

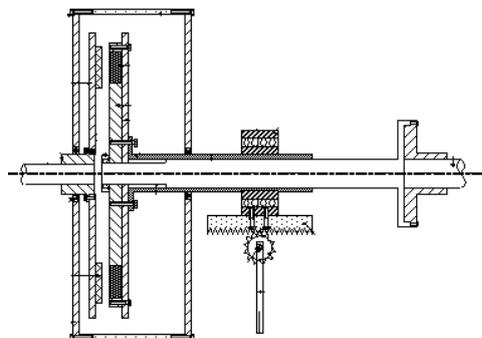
东北大学成果汇编(2014)

涡流驱动器	4
热连轧过程自动化计算机控制系统的开发.....	5
超快冷技术在热连轧中的应用.....	8
酸洗冷连轧机组三电控制系统自主集成与创新.....	10
Hartmann 管式粉尘爆炸试验仪(型号 : NU-D-H- I).....	12
20 升球形爆炸测试装置(型号 : NU-D-P20).....	13
粉尘最低着火温度测试装置.....	15
可燃气体/蒸气爆炸极限测试装置(型号 : NU-PG-LEL)	16
1 立方米爆炸测试系统(型号 : NU-PD-1000).....	17
三相四线制逆变器.....	18
以白云石和菱镁石为原料新法炼镁副产氧化铝复合材料技术.....	19
新型阴极结构铝电解槽技术.....	20
洁净特殊钢高效冶炼工艺技术及冶金辅助材料.....	21
能源消耗信息采集与管理信息系统.....	22
发热直上渣洗料	24
冶金渣余热回收及碳资源协同减排制取合成气联合系统.....	26
烟道式余热锅炉结构参数优化及设计软件开发.....	28
工业热设备三维设计软件开发.....	30
除尘产品开发	32
防雨窗纱	33
极贫磁铁矿超细碎干式预选技术.....	34
超级铁精矿制备技术.....	35
太阳能晶体硅切割废料的综合利用.....	35
直接还原法处理钒钛磁铁矿以及含钒生铁脱碳保钒生产钒钢.....	36
亚微米陶瓷颗粒增强金属基复合材料低成本制备技术.....	37
耐磨耐蚀金属陶瓷复合材料及连接技术.....	38
铸造高强度双相钢履带板.....	39
高质量镁合金锭坯、型材和板材生产技术.....	41
冷轧机板形控制系统核心技术自主研发与工业应用.....	42
航空铝合金大尺寸板坯的制备.....	43
多晶铁磁形状记忆合金的相变特征与功能特性.....	43
现代轧制技术、装备和产品研发创新平台.....	44
基于超快速冷却的新一代 TMCP 装备及工艺.....	45
镁合金电磁连铸技术.....	45
高硅钢薄带织构控制与高效率制备技术.....	46
高性能纳米陶瓷刀具材料.....	46
贵金属纳米孔海绵材料绿色化制备、线性自组装行为及性能研究.....	47
碳化硅及其复合材料的无压烧结制备技术.....	48
多孔碳化硅陶瓷的制备技术.....	48
碳化硼陶瓷及其复合材料的低成本制备技术.....	49
三维网络陶瓷/金属新型刹车材料的制备技术.....	49

超高强度超高韧性钢的研发.....	50
超细晶粒双相钢材料及其制备.....	51
新型磁性纳米材料的研发.....	51
具有形变诱导增塑效应的高强度—高塑性钢的开发.....	52
泡沫铝夹心结构材料的研究及应用.....	53
金属剪切/振动熔体处理及低碳短流程加工技术.....	55
大规格、高质量镁合金锭坯制备技术.....	56
金属材料的表面纳米化和电磁处理.....	57
强磁场材料科学的基础研究.....	57
复吹转炉高效脱磷技术.....	58
洁净钢冶炼工艺理论与应用.....	58
连铸机凝固末端动态轻压下技术.....	59
大方坯连铸关键工艺与装备技术国产化.....	59
转炉连铸大方坯生产高质量特殊钢工艺技术研究.....	60
转炉流程生产高品质齿轮钢.....	61
高效连铸结晶器冶金学理论与技术.....	61
节镍型不锈钢冶金理论与应用.....	62
大断面电渣连铸技术.....	62
利用电磁感应加热的新型钢包出钢技术.....	63
冶金二次资源综合利用新技术.....	64
炼钢中试设备和成套中试生产线的研制.....	64
金属的分离提取与净化.....	65
大型铝电解连续稳定运行工艺技术及装备开发.....	66
高效节能新型阴极结构电解槽铝电解理论与技术.....	67
高锂盐低温铝电解成套技术.....	68
利用钛白废酸无焙烧直接加压酸浸提钒短流程新工艺.....	68
利用非传统铝资源双循环法氧化铝清洁生产新工艺.....	68
低碳低能耗低排放新法炼镁技术研究.....	69
铝电解槽余热回收利用技术.....	69
电解铝固体废弃物无害化处理与综合利用技术.....	70
自蔓延冶金法制备超细粉体清洁生产技术.....	71
自蔓延熔铸法制备低氧中间合金的短流程工艺.....	71
基于碳酸钙粉体制备的高碱含钙废水吸收 CO ₂ 新技术及设备.....	72
钙化-碳化法处理拜耳法赤泥新技术.....	73
钙化-碳化法处理中低品位铝土矿新技术.....	74
新型反应器设计与模拟.....	74
基于机械搅拌作用下喷气原位脱硫新技术.....	75
红土矿提取镍钴新技.....	76
有色冶金废渣处理及综合利用技术.....	76
“非并网风电”应用于铝电解技术.....	77
泡沫/多孔金属产品及其制备技术.....	78
铝电解槽电极涂层技术.....	79
微波技术合成碳化硅和碳化钛粉体材料.....	80
高耐蚀性 Zn-Al-Mg-Si-RE 合金镀层.....	80

从含铜镍废塑料镀层中回收有价金属的研究.....	81
贵金属冶金与材料关键工艺与装备技术.....	81
生物冶金关键技术.....	82
清洁、高效综合利用红土镍矿中有价组元的新工艺、新技术.....	82
清洁、高效提取粉煤灰中氧化铝的新工艺、新技术.....	83
新型冶金成分传感器的研制开发.....	83
含砷金精矿生物氧化液综合回收利用的技术.....	84
熔盐电化学技术制备金属、合金以及功能材料.....	84

涡流驱动器



涡流驱动器既可以作为联轴器使用，也可以作为调速器使用。在作为调速器使用时，执行器调节两个转体之间空气间隙的大小，通过负载转矩的调节实现负载输出速度的控制，电动机输出到涡流驱动器的转矩和涡流驱动器输出到负载的转矩相等。根据负载实际运行过程中转矩的大小调整电动机输出端。

涡流驱动器具有以下几大优势：

- 1) 高效节能，绿色环保。采用涡流驱动器技术，可以通过调节气隙实现流量和压力的连续控制在电机转速不变的情况下，调节被拖动设备的转速。
- 2) 空载启动。涡流驱动器可以通过调整气隙，让电机空载启动，当电机达到额定转速后，调节气隙，使负载稳定逐步加速到所需转速。改变了以往利用电力电子设备在软启动的同时污染电网。涡流驱动器可以大大降低启动过程中的电流冲击、电机线圈发热、流量急剧变化等问题造成的影响。
- 3) 容忍对中误差。涡流驱动器因采用非接触式连接，因而，在不影响工作精度的同时，对电机和负载设备连接精度要求大大降低。
- 4) 显著减少系统震动和噪音。涡流驱动器除安装精度要求不高外，还大大降低了硬机械连接所造成的机械振动和噪音。实践证明，这种连接方式，可降低振动 80%左右。
- 5) 对电网无谐波污染。涡流驱动器不会对其它与之相连的设备产生谐波。涡流驱动器是一个机械电磁一体化装置，它对周围系统的功效均没有影响。
- 6) 具有过载保护功能。
- 7) 结构简单、安全可靠、降低设备的维修率和维修费用。
- 8) 应用范围广、适应环境能力强。
- 9) 体积小，安装方便、易于改造。

- 10) 过程控制精度高。
- 11) 系统寿命长。

热连轧过程自动化计算机控制系统的开发

1 项目简介

东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室在充分了解热连轧带钢生产工艺、设备和技术条件的基础上，开发了热连轧过程自动化计算机控制系统，包括完善的带钢数据跟踪功能，模型设定计算和自学习功能，以及数据库报表功能；从轧制规程、速度制度、温度制度等方面，综合考虑现场条件，实现对热轧带钢产品外形质量和组织性能质量的全面设定和控制。典型热连轧机组如图 1 所示。

2 系统功能

带钢数据跟踪功能包括从加热炉直至卷取区的带钢全长的跟踪，利用数据共享的方式保证轧线全长多块带钢同时轧制的模型设定数据的准确性，保证了多品种多规格切换时数据流的准确性，为模型计算提供了良好条件。图 2 为轧件跟踪示意图。

模型计算功能包括以粗轧设定模型、精轧设定模型、板形设定和控制模型、终轧温度控制模型、卷取温度控制模型为核心的一套热连轧带钢过程控制数学模型。并开发了基于稳态误差的模型自学习优化算法，基于 N-M 单纯形法则的自学习优化算法等对设定模型进行优化，大大提高了模型的计算精度。并为新产品提供了预留接口和空间，既保证设定和控制精度，又提高了模型的可用性。

数据库系统保存带钢轧制过程中的各项模型设定参数和实测数据，为每块带钢建立完善身份信息，便于产品质量查询和数据分析，并可以从大量数据中提取有效信息，进一步提高模型的计算精度。图 3 为钢卷数据报表示意图。

完善的过程控制系统能够大大减少操作人员的工作量，大幅提高带钢头部的控制精度，为带钢全长的质量控制提供了参数基准，提高了带钢成材率。

3 应用效果

此热连轧过程自动化计算机控制系统已成功应用于思文科德热连轧生产线，国丰热轧厂热连轧生产线，广东揭阳热连轧生产线等。

基于此热连轧过程控制计算机控制系统，带钢头部的厚度控制精度控制效果达到 35 μm (3.00mm 规格)，40 μm (3.00-8.00mm 规格)，大大提高了带钢的质量和精度。图 4 为轧制过程中的厚度控制精度曲线。

过程控制系统运行稳定，便于维护和二次开发，获得了良好的应用效果。



图 1 典型热连轧机精轧组

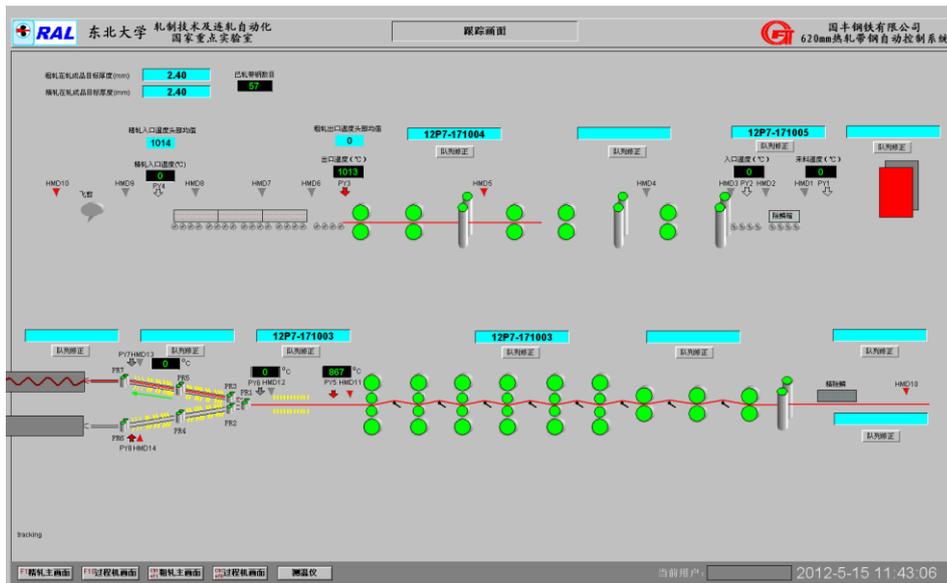


图 2 轧件跟踪示意图

RAL		钢卷数据报表					G		
板坯号	12p7-5077005	开始时间	2012-10-21 12:15:33	轧制时间	302				
钢卷号	12p7-5077005	结束时间	2012-10-21 12:20:35	班次	乙				
FDI数据									
钢种	板坯长度[mm]	板坯宽度[mm]	板坯厚度[mm]	板坯重量[kg]					
Gr08	6,000.00	350.00	150.00	2,000.00					
加热炉号	粗轧出口目标厚度[mm]	粗轧出口目标宽度[mm]	精轧出口目标厚度[mm]	精轧出口目标宽度[mm]					
1	35.00	355.00	1.90	355.00					
加热炉出口目标温度[℃]	粗轧出口目标温度[℃]	精轧入口目标温度[℃]	精轧出口目标温度[℃]	超快冷出口目标温度[℃]					
1,160.00	1,050.00	950.00	890.00	600.00					
碳含量[%]	硅含量[%]	磷含量[%]	硫含量[%]	铜含量[%]					
0.070	0.110	0.021	0.032	0.011					
铬含量[%]	锰含量[%]	镍含量[%]	钨含量[%]	钒含量[%]					
0.040	0.330	0.015	0.000	0.000					
钛含量[%]	0.000								
实测数据									
卷取机号	粗轧出口宽度[mm]	精轧出口厚度[mm]	精轧出口宽度[mm]	加热炉出口温度[℃]					
2	359.64	1.92	360.38	0.00					
粗轧入口温度[℃]	粗轧出口温度[℃]	精轧入口温度[℃]	精轧出口温度[℃]	超快冷出口温度[℃]					
1,092.67	1,091.32	1,082.93	889.65	0.00					
粗轧设定/实测数据									
序号	出口宽度 [mm]	出口厚度 [mm]	开口度 [mm]	辊缝 [mm]	轧制力 [kN]	电机转速 [r/min]	穿带速度 [m/s]	出口温度 [℃]	轧制电流 [A]
E1	347.43	0.00	346.49	0.00	415.83	21.30	0.41	1,147.40	32.28
	347.43	0.00	346.49	0.00	415.83	0.00	0.41	0.00	91.64
R1	0.00	102.20	0.00	101.17	3,154.25	500.98	0.56	1,141.88	500.98
	0.00	102.20	0.00	101.17	3,154.25	0.00	0.56	0.00	814.44
E2	350.57	0.00	348.21	0.00	348.57	26.41	0.60	1,134.76	40.02
	350.57	0.00	348.21	0.00	348.57	0.00	0.60	0.00	177.87
R2	0.00	70.18	0.00	69.06	2,973.56	561.40	0.80	1,128.90	561.40
	0.00	70.18	0.00	69.06	2,973.56	0.00	0.80	0.00	903.09
R3	0.00	47.01	0.00	45.54	3,146.21	782.23	1.20	1,115.73	782.23
	0.00	47.01	0.00	45.54	3,146.21	0.00	1.20	0.00	1,134.67
E3	355.72	0.00	352.64	0.00	287.90	45.49	1.31	1,109.06	68.93
	0.00	0.00	352.64	0.00	287.90	0.00	1.31	0.00	375.06
R4	0.00	47.01	0.00	47.31	0.00	0.00	1.27	1,104.42	0.00
	0.00	47.01	0.00	47.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
R5	0.00	35.00	0.00	34.11	2,340.38	649.76	1.65	1,091.57	649.76
	0.00	35.00	0.00	34.11	2,340.38	0.00	1.65	0.00	847.36

图 3 钢卷数据报表示意图

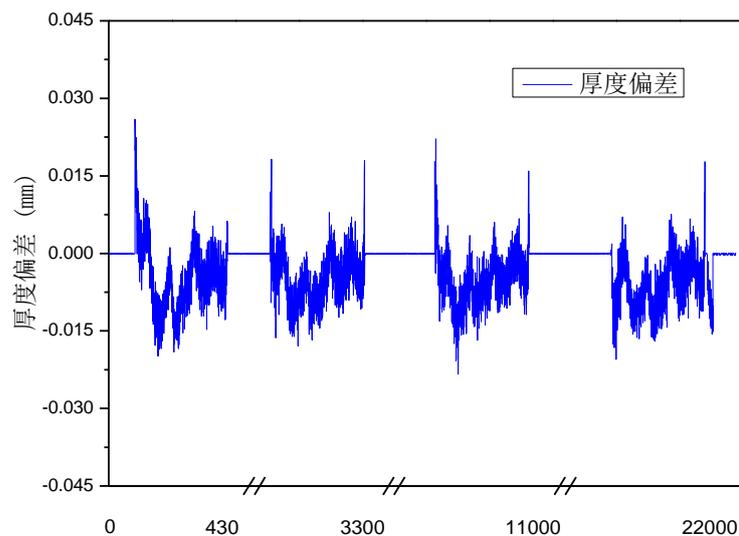


图 4 厚度控制精度示意图

超快冷技术在热连轧中的应用

1 项目简介

超快速冷却（Ultra Fast Cooling），简称 UFC，是近年来国际上发展起来的一项用于控制带钢冷却的新技术。配合其它一些先进钢铁材料的轧制新技术，如铁素体区轧制双相钢、相变诱导塑性钢的轧制以及薄板坯连铸连轧等，在轧制生产过程中可以实现快速、准确的温度控制以获得相应的相变组织。超快冷装置布置如图 1 所示。

唐山国丰热连轧生产线采用立式卷取的方式，带钢在精轧机后运输辊道上为立式前进，为达到快冷效果，开发出两段式超快冷装置配合控制冷却的需要，前段超快冷为典型布置为上下对称式结构，后段超快冷为立式对称布置，有效地解决了立式带钢快速冷却的需要。生产过程中的超快冷使用情况如图 2 所示。

2 超快速冷却的优点

通过进一步提高冷却效率，利用高压水流的高冲击力，有效地大面积击破汽膜。在单位时间内有更多的新水直接作用于钢板表面，大幅度提高换热效率，实现超快速冷却。

1) 提高带钢的表面质量，减少了带钢表面的氧化铁皮，提高了产品的表面质量；

2) 通过控制超快速冷却中的水量，进一步控制冷却速度，实现了轧后冷却路径的精确控制，精确控制钢铁材料的复杂相变过程，为获得多样化的相变组织和材料性能提供手段。

3) 可以利用不含合金或减少合金的简单成分体系获得高性能的材料，实现热轧带钢的减量化和集约化生产。

3 现场使用效果

唐山国丰热连轧生产线已采用两段式超快冷装置生产低成本热轧钢板，从现场跟踪情况来看，冲压工艺稳定，表面质量正常，没有出现开裂及其它异常现象，表明采用超快冷工艺生产的完全满足用户的使用要求。表 1 给出了不同厚度规格下的超快冷最大的冷区能力。

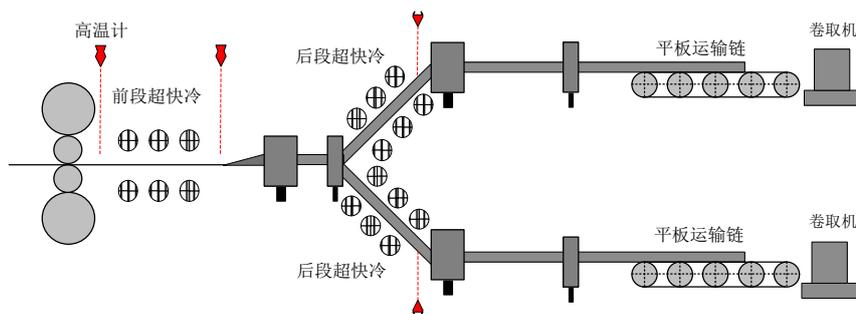


图 1 超快冷布置示意图

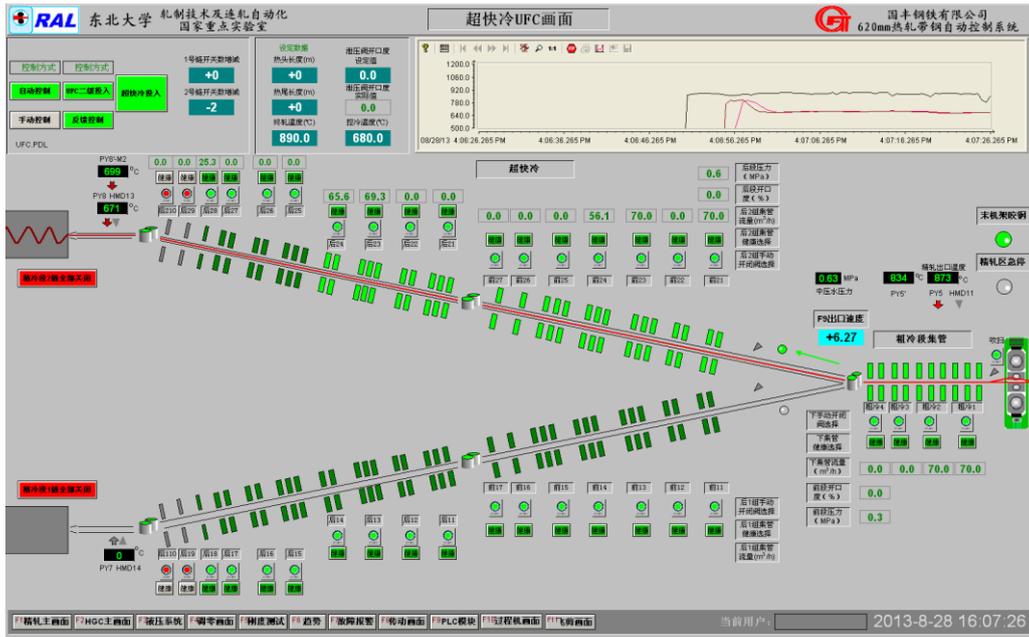


图 2 轧制过程中的超快冷

表 1 超快冷冷却能力

厚度(mm)	终轧温度(°C)	最大冷却能力
4.0-5.0	880	250
3.0-4.0	880	260
2.0-3.0	880	280

酸洗冷连轧机组三电控制系统自主集成与创新

迁安市思文科德薄板科技有限公司 80 万吨精品冷轧项目为河北省重点项目，而酸洗冷连轧机组又是该项目的重中之重。该机组产品主要为电镀锡产品和冷轧产品，整体设计具有国际先进水平。采用浅槽紊流式酸洗，五机架全六辊 UCM 轧机，卡鲁塞尔卷取机，最大轧制速度为 1350m/min，成品带钢厚度为 0.18-1.8mm、宽度为 750-1300mm 的镀锡基板。轧线主传动采用 TMEIC 交直交传动，使用西门子 TDC 系统、HP 服务器及 IBA 数据采集系统，配置比利时 IRM 测厚仪、TSI 激光测速仪、ABB 板形仪等高端仪表。

在该项目实施过程中，采用了具有 RAL 自主知识产权的一系列冷轧控制创新技术，申请了多项发明专利和软件著作权。1450mm 酸轧联机具有的主要控制功能包括：冷连轧物料跟踪与线协调控制、高精度厚度控制、机架间张力控制、动态变规格、冷连轧板形控制、酸洗和冷连轧设定计算模型、自学习与自适应控制和离线仿真测试等功能。是国内第一条完全靠自己力量开发两级全线控制系统应用软件、并进行自主调试的大型高端精品酸连联机。

RAL 从 1999 年开始进入板带冷轧控制领域，曾经先后与日本三菱公司合作开发了益昌薄板的 1220mm 五机架四辊冷轧机过程控制系统，与 VAI 合作开发唐钢冷轧厂 1800mm 五机架冷连轧机全线自动化系统，与 SIEMENS 合作完成了鞍钢福建莆田 1450mm 冷轧机全线自动化系统应用软件，其中与鞍钢合作完成的“冷轧板形控制核心技术自主研发与工业应用”项目 2011 年获国家科技进步二等奖。

本项目的成功，标志着 RAL 已经完全具备了自主完成大型酸轧联机三电系统综合自动化工程项目的的能力，实现了在板带冷连轧自动控制领域的跨越式发展！该项目的实施有力推动了大型高端酸洗冷连轧机组的自主创新和国产化进程，使我国拥有了酸洗冷连轧自动控制系统的自主知识产权，将大大增强我国在轧制控制系统方面的核心竞争力。



图 1 五机架连轧机



图 2 第一卷冷轧带钢下线

Hartmann 管式粉尘爆炸试验仪(型号：NU-D-H- I)

产品性能：Hartmann 管是国际上广泛采用的粉尘爆炸测试系统本体，和辅助系统配合可用于测试粉尘的爆炸下限，最小点火能，燃烧级别等。东北大学工业爆炸及防护研究所开发的改进 Hartmann 管式粉尘爆炸演示仪管体采用不锈钢制造，点火采用电热丝，粉尘通过伞形喷头均匀分散在管体内，着火后发生粉尘爆炸，通过配置泄爆口、观察窗可以产生适度的声光效果，以便学生实验时对火灾、爆炸危害产生最直观的感受，获得较好的实习效果。点火温度可以调节，适用粉尘范围宽（如棉、麻、粮食、煤粉、化纤、金属等）。系统关键部件采用进口件，可靠度可达 95% 以上。配置进口压力传感器，提供 0~5v 的标准压力信号输出，可供记录和显示。



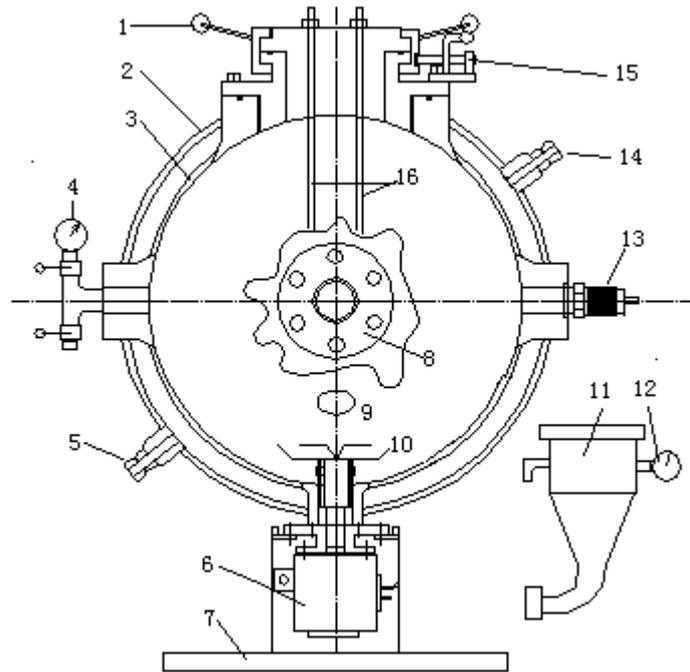
粉尘爆炸事故的预防和防护是安全工程专业学生需要学习和掌握的重要内容之一。单纯的书本和理论教学对于建立学生的专业理念、培养学生的实际动手能力是不够的。Hartmann 管式粉尘爆炸演示仪作为真实粉尘爆炸的教学演示实验，可以弥补理论教学的不足，提高学生的培养水平。本装置操作难度合适，实验成本低（每次约 0.2 元），适合本科生教学及实验。

本专利产品已成功应用于东北大学、沈阳化工学院，沈阳航空工业学院、西南科技大学、西安建筑科技大学、上海应用技术学院、湖南科技大学、湖北黄石理工学院、沈阳化工大学。

20 升球形爆炸测试装置(型号：NU-D-P20)

产品性能：20 升球形爆炸实验装置是国际标准 ISO6184/4 和德国标准 VDI2263 推荐的用于测试粉尘最大爆炸压力、最大爆炸压力上升速率的标准设备；同时也可用于测试粉尘爆炸极限（一般指爆炸下限）和极限氧浓度参数。测试装置本体为双层不锈钢球形结构，内容积约 20 升，原理如下图所示，系统配备喷粉系统、点火系统、压力采集系统和程序控制系统。该装置主要用于完成粉尘的爆炸性测试，也可用于测试准静态可燃气体的爆炸过程。

依据标准：ISO6184-1；GB/T16426

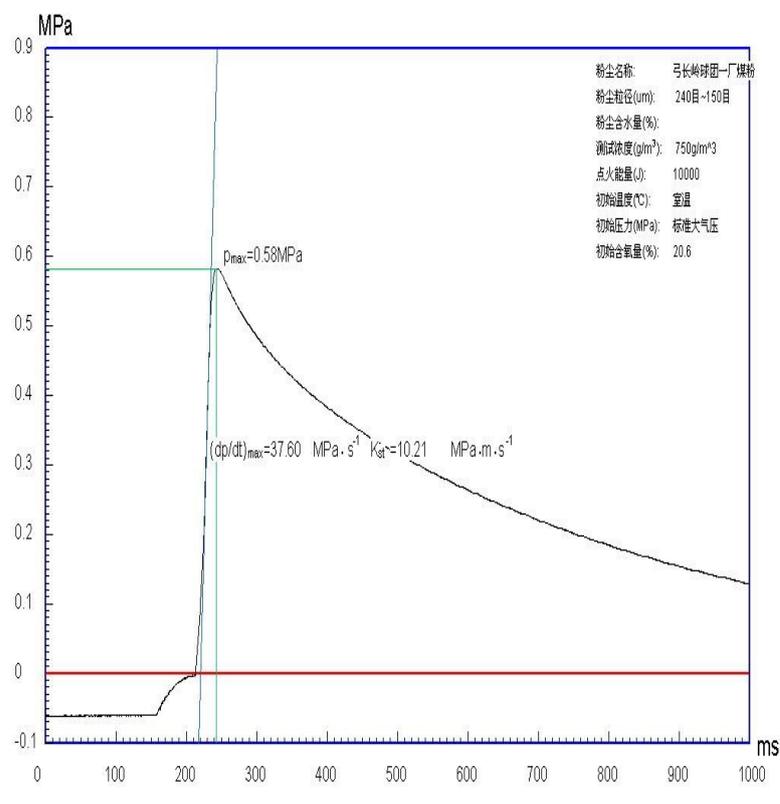


1 操作手柄 2 夹套外层 3 夹套内层 4 真空表 5 循环水入口 6 机械两相阀（进口） 7 底座 8 观察口 9 抽真空口 10 分散阀 11 高压储粉罐 12 电接点空气压力表 13 压力传感器（进口） 14 循环水出口 15 安全机构（进口）

Hartmann 管式粉尘爆炸演示仪主要用于粉尘爆炸的教学演示实验，由于其容积太小（约 1.3 升），“壁面”效应对爆炸的影响太大，所以人们在定量研究粉尘的爆炸特性时一般选用 20 升球形爆炸实验装置或 1m³ 爆炸实验装置。测试结果可直接应用于工业安全设计或防爆改造设计。实验成本较高，主要用于研究生教

学和科学研究，属于安全专业的大型基础设施。

应用情况：已成功应用于鞍山钢铁公司、中国矿业大学、南京理工大学、南京工业大学、中国武装警察部队学院、四川大学、昆明理工大学、南京安全科学研究院、上海应用技术学院、中国安全生产科学研究院、青岛安全工程研究院等。



粉尘最低着火温度测试装置

产品性能：粉尘最低着火温度测试装置包括粉尘云最低着火温度测试装置(型号：NU-TC700)和粉尘层最低着火温度测试装置(型号：NU-TL400，各装置主要组成为：

粉尘云最低着火温度测试装置：Godbert-Greenwald 炉，精密温控数显仪（提供 4~20mA 标准信号输出），粉尘分散系统等；

粉尘层最低着火温度测试装置：不锈钢恒温热板，精密温控数显仪（提供 4~20mA 标准信号输出），粉尘盛装环、计算机数据采集系统等；

以上两装置联合可用于测试粉尘处于云状和层状时的最低着火温度。

依据标准：IEC1241-2-1；GB 12476.8

粉尘最低着火温度是反应粉尘着火敏感性的重要参数，两者中的较低者是防爆设计时选用防爆电气温度组别的实验依据。因此该装置是从事防火、防爆安全评价和粉尘爆炸研究的必备设施。



粉尘层最低着火温度测试装置



粉尘云最低着火温度测试装置

可燃气体/蒸气爆炸极限测试装置(型号：NU-PG-LEL)

产品性能：可燃气体/蒸气爆炸极限测试装置可用于测试气态物质的爆炸上限、下限，最大爆炸压力，爆炸压力上升速率等参数。为了扩大研究范围，设备可以调整初始温度（最高至 120℃）和初始压力（最高至 0.1MPa, g）。点火采用高压电火花方式，点火时间可以自由调节。爆炸压力由计算机自动采集、处理。系统采用压力法配气，简便、准确、可靠。

依据标准：DIN EN 1839(欧州标准)

该装置是安全工程专业防火、防爆课程实验教学的基础设施。同时也是防火、防爆、安全评价等安全相关研究的必备实验设备。



实验测试系统



控制和数据采集系统

1 立方米爆炸测试系统(型号：NU-PD-1000)

1 立方米爆炸测试系统是工业量级的气体/粉尘爆炸测试系统，一般来说，在 20 升球形爆炸测试系统上获得的实验数据在应用于工业现场之前，需在 1 立方米爆炸测试系统上进行放大认证实验。系统包括 1m³ 抗爆罐，真空配气系统，点火系统，数据采集与处理系统，程序操作自动化系统。

依据标准：ISO6184-1



1 立方米爆炸测试装置

三相四线制逆变器

三相四桥臂光伏逆变器是将太阳能发电产生的直流电转换成频率和幅值可调节的交流电。采用高性能微处理器和大规模集成电路，结合智能解耦控制，提高供电质量。具有独立的输出电压幅相控制，快速的模拟逻辑控制技术，高精度功率输出，完备的保护功能和故障隔离功能，高转换效率和小谐波畸变率，多功能输出电能计量和电力参数监测，适用于平衡和不平衡等多种负载类型，及并网需求。

主要特点：快速的并网和离网切换

快速的模拟逻辑控制技术

完备的保护和故障隔离功能

完美的电能质量管理与控制

高效率的电能转换

高精度功率控制和并联控制

独立的输出电压幅相控制

多种类型负载一体化控制

应用范围：主要应用于太阳能发电、风力发电等新能源领域，也可广泛应用于电力变换和电力传动等领域。



以白云石和菱镁石为原料新法炼镁副产氧化铝复合材料技术

近年来，世界金属镁的应用量以每年 20% 以上的速度增长，镁的应用范围越来越广泛，其市场前景广阔。

目前世界上 85% 以上，我国 95% 以上的金属镁是采用皮江法生产的，皮江法炼镁技术是以白云石为原料以硅铁合金为还原剂的一种真空热还原炼镁技术，该技术每生产一吨金属镁要消耗约 6 吨标准煤，1.1 吨硅铁合金，其生产成本较高。新法炼镁技术是由东北大学发明的一种新法铝热还原炼镁技术，该技术是以白云石和菱镁石或镁化白云石为原料，以废铝制成的铝粉为还原剂真空铝热还原炼镁同时副产特种氢氧化铝或氧化铝复合材料的新法炼镁技术，该技术具有能耗和物料消耗少，生产效率高，成本低，温室气体和固体废渣排放量小（或废渣零排放）等优点，同现行的皮江法炼镁技术相比，能耗较皮江法降低 40% 以上，生产效率提高 80% 以上，温室气体和废渣排放量降低 60% 以上或废渣零排放，金属镁的生产成本大幅度降低，该技术的技术经济指标达到国内外领先水平。

新法炼镁技术主要包括以白云石和菱镁石混合矿物（其中白云石占 30%，菱镁石占 70%）或镁化白云石为原料真空热还原炼镁同时利用炼镁还原渣生产特种氢氧化铝或其它铝酸钙材料的技术和以菱镁石为原料真空热还原炼镁同时副产铝镁基复合材料的技术，新法炼镁技术对所使用的白云石和菱镁石的纯度要求不

高，可使低品位菱镁石和镁化白云石得到很好的利用，这两种技术均是在生产金属镁的同时副产高附加值的化工材料，不仅使炼镁还原渣得到了合理利用，减少了废渣排放，同时大大降低了金属镁的生产成本和炼镁能耗，是一种节能环保的新法炼镁技术，符合国家节能减排的发展方向。

新型阴极结构铝电解槽技术

新型阴极结构铝电解节能技术可使槽内阴极铝液流速场被分隔，流速大大降低，削弱了其对重力波的强化，减小了铝液波动的波幅，可降低极距实现槽电压降低。从而解决了铝电解长期以来因铝液波动而无法降低极距、降低槽电压以及降低铝电解电能消耗的技术瓶颈。个别铝厂系列电解槽使用这种技术后，实现了系列直流电耗达到 12100kWh/t-Al。有的铝厂单台电解槽直流电耗达到 11900kWh/t-Al，新型阴极结构电解槽为名副其实的国际领先水平。2011 年初国际 TMS 年会上获得了 TMS 轻金属领域科学技术奖。国外最大的铝业公司之一 Hydro 铝业公司，在经过了 1 年多对 5 台新型阴极结构试验电解槽的考验后，证实有非常大的节能潜力，决定购买此技术，在其所属的电解铝厂使用该技术。

新型阴极结构电解槽的配套技术包括：新型阴极结构铝电解槽的热场分析、电场、磁场计算，电磁流体动力学分析及阴极铝液面波动仿真软件技术，铝电解槽火焰-铝液焙烧技术，铝电解槽的内衬结构优化技术，铝电解内衬保护防止铝电解槽早期破损的技术，新型阴极结构电解槽的强化电流技术，以及新型阴极结构电解槽的工艺技术条件优化技术。

新型阴极结构电解槽最初在重庆天泰铝业电解槽上试验成功并在华东铝业全系列电解槽上成功使用之后，已在国内诸多电解铝厂推广使用，并取得了显著

的节电效果。

本项目提供多种新型阴极结构型式，电流强度为 160kA~500kA 新型阴极结构电解槽建设方案。并为这三种建设方案提供：1) 阴极结构设计；2) 槽内衬结构设计；3) 电解槽焙烧启动方案设计；4) 电解槽防早期渗铝、早期破损技术方案设计；5) 电解槽工艺与操作技术方案设计；6) 电解槽电流强化技术方案设计。依电解铝厂技术基础条件不同，使新型阴极结构电解槽直流电耗达到 12000~12500kWh/t-Al，电流效率大于 95%的技术经济指标。

洁净特殊钢高效冶炼工艺技术及冶金辅助材料

洁净特殊钢冶炼及品种开发是当今钢铁冶金学科的最前沿的热点研究方向之一。其意义在于高洁净度特殊钢的性能提高使得相同条件下钢材的使用量减小寿命延长，从而可大幅度地减少资源（矿物和能源）的消耗并减轻对环境的污染；同时，低成本大批量生产高质量钢材是钢铁企业提高产品市场竞争力的根本所在。

关键技术

(1) 转炉或电炉流程洁净特殊钢冶炼成套工艺技术及品种开发

该技术解决了转炉终点和电弧炉大用氧条件下终点碳和氧含量的控制问题；针对 LF-VD 精炼时间长，与连铸匹配困难等问题，通过调整精炼渣系，改进脱氧工艺、造渣工艺、加料制度、吹氩制度等，实现了快速精炼，并提高了钢水洁净度。在连铸过程中采用调整结晶器电磁搅拌参数、水口插入深度、优化中间包流场、开发与钢种相适应的二冷控制技术，解决了合金钢洁净度控制、多炉连浇、铸坯偏析、夹渣、裂纹等一系列关键技术问题。形成了电炉流程、转炉流程洁净钢高效冶炼系统工艺理论及应用技术。

(2) 洁净钢用冶金辅助材料

通过对洁净钢冶炼用辅助材料进行理论与实验研究，并结合冶炼设备、工艺

和钢种特点，开发了一系列洁净钢用辅助材料。包括：渣洗料（冲洗渣）、转炉出钢钢包渣改质剂、脱硫剂，LF 炉高效合成渣、预熔渣、发泡剂、脱氧剂，RH 脱硫剂，CAS-OB 脱硫剂，低碳低硅钢精炼渣系等。

成果推广应用情况

已在宝钢、本钢、抚钢、攀钢等 30 余家钢铁企业应用。

达到的技术经济指标

转炉流程：轴承钢平均 T.O=5.91ppm，80% 以上炉次 T.O 小于 7 ppm；管线钢[S]min=3ppm，取向硅钢 RH 脱硫后[S]≤20ppm,轴承钢平均 T.O=7ppm。

电炉流程：LF 炉冶炼周期可控制在 45~62 min，电炉-LF 电耗降低 80kWh/t。轴承钢最低氧含量达到 5×10^{-6} ，齿轮钢 8620RH 淬透性带波动范围控制在 4HRC 以下。

能源消耗信息采集与管理系统

项目成果简介：

能源消耗信息采集与管理系统是一个基于开放式网络、关系数据库和管理信息系统应用软件的分布式信息处理系统。系统以能耗数据采集为核心，将有线和无线传输技术相结合，通过 TCP/IP、RS485 有线传输方式、ZigBee 等无线传输方式将数据上传给管理数据库，实现能量产生与消耗参数的在线监测、统计分析、设备状态及故障诊断等功能。通过人工智能技术对具体能耗情况进行综合分析和应用，为进一步开展节能措施提供数据、标准的依据。

系统结构与主要功能：

能源消耗信息采集与管理系统能够对建筑物的能量产生与消耗情况进行在线检测、数据传输、智能处理与有效存储，通过智能分析处理技术对设备系统的能耗数据进行处理与智能分析，从而发现建筑各用能环节中存在的问题和节能潜力，从而为建筑节能改造提供科学的依据，以提高能源利用率。



系统工作原理

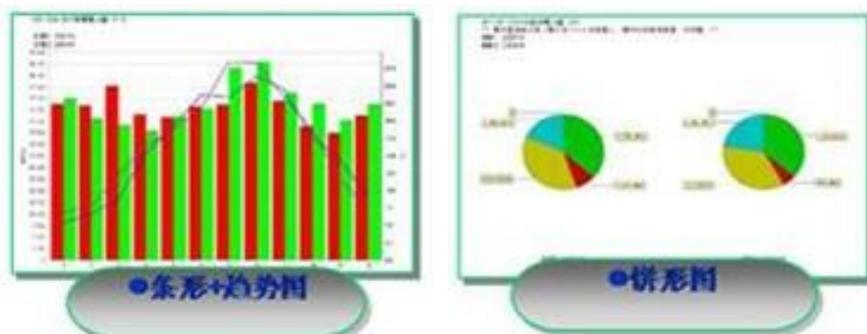
采集器通过 RS485 有线传输或 ZigBee 无线传输方式从检测仪表中采集风力发电、太阳能发电等能源产生数据以及照明、空调用电等能耗数据，通过局域网将数据上传到前置机中，最后上传存储到数据库服务器中。通过能源消耗信息采集与管理系统软件可以实时监控建筑物中各种能源的消耗，对建筑内的用电量进行全面、实时的监测和记录及分析，掌握负荷的变化情况，从而发现建筑中各用能环节中存在的问题和节能潜力，为建筑节能改造提供科学的依据。

系统应用

实现建筑物（群）、工业设备能耗监控与报警自动化；实现能耗量化分析，精确管理；实现能耗、能效标准化管理，形成具有推广性的标准；实现能耗管理流程化；实现能耗波动跟踪，实现能耗准确预估；为决策提供辅助支持与建议。



系统监控界面



发热直上渣洗料

从 1933 年 Perrim 提出合成渣洗以来，渣洗由于钢渣混冲过程动力学条件好，钢渣反应界面面积大，具有较好的脱氧、脱硫能力，渣洗技术沿用至今已有 70 年多年的历史。近年来，由于精炼效果更好的 LF、CAS-OB、RH 等技术的快速发展，渣洗精炼技术逐渐被取代。但由于这些精炼技术的处理成本较高，随着市场竞争的日趋激烈，各钢铁企业始终在寻求精炼效果好、处理成本低的精炼技术。

东北大学对炉渣冶金技术已有多年的研究开发历史，在基于上述背景的基础上，将出钢渣洗精炼与吹氩搅拌精炼技术相结合，开发了出钢渣洗—吹氩直上连铸技术。

与传统渣洗技术相比，该技术具有如下优势：

(1) 熔点低、成渣速度快、流动性好

该产品采用电熔法生产工艺，渣系成分均匀，熔点低，成渣速度快，在出钢过程随钢流加入钢中，钢渣混冲过程即可充分熔化，可满足炉后快速成渣要求。

(2) 脱氧、脱硫效果好

该产品渣中含有脱氧剂，可实现对初炼炉下渣进行改质，强化沉淀脱氧的效果，减少沉淀脱氧时钢中铝的加入量。同时，高碱度的渣洗料中含有强脱硫组元，可实现渣洗脱硫。

(3) 夹杂物吸附能力强，水口不结瘤，可保证多炉连浇

该产品采用电熔法生产，高温 (>10000℃) 电弧下使生产过程渣中组元反应后形成钙、镁组元具备一定的夹杂物变性能力；同时，渣中生成与 Al₂O₃ 夹杂物界面张力小的渣系组元，具有超强的夹杂物吸附能力，从而取代钙处理工艺，无需 LF 精炼，渣洗后吹氩直上，水口不结瘤，可实现多炉连浇。

(4) 温降小

该产品渣中含有发热剂，反应过程放热，减少出钢渣洗及吹氩过程温降，保证连铸上钢温度。

(5) 无氟、不粘包、耐材寿命长

该产品渣中不含 CaF₂，不侵蚀耐材耐火材料。同时，渣洗流动性好，不粘钢包，避免因钢包粘渣造成超重提前下线问题。钢包承钢时间短，无需小修渣线，钢包寿命显著提高。

(6) 成本低

渣洗精炼—吹氩搅拌直上连铸，不走 LF 精炼，吨钢节约成本至少 20 元/t 钢。同时，Al 脱氧钢节约用铝量，不用钙处理。耐材消耗小，钢包寿命显著提高，综合成本明显降低。

预熔渣产品及性能

系列	CaO	Al ₂ O ₃	Al	MgO	SiO ₂	H ₂ O
发热渣洗料	40-55	25-42	5-25	<10	<8	<0.5
预熔渣洗料	40-55	25-42	5-25	<10	<8	<0.5

产品适用范围

本系列产品广泛适用于铝镇静钢。

产品使用方法及加入量

(1) 在初炼炉出钢过程中随钢流加入钢包，根据改质、脱硫等要求不同，确定其合适加入量，参考加入量 3~8kg/t 钢。

(2) 加入后炉后软吹氩 8min 以上，然后直接吊包，供钢给连铸机。

冶金渣余热回收及碳资源协同减排制取合成气联合系统

项目简介：

该项目基于冶金过程余热“能级对口，梯级利用”原理，针对冶金熔渣与烟气 CO₂ 资源回收利用困难、能耗高等问题，构建了熔态渣气化-干法粒化-颗粒渣气化-余热锅炉的梯级余热回收系统，利用高温熔渣(温度高于 1300℃)进行煤和富 CO₂ 烟气熔融气化制取合成气，然后利用高速旋转的转杯将熔渣粒化，粒化后的渣粒作为煤和富 CO₂ 烟气二次气化的热载体(渣粒温度介于 800~1200℃之间)，最后利用余热锅炉回收 800℃以下高炉渣粒的余热，直接产生蒸汽。

特点：

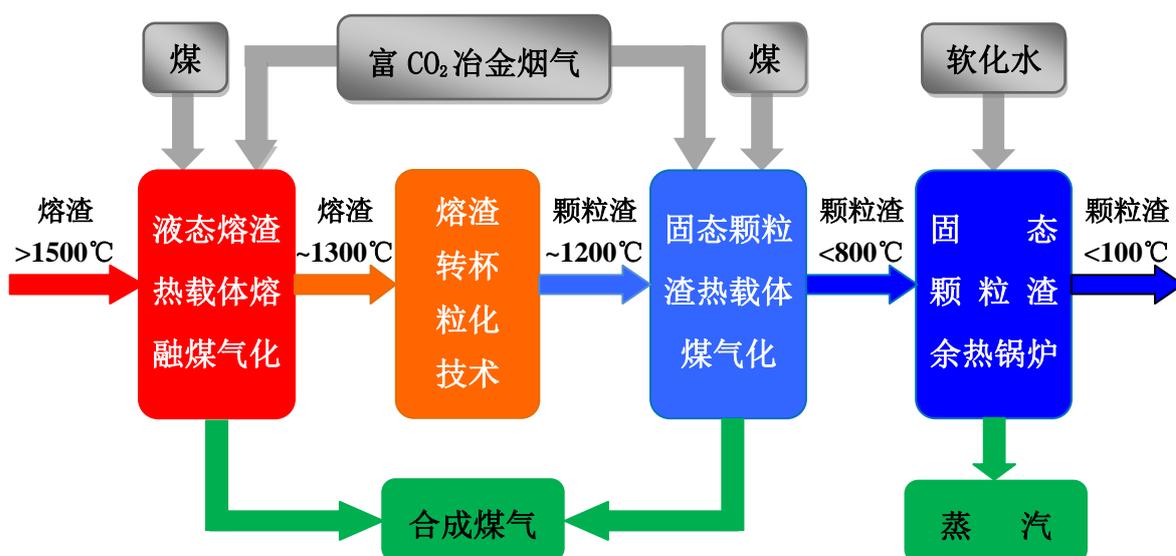
首次提出冶金过程熔态渣/煤/CO₂/H₂O 熔融直接气化制取合成气调控制备气体新理论、新过程以及高温熔态渣、固态渣分阶段气化的余热梯级利用与碳氢气体调控耦合新模式，从源头实现冶金过程高温余热的高质梯级利用与烟气中 CO₂ 大规模、低成本、高值化的转化利用，实现冶金余热梯级利用与碳资源转化利用高效协同。

技术指标:

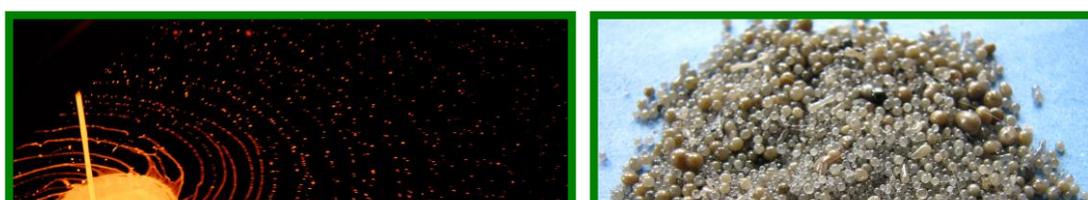
- (1) 该系统可实现系统余热回收率 70% 以上;
- (2) 液态渣熔融床煤气化产气组分主要为 CO、H₂、CO₂, CO 含量在 60% 以上, H₂ 含量高达 20%。碳转化率在 98% 以上。
- (3) 转杯粒化颗粒粒径在 2~5mm 左右, 玻璃体含量高达 90% 以上。
- (4) 自流床余热锅炉的余热回收效率可达 90% 以上。
- (5) 采用该技术, 一年产千万吨生铁的钢铁厂年可减排 CO₂ 38 万吨。

应用情况与应用范围

据不完全统计, 目前中国约有钢铁企业数百家, 大于 200m³ 的高炉 500 余座, 拥有高炉总座数接近 3000 座。而目前绝大部分企业高炉熔渣的处理方式均为水淬渣, 甚至部分企业直接采用高压水喷淋的方式。此外, 有色冶炼企业中也有大量高温熔渣资源没有得到很好的回收利用, 比如高温铜渣、高温镍渣等, 这些高温冶金渣的余热余能均可利用该技术进行回收利用。



冶金渣余热回收及碳资源系统减排制取合成气联合系统图



烟道式余热锅炉结构参数优化及设计软件开发

项目简介:

氧气转炉在吹炼期间产生大量含尘炉气，其温度高达 $1400^{\circ}\text{C}\sim 1600^{\circ}\text{C}$ ，炉气中含有大量的一氧化碳并有含铁量为 60% 的粉尘(约占铁水装入量的 1%~2%)，如果让这些炉气出炉后任意放散，不但会污染环境，同时也浪费了大量能源和有用物质。因此无论是从治理环境还是回收能源方面，都必须对转炉炉气进行净化处理和回收利用。利用转炉余热锅炉回收利用 CO 含量高达 40% 以上的转炉煤气及其高温余热具有很高的经济效益。

特点:

确定了典型烟道式余热锅炉的结构形式和几何特征；建立了余热锅炉烟气燃烧、流动及传热的数学模型，研究了烟道内烟气流动及传热的变化规律；建立了冷却水循环系统流动、传热数学模型，给出了确定汽化点的计算方法；编制了余热锅炉热力及水循环设计、校核软件，并将其成功地应用于企业的设计工作。

技术指标

(1) 软件可进行碳钢转炉和不锈钢转炉的热力计算、水循环计算及应力计算；

(2) 采用 IAPWS-IF97 标准编制了水和蒸汽热力性质，提高了计算精度和速度；

(3) 软件的计算结果采用 EXCEL 表格和图形输出，方便设计人员检查计算结果；

(4) 软件采用加密狗进行加密，保证了软件使用的安全性；

应用情况与应用范围

烟道式余热锅炉结构设计软件对设计人员制定设计方案、确定合理的结构参数具有重要的指导意义。同时，采用计算机进行计算可提高计算效率和计算精度，缩短计算周期，提高转炉余热锅炉的设计水平，可广泛应用于我国烟道式余热锅炉的设计场合。该软件已在国内的冶金设计院得到应用。

The screenshot shows the '碳钢转炉余热锅炉设计与优化' (Design and Optimization of Carbon Steel Converter Waste Heat Boiler) software interface. The window title is '碳钢转炉余热锅炉设计与优化'. The menu bar includes '文件(F)', '计算(C)', '结果(R)', '帮助(H)', and '水和蒸汽性质(P)'. The toolbar contains icons for file operations and calculations. The main area is divided into several sections:

- 项目信息:** 项目名称: 新余, 项目编号: 1
- 基本数据:**
 - 初始炉气温度: 1600 °C
 - 设计出口烟温: 890 °C
 - 空气消耗系数: 1.30
 - 烟尘损失: 4.00 %
 - 吹氧时间: 16 min
 - 吹炼周期: 38 min
 - 炉气中CO₂浓度: 10.0 %
 - 炉气中CO浓度: 90.0 %
 - 炉气中N₂浓度: 0 %
 - 炉气中O₂浓度: 0 %
 - 汽包压力(绝压): 3.20 MPa
 - 除氧器压力(绝压): 0.30 MPa
 - 除氧器补水温度: 30.00 °C
 - 铁水最大装入量: 250 t
 - 总降碳量: 4.00 %
 - 铁水比: 94 %
 - 同时吹炼个数: 2
 - 裙罩下节圆直径: 4.89 m
- 计算模式:**
 - 热力计算
 - 水力计算
 - 设计计算
 - 校核计算
- 末段个数:**
 - 一个
 - 两个
- 数据处理:**
 - 热力结构数据
 - 保存
 - 计算

基本数据输入界面

The screenshot shows the '碳钢转炉余热锅炉设计与优化' software interface for detailed system configuration. The window title is '碳钢转炉余热锅炉设计与优化'. The menu bar includes '文件(F)', '计算(C)', '结果(R)', '帮助(H)', and '水和蒸汽性质(P)'. The toolbar contains icons for file operations and calculations. The main area is divided into several sections:

- 项目信息:** 项目名称: 新余, 项目编号: 1
- 循环方式选择:**
 - 裙罩: 低压强制, 16Mn
 - 中二段: 中压强制, 20G 20号钢
 - 末段1: 中压强制, 16Mn
 - 末段2: 中压强制, 16Mn
 - 中一段: 中压强制, 16Mn
 - 中三段: 自然循环, 16Mn
- 下料孔:** 下料孔1: 低压强制, 下料孔2: 低压强制
- 氧枪孔:** 氧枪孔: 低压强制
- 副枪孔:** 副枪孔: 低压强制
- 防爆孔:** 防爆孔: 低压强制
- 人孔:** 人孔: 低压强制
- 分段方式:**
 - 五段式
 - 三段式
- 限流方式:**
 - 非限流
 - 限流
- 系统结构:**
 - 除氧器系统
 - 汽包系统
- 计算模式:**
 - 热力计算
 - 水力计算
 - 设计计算
 - 校核计算
- 计算类别:**
 - 除氧器
 - 汽包
- 数据处理:**
 - 热力结构数据
 - 保存
 - 计算

工业热设备三维设计软件开发

项目简介：

将三维设计的方法引入到工业热设备的设计中，采用先绘制布局再添加材料的处理方式，将工业热设备分解为多个子结构，使用先独立生成再装配的自底向上的设计模式，开发了交互式绘图程序，实现了 Solid Edge 环境下的三维参数化设计，有效地提高了设计效率和质量。

特点：

本软件有针对性强，建模效率高，易学易用等特点，可以在 Solid Edge 交互环境下，利用所开发的模块，生成设计人员所需要的常用的零部件，然后利用软件所开发出的自动装配功能，准确快速的完成装配操作，最后利用已存的图纸模版，选择相应的视图生成符合设计单位习惯的二维工程图。

技术指标：

(1) 利用了 Solid Edge 提供的 API 编程接口，采取模块化的开发方式，建

立独立的标准化程序模块；

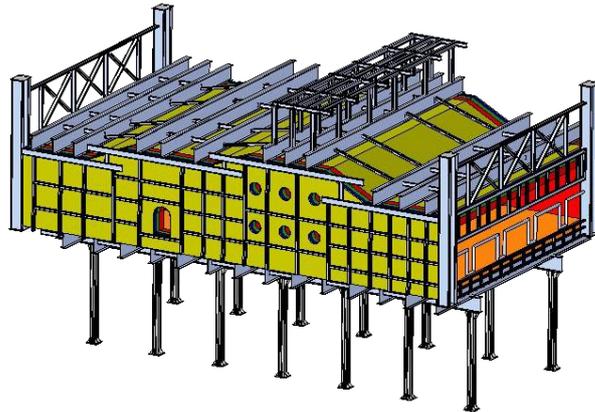
(2) 按照零件环境下完成零件建模，开发了烟道设计模块、过热器设计模块、蒸发器设计模块、省煤器设计模块、辅助管设计模块、集箱设计模块、烟道外部管路设计模块；

(3) 按照装配环境下生成装配总图，开发了自动装配模块和手动装配模块；

(4) 按照工程图环境下生成二维工程图，开发了三视图模块、标题栏模块、明细表模块、技术要求模块。

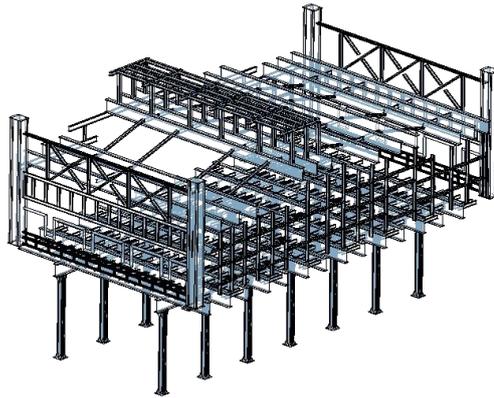
应用情况与应用范围

国内工业设计主要使用二维软件，与之相比，三维软件具有生成速度快，修改方便，直观，美观等特点，是诸多行业设计的方向和趋势，而且在三维实体的基础上可以方便地输出二维图纸，与工业行业的设计现状很好的接轨。该软件已在国内的冶金设计院得到应用。



步进梁式加热炉的三维图





步进梁式加热炉钢结构

除尘产品开发

1) 耐高温复合过滤材料

本产品利用专利技术，以玻璃纤维、聚酰亚胺纤维或者聚苯硫醚纤维等耐高温材料，与其它纤维复合，通过针刺或水刺，制造成针刺毡，经过特殊的后处理制成成品滤料。

该产品具有效率高、阻力低、耐腐蚀、长寿命、大容尘的特点，可用于燃煤电厂、水泥窑炉、钢铁烟尘、垃圾焚烧、冶金尾气等众多行业烟气的除尘，满足环保减排的要求。

2) 三梯度高密面层过滤材料

产品采用专利技术，通过 CFD 计算机模拟优化，确定滤料的立体结构，采用三条纤维成网的工艺设备同时形成粗、细不同的三层纤维网，加工成三梯度高密面层过滤材料。迎尘面采用超细纤维形成高密面层，不仅过滤效率高、阻力低，

而且剥离率高。

该产品具有过滤效率高，成本低、对于粉尘层具有良好剥离效果，可以广泛地应用于工业生产和环保工程上，取得很好的经济效益。

3) 湿式纤维栅除尘器

该产品采用有机合成纤维或金属纤维加工成多层隔栅，在上游安装水雾喷嘴。喷嘴喷出的水雾在纤维间形成水膜，含尘气流通过时，粉尘被捕集。

该产品除尘效率高，结构简单，维护方便，容易制造，价格低廉，另外由于水膜及雾滴的吸附作用，它还对气流中的有害气体起一定的捕集作用，如喷入石灰水具有一定的脱硫效果。广泛适用于煤矿、金属矿、工业粉尘、高温烟尘的捕集。

防雨窗纱

装设窗纱是使房间通风、去除房间异味、保持室内干燥、使室内空气清新宜人，保证人们身体健康，又可避免蚊虫入侵的最好办法。

当您出门时，总会根据天气情况为关不关窗而犹豫不决；当在外面时，又为突降大雨未关窗而懊悔，担心着雨水进入屋内，淋湿地板、地毯、甚至……。

现在向您提供的窗纱是一种高科技（专利）产品，能防止雨水进入室内。装有这种窗纱，您就可以安心上班、安心度假，时刻保持室内的通风而又不用担心由于雨水从窗纱进入室内。

这种专利技术的窗纱是对普通窗纱进行高科技处理，使其具有长久防水功能，雨水落到上面不会将窗纱打湿，而是形成一个个水球滚下去，从而具有防雨功能。可广泛用作宾馆、住宅、写字楼等建筑的窗纱（防虫网）。

窗纱规格：

目数	丝径	参考重	幅宽	材质	疏水等
----	----	-----	----	----	-----

(目/英寸)	(mm)	(kg/30m ²)	(m)		级
24	0.17	10.28	0.5-1.5M	低碳钢丝、 不锈钢丝、 铝镁合金 丝、镀锌 丝、铝丝	ISO 标准 4-5 级
	0.15	8.02			
30	0.12	6.35			
	0.17	12.85			



极贫磁铁矿超细碎干式预选技术

我国极贫磁铁矿资源丰富，全国各地已探明的极贫铁矿储量有几百亿吨，主要分布在河北、辽宁等地区，通常 TFe 品位在 10%~20%，磁性铁品位 (MFe) $\geq 5\%$ ，有的甚至更低。极贫磁铁矿石品位低、铁矿物嵌布粒度细，导致选比大，开采利用成本高。本技术将极贫磁铁矿进行高压辊磨超细碎，在适宜的操作条件及合理的超细碎流程下获得粒度达为-3mm 的超细碎物料，利用带式振动沸腾干选磁选机进行入磨前预选，大幅度提高入磨矿石的品位，可将铁品位 5%左右提高至 30%至 40%，如果矿石结晶粒度粗，提高幅度更大，抛尾量达 80%以上，从而大幅降低选厂能耗、水耗、球耗，为选厂节省生产成本。同时预选后的尾矿可实现干堆，大大减轻选矿尾矿库的压力，延长其使用寿命。

成果水平：此项成果国内首创。

应用范围：该技术可用于所有贫磁铁矿的高效低耗开发利用。

超级铁精矿制备技术

针对嵌布粒度较好的磁铁矿和赤铁矿，东北大学矿物工程研究所开发了超级铁精矿制备特定的工艺、设备和药剂。采用这一技术，利用朝阳地区较多数的品位在 65%-67%普通铁精矿，制备超级铁精矿的产率可以达到 70%以上，酸不容物小于 0.2%。同时可以获得一部分 68-70%的高品位铁精矿，这两部分的金属回收率可以达到 95-98%。该产品可以为还原铁粉生产厂家提供原料。

成果水平：达到工业化水平

应用范围：拥有铁矿石资源的嵌布粒度较好的磁铁矿和赤铁矿矿山和选矿厂都可以采用该技术提高产品附加值。

太阳能晶体硅切割废料的综合利用

随着光伏产业高速发展，晶体硅切割产生的一次废料浆出现井喷式增长。目前国内现有回收工艺是：废料浆中的液体PEG可全部回收；料浆中的占碳化硅总量50%的大颗粒可回收再用于晶体硅切割，但其余小颗粒碳化硅和晶体硅粉($\leq 7\mu\text{m}$)成为了二次废料难以利用。仅2011年一年，我国就产生了近25万吨二次废料(SiC+Si)，厂家院内废料堆积如山，粉尘飞扬，环境恶劣。

东北大学通过多年深入研究，可以将二次切割废料中的碳化硅和晶体硅粉进行有效分离，然后将分离出的晶体硅粉制备成高纯硅，作为制备太阳能多晶硅的原料，将分离出的碳化硅粉制备成碳化硅制品，广泛用于冶金工业和陶瓷工业等，实现了二次切割废料的综合利用，形成了具有自主知识产权的原创性技术，并申请了多相相关专利。该技术还具有生产技术先进、产品质量优越，生产成本低等特点。

该项目的实现具有以下重要的意义：

第一：二次废料中的碳化硅和晶体硅粉都是通过高能耗、高成本制备出来的，该技术的实现不仅减少了环境污染，也会产生出巨大的经济效益。特别是能将废料中价值最高的晶体硅粉得以回收并再用于制造太阳能多晶硅，这对我国减少多晶硅的进口是有重要意义。

第二：回收废料中的晶体 Si 粉和 SiC 粉可以显著降低晶体硅切片的切割成本，进而可以显著降低太阳能电池的成本，这对降低我国光伏能源的成本，对加快我国光伏产业发展、早日实现平价上网也有重要意义。

第三，实现工业化回收切割废料，不但能提高资源利用率，而且能够减少环境污染，变废为宝，使晶体硅和碳化硅得到合理利用，解决日益严重的切割废料的污染问题，是一件利国利民的好事。

直接还原法处理钒钛磁铁矿以及含钒生铁脱碳保钒生产钒钢

钒钛磁铁矿经选矿处理后得到铁精矿，传统的冶炼方法基本上是通过高炉冶炼，使铁矿石还原成生铁，生铁再经电炉或转炉炼钢。其中钒会通过炼钢过程进入含钒钢渣中，钒渣再进一步进行提钒处理，而大部分的钛则在高炉冶炼过程中进入高炉渣难以得到应用。传统的钒钢冶炼都是向钢液中添加钒、碳氮化钒或钒铁等，最终生产出性能优良的钒钢制品。

本成果主要是避开传统的高炉冶炼方式，而采用转底炉直接还原法（又称固相还原法）处理钒钛磁铁矿。与高炉冶炼相比，固相还原技术不仅反应温度低，可以大幅度节约能源，而且可用无烟煤或煤气作还原剂，从而使冶炼过程摆脱了对焦炭的依赖。固相还原所得产物通过电炉熔分后，钒组分仍留在铁相（即海绵铁）中，而钛组分进入渣相，通过控制熔分过程，可获得品位很高的含钒生铁和富钛料。海绵铁物再经 AOD 处理，通过控制吹炼温度、氧枪内径及氩氧比等因素，

在脱碳的同时使钒组分继续留在铁相中，即实现脱碳保钒，通过调质处理即可直接制得钒钢制品。脱碳保钒工艺使钒组分直接留在钢液中，减少了提钒后再生产钒制品，然后再向钢液中加钒的工艺过程，是实现钒钛磁铁矿综合利用特别是优质钒钢生产的理想途径。

成果主要包括以下几方面内容：

1. 钒钛磁铁矿的工艺矿物学确定，明确矿物的成分和结构特点，特别是钒、钛和铁的含量和赋存状态。
2. 固相还原工艺的确定，明确原料配比、反应温度、反应时间、物料粒度等因素对固相还原产物的影响，得到合理的工艺参数。
3. 熔分条件的确定，明确钒钛的走向及其赋存状态，通过控制钒钛在渣金两相中的分配平衡，使钒组分以单质形式保留在海绵铁中，而钛组分以 TiO_2 的形式进入渣相，钒和钛的回收率均可达到 90% 以上。
4. AOD 工艺的确定，通过控制吹炼温度、氧枪内径及氩氧比等因素，使生铁中的大部分碳被氧化，而钒不被氧化，即实现“脱碳保钒”，同时实现脱磷和脱硫，得到含碳量低、韧性很强的钒钢制品。

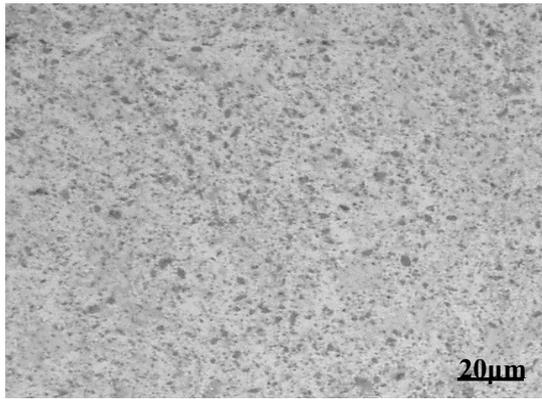
亚微米陶瓷颗粒增强金属基复合材料低成本制备技术

项目简介

亚微米陶瓷颗粒增强金属基复合材料具有比刚度和比强度高、耐磨性和尺寸稳定性好等特点，用途十分广泛，被认为是 21 世纪新型材料。本项目采用元素粉末法制备工艺技术，与传统粉末冶金法相比，此方法具有流程短、原料成本低、颗粒尺寸小、合金成分和显微组织设计自由度高等优点，主要技术指标已经达到国际先进水平，先后设计和开发了高尺寸稳定性高导热易加工电子封装复合材料制品，在金属基复合材料实际应用方面取得了突破性的进展。

应用范围

在汽车、航空航天、动力机械行业等领域可替代要求比模量高、耐磨、零件尺寸稳定好的构件，该材料应用的范围广泛。



铝基复合材料微观组织



铝基复合材料制品

耐磨耐蚀金属陶瓷复合材料及连接技术

项目简介：

针对冶金、石化和轨道交通等领域中高温磨损、冲击、腐蚀的工况环境，提出采用复合结构设计，即保证具有高的耐磨性，又使得整体构件具有足够高的强韧性、耐高温性能和耐腐蚀性能。金属陶瓷具有硬度高、密度低、耐高温及耐磨损等优良的力学性能和物理性能，是一种很有发展前途的结构材料。开发研制出耐磨耐蚀金属陶瓷复合材料及连接技术，充分利用金属陶瓷复合材料具有的高硬度、高耐磨性、耐高温和耐腐蚀性等优良性能，同时发挥合金钢、不锈钢基体的强韧性，使获得的整体复合材料构件的抗弯强度和断裂韧性大幅度提高，使用寿命达到或接近国外同类产品先进水平。本项目曾获得国家“十五”863项目资金资助。

项目技术指标：

1. 耐磨耐蚀金属陶瓷复合材料的主要性能指标：

密度：6.0-8.0g/cm³

硬度(HRC): 65~68

抗弯强度: $\geq 1600\text{MPa}$

热膨胀系数: $9.0\sim 11.0 \times 10^{-6}\text{K}^{-1}$

冲击韧性(α_K): $\geq 2.0\text{ J/cm}^2$

2. 金属陶瓷与钢之间界面连接强度: 真空扩散焊界面强度 $\geq 700\text{MPa}$;

真空钎焊界面强度 $\geq 500\text{ MPa}$

应用范围

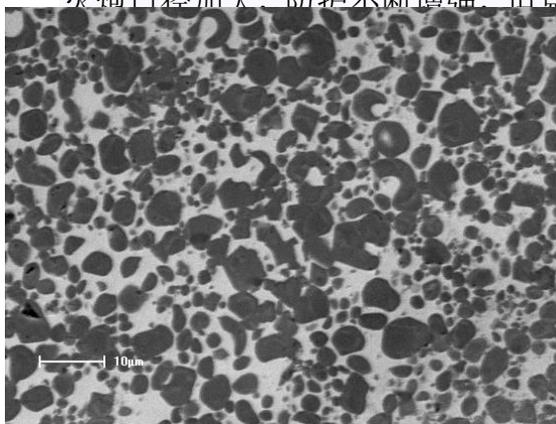
冶金、石化和轨道交通等领域中高温磨损、冲击、腐蚀的工况环境下的关键构件。

耐磨耐蚀金属陶瓷复合材料微观组织

金属陶瓷与钢真空钎焊界面微观结构

铸造高强度双相钢履带板

随着科学技术的不断发展和作战使用要求的提高,坦克装甲车辆的性能也日新月异,改进,坦克的火力、机动性、防护三大性能之间的矛盾更为突出。随着火炮口径加大,防护不断增强,坦克战



也更具反,度。主要~1030%目冲击够,的危易于部位
出现裂纹。多数履带板在 1000km 检修时被换下,履带板平均使用寿命大约 3700km, 不能与坦克发动机大修期相匹配。

研究高强度、高韧性、耐磨性好的新材料制造履带板，设计新型履带板结构，减轻履带板重量，提高履带对地面的附着力，防侧滑性能好，是提高坦克机动性的重要保证，也是未来提高坦克性能需要解决的重要问题之一。

为了实现希望的无裂纹履带板，将使用寿命提高至 5000km 以上，研究了铸造高强度钢“高寿命履带”。在锰硼铸造马氏体+贝氏体钢的基础上增加固溶强化型合金元素，适当提高含碳量，增加强度，提高耐磨性，同时保持一定韧性，满足履带板疲劳韧性的要求。铸造成形，经热处理，抗拉强度达到 1550 MPa；屈服强度达到 1260MPa；延伸率达到：8.8 %；U 形缺口冲击韧性达到：40J/cm²。实验室磨料磨损对比，铸造高强度钢耐磨性是铸造 Mn13 高锰钢的 1.6 倍；销耳孔耐磨性是高锰钢的 2.6 倍。

由于高强度双相钢的合金元素总含量低于高锰钢，不含镍钼等贵重元素，热处理温度低于高锰钢水韧处理加热温度，每吨高强度双相钢履带板的生产成本比高锰钢履带板低 1000 元左右。

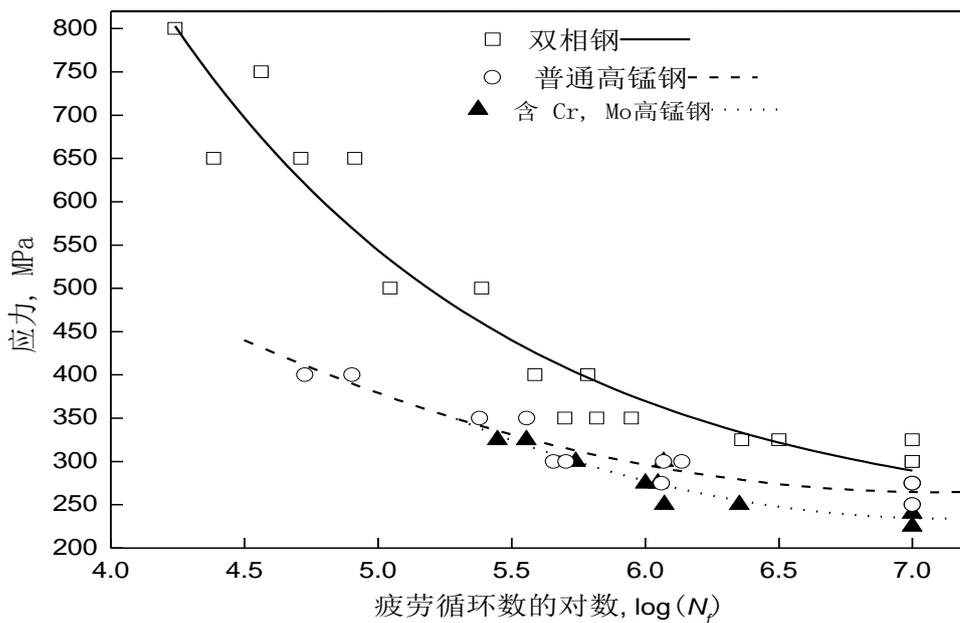
项目的完成程度

利用国内某坦克厂履带板铸造车间生产高锰钢履带板的设备和工装，铸造了双相高强韧耐磨钢履带板样件。在兰州部队某坦克训练基地进行了坦克搭载试验，行驶了 2600km，未发现裂纹和变形。搭载后实测履带板失重量，铸造高强度钢履带板的耐磨性是高锰钢履带板的 1.39 倍；销孔耐磨性是高锰钢履带板的 1.94 倍。预计履带板寿命超过 6000km。

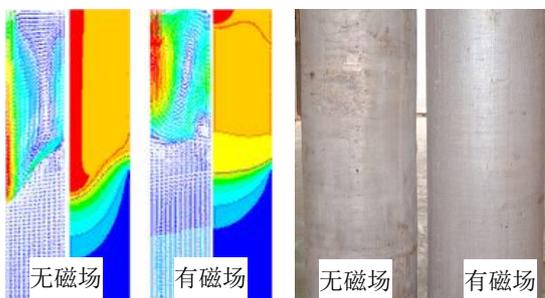
应用范围

该材料属于高强韧耐磨钢，出出料铸造坦克和拖拉机履带板外，可以用于铸造矿山、建筑、冶金等要求耐磨料磨损的零件。

对铸造高强度钢和铸造高锰钢进行了旋转弯曲疲劳对比试验，两种材料的疲劳强度曲线见图 1。结果表明，铸造高强度钢的疲劳寿命高于高锰钢的疲劳寿命，用铸造高强度钢履带板代替铸造高锰钢履带板是安全可靠的。



高质量镁合金锭坯、型材和板材生产技术



温度场与流场比较

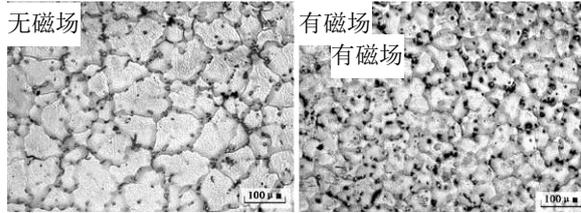
表面质量比较

开发了高质量镁合金锭坯制备技术和型材挤压、薄板轧制等多种塑性加工技术。在镁合金半连续铸造中施加低频电磁场，改善凝固过程的温度场和流场，可获得内部组织优良，表面光洁的高质量镁合金锭坯，并利用该锭坯可以制备高性能挤压型材和轧制板材。该技术具有广泛的工业化前景，现已在山西、辽宁和山东等国内多家企业得到应用。该技术生产的锭坯在美国通用和青岛戴卡也得到了应用，产品远销欧洲、韩国、日本、台湾等。

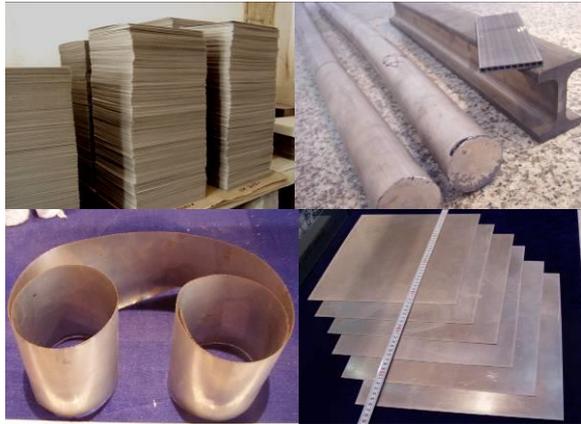
技术特点：

- ✚ 高铸坯质量：高表面质量，优良的内部组织（晶粒细化、枝晶退化、裂纹抑制、元素偏析大大减小）；

- ✚ 适用锭坯、板材规格范围广： Φ



镁合金组织比较



镁合金板材和型材



Φ320mm 镁合金圆坯及锻造轮毂



300mm×800mm 镁合金板坯

冷轧机板形控制系统核心技术自主研发与工业应用

开发出具有完全自主知识产权的冷轧带钢板形控制成套系统。解决了数据高速采集、实时信号处理等难题，开发出冷轧机板形控制全套计算机控制系统、数学模型和应用软件，实现了冷轧板形控制技术的自主创新。建立了独特的板形控制目标曲线，根据轧制过程中卷取进程、设备安装状况、带钢横向温差、带钢边部减薄、板形控制执行器手动调节量等实际因素，对带钢目标板形进行补偿修正，提高了冷轧带钢板形目标控制精度。

完成了国内第一套工业应用级的冷轧板形控制技术和控制系统，是我国冶金领域核心技术研发的重要成果。该板形控制系统是一个通用系统，可实现四辊（以及 CVC 类）、六辊（以

及 UC 类) 等常规轧机以及森及米尔等多辊轧机的精确板形控制。该项技术整体上达到国际先进水平, 填补了国内空白, 打破了国外对冷轧板形控制系统的长期技术垄断, 使中国成为世界少数掌握全套工业应用级冷轧板形控制系统核心技术的国家, 是我国冶金领域核心技术自主创新的重大进步。

开发出的系统在鞍钢 1250 冷轧机生产得到应用, 实现了 0.18 毫米超薄带钢生产控制, 取得了带钢平均板形质量小于 7I 的良好效果。

2010 年获冶金科学技术一等奖, 2011 年获国家科技进步二等奖。

航空铝合金大尺寸板坯的制备

高合金化铝合金大铸锭是制约我国航空铝合金发展的瓶颈问题。

在铝合金 DC 铸造时施加低频电磁场, 利用低频电磁场的强贯穿能力, 改变结晶器中熔体的流场, 进而能动地控制结晶器中的温度场, 使合金铸锭组织显著细化, 裂纹抑制, 合金元素宏观偏析减弱, 表面质量改善。同时在二冷到预定尺寸时施加气刀, 将二冷水除去, 使铸锭实现自回热, 利用本身的热量实现深退火, 可以避免冷裂纹。该研究提出的电磁过冷理论和自回热理论为铝合金连铸理论开辟了外场连铸的理论基础, 开发了电磁-气刀连铸新技术。

该技术已在东北轻合金有限公司实现工业化生产, 解决了我国大飞机工程铝合金材料生产的关键问题。2010 年获中国有色科技一等奖和二等奖。

多晶铁磁形状记忆合金的相变特征与功能特性

NiMnGa、NiCoMnIn 系合金具有作为新一代磁驱动材料的巨大潜力。利用同步辐射高能 X 射线衍射与中子散射技术等, 着重就晶体结构、微结构、马氏体相变特征、力学行为及形状记忆机制等开展研究。

首次获取非当量 Ni₂MnGa 系合金相变过程中磁结构与晶体结构交互作用的实验证据, 为构建 NiMnGa 系合金相变过程的理论模型奠定了基础。揭示了铁磁形状记忆合金相变过程中形状记忆的本质, 即微观尺度上的织构“记忆”与应力“记忆”。发现两类微观应力(晶间应力与晶粒内部缺陷导致应力)对“记忆”效应具有不同的作用, 晶粒内部缺陷引发的应力在相变过程中导致晶粒转动从而降低微观“形状记忆”功能, 该发现对研制高性能铁磁形状记忆合金提供了理论依据。制备出性能达到国际先进水平的 NiMnGa 合金(多晶 Ni₄₈Mn₂₂Ga₂₅Co₅ 室温塑性可达 9.5%, 形状回复可达 76%)。

证明可通过调整温度来控制 NiCoMnIn 系合金可逆或不可逆相变, 在 1~2T 磁场诱导下马氏体逆相变可产生 2.7%磁致应变。发现在相变温度下, 合金可反复通过强磁场“训练”

降低马氏体变体之间的微观应力，优化马氏体变体的形核条件，获得分布均匀且更为自协调的马氏体组织，从而改善合金的磁致形状记忆行为。

相关研究成果发表在《Adv. Mater.》、《Appl. Phys. Lett.》、《Acta Mater.》等知名刊物上，被评价为“铁磁形状记忆合金领域出色的工作，在文献中非常罕见”，是目前国际上针对铁磁形状记忆合金研究进展的重要组成部分。

现代轧制技术、装备和产品研发创新平台

现代轧制技术、装备和产品研发创新平台，在企业新工艺、新产品开发和提高企业核心竞争力中发挥着重要作用。平台中的热轧实验机组、冷轧、温轧实验轧机、多功能退火实验机等系列实验装备已在钢铁企业和研究院得到广泛应用。近期又与台湾中钢和俄罗斯维克沙钢铁公司等国外钢铁企业建立了实质性的合作关系。钢铁企业利用上述研究设备开发出大量高品质钢铁产品和先进生产技术，部分产品和技术获得了国家级和省部级科技奖励，典型奖励如下：

- (1) 提高 C-Mn 钢综合性能的微观组织控制与制造技术（国家技术发明二等奖）
- (2) 鞍钢高性能造船用钢制造技术创新与集成（国家科技进步二等奖）
- (3) 沙钢大壁厚高强韧性管线钢品种开发（江苏省科技进步二等奖）

在实验研究装备和平台建设的基础上，东北大学与国内几十家钢铁企业合作开展了大量的钢种和工艺研发工作及技术转让，通过开发新钢种，新设备和新技术，为企业创造了巨大的经济效益。仅东北大学通过实验研究装备建设和轧制技术开发转让创造直接经济效益约4.6亿元（合同额）。

创新平台及相关实验设备的开发，为我国钢铁行业提供了先进的轧制技术、装备和产品开发的手段，在新钢种、新技术开发中发挥了重要作用，极大地提升了企业的自主研发能力，增强了企业的核心竞争力；项目在多个方面填补了国内空白，在与国外产品的竞争中取得绝对领先的优势，为钢铁企业节省了大量研发设备投资；在创新平台的建设和使用过程中，培养了大批科技研发人才，促进了钢铁行业研究水平的提升。通过轧制技术研发平台开发新技术、装备和产品，将为钢铁企业乃至整个钢铁行业带来巨大的经济效益和社会经济效益。

近5年间，RAL实验室开发的轧制技术、装备和产品研发创新平台及系列研究装备在企业得到广泛的推广应用，获得了国家、省和行业部委、企业的高度评价。完成省部级科技成果鉴定4项，获得国家发明专利12项，发表学术论文50多篇，获得国家科技进步二等奖1项、省部级科学技术二等奖以上奖励5项，在刚刚结束的2012年国家科技奖励评审中，“现代轧制技术、装备和产品研发创新平台”项目获得国家科技进步二等奖。

基于超快速冷却的新一代 TMCP 装备及工艺

在热轧钢铁材料新一代 TMCP（控轧控冷）装备及工艺开发技术领域取得了系列创新性的科研成果，针对不同的钢材门类开发了与之相适应的控制冷却系统，统称为 ADCOS（Advanced Cooling System）。

开发出中厚板轧机的 ADCOS-PM 系统。提出一种倾斜喷射的超快冷+层流冷却的新设计概念，采用斜喷缝隙式喷嘴+高密管式喷嘴的混合布置，均匀地将板面残存水与钢板之间的气膜清除，实现钢板和冷却水均匀接触的全面核沸腾。不仅提高了钢板和冷却水之间的热交换，而且抑制了钢板由于冷却不均引起的翘曲，总体上达到了国际领先水平。截止 2011 年，与首秦公司合作开发的 4300mm 超快速冷却系统完成高钢级管线钢生产 24 万余吨。

开发出热连轧机的 ADCOS-HSM（Hot Strip Mill）系统。可以在热连轧较高轧制速度下，对热轧带钢进行快速冷却，也可与后面的层冷进行接力式冷却。在连钢建成国内首套依据新一代 TMCP 工艺的热轧带钢生产线，已稳定用于低成本、减量化的 C-Mn 钢、高强钢、双相钢、管线钢等钢材品种的工业化大批量规模化生产。

开发出辊式淬火机。2011 年 6 月，在宝钢就 4300 中厚板热处理生产线进行国际招标时，战胜国际著名热处理装备公司，表明辊式淬火机装备及相关的工程技术具有在国际舞台上进行高水平国际竞争的雄厚实力。

新一代 TMCP 技术被列为工信部《产业关键共性技术发展指南（2011 年）》中钢铁产业五项关键共性技术之一，被世界金属导报评选为 2011 年世界钢铁工业十大技术要闻。

镁合金电磁连铸技术

开发了镁合金电磁连铸理论与技术，在系统研究了电磁场参数和铸造工艺参数对镁合金 DC 铸造结晶器内的流场和温度场影响规律基础上，明确了电磁场作用下镁合金凝固时的传热行为、凝固行为，掌握了电磁铸造凝固组织的调控方法。

首次明确提出：糊状区的大小与形状是影响锭坯组织的主要因素，糊状区的厚度可以表征该处的冷却速度。电磁场对凝固组织的影响主要表现在对糊状区的厚度和形状的影响，电磁场改变了糊状区的厚度和均匀性，因此显著细化了凝固组织，并且提高了组织均匀性。

开发了具有独立知识产权的镁合金锭坯 LFEC 技术。该技术可显著细化铸锭组织、抑制合金元素的宏观偏析与裂纹、提高锭坯表面质量和提高锭坯加工材的力学性能。该技术已在 4 个企业应用，生产了 $\Phi 100-500\text{mm}$ 的 AZ31, AZ80 和 ZK60 合金铸锭， $\Phi 500\text{mm}$ 铸锭车削量 5~10%，远优于国际上同等规格铸锭的 20%车削量水平；实现 $\Phi 800\text{mm}$ AZ31、AZ80 和 ZK60 镁合金锭坯的产业化生产，该尺寸的圆锭是目前世界上规格最大的锭坯，车削量仅为 8~15%。

该技术被评为国家 973 项目“高性能镁合金加工与制备中的关键基础问题”的重大研究成果。

高硅钢薄带织构控制与高效率制备技术

轧制成形和织构控制是阻碍具有优异软磁性能的高硅钢广泛应用的两大瓶颈问题，也是制造高硅钢薄带产品必须解决的两大核心技术。

围绕铸造、热轧、常化、冷轧、退火等工序，坚持轧制成形与织构控制兼顾的原则，研制出完整的涵盖制造全流程的高硅钢薄带轧制成形与织构控制技术。

主要体现在：● 浇铸时选择模具及冷却方式，确定铸锭（坯）冷却过程需要控制冷速的温度区间及冷速，避免内裂纹产生；● 热轧工艺的确定，既要保证成形性和轧机负荷的要求，又要满足基于织构遗传与转变规律提出的对热轧织构的要求；● 热轧板常化退火旨在调整热轧板组织状态，使之既可保证冷轧成形性的要求，又可为不同再结晶组分形核提供有利的初始组织条件；● 冷轧工艺的制定，是在实现高效、连续、稳定的薄带成形前提下，获得有利于再结晶织构优化控制的形变织构与形变微结构；⑤ 再结晶退火过程实质上是为再结晶形核与长大提供热激活能，使有利织构组分获得优先形核与长大的优势，进而实现再结晶织构的有效优化。

利用开发的成形技术成功制备出 0.02mm~0.50mm 的系列厚度规格，是目前国际上以轧制方式制备的最丰富的高硅钢薄带规格；利用开发的织构控制技术成功实现了有利织构 λ 和 η 的优化，是目前国际上关于高硅钢薄带再结晶织构控制的最完整的方法与技术。高硅钢薄带磁性能超过国际上报道的性能（采用 CVD 法而非轧制法制备），处于国际先进水平。相关技术创新申报了三项国家发明专利。

以上述成果为基础，东北大学作为牵头单位通过产学研联合的方式推动工程化技术开发和应用。

高性能纳米陶瓷刀具材料

针对我国目前陶瓷刀具产品力学性能较差，质量不稳定，无法满足我国汽车制造、飞机制造、重型机械、化工设备等领域关键零、部件加工设备数控机床要求的现状，研制出具有自主知识产权的新一代 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ti (C, N)-TiNi}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ 等系列的刀具用纳米陶瓷复合材料。

发明了以聚羧酸铵为表面活性剂制备高固相含量的 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ (Y_2O_3) 水系悬浮体系的方法，消除了纳米粉体中的硬团聚，解决了 ZrO_2 (Y_2O_3) 纳米粉和 Al_2O_3 纳米粉难以均匀混合

的难题，显著提高了 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ 材料的力学性能，其抗弯曲度达到 800MPa 以上，断裂韧性达 $7.8 \text{ MPa m}^{1/2}$ ，为 Al_2O_3 陶瓷刀具材料的 2.5 倍、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ 陶瓷刀具的 1.6 倍。这可有效解决陶瓷刀具在使用过程中的崩刀难题。

研制新型 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ti (C, N)-TiNi}$ 网状纳米陶瓷复合材料，纳米 Ti (C, N) 颗粒通过组织细化显著提高了复合材料的力学性能，其三点抗弯强度比普通的 Al_2O_3 陶瓷刀具高 400MPa 以上，比 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ 陶瓷刀具高 100 MPa 以上；TiNi 合金在材料中呈三维网状分布，显著提高了复合材料的韧性（达 7-13MPa）。

研制的 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ti (C, N)-TiNi}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ 等高性能纳米陶瓷复合材料，具有高强度、高韧性、高红硬性等优点，在高性能陶瓷刀具领域具有很好的应用前景，可大大提高精度和质量，提高加工效率，降低加工成本。

该项成果在 *Acta Mater.* 等高水平刊物上发表论文 20 余篇，获国家发明专利 2 项。

贵金属纳米孔海绵材料绿色化制备、线性自组装行为及性能研究

纳米材料的绿色化制备和可控自组装行为一直是纳米材料研究的热点与难点。针对 Ag/Au/Pt 等贵金属提出了合成纳米粒子的简便、绿色化制备方法，通过控制反应条件诱导纳米粒子自组装成宏观任意形状与尺寸、高晶界密度的纳米孔海绵薄膜与块体材料。利用该方法获得海绵 Au 的比表面积高达 $12\text{m}^2/\text{g}$ ，是强酸腐蚀法 (*Nature*, 410:450, 2001) 和高温锻烧还原法 (*Nature Mater.*, 2:386, 2003) 的几倍乃至几十倍，为迄今文献报道的最高水平。

研究表明，纳米粒子通过“自动焊接”形成的纳米线的催化活性为单分散纳米粒子的 2~3 倍，晶界是提高催化活性的有效缺陷；利用该材料制成直接甲醇燃料电池的催化电极的催化活性是强酸腐蚀法制备的低晶界密度纳米孔海绵 Au 电极的 2 倍，而痕量 Pt/Pd 修饰可以进一步提高催化活性达 10 倍左右。此外，提出了单原子层沉积获得纳米 Al_2O_3 等来修饰纳米孔海绵 Au，据之有效调控局域表面等离子体共振峰位的红移。该类材料展现出独特的可见光~红外光学吸收特性与优异的催化性能，有望在化学传感器、催化剂、燃料电池电极、光学导向和生物过滤等上获得应用。

上述研究在国际刊物上发表论文 8 篇(包括 *Chem. Commun.*、*Chem. - A Euro. J.*、*J. Phys. Chem. - C* 和 *Nanotech.* 等)，其中 SCI 影响因子 4 以上的 4 篇，他引 40 次；获得中国和日本发明专利 3 项。

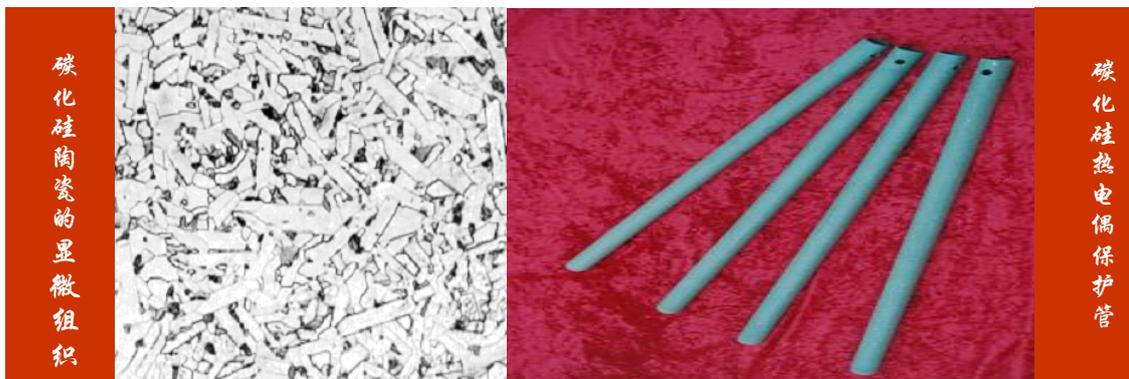
碳化硅及其复合材料的无压烧结制备技术

碳化硅复合材料制品目前主要用于机械密封环、刀具、汽车发动机部件和机械行业的校准量具等。碳化硅机械密封环在国外广泛用于水泵、化工、核潜艇、核电站和航天工业，但我国大型尺寸的密封环仍靠进口。

近年来，东北大学受国家自然科学基金(59602009)和国家“863”高技术项目(2003AA305620)的资助，对碳化硅及其复合材料的无压烧结工艺和性能进行了研究，目前已经掌握了 SiC 和 SiC/TiB₂ 等材料的制备工艺，并开发出机械密封环、拉丝模具和热电偶保护管等产品，产品的性能指标达到了国内外同类产品的先进水平。利用该技术还可以生产防弹陶瓷板。目前该技术已经获得一项国家发明专利。



碳化硅拔丝磨具及机械密封环



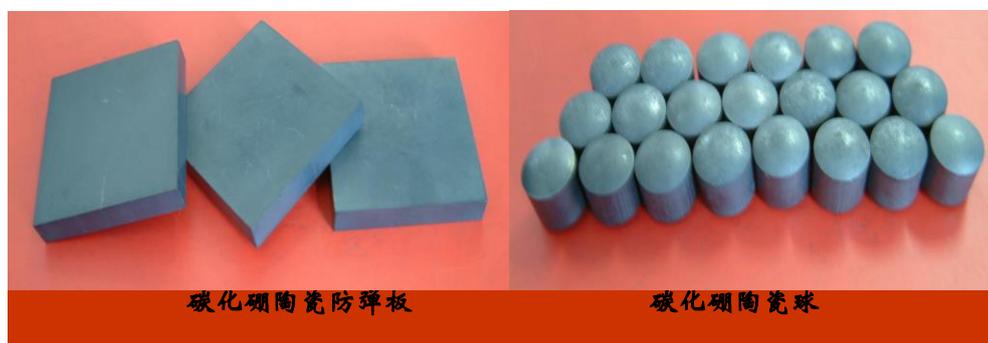
多孔碳化硅陶瓷的制备技术

多孔陶瓷在金属熔体过滤、气体过滤、催化剂载体和热交换器等方面具有非常广泛的用途，目前使用的多孔陶瓷存在着使用温度不高、强度低、孔径不易控制等问题。本项目研发出高性能的多孔碳化硅制备技术，可以利用溶胶发泡方式制备出直径为亚毫米级的多孔碳化硅陶瓷，多孔陶瓷的孔隙率大于 80%，也可利用前驱体法制备出孔径为 mm 级、碳化硅含量大于 99% 的多孔陶瓷，材料的强度高、耐化学腐蚀性好，可广泛用于金属熔体过滤、气体过滤、催化剂载体和热交换器等方面。本项目已经获得国家发明专利二项。

碳化硼陶瓷及其复合材料的低成本制备技术

碳化硼是硬度仅次于金刚石和立方氮化硼高技术陶瓷材料，由于其硬度高、密度低、耐磨性好、化学性能稳定和具有中子吸收性能，在机械、军工防护、核电站、化工和航空航天等领域具有广泛的用途，其主要产品有喷砂嘴、机械密封环、防弹衣、军工装备防护板、核屏蔽和核反应控制棒等。目前碳化硼制品的生产大都是采用热压方法生产，热压产品的质量高，但成本高，而且受到尺寸的限制，只能做一些形状简单的制品，这严重制约着这种高技术陶瓷材料的推广和应用。无压烧结（或常压烧结）法制得的碳化硼制品成本最低，质量适中，能制作形状复杂、尺寸较大的各种制品，是最有商品化前途的方法，是国内外企业所追求的技术。

近年来，东北大学受国家自然科学基金(50372020)和国家“863”高技术项目(2003AA305620)的资助，对碳化硼及其复合材料的无压烧结工艺和性能进行了研究，目前已经掌握了反应烧结 B_4C 、 B_4C/TiB_2 、 B_4C/ZrB_2 等材料的制备工艺，使碳化硼及其复合陶瓷材料的制备成本大大降低，仅为热压烧结产品的五分之一，并开发出碳化硼陶瓷防弹板和陶瓷球等产品，产品的性能指标已接近或超过了热压产品的水平。目前该技术已经获得三项国家发明专利。



三维网络陶瓷/金属新型刹车材料的制备技术

随着运输车辆速度的提高和单车载重量的增加，对刹车摩擦材料也提出了更高的要求。本项目可以为交通运输行业提供一种性能高、成本低、寿命长的新型摩擦材料。自 2003 年 8 月起，东北大学就对三维网络 SiC/金属复合材料进行了开发研究，该方法采用凝胶—溶胶成形和常压烧结方法首先制备出高 SiC 体积含量三维网络陶瓷，随后采用真空-气压铸造方法将金属填充三维网络碳化硅陶瓷骨架中，形成如图 1 所示的高性能三维网络 SiC/金属复合材料。该材料具有新型的摩擦材料具有摩擦性能稳定、磨损率低、耐热性能好、机械强度高、抗变形和抗破坏能力强特点，与传统的钢/粉末冶金刹车材料相比，各种机械性能指标有了

明显提升，解决了传统材料容易热裂、粘结及整片剥落、掉渣等缺陷，与碳/碳刹车盘相比，则弥补了成本高、不能全天候、全气象使用的不足。

利用该材料已经制备出飞机、汽车的制动系统（见图 2），飞机制动系统已经通过飞机台架试验，汽车的台架试验正在进行之中。该项目已经获得国家发明专利（ZL200510046691.X）。这种新型摩擦材料在汽车、飞机、轮船、电梯、机床和其它传动机械上都有广泛的使用市场，尤其在我国的铁路大提速的背景下，其应用前景非常巨大。目前该技术已经获得三项国家发明专利。



图 2 制备的飞机制动盘(a)、刹车片(b)以及汽车制动盘于刹车片(c)

超高强度超高韧性钢的研发

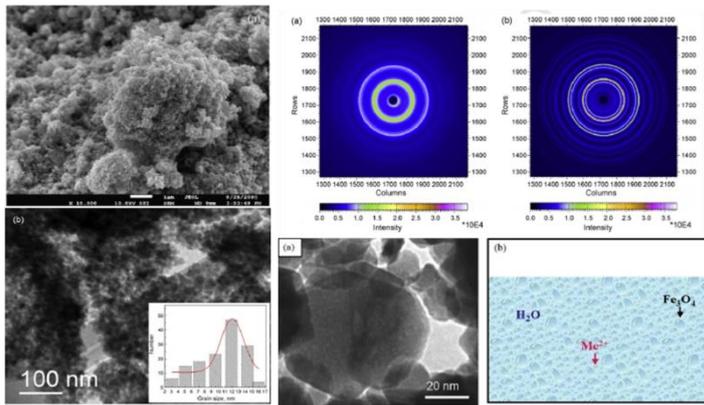
高锰钢的研究与使用历史悠久，具有良好的加工硬化性能，因而高锰钢广泛用于制造抗冲击磨损的工件。但在实践中发现，由于高锰钢的屈服强度低，初次使用时易于变形，并且造成较大的磨损；另外，寒冷地区经常发生高锰钢部件脆性断裂现象；因此，如何通过适当的成分及加工工艺设计，进一步提高高锰钢耐冲击性、耐磨性，成为材料研究工作者的新课题，也成为当前世界范围内的金属材料的研究热点之一。针对现有高锰钢在综合性能上存在的上述缺陷，申勇峰副教授发明了一种具有超高强度超高韧性钢板及其制备方法，通过变形过程中马氏体相变效应、孪生效应和 C 元素的固溶强化作用，制成具有超高强度和韧性的高锰钢。本发明通过层错能计算进行成分设计，在适当的加工条件下易于形成大量纳米尺度的马氏体片层及孪晶亚结构，使金属得到强化；该材料具有非常高的室温拉伸强度，抗拉强度为 1910~2010 MPa，拉伸延展性为 75~85%，屈服强度为 310~400MPa。该产品应用性极强，由于具有相变及孪生效应，具有极强的吸收位错大能力，使得材料具有非常高的强度及良好的塑性及优越的耐磨耐蚀性能，对迅速发展的汽车工业，建筑业，化学工业，原子能工业，造船等新技术领域等高新技术的发展具有重要价值；本发明的制备方法简单，只需改进工艺条件，控制适

当的热处理及冷却参数即可获得。本成果授权发明专利 1 项。

超细晶粒双相钢材料及其制备

近年来，美国、日本和俄罗斯等发达国家相继开发并逐步采用 400 MPa 以上超高强度船体用钢替代传统的高强度船体钢，然而，目前我国生产的船舶用钢仍不能完全满足该工业领域发展的需求，随着我国造船业的迅猛发展，超高强度船体用钢的需求明显增大。针对现有技术存在的钢材抗拉强度及屈服强度较低的问题，申勇峰副教授发明了一种超细晶粒双相钢材料及其制备方法，通过合理的成分设计及工艺控制，使所制备热轧钢材料中存在大量的马氏体组织及亚微米级超细晶粒，同时存在纳米尺度的孪晶片层结构，几种组织协同作用，使该钢材料在具有超高强度的同时并具有一定的塑性变形能力。与现有技术相比，本发明的特点为：通过层错能计算进行成分设计，确定以 Fe-14.3Cr-2.6Mn-6.8Ni-0.03C 为基础合金成分，促进在适当的加工条件下发生马氏体相变及机械孪生，形成大量纳米尺度的马氏体组织及孪晶亚结构，使金属得到强化。所制备出的材料具有双相，即奥氏体+马氏体组织及超细晶粒结构的钢材料，由于其特别的微观组织结构和超细晶粒，使其具有非常高的室温拉伸强度，最高达到 1850MPa，该强度已远高于用传统方法制备的相当晶粒尺寸的钢样品的抗拉强度；同时，该合金成分的钢种与不锈钢相似，使所制备材料的耐磨、耐腐蚀性能较强，能够满足其在海洋等腐蚀性环境使用的需要；种高强度的钢材料对迅速发展的汽车工业，建筑业，原子能工业，造船等新技术领域等高技术的发展具有重要价值。本成果授权发明专利 1 项。

新型磁性纳米材料的研发



图：制备的纳米 Fe_3O_4 粒子及其对有毒金属离子的吸附情况。

作为水污染的主要污染源之一，有毒重金属对人类生活及环境具有非常有害的影响。金属的提取及分离等过程均会因重金属或其化合物通过沉积或离子交换进入土壤、泥浆、水源而给环境造成严重污染。因重金属 Hg 污染环境而引起的水俣病就是

典型的案例之一。在有毒性的重金属中，Cr、Cu、Cd 及 Ni 对环境的毒害最大。与粗晶结构材料相比，磁性纳米材料具有许多不同于常规材料的独特效应，如量子尺寸效应、表面效应、小尺寸效应及宏观量子隧道效应等。磁性纳米 Fe_3O_4 粒子由于其极小的颗粒尺寸、生物相容性及铁磁特性在磁纪录、颜料、光催化、磁感应医学治疗（细胞分离、磁共振成像、视网膜切除、放射性治疗、药物定向输送）等领域得到广泛应用或引起关注。磁性纳米粒子的优异性能源于其尺寸效应或者较大的表面积，这说明通过控制纳米材料的晶体结构调整其性能非常重要。然而，迄今所制备的许多纳米粒子的平均粒径大约在 120~180 nm 之间，大于单个细胞所占据的空间（~50 nm）。因此，如何通过调整工艺制备尺寸分布范围窄的小粒径磁性 Fe_3O_4 纳米粒子具有重要意义，极富挑战性。

东北大学成功制备出具有高吸附能力的纳米晶体 Fe_3O_4 微粒为具有纳米级等轴晶结构的 Fe_3O_4 粉体材料，该样品的平均粒径为 8~25 nm。在室温下具有对废水中的有毒重金属离子具有非常高的吸附容量，可达到 34.93 mg/g，与目前文献所报道的数值，其吸附能力提高了 7 倍。该纳米晶体 Fe_3O_4 微粒具有平均粒径小、磁化强度高的特点，使得材料具有非常广泛的用途。因此，这种纳米 Fe_3O_4 粉体材料将对高密度磁带、集成电路的电磁波吸收、动态轴承密封、靶向药物、废水净化等领域的技术革新具有重要的推动作用。本成果授权发明专利 1 项。

具有形变诱导增塑效应的高强度—高塑性钢的开发

具有形变诱导增塑效应的高强度—高塑性钢用作汽车钢板可以减轻车重，降

低油耗，同时有较强的能量吸收能力，能够抵御撞击时的塑性变形，显著提高汽车的安全等级，具有明显的优越性。丁桦教授和唐正友副教授的研究团队根据材料在变形过程中的形变诱导增塑机制不同，先后开发了多种形变诱导相变增塑钢、形变诱导孪生增塑钢和形变诱导显微带增塑钢等先进高强塑性钢。根据最终组织的不同，开发的具有形变诱导增塑效应的高强塑性钢分为：（1）组织由铁素体、贝氏体和残余奥氏体组成的常规相变诱导塑性 (transformation induced plasticity, TRIP) 钢，强度级别为1000MPa；（2）组织由马氏体板条基体和分布在板条间的残余奥氏体（同时伴有复杂碳化物）组成的淬火分配 (quenching and partitioning, Q&P) 钢，常规的低碳Si-Mn钢经过此处理强度可得到1300MPa以上，并在此基础之上首次对Q-P处理后的低碳钢进行了空冷处理，得到强度1000MPa以上同时具有良好延伸率 (>25%) 的高强度钢；（3）由铁素体和奥氏体组成的中锰TRIP钢，经轧制和淬火-回火 (quenching-tempering, Q-T) 后晶粒细化显著，变形时TRIP效应明显，抗拉强度达到1000MPa以上，塑性优良（总延伸率>60%）；（4）同时具有相变增塑和孪生增塑 (twinning induced plasticity) 效应的高锰TRIP/TWIP钢，具有高的强度和良好的应变硬化能力；（5）添加Al的形变诱导显微带增塑 (microband induced plasticity) 效应复相钢，抗拉强度达到920MPa，延伸率为46.4%，减重效果明显。

研究过程中形成授权发明专利 2 项；发表学术论文 50 余篇，其中 SCI 检索 25 篇次。先后承担和参加国家自然科学基金和重点基金项目、“十二五”国家科技支撑计划项目子课题、教育部中央高校基本科研业务费和企业技术攻关项目十余项。

泡沫铝夹心结构材料的研究及应用

具有面板/芯层界面冶金结合效果的泡沫铝夹心结构材料，既在宏观上具有夹心结构特性，解决了单一泡沫铝强度较低、难于连接等问题，又具有极佳的比强度、比刚度及吸能能力。被认为是一种极具发展潜力的新型金属基复合材料，代表着多孔泡沫金属材料工程化应用的重要发展方向。

自 2005 年起，东北大学祖国胤等在多项国家、省、市纵向课题的支持下，开展了泡沫铝夹心结构材料制备技术及理论研究方面的系统性工作。提出了“轧

制复合-粉末冶金发泡”的短流程、近终成形技术路线，通过工程化中试试验，已制得规格可达 500mmX500mmX(15~30)mm 的高性能泡沫铝夹心结构板材，夹心结构界面结合强度高于 100MPa，三点抗弯强度高于 80MPa，吸能性达到 15J/cm³~30J/cm。通过与国内高速列车（图 1）、乘用车重点生产企业的技术合作与联合研发，有效拓展了新材料的应用领域。理论研究方面，创新性地应用同步辐射技术揭示了泡沫铝的粉末冶金发泡机理、攻克了泡沫铝/实体金属的高强度连接、碳纤维增强泡沫铝的界面润湿及均匀分散等难题，完成了大规格泡沫体凝固过程温度场、应力场模拟，分析了泡沫铝夹心结构材料应变率效应、各向异性的微观本质。初步实现了泡沫铝夹心结构材料的可控制备，建立了材料合金成分-组织结构-力学性能的有机联系。

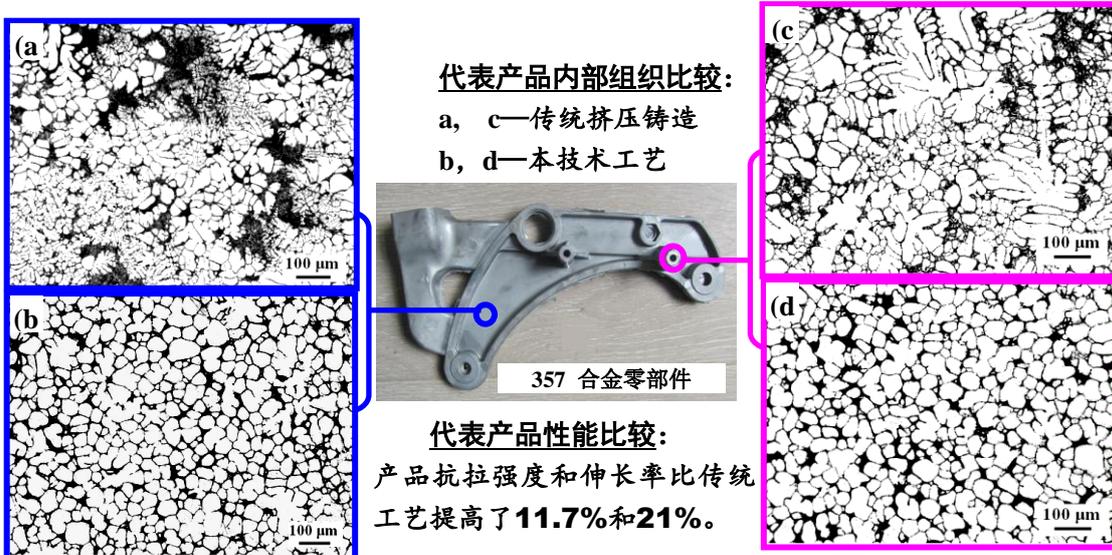
目前，课题组以泡沫金属材料的强韧化及结构化设计和制备为主要学术创新目标，主要致力于深入研究低速高动能、爆炸高速冲击条件下泡沫铝夹心结构材料的变形行为及失效机理，以期加速其在军事国防、航空航天等领域的应用进程。

本项成果获得包括 2 项国家自然科学基金等五项资助，获批 3 项发明专利。

金属剪切/振动熔体处理及低碳短流程加工技术

晶粒细化与金属流变成形是金属材料加工领域的共性技术。晶粒效果直接影响到金属加工产品的质量，开发紧凑型、低成本、低消耗、高效的晶粒细化与金属流变成形技术是该领域的重要发展趋势。技术路线是：将熔体净化后→制备细小球形固相和液相组成的半固态金属浆料→浆料压力加工成形。优点是：①短流程，节能环保效果显著；②易于生产复杂零件；③低成本；④产品质量优良。被誉为本世纪最具有应用前景的绿色加工技术。

以开发高效低成本、低能耗、适于大规模推广的高性能金属流变成形技术为目标，在国家自然科学基金及国家 863 计划项目资助下，开发了剪切/振动熔体处理及低碳短流程加工技术。基本原理：将流动剪切与电磁振动进行耦合，将熔融合金浇注到电磁振动的冷却斜坡通道中，熔融合金在重力作用下发生流动并与振动的斜坡表面发生作用，熔体以高形核率形核，并在碰撞剪切与振动条件下生长，实现了固相晶粒高效细化和球化，可以将浆料直接铸锭制备高性能铸坯，或进行压力加工，包括流变压铸、流变挤压和流变轧制，高效、低成本制备高质量的金属零部件、金属板材、管、线、型材。本技术采用自然重力场来细化和球化金属组织，突破了传统工艺中采用晶粒细化剂、外场搅拌的方法，改变了高能耗、高污染的组织细化工艺，具有低碳、低能耗、低成本、高效高质的突出优势，获辽宁省科技进步二等奖。



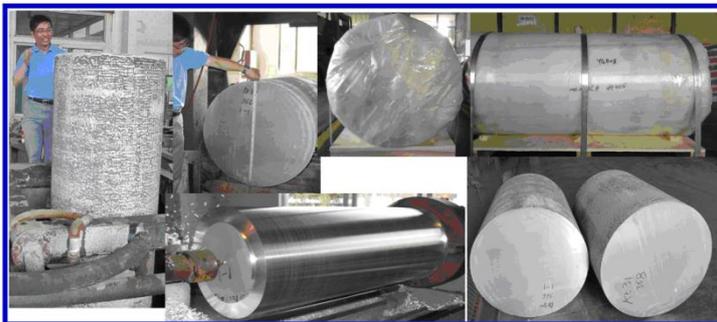
大规格、高质量镁合金锭坯制备技术

目前镁合金主要应用在铸造部件上，变形材应用十分有限。其中，变形坯料冶金质量差、成材率低以及无法制备高质量大规格坯料等是制约变形镁合金研究与发展的重要瓶颈。在此之前，我国变形镁合金坯料制备技术仍然停留在 60 年代从前苏联引进的技术水平上。东北大学镁合金课题组在国家“973”、“863”和“支撑计划”等支持下，经过十多年的潜心研究，在镁合金外场凝固基本理论与工艺技术上取得了突破，开发了大规格、高质量镁合金锭坯制备系列技术。理论上，明确了电磁场和超声等作用下镁合金凝固时的传热行为和凝固行为，掌握了镁合金外场铸造凝固组织的调控方法，技术上，实现了包括外场作用下的镁合金锭坯的半连续铸造。该成果具有显著细化凝固组织，提高组织均匀性，抑制合金元素的宏观偏析与裂纹，以及显著提高锭坯表面质量和提高锭坯加工材力学性能的技术效果。目前该成果已经获得 8 项国家发明专利，并在四个企业实现工业应用， $\Phi 100\sim 800\text{mm}$ 的 AZ31、AZ80 和 ZK60 合金圆锭和横截面小于 $400\text{mm}\times 1450\text{mm}$ 的镁合金大规格板坯实现批量生产，冶金质量和成材率达到世界先进水平，其中 $\Phi 800\text{mm}\times 3000\text{mm}$ 的圆锭和 $400\text{mm}\times 1450\text{mm}\times 3000\text{mm}$ 的镁合金板坯是目前世界上规格最大的变形镁合金坯料。

□ 在国内 4 个企业实现全系列镁合金 $\Phi 100\sim 800\text{mm}$ 圆坯的批量生产。



□ 制备出世界上规格最大的 $\Phi 800\text{mm}$ 的 AZ31、AZ80 和 ZK60 圆锭。



金属材料的表面纳米化和电磁处理

该成果主要研究了多种金属材料的表面纳米化和氮化过程；磁场对纳米材料的热稳定性、晶粒生长的影响规律和作用机理；磁场下纳米材料氮化反应的热力学与动力学；磁场下纳米材料中原子扩散和相变过程等。

科技创新贡献：

发现表面纳米化对不锈钢、38CrMoAl、42CrMo、40Cr 和 20CrMnTi 等钢的气体氮化、离子氮化和离子氮碳共渗过程有明显的催渗作用，可以大幅度降低处理温度，减小热变形，缩短处理时间，总结确定了金属工件表面纳米化低温氮化的工艺准则。

发现在“强磁场”和“纳米化”双促进条件下制备纳米氮化铁，氮化反应可以在低温条件下缓慢进行（200 °C 左右，30h~60h），这样的氮化有利于巨磁性的 α'' -Fe₁₆N₂ 相的形成，抑制其它氮化铁（比如 γ' -Fe₄N 等）的生成，所制备的纳米氮化铁中 α'' -Fe₁₆N₂ 的含量为 65%~90%。

发现磁场可以提高纳米钛合金的热稳定性，提出采用表面纳米化（纳米助渗）和强磁场技术（抑制纳米晶粒长大）相结合的方法可大幅度降低钛合金氮化温度，实现低温快速氮化，并获得高硬度、高耐磨的纳米结构氮化钛层。

国内外影响的主要佐证

上述成果获得 2009 年辽宁省科学技术一等奖（与中国科学院金属研究所合作申报，个人排名第五）；获得国家发明专利 4 项；在国际学术期刊和学术会议上发表英文论文 60 余篇。

强磁场材料科学的基础研究

本项目是材料科学与强磁场科学、电磁流体力学、冶金学等若干其它技术科学的交叉领域。主要研究包括强磁场作用下流体的运动行为、流体中溶质元素或第二相（晶出相、添加相、夹杂物）颗粒的迁移行为；强磁场下的二元共晶合金相图；纯金属和合金凝固行为演化；合金凝固过程中第二相迁移行为对组织演化的影响；合金凝固过程中的晶体取向与组织排列；合金热处理组织演化；合金组织演化对材料磁性能的影响；强磁场和其它电磁场共同作用下电磁超声波的形成及其对组织细化的影响等。

本项目研究特点为：（1）在高温下，系统地研究强磁场的“强洛伦兹力”、“磁化力”和“强磁化效应”对材料制备过程中的合金溶体流动、传热、传质现象、晶体形核和结晶生长的热力学与动力学条件、凝固行为与组织演化、第二相迁移、固态相变、材料组织性能及表征等所产生的作用和规律。（2）以特定的合金材料为对象，探索强磁场与其它形式磁场或电场的复合应用，研究提高材料性能和新制备方法的途径。（3）通过在强磁场作用下，对材料制备相关基本科学问题的研究，为“强磁场材料科学”理论体系的形成和完善提供基础。2010 年

获辽宁省自然科学二等奖。

复吹转炉高效脱磷技术

磷是绝大多数钢种中的有害元素。随着科学技术的迅速发展，用户对钢材质量的要求不断提高。对于优质钢，除了要求极低的硫含量以外，还要求尽量降低钢中的磷含量。在冶炼优质高碳钢时，实现低磷、高碳出钢的工艺难度非常大。采用传统的双渣低拉碳工艺进行生产优质高碳钢时，转炉出钢磷含量波动大，出钢碳含量低，出钢氧含量较高。由此造成钢水终点氧化性高、脱氧合金元素收得率低、增碳剂耗量高等工艺问题。为此，武钢（集团）公司和东北大学共同开展“顶底复吹转炉高效脱磷技术”的联合攻关，通过脱磷反应高温实验、转炉氧枪结构和顶底复吹工艺优化及现场转炉高效脱磷高拉碳操作工艺优化的吹炼试验等一系列研究，开发出在一座转炉内，采用单渣高效脱磷高拉碳吹炼工艺，实现了冶炼优质高碳钢的低磷含量、高拉碳出钢转炉冶炼新技术。

采用顶底复吹转炉高效脱磷技术后，冶炼优质高碳钢，转炉出钢平均磷含量由 0.015% 下降为 0.011%，且磷含量 $\leq 0.01\%$ 的炉数约占 36%，出钢平均碳含量由 0.097% 提高到 0.44%，终点氧含量从 380-520ppm 降低到 72-120ppm。这一新技术的采用，使转炉出钢磷含量降低，提高了钢的质量；出钢碳含量显著提高，冶炼优质高碳钢所需的增碳剂用量大幅下降，同时可以节约大量氧气，减少碳氧化产生的一氧化碳气体的体积，最终减少二氧化碳的排放量，对于节能降耗，减少排放，保护环境，具有十分重要的意义；终点钢水氧化性降低，合金元素收得率提高，转炉炼钢成本大幅下降；该技术可以使转炉炼钢-精炼-连铸生产流程节奏稳定且工艺顺行。

武钢应用该技术已用于生产重轨钢、SWRH82B、轴承钢、弹簧钢、70 系列钢和其它钢绞线用钢。该技术的实施，取得了显著的经济效益和社会效益。

该项目于 2009 年获得湖北省科技进步二等奖。

洁净钢冶炼工艺理论与应用

近年来，围绕这一学科前沿方向先后承担国家、省市和企业合作课题 30 多项，对洁净钢生产的各个环节和整体优化进行了系统的理论和应用研究，取得多项专利、获得了各种科技奖励 10 多项，取得了以下创新性成果：

(1) 铁水预处理理论与应用。对国内首次采用的 Mg+CaO 复合喷吹脱硫新技术进行了理论计算和试验研究。提出了复合喷吹脱硫反应的机理和最佳的 CaO /Mg 比和相关喷吹参数，并用改进的 BP 网络算法建立了能精确预报铁水终点硫含量的计算模型，并在国内率先研制成功了高流动性钝化石灰粉剂，获得“一种顶底复吹真空感应炉”等国家发明专利。

其成果在宝钢等 30 多家企业得到应用，获沈阳市和辽宁省科技进步二等奖和三等奖。

(2) 钢水精炼理论与应用。依托国家攻关和企业合作项目，系统研究了 LF/VD 精炼过程中一系列基础理论问题。开发成功了 LF 炉精炼渣和优化供电技术、以 X70 管线钢为代表的超低硫钢冶炼技术、以轴承钢为代表的超低氧钢精炼技术、VD 炉钢水温度预报技术、以帘线钢为代表的夹杂物控制技术、LF 炉工艺控制模型等创新技术，获得“一种直流电弧感应炉”等国家发明专利。结合国家技术创新项目在宝钢率先开发成功了 RH 装置内喷粉脱硫模型和 RH 精炼过程预熔渣深脱硫技术，解决了超低碳钢的深脱硫难题。这些技术在抚钢、宝钢、梅钢、南钢、本钢和武钢等企业得到成功应用。

连铸机凝固末端动态轻压下技术

连铸坯的中心偏析和疏松已严重制约我国高端产品的生产。消除或减少中心偏析和中心疏松的有效措施之一是对通过在连铸坯液芯末端附近施加压力产生一定的压下量来补偿铸坯的凝固收缩量即所谓的轻压下技术。该技术已成为现代连铸水平的一个标志。国外掌握并成功地应用该技术的只有奥钢联、达涅利等少数几家公司。朱苗勇教授的研究团队突破了旨在消除连铸坯中心偏析和疏松的凝固末端轻压下理论，首次提出了确定轻压下的压下量、压下区间、压下效率的理论模型，自主开发了动态轻压下工艺控制核心技术，形成了具有自主知识产权的动态轻压下工艺控制核心技术，并上海宝钢集团梅钢 2[#]板坯连铸机实施成功应用。李正邦院士为组长的验收专家组认为“自主开发动态轻压下核心工艺控制模型、过程控制系统及生产应用成果属国内首创，达到国际先进水平，自主开发的板坯连铸动态轻压下技术，可推广应用于国内外新建板坯连铸机及现有板坯连铸机生产线的升级和改造，经济效益和社会效益显著”。中国金属学会名誉理事长殷瑞钰院士在 2008 年世界金属导报“新世纪中国连铸技术发展取得长足进步”一文中给予了充分肯定：“东北大学和宝钢梅山钢厂共同开发动态轻压下技术取得了理想效果。”自主研究开发的大方坯连铸机动态轻压下核心工艺控制模型和过程控制系统已分别于 2008 年 1 月在攀钢和 2009 年 2 月邢钢的自主设计制造的大方坯连铸机上正式投用，为攀钢的高速轨、车轴和邢钢的轴承、弹簧等高端产品生产奠定了坚实基础。2010-2012 年间，研究成果相继在天钢、湘钢、涟钢、攀钢西昌基地和首钢板坯连铸机上推广实施。授权的相关发明专利 11 项。该成果于 2007 年和 2008 年获中国冶金科学技术二等奖和四川省科技进步二等奖。

大方坯连铸关键工艺与装备技术国产化

提高连铸坯轧制成材的压缩比有利于提高钢产品性能，满足交通运输、能源石化、工程

机械等行业的发展需求。大方坯连铸能替代传统模铸，生产对轧制压缩比要求严格的铸坯，其金属收得率可提高 10% 以上，吨钢能耗可降低 25% 以上，且具有成分均匀稳定、表面质量良好等优点，能显著提高大规格铸坯产品的性能。大方坯连铸坯主要用于生产重轨钢、钻铤钢、车轴钢、帘线钢、轴承钢等高品质合金钢，要求具有十分优异的表面质量和内部质量。然而，由于连铸坯断面较大，碳和合金含量较高，铸坯易出现裂纹、凹陷、鼓肚、中心偏析与疏松等缺陷，严重制约了后继轧材质量。朱苗勇教授的研究团队与国内的企业、设计院合作，以高品质大方坯连铸生产为目标，研究开发出一系列具有自主知识产权的高效大方坯连铸工艺及控制集成技术。研究成果相继应用于攀钢 2 号(断面尺寸 360mm×450mm)和邢钢 5 号、7 号(断面尺寸均为 280mm×325mm)国产大方坯连铸机，开发建立了列车车轴钢、大口径钻铤钢、高强度乙字钢、轮胎子午线用帘线钢等一系列优质合金钢大方坯连铸生产工艺，取得了显著的经济效益与社会效益。攀钢 2009-2011 年，生产铸坯平均合格率达到 99.89%，表面无清理率平均达到 99.34%；铸坯低倍缺陷评级均≤1.0 级比例达到 99.92%，中心碳偏析指数控制在 1.01-1.05。邢钢 2009-2011 年，生产铸坯平均合格率达到 99.87%，铸坯低倍缺陷评级均≤1.0 级比例达到 99.22%，中心碳偏析指数均控制在 1.10 以内，达到国际领先水平。2009-2011 年为攀钢与邢钢创造经济效益 7.65 亿元。

研究过程中形成授权发明专利 19 项；发表学术论文 68 篇，其中 SCI 检索 13 篇次。成果 2009 年获中国冶金科学技术一等奖。

转炉连铸大方坯生产高质量特殊钢工艺技术研究

特殊钢生产主要有转炉和电炉两种流程。对比电炉冶炼流程，采用转炉配精炼连铸生产特殊钢流程生产率高，钢材性能好，具有明显的技术和成本优势。在多年转炉冶炼特殊钢的基础上，本钢于 2006 年投产一台断面尺寸 350 mm×470 mm 四流矩形坯连铸机，以本钢纯净铁水为主原料，采用转炉+LF+RH+矩形坯连铸工艺生产高质量特殊钢。

在辽宁省科技厅的支持下，本钢与东北大学经过几年的科研创新研发，使得这条生产线形成了稳定的批量生产能力。

项目研究开发了多项关键技术，主要技术指标达到：轴承钢平均全氧含量小于 8×10^{-6} ，Ti 小于 25×10^{-6} ，Ca 小于 10×10^{-6} 。齿轮钢平均氧含量小于 15×10^{-6} ，淬透带值波动小于 4 HRC。

共开发钢种 51 个，重点品种有曲轴钢、轴承钢、齿轮钢、石油用钢和气瓶用钢等，从 2009 年 12 月至 2010 年 11 月已生产品种钢材总量约为 265455.25 吨，年创造经济效益达到 1.13 亿元，经济效益显著。对满足国家特殊钢需求和科技进步做出了贡献，具有显著的社会效益。2011 年获辽宁省科学技术二等奖。

转炉流程生产高品质齿轮钢

本项目产品由本溪钢铁集团公司和东北大学联合开发，采用铁水预处理→转炉→LF→RH→连铸→连轧工艺路线，创新开发了转炉超纯净齿轮钢生产工艺技术，齿轮钢低氧控制技术，成分动态控制及窄成分控制技术，矩形坯电磁搅拌数值模拟技术，窄淬透性带控制技术，齿轮钢控轧控冷技术，制定了合理的加热工艺和轧制变形制度，解决了转炉流程生产齿轮钢脱磷负荷大、化学成分均匀性稳定性差、铸坯偏析缩孔严重的难题，克服了电炉生产冶炼时间长、成本高的缺点，开发生产了 CrMo 系、CrMnMo 系、CrNiMo 系、MnCr 系以及传统的 CrMnTi 系列等多个系列的高档齿轮钢品种。齿轮钢平均全氧含量小于 11.5×10^{-6} ，淬透带值波动不大于 4HRC，两项衡量齿轮钢品质的关键技术指标都达到了国内领先水平。

产品广泛用于一汽、二汽、陕西法士特齿轮有限责任公司、北京齿轮总厂、哈尔滨一汽变速箱股份有限公司、株洲齿轮有限责任公司、鞍山市丰林精密锻压件有限公司等知名企业，主要用于加工制造重载汽车变速箱齿轮、后桥主、从动圆锥齿轮，产品质量得到了普遍的认可和好评。大大提高齿轮配件的使用寿命，从而有效减少资源消耗。

高效连铸结晶器冶金学理论与技术

结晶器是连铸机的核心，对连铸的顺行和连铸坯的质量具有决定性作用。朱苗勇教授的研究团队承担了国家杰出青年科学基金项目，近年在高效连铸的结晶器冶金学理论（结晶器内多相流行为、铜板与凝固坯壳的热/力学行为、结晶器振动等）研究获得重要进展：充分考虑电磁发生器的结构和铜板的屏蔽效应，实现了结晶器内磁场、流场、温度场、气泡及夹杂物等多场耦合的数值模拟，揭示了钢/渣界面行为特征，阐明了反映钢渣卷混的特征值与弯月面波高间的内在关系；提出了实时确定结晶器热流密度的新方法，建立了描述坯壳生长的热-力学模型，揭示了熔渣状态及厚度、气隙、界面热流、坯壳生长等在结晶器内的分布规律，提出了“宽面角部楔形锥度与窄面角部楔形曲面锥度组合”的结晶器铜板新结构；建立了伴随 $\delta-\gamma$ 相变的钢凝固过程两相区溶质微观偏析模型，揭示了 C、Si、Mn、P 和 S 等元素的微观偏析规律及对钢凝固前沿裂纹敏感性影响规律；提出了连铸坯表面裂纹起源于临近结晶器振动负滑脱段的正滑脱时段的新观点，以及液态渣抽吸进入渣道主要发生于结晶器的振动负滑脱期的液体润滑新机理。研究成果对微合金钢连铸的裂纹控制和连铸的高效化生产提供了指导。部分研究结果发表 *ISIJ International*、《金属学报》等刊物，有 26 篇论文被 SCI 收录，公开和授权的国家发明专利 9 项。“高拉速连铸结晶器非正弦振动理论与参数优化研究” 博士论文 2010 年获全国优秀博士学位论文提名奖。

节镍型不锈钢冶金理论与应用

以氮代镍是不锈钢冶金的一项重大技术。利用廉价的气体氮代替昂贵的金属镍，不仅节约了资源，而且可以制备性能优异的低成本不锈钢，取得了以下理论和技术创新：

(1) 建立了更加符合实际的高氮不锈钢在液相、 δ 相和 γ 相中氮溶解度的计算模型，制备出了氮含量达 0.9% 以上的氮元素均匀分布、结构致密的高氮无镍奥氏体不锈钢材料，使我国高氮钢制备技术跨入国际先进行列，获得“一种加压电渣炉冶炼高氮钢的方法”等国家发明专利。

(2) 建立了不锈钢精炼过程气体渗氮的动力学模型，为氮的气相合金化工艺提供了理论指导。提出了在 LTS（吹氩站）精确控氮的新思路，并开发成功了 AOD、LTS、VOD 和 LF 各精炼过程氮的在线精确控制技术。该成果在宝钢不锈钢公司得到成功应用，创造年经济效益 6000 多万元，获得“钢包炉用氮气进行氮合金化工艺”等国家发明专利。2010、2011 年该成果分别获得第十九届全国发明展览会金奖和第二十三届上海市优秀发明金奖。

大断面电渣连铸技术

电渣冶金是生产高品质特殊钢的重要方法，其产品在空中、航空、海洋、石油、电力和军工等领域有广泛用途。多年来，在电渣冶金工艺和理论方面做了大量研究，主要创新成果如下：

(1) 电渣连铸理论与应用。传统的电渣重熔理论认为，为了保证钢锭的结晶质量，以熔化速度与重熔锭直径之比不超过 1 的原则来控制。作为我国首位获得“IEC1906”国际标准大奖的姜周华教授提出了熔化和凝固的热过程互相分离的创新思想，使渣/金界面熔池温度接近液相线温度，这样在保持相同熔池深度的情况下，可大幅度提高电极的熔化速度。这是电渣重熔理论的重大突破。采用导电结晶器技术成功地将这一思想变成现实。同时，将连铸技术引入电渣重熔，开发成功了电渣连铸技术，并获得了“一种液态电渣连铸渣池液面的控制装置及方法”等国家发明专利。该成果已在兴澄特钢成功应用，用于生产断面为 300×340mm 和 Φ 600mm，长度超过 6000mm 大型合金钢铸坯，并推广应用于邢钢和攀长钢等企业，目前最大断面到达 Φ 1100mm。

(2) 电渣重熔渣系和凝固理论也取得了重大突破。首次测定了电渣重熔渣系的氢渗透率，提出了降低钢中氢含量的理论和方法，开发了低渗透率节能型低氟渣系，应用后取得了吨钢节电 200kWh 以上和氟的排放明显减少、钢中基本不增氢等显著效果，并获得了“一种电渣液态浇注用渣料”等国家专利。开发了基于凝固模型控制的智能化电渣炉成套设备和工艺，有 60 多台成套设备分别推广到宝钢、本钢、太钢、冶钢、中原特钢和中钢邢机等 20 多家大型特钢企业。

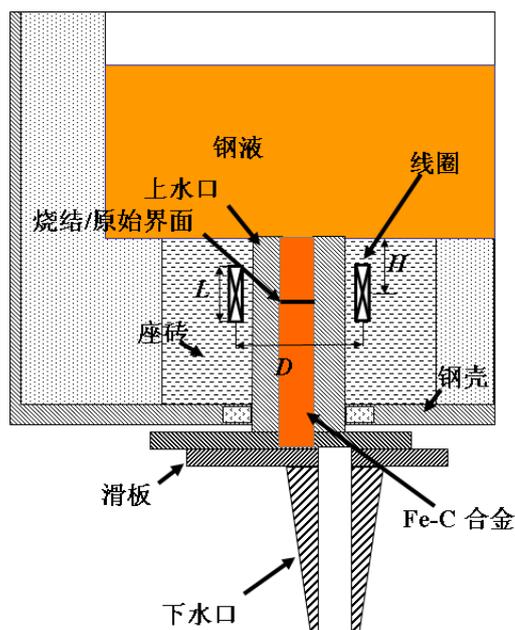
(3) 在国内首次开发成功了保护气氛电渣炉和加压电渣炉，目前正在国内数家特钢企业推广应用。在舞钢开发成功了世界上最大断面（960×2000mm）特大型板坯电渣炉，采用低频电源、双极串联和结晶器移动进行抽锭等新技术，并获得“一种板坯电渣炉”、“在T形结晶器中采用双极串联电渣重熔的固态启动方法”等国家发明专利。2009年舞钢再推广2台，2011年推广至武钢集团鄂钢公司。该技术为我国生产高性能特厚板，如大飞机模锻用模具钢、加氢反应器用特厚钢板和海洋平台用高强度齿条钢等提供了设备和技术保障，其产品填补了国内空白。

利用电磁感应加热的新型钢包出钢技术

在钢的连铸生产中，目前普遍采用滑动水口系统完成钢包出钢过程。在钢水注入钢包的初期，填入水口的引流砂的上表面迅速烧结而阻碍了熔融钢水的渗透，烧结层在下部物料的支持下能够承受钢水的静压力而不破坏；与此同时，物料的烧结速度变慢，烧结层保持在一定的厚度。当钢包开浇时，拉开滑动水口，下部未烧结的引流砂因自重下落，烧结层失去支撑，在钢液静压力的作用下，烧结层破碎，实现顺利开浇。目前的自动开浇率一般在90—98%之间。另一方面，引流砂的使用引入了对钢液有害的夹杂物，这些夹杂物在之后的工艺中很难去除，并会在中间包中被钢液中的[Al]还原为 Al_2O_3 夹杂，存在于钢液中，并最终成为钢材成品中的有害夹杂物影响钢材的质量和性能，为制造高级洁净钢造成难以克服的困难。而且，现有的连铸工艺中大量使用的硅质和铬质引流砂，都含有数量相当的 Cr_2O_3 ，会形成大量的6价Cr化合物，对环境会造成严重的污染。

钢包电磁出钢技术是钢坯连铸工序的一种新技术设想，其基本原理是用与钢液成分相同或相近的Fe-C合金代替传统引流砂，在钢包出钢过程中通过电磁感应加热，使钢包底部上水口的Fe-C合金快速全部或部分迅速熔化，从而实现自动出钢。该工艺的原理图如右图所示，当钢包空包时，在上水口中填入Fe-C合金来替代传统的出钢用引流砂，在上水口外侧布置感应加热线圈，当钢包置于浇注位时，给感应加热线圈通以高频交流电，Fe-C合金将在感应热的作用下发生软化直到开始熔化；此时，拉开滑板，钢液将随着全部或部分熔化的Fe-C合金流入中间包中，顺利完成出钢。

应用电磁出钢方法有如下冶金效果：(1) 可以提高钢包的自动开浇率至100%；(2) 显著提高钢水的洁净度，提高钢种等级或生产高级洁净钢；(3) 减少浸入式水口的絮流，增加连浇炉数；



(4) 避免使用引流砂形成有毒的六价 Cr，对环境造成污染；

(5) 彻底取代引流砂，实现节能减排，降低企业成本。

钢包电磁出钢技术是国内外首创，已获得国家发明专利两项并发表论文多篇，目前已完成实验室研究和工业化生产实验。该技术有望成为新一代的钢铁冶金新技术，创造企业和社会创造巨大的经济效益和社会效益。

冶金二次资源综合利用新技术

我国是世界第一产钢大国，2012 年粗钢产量达 7.17 亿吨。与产量相对应，冶金废弃物的排放也日益剧增。冶金炉渣富含大量有价成分，是一类典型的二次资源，随着一次资源濒临枯竭，开发冶金资源综合利用新技术对钢铁工业走可持续发展道路具有重大的现实意义。含硫炉渣是钢铁冶金流程内排出的一类固体废弃物，主要包括高炉渣、铁水预处理渣、钢水二次精炼炉渣。关于高炉渣的利用已经非常成熟，但后者显然未得到有效利用，这主要受制于炉渣中含有大量硫元素。为此，我们开发了含硫渣弱氧化性快速焙烧脱硫新工艺，其过程如下：将炉渣细粉在氧分压 0.08~0.15atm 弱氧化性气氛、以及高于 1100℃ 温度中焙烧，使有害成分 CaS 相转化生成有效成分 CaO。本技术可以使回收含硫精炼废渣直接用于利用价值高的精炼渣回用，每吨较现有技术应用可增加附加值 800 元以上。焙烧产物与其它组分配合制成新的脱硫剂，可实现 60% 的钢水脱硫率，实现了冶金废渣的循环使用，显著降低了炼钢石灰消耗，该技术已申请国家发明专利（专利号: ZL 2009 1 0264646.X）。针对转炉钢渣中含有大量铁、磷等有价值组元，我们以熔融的生铁水为原料，将转炉脱磷渣倒入生铁水中，再加入焦炭粉和石英砂；对上述配制的物料进行吹氧升温，同时底部通入氩气，反应温度为 1530~1550℃，反应时间为 20~30min，将获得的炉渣去除，获得中间生铁水；以中间生铁水为原料，按上述步骤重新加料并还原 1~2 次。本发明的方法充分发挥了转炉脱磷渣的最大效用价值，同时获得了一种低品位磷铁产品，炉渣又可循环使用，除磷后的炉渣经过高温预熔，氧化铁含量极低，循环利用时成渣速度快，应用范围广泛。经多次还原富集，铁水中磷含量可达 5~8%，可作为磷铁合金应用于炼钢合金化。对年产 1000 万吨的钢铁企业，仅减少磷铁采购一项可节约成本 500 万元/年。该技术已申请国家发明专利（专利号: ZL 2010 1 0200005.0）。

炼钢中试设备和成套中试生产线的研制

率先开发了具有自主知识产权的多种炼钢中试设备和成套中试生产线，在国内多家大型

钢铁企业技术中心推广应用，提高了我国钢铁企业的自主创新能力

根据国内钢铁企业新产品新工艺技术开发的迫切需要，进行了炼钢中试设备和中试生产线的研发。获得了“一种感应炉底吹供气元件蚀损检测装置”等多项专利。为宝钢技术中心设计开发了 1 吨模拟试验转炉、为宝钢不锈钢分公司技术中心设计研制了炼钢中试生产线，主要设备包括 200kg 多功能非真空感应炉（带顶底复吹装置可模拟复吹转炉和 AOD、带直流电弧加热可模拟 LF 炉）、200kg 多功能真空感应炉（带顶底复吹装置模拟 VD 和 VOD）、喷粉设备、全套水模设备（带计算机自动检测与数据处理）。为马钢技术中心实验工厂设计研制了炼钢中试生产线，主要设备包括 200kg 多功能真空感应炉、2 吨直流 LF 炉和 2 吨电渣炉炉成套设备等。目前，这些成果正在武钢、韶钢、唐钢、太钢等企业正在进一步推广。另外，还开发了炉渣物性系列检测设备（熔化特性、结晶温度、粘度、表面张力、导热系数、挥发性等）、多功能高温渣金反应实验炉、铁水定硅仪、焦碳水分测定仪和钢铁冶金水模实验平台等一系列检测和实验设备，在 20 多家企业和研究单位推广应用。这些研究设备的开发成功大大增强了这些钢铁企业的研发能力。

金属的分离提取与净化

随着镍钴生产能力日益扩大，镍钴资源的供给呈现矿石品位低、氧化镁含量高、成分复杂且不稳定的态势。如何高效率、低成本、无污染处理复杂镍钴资源已成为世界性难题。以金川集团作为牵头单位，金川集团有限公司、中国恩菲工程技术有限公司、昆明理工大学、北京矿冶研究总院、中南大学、东北大学、西北矿冶研究院等多家科研院所及大学协同攻关，联合作战，针对复杂难处理镍钴资源高效利用的问题进行了长达 20 年的持续技术创新，重点开发了具有自主知识产权和金川独有的闪速炉-顶吹炉-自热炉三炉共用的镍钴火法冶炼联合新工艺及其配套的多项关键技术。该技术的主要创新点包括：①在对复杂难处理镍钴资源进行降镁选择性磨矿-浮选工艺处理的基础上，构建了闪速炉-顶吹炉-自热炉三炉共用的镍钴火法冶炼联合新工艺。②首次发现了金川矿床侧列尖灭再现成矿规律，新探明镍、铜金属量分别为 50 万吨和 30 万吨；研究并建立了铜镍矿级差品位指标体系，实现了盲、残及低品位高氧化镁镍矿资源化开发。首次开发了短柱形铸铁段磨矿介质的选择性磨矿技术，研发了高镁难选硫化铜镍矿的高效浮选药剂，实现了高镁铜镍矿的降镁增效。③发展了复杂非金属化高镍硫原料在富氧高压条件下有价金属的选择性浸出理论体系，实现了非金属化高镍硫原料浸出-萃取-电积工艺的大规模工程化应用，开发了复杂镍原料浸出-净化-萃取-脱除油类杂质生产高品质镍盐技术。④在国内率先开发了全氯化介质不溶阳极电积

钴技术和喷雾热解法生产电池级三氧化二钴技术，解决了阳极材料腐蚀、氯气捕集问题，使我国的钴精炼技术达到了国际先进水平。申请专利 36 项，授权 14 项。复杂难处理镍钴资源高效利用关键技术可以高效处理氧化镁含量高、镍钴品位低的复杂原料，为全球的复杂难处理镍钴资源提供了经济、节能、清洁的工艺技术，对推动镍钴冶炼行业的技术进步具有重大意义，具有广阔的推广应用前景。2012 年，以“复杂难处理镍、钴金属高效利用关键技术与应用”为题的该项技术得到了国家科学技术进步一等奖的奖励。申勇峰副教授为子课题《非金属化高镍钨加压浸出-电积镍技术的研究》的主要完成人，对创新点③有重要贡献。采用全湿法两段逆流浸出技术从富钴冰铜中回收金属镍和钴，两种金属的提取率均大于 96%，浸出残渣中 $Cu/Ni > 45$ ，有利于提取金属 Cu。该工艺显著降低了金川集团原有工艺中因火法处理而产生的能耗及环境污染。

大型铝电解连续稳定运行工艺技术及装备开发

本项目围绕大型铝电解槽技术工业化过程的核心技术难题,进行了铝电解槽电磁稳定性和铝电解系列连续稳定运行工艺技术的深度开发:

1 本项目首创了大型铝电解槽电流转移和能量转移的理论,发明了“铝电解系列全电流不停电停、开槽方法、技术与成套设备”,解决了铝电解单台槽检修必须系列停产的技术难题,改变了传统工业铝电解系列电流频繁大幅度波动的工艺运行模式。

2 本项目开发了电磁模拟和磁流体特性数学模型和仿真技术,采用“全槽电流场模型和有效空间铁磁物质模型”,建立了大型铝电解槽“电流场-母线配置-磁流体”耦合模型和仿真系统;发明了“铝电解槽阴极电流在线调整方法和装置”、“高度和位置可调整的铝电解槽母线配置方法”、“端部非对称强补偿,底部分散式弱补偿”母线装置;发明了可优化电流场和延长槽寿命的“可压缩阴极内衬结构”,实现了大型铝电解工艺过程优化和长周期高效、稳定运行。

3 采用电磁模拟和仿真技术,首创了“区域电磁场调节控制原理”,发明了“大型铝电解槽不停电焊接的方法”,成功实现了系列全电流状态下大修槽阴极钢棒的焊接,彻底消除了电流大幅波动对铝电解生产的影响。

本项目技术发明解决了大型铝电解槽工程领域的关键技术难题,改变了传统的铝电解生产工艺运行模式,为我国大型铝电解技术工业化推广提供了技术支撑,达到国际领先水平,主要技术成果在国内外广泛应用。

本项目推广应用节能环保和经济效益显著。关键技术和装备在新、老电解铝企业推广应用率达到 90%以上,更已成为新建电解铝企业必备的技术和装备。近 3 年累计节能达到 77.45 亿 kWh,相当于节约标准煤 247.84 万吨,减少 CO 排放 659.25 万吨,同时增加原铝

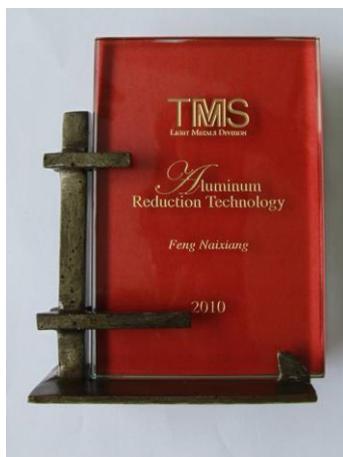
产量 52.98 万吨，经济效益 59.27 亿元。2012 年国家发明二等奖。

高效节能新型阴极结构电解槽铝电解理论与技术

铝电解能耗一直居高不下，开展大幅度降低铝电解生产电能消耗的理论基础与技术研究是国家节能减排的重大需求。冯乃祥教授等在国家自然科学基金（批准号：50274031，50934005）等资助下，针对铝电解槽的阴极在铝电解生产过程中的行为和阴极结构特征对铝电解生产过程中的阴极反应、电极过程、电流效率影响，以及阴极破损机理、铝液中电场、磁场、电磁流体动力学过程进行系统研究。

在此研究基础上，开发出了具有高效节能功能的新型阴极结构铝电解槽，目前，该技术已在重庆天泰铝业、华东铝业、浙川铝业、中孚实业、中电投所属铝业公司、百色银海、来宾银海、东方希望、四川启明星、神火集团、南山集团、魏桥铝业、晟通集团、丹江口铝业、青海百河铝业、广元启明星、Hydro 旗下在挪威与德国的铝厂、巴西 Albras、巴西 CBA 等铝厂推广应用，直流电耗降低至 12000 kWh/t-Al 水平，可节电 1000 kWh/t-Al 左右，吨铝成本降低 500 元左右。若全国铝电解槽均使用该技术，可实现节电 180 亿 kWh/年，相对于节省标煤 630 万 t/年，减排 CO₂ 气体 1500 万 t/年。中国有色金属工业协会十二五重点研发及推广技术，国家发改委将该技术列入《国家重点节能技术推广目录》和节能技术改造财政奖励项目范围，工信部与财政部列为国家重大科技成果转化重点项目。

“高效节能新型阴极结构电解槽铝电解技术”获中国有色金属工业科学技术奖一等奖（2010 年）。该技术在重庆天泰铝业、浙江华东铝业的实施入选教育部“2008-2010 年度中国高校产学研合作十大优秀案例”。目前已获授权专利 6 项，核心专利“一种异形阴极碳块结构铝电解槽”获得中国专利奖（2010 年）；获 TMS 轻金属学科领域科学技术奖（LIGHT METALS SUBJECT AWARD）（2011 年），得到国际铝工业界的承认。



高锂盐低温铝电解成套技术

铝电解是高耗能产业，低温铝电解是实现铝电解节能的重要技术。东北大学熔盐电解课题组多年来一直从事高锂盐铝电解质的物理化学性质、电极过程研究、氧化铝溶解行为与分布技术研究等基础研究工作，并在合作电解铝厂进行工业试验。经过多年的研究与技术沉淀，获得了电解质的初晶温度为 895-915℃、电解质的电导率为 2.1-2.5S/cm、电解质中氧化铝的溶解度大于 4wt%的富集锂盐低温电解质体系，成功开发了适应我国国情的低温铝电解成套技术，并最终实现了我国大型铝电解槽在 925℃-930℃的高效稳定运行。

通过低温铝电解技术的开发与应用，实现吨铝能耗较全国平均水平降低 1000kWh 以上，如果考虑煤电生产过程中的温室气体和二氧化硫代减排，具有重大的生态效益及环境效益，符合国家节能减排、环境保护的相关政策，对我国铝工业的发展具有重要的意义。

五年来，熔盐电解课题组围绕本技术获得国家科技支撑计划课题一项，企业项目三项，此外，本技术衍生的成果“富集锂盐低温电解质体系在 400kA 铝电解系列上的应用”于 2012 年通过国家科学技术成果鉴定，鉴定结果为“国际领先水平”；同时，课题组围绕该技术授权发明专利 4 项，制定企业标准 2 项，并研制具有自主知识产权的新设备 2 套。

利用钛白废酸无焙烧直接加压酸浸提钒短流程新工艺

2010 年我国钒产量已达到 7 万吨以上，增幅达 100%，其中，以钒渣为原料生产的钒及钒制品占总产量的 70%左右。目前，我国的钒生产主要使用的方法是碱金属-碱土金属烧结法，该类生产方法存在着添加剂用量过大、废气排放量大、能耗较高。每生产 1 吨五氧化二钒预烧结段消耗添加剂 1.5 吨以上，产生有毒或温室气体 450m³以上，烧结成本高达 1 万元以上。另一方面，每生产 1 吨钛白粉就会产生 8~10 吨 20%的废酸，处理难度大，成本高。这种高能耗、高排放的生产方法已无法满足国家在节能减排、循环经济等方面的要求。针对以上问题，东北大学提出采用钛白废酸无焙烧直接加压酸浸技术提钒，并对该过程涉及的浸出、萃取分离等过程进行了系统的研究，该技术可同时综合回收稀散金属钒及其他有价元素，以及钛白废酸的综合利用，实现了无废冶炼。符合我国当前节能减排的发展主题，也是钒、钛冶金划时代的革新技术。目前该技术已获国家“863”计划资助，申报发明专利多项。

利用非传统铝资源双循环法氧化铝清洁生产新工艺

随着我国氧化铝生产规模及技术水平的不断提高，使用非传统铝土矿资源生产氧化铝的方法受到学术界和工业界的广泛关注。针对这一问题，东北大学经多年研究提出了无废物的

排放的生态化酸法生产氧化铝的新思路，即盐酸加压浸出-浸出液萃取分离-氯化铝溶液直接热解生产氧化铝。克服了现有酸法技术氯化铝向氧化铝转化过程复杂及酸无法循环利用的缺点。该技术的优势在于：（1）以提取稀有金属为目的，有效分步提取广西高铁矿资源中的全部有价金属，“吃干榨净”；（2）无固体废弃物排放，硅渣可用于生产水泥。并具有重要的学术价值和经济意义；（3）生产过程中使用的酸和水均循环利用，无废水和废酸的排放，是符合生态化要求的清洁生产新工艺。先后获得美铝公司国际合作、国家自然科学基金重点项目（云南联合基金）和国家自然科学基金、辽宁省优秀人才基金、教育部博士点基金等项目资助，已形成国家发明专利十余项。

低碳低能耗低排放新法炼镁技术研究

我国的金属镁全部采用皮江法生产，其产量已占世界的 85%以上。皮江法炼镁是以白云石为原料以硅铁为还原剂的真空热还原炼镁技术，其炼镁过程中生产一吨金属镁需白云石 10.5 吨以上，还原过程料镁比 6.0 以上，如果将还原剂硅铁的能耗计算在内则炼镁综合能耗在 9 吨标煤以上。本项目开发了一种以白云石和菱镁石混合矿物为原料或以菱镁石为原料，以废铝为还原剂真空热还原炼镁，然后以炼镁还原渣为原料生产特种氢氧化铝或氧化铝复合材料的新法炼镁技术。

应用该技术生产一吨金属镁原矿石消耗低于 5.5 吨，还原过程料镁比低于 3.5:1，还原渣实现了综合利用，最终废渣排放量低于 1.5 吨或实现废渣的零排放。该技术具有能耗和物料消耗少，生产效率高，成本低，温室气体和固体废渣排放量小等优点，同现行的皮江法炼镁技术相比，能耗较皮江法降低 40%以上，温室气体和废渣排放量降低 50%以上，生产效率提高 50%以上，是一种节能环保的新法炼镁技术。

目前，该技术的实验室研究成果已通过有色金属工业协会的专家鉴定，目前年产 500 吨金属镁和 1000 吨氢氧化铝，以及年产 500 吨金属镁和 1100 吨镁铝尖晶石耐火材料的两条生产线正在建设中。

铝电解槽余热回收利用技术

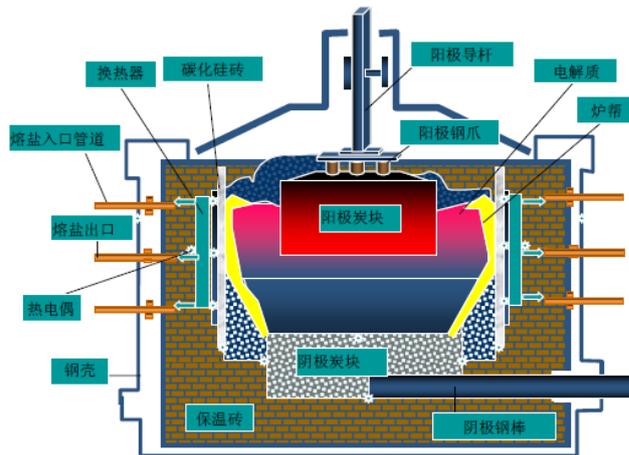
铝电解是高耗能产业，然而提供给铝电解槽的能量有 50%以上是以热量的形式散发掉了，因此回收利用这部分热量具有重要意义；另一方面，我国电解铝厂与氧化铝厂建在一起

的较多，电解铝的余热可以为氧化铝生产服务。

东北大学熔盐电解课题组王兆文教授于 2008 年提出了采用高温熔盐换热介质在电解槽的侧部进行热量回收，并送往氧化铝生产管道化溶出进行循环利用的技术思想。这样就可以把氧化铝生产过程中的管道化溶出熔盐加热炉省掉，替代以电解槽的余热加热熔盐(350℃)，在换热介质温度上符合温度对口的原则。

课题组研制了 2000A 新型铝电解槽，如图 1 所示，并成功进行了铝电解槽在焙烧启动和正常电解阶段的换热实验，实现了电解槽侧部散热回收 80%的目标；同时，应用 ANSYS 软件分析电解槽的温度场情况，进行了电解槽各部分的散热比例分析，并根据换热实验结果进行了试验修正，为设计大型换热铝电解槽提供了理论基础及设计参数，对我国铝工业的发展具有重要意义。

基于该技术，课题组获得国家“863”课题一项，授权发明专利 2 项。



换热铝电解槽示意图

电解铝固体废弃物无害化处理与综合利用技术

目前，我国电解铝厂主要采用大型预焙阳极电解槽，大型电解槽经过一段时间的运行之后，达到其使用寿命就必须进行大修，大修时，电解槽的内衬就要更换，包括底部的阴极碳块、耐火砖、保温砖和防渗材料及侧部碳化硅砖。这些大修产生的固体废物，如果不加以处理而任意堆放，存在于这些废物中的氟化物和氰化物渗入土壤和地下，污染水源，对人的身体骨骼毒害极大，严重破坏生态环境。

东北大学熔盐电解课题组从 2005 年开始进行铝电解槽固体废弃物的无害化处理与综合利用技术研究，相继开发出了铝电解槽废旧阴极碳块的浮选和酸碱联合处理工艺、铝电解槽

废旧碳化硅的水洗处理工艺,并将这些技术应用于伊川电力集团总公司龙海科技实业有限公司电解槽,废旧阴极废旧阴极材料和碳化硅的回收率分别达到了 98%,废阴极材料和碳化硅砖中的电解质回收率达到了 95%,纯度达到 95%,使有害物质氟化物转化率达 99%,氰化物分解率达 99.9%,可溶 F⁻离子、CN⁻离子平均含量小于 1.2 μg/g,达到国家环保标准,有一定经济效益和良好的环保效益、社会效益,推广前景广阔。

课题组围绕本技术获得国家发改委重大产业技术开发专项一项,此外,本技术于 2010 年通过国家科学技术成果鉴定,鉴定结果为“国际先进水平”;同时,课题组围绕该技术授权发明专利 2 项。

自蔓延冶金法制备超细粉体清洁生产技术

硼资源是国家的战略资源。美国的含硼产品已达到150多种,日本硼化物品种达130多种。我国硼工业除硼砂、硼酸外,硼化物品种仅有30余种,远远不能满足相关产业发展的需求。项目将自蔓延高温合成技术(又叫燃烧合成技术)与湿法冶金浸出和氯化镁热解技术相结合,发明了自蔓延冶金法制备超细粉体的清洁生产新工艺,并设计出核心装备。项目研究先后得到国家自然科学基金、辽宁省自然科学基金、辽宁省镁办科技创新攻关项目等项目资助。

中国有色金属工业协会组织专家对项目研究成果进行鉴定,专家一致认为:自蔓延冶金法制备超细粉体清洁生产技术具有工艺先进、操作简单、生产成本低、易于工业化等优点。已成功制备出冶金级无定形硼粉、超细高纯无定形硼粉以及高活性纳米无定形硼粉等系列产品,达到和超过美国军用标准和SB公司标准。纳米和微米级稀土硼化物(LaB₆、CeB₆、NdB₆、SmB₆等)粉末纯度均大于99.0%;制备的TiB₂、CaB₆、B₄C粉末纯度分别为>98.5%、>98.0%、>98.5%,粒度分别为0.41 μm、1.65 μm、2.73 μm。其中稀土硼化物和CaB₆陶瓷粉末性能优于国外产品,TiB₂、B₄C优于国家标准。制备的金属钨粉纯度99.8%,粒度0.87 μm,比表面积1.09 m²/g。粒度和氧含量优于国家标准。项目研究还发明了碳质耐火材料用硼化物复合添加剂的制备技术,解决了含碳耐火材料添加单一硼化物添加剂时混料不均匀、界面二次污染的生产难题,应用前景广阔。发明了氯化镁热解新技术,解决了自蔓延冶金法制备超细粉工艺中的废酸利用,实现了自蔓延冶金法制备超细粉体的清洁生产。

该技术研究社会和经济效益显著,获得国家发明专利 9 项,项目整体技术达到国际先进水平。

自蔓延熔铸法制备低氧中间合金的短流程工艺

针对传统铝热还原法制备钛基合金存在夹杂物多、氧含量高等缺陷,发明了具有我国特

色和独立知识产权的以钛氧化物（或高钛渣）为原料，强化金属热还原法直接制备钛基（钛铁、钛铝、钛铝钒）中间合金的核心技术，已获得国家发明专利 3 项。该技术突破了现有钛材利用首先要经过氯化-精制-真空还原-精炼等复杂流程，解决了 Kroll 法氯污染严重等缺陷，实现了钛及钛合金短流程清洁制备，将极大地提升我国钛冶金技术水平及国际竞争力。采用该技术已成功制备出氧含量为 0.59% 的 70TiFe 和氧含量低于 0.2% 的 TiAl 合金，一举打破了钛工业界多年来研究结论结果：铝热还原一步法无法直接制备出低氧钛基合金。以上研究已得到国家 973 计划项目的滚动资助以及 2 项国家自然科学基金和中央高校基本业务费探索导向重点项目联合资助。

形成了具有我国独立知识产权的以氧化铜、氧化铬为原料，基于铝热还原精炼法低成本制备大尺寸 CuCr 合金的核心技术及装备，已获得国家发明专利(专利号:ZL 200710011613.5) 2 项，项目得到了 6 项国家自然科学基金持续资助。



高钛铁,氧含量 **0.59%**

TiAl,氧 0.2%,钛 82%

CuCr50 电导率 17MS/m

CuCr25 电导率 25MS/m

基于碳酸钙粉体制备的高碱含钙废水吸收 CO₂ 新技术及设备

针对我国冶金等工业排放大量碱性废水(如钢渣热焖生产线高温循环洗水管路结垢严重影响正常生产)和高碱废渣无法综合利用，另一方面又排放大量温室气体 CO₂ (如电解铝行业每吨电解铝排放约 1.5 吨的 CO₂) 无有效放方法治理的难题。课题组提出了利用高碱含钙废弃物吸收矿化 CO₂ 直接制备碳酸钙粉体技术及设备，即以钢铁工业产生的高碱含钙废水或高碱电石废渣(将其矿浆化得到高碱含钙溶液)吸收 CO₂ 尾气并矿化成碳酸钙粉体产品，实现“以废治废，变废为宝”的高值化利用。解决了钢渣热焖生产线高温循环洗水管路结垢

和废电石渣清洁利用的技术难题，同时实现了 CO₂ 尾气的高值矿化利用。

中国有色金属工业协会组织专家对项目研究成果进行鉴定，专家一致认为：“基于碳酸钙粉体制备的高碱含钙废水吸收 CO₂ 新技术及设备” 系统工艺简单、运行稳定，以废治废、变废为宝，具有明显的环保和社会效益，推广应用前景良好。项目研究针对钢渣热闷循环水结垢难题，研发了利用循环水吸收 CO₂ 的工艺及装备，有效解决了循环水结垢，制得了碳酸钙粉体。碳酸钙粉体白度为 85.0%~95.3%，纯度在 98.0% 以上，粒度在 50nm~30 μ m，其技术指标达到相应的国家标准，彻底解决了钢渣热闷循环水结垢。

研发了吸收 CO₂ 气体捕集罩、废电石矿浆化和钙离子发生器以及多级射流吸收反应装置。试验表明：经多级反应器吸收后，残余气体中 CO₂ 浓度降至 0.08% 以下。利用 PVC 废电石渣吸收 CO₂ 制备的碳酸钙粉体，纯度达 99.0%、白度大于 85.0 %、粒度小于 20 μ m 的碳酸钙，其技术指标达到相应的国家标准。该技术可实现铝电解排放的 CO₂ 高效利用。

项目研究已形成国家发明专利 3 项，项目整体技术达到国际先进水平。



工业化装置

钙化-碳化法处理拜耳法赤泥新技术

针对高铁、高碱、高铝赤泥的堆存量逐年增加，综合利用难度较大这一世界性难题。提出采用改变拜耳法赤泥平衡结构的“钙化-碳化-还原提铁”新工艺处理高铁拜耳法赤泥。即首先通过钙化处理将赤泥中的含硅相全部转化为钙铝硅化合物即水化石榴石，并使用 CO₂ 对水化石榴石进行碳化处理，得到主要组成为硅酸钙、碳酸钙以及氢氧化铝，再通过低温溶铝后浸出渣的主要成分为硅酸钙、碳酸钙及氧化铁。赤泥中的铁经“钙化-碳化”处理后可实现充分单体解离，经还原-磁选提铁后即可得到主要成分为硅酸钙和碳酸钙的低碱、低铝、低铁的新型结构赤泥，可直接用于水泥工业。该技术可将拜耳法赤泥中的碱和铝转化为铝酸钠溶液并返回拜耳法工艺，高钙介质体系还原-磁选的方式可有效提高赤泥中铁的回收效率，实现赤泥有价值元素的有效回收及综合利用，目前该技术已获国家自然科学基金重点项目（云南联合基金）和国家自然科学基金等项目资助，目前已与国内氧化铝厂及设计单位达成工业化试验合作协议。

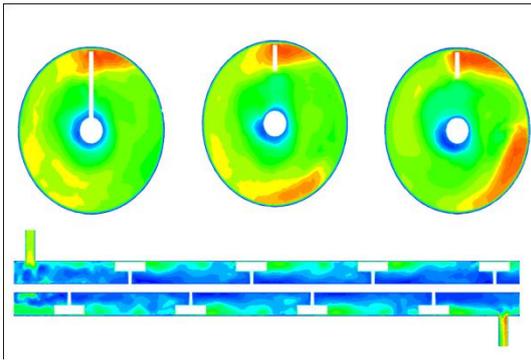
钙化-碳化法处理中低品位铝土矿新技术

目前全世界 90%以上的氧化铝是采用拜耳法生产的。我国氧化铝工业的高速发展，极大地加快了我国高铝硅比优质铝土矿的消耗速度。现阶段我国高铝硅比铝土矿（铝硅比 >7 ）在铝土矿资源总储量中的比例已不足 20%。低品位铝土矿资源品位与生产工艺要求间的矛盾已成为制约我国氧化铝工业健康发展的主要瓶颈所在之一。为解决这一矛盾，东北大学经多年研究提出了钙化-碳化法处理低品位铝土矿及其他含铝原料的新方法，即首先通过钙化处理将铝土矿中的硅全部转化为钙铝硅化合物即水化石榴石，并使用 CO_2 对水化石榴石进行碳化处理，得到主要组成为硅酸钙、碳酸钙以及氢氧化铝，再通过低温溶铝即可得到主要成分为硅酸钙和碳酸钙的新型结构赤泥，可直接用于水泥工业实现铝土矿资源的循环。以钙化-碳化转型预处理我国某地区低品位铝土矿（ $A/S=3.29$ ）为例，溶出渣的铝硅比可降至 0.44，钠碱含量可降至 0.3% 以下，铝的回收率达到 86.6%；使用该工艺处理三水铝石溶出赤泥（ $A/S=1.5$ ），经碳化处理后，赤泥铝硅比可降至 0.58，碱含量降至 1% 以下。

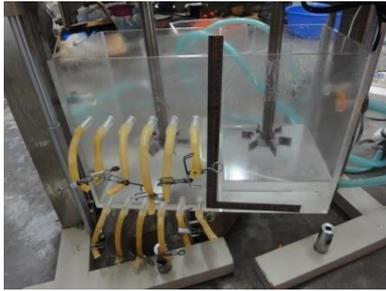
该技术已获国家自然科学基金重点项目（云南联合基金）和国家自然科学基金等项目资助，申报发明专利两项。

新型反应器设计与模拟

针对我国冶金工业核心设备缺乏，设计开发具有独立知识产权的“基于强化矿物溶出的高效叠管式高压溶出反应器”，并建立冷态模拟装置及 0.2m^3 规模热态模拟试验机。并设计出无动力新型管式搅拌反应器模拟样机。研究表明与传统管式反应器相比，带搅拌装置管式反应器具有更优越的流动特性，混合时间是不加搅拌时的 $1/3-1/5$ 。针对稀土萃取分离过程中传统的混合澄清槽由于混合与澄清速率不匹配，造成稀土存槽量大、生产效率降低等缺陷，从改变槽结构方面入手，发明了“双搅拌新型高效分离萃取槽”，并完成中试试验装置的放大。其生产效率可提高 50% 以上。以上研究先后获得国家重大 863 计划、国家自然科学基金、辽宁省优秀人才基金项目资助，已获得相关国家发明专利 5 项。



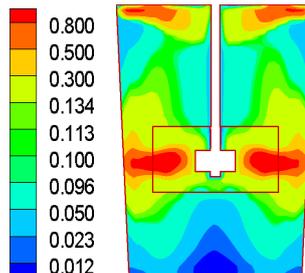
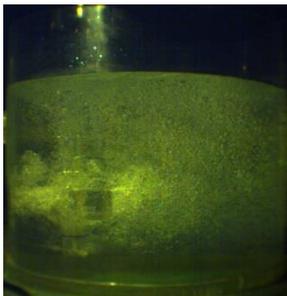
带搅拌管式反应器速度云图



双搅拌萃取槽

基于机械搅拌作用下喷气原位脱硫新技术

基于目前工业采用的铁水预处理脱硫工艺-KR法和喷镁法的诸多缺点,提出“原位镁脱硫技术”,即以MgO基(白云石基)脱硫剂取代金属镁,实现高温镁蒸汽直接原位脱硫。该技术既弥补了KR法和喷镁法的诸多不足的同时,又实现了生产成本的降低。为了探寻最佳的反应条件,从物理模拟和数值模拟两个方面,对不同搅拌模式,搅拌转速,喷吹条件下熔池内部的气泡直径,气液两相分布状况,气含率,湍动能分布等方面进行了研究,通过水模型实验得到最佳搅拌条件,选出了最佳桨型,并通过数值模拟对各种搅拌条件进行了深入分析验证,在此基础上,对300t铁水包内部流场进行了放大预测,为该法的工业化推打下基础。已完成1t炉放大试验研究。最优脱硫效率>90%;处理时间为6~10min,终止硫含量小于40ppm,脱硫剂成本较喷吹法脱硫剂成本降低50%以上。本课题现已获得2项国家自然科学基金(50974035, 51074047)和辽宁省重点科技攻关计划(200921007)的资助。获得国家发明专利6项。



红土矿提取镍钴新技术

微波选择性还原焙烧—稀酸浸出氧化镍矿物。该技术利用微波对物料的快速加热，实现反应物的快速升温，加速矿物中镍和钴有价元素的还原，并控制铁的还原程度，实现矿物的选择性还原焙烧。焙烧之后的还原产物在稀酸溶液中进行镍钴的选择性浸出，实现镍钴的有效提取。该方法焙烧时间短，还原剂消耗量少，能耗低，浸出过程中试剂消耗量小，并且浸出渣适宜用作炼铁的原料，对环境无危害性。该技术已获得国家发明专利（ZL200810116767.5）。

微波还原焙烧—赤铁矿沉淀转化法处理含镍红土矿。该技术是将含镍矿物矿在微波辐照下进行还原焙烧，之后在高压釜中控制适当条件进行浸出，使焙砂中浸出的铁转化为赤铁矿沉淀，同时利用赤铁矿沉淀时释放的酸继续浸出，有效提取红土矿中的镍钴。该方法耗酸少，浸出温度相对现有的高压酸浸法大大降低，有利于降低设备造价。同时浸出温度降低，矿物中的铝浸出后热力学稳定性增强，不易水解为明矾石/铁矾沉淀，因此设备结垢的问题大为减轻，浸出渣中硫酸根含量也随之下降，利于浸出渣的综合利用。该技术已获得国家发明专利（ZL200810228436.0）。

微波还原焙烧—针铁矿沉淀转化法处理含镍红土矿。该技术是将含镍的氧化物矿在微波辐照下进行还原焙烧，之后创造针铁矿形成的条件，使焙砂利用针铁矿沉淀时释放的酸来浸出，从而实现针铁矿沉淀转化法浸出焙砂，来有效提取红土矿中的镍钴。该方法耗酸量少，与高压酸浸法相当，但通过还原焙烧后使浸出阶段的操作温度和压力大大降低，同时有利于降低浸出设备造价。该技术已获得国家发明专利（ZL200810228435.6）

焙烧—浸出处理褐铁矿型氧化镍矿。该技术是将褐铁矿型氧化镍矿经与处理后，进行还原焙烧，将矿物中的镍、钴和少量的铁还原至金属态形成铁合金，其余的铁主要以氧化亚铁和四氧化三铁的形式存在；然后，在一定温度下，向还原焙砂中加入氯化剂，在弱氧化性气氛下进行氯化焙烧，实现镍、钴的选择性氯化；经冷却后，将氯化焙砂中的镍、钴氯化物浸出，回收镍和钴。该方法与现有的焙烧—浸出工艺相比，流程短，试剂消耗少，可有效地回收氧化镍矿中的镍和钴，浸出渣易于综合利用，可提高环保效益和经济效益。该技术已获得国家发明专利（ZL201010131130.0）。

有色冶金废渣处理及综合利用技术

综合利用铝电解废旧阴极炭块技术。该技术是将铝电解废旧阴极炭块进行破碎和磨矿后，采用浮选法将废旧阴极炭块中的碳和电解质分离，可得到含碳量小于5%的电解质产品。

然后控制适当条件对碳产品中的电解质进行浸出，进一步提高碳产品的品位。将球磨、浮选废水和浸出液混合，添加 CaO 和 CaCl₂，使溶液中的氟和铝沉淀得以回收利用，达到废水处理和有效回收有价物质的双重效果。所得产品碳粉和电解质，可返回碳素生产和铝电解工艺中使用。可有效地解决废旧阴极炭块的堆存污染问题，具有较好的环境效益和经济效益。目前已建成 5000t/a 的工业生产示范线。该技术已获得国家发明专利（ZL200810230201.5）。

黄钠铁矾渣的综合利用。该技术采用稀酸将铁矾渣中的有价金属浸出回收，然后利用微波技术分解黄钠铁矾，之后再配入一定量的水和铁屑、废铁片等，进行熟化后，利用氧化剂将溶液中的二价铁氧化，经水解、聚合得到水处理剂聚合硫酸铁。该技术有效地回收了铁矾渣中的有价金属，减少了铁矾渣处理过程的试剂消耗和能耗，缩短了处理时间，处理过程对环境无污染，可有效地解决黄钠铁矾渣的堆存污染问题。该技术已获得国家发明专利（ZL200810228440.7）。

电解制备金属粉体的自动脱粉技术。该技术采用间歇式超声波-反向脉冲电解的方法实现电解制备金属粉末过程中自动取粉。在电解法制备金属粉末的过程中，施加间歇式超声波-反向电脉冲，在超声波-反向电脉冲的共同作用下，使阴极上生成的金属粉末脱离阴极表面，实现自动取粉，同时使阴极表面得到清洁。该技术可显著改善电解法制备金属粉体生产中人工的劳动强度，提高生产效率和产品质量。该技术已获得国家发明专利（ZL200810228434.1）。

富钴铜转炉渣中回收铜钴技术。该技术是将富钴的液态铜转炉渣进行选择性还原和硫化还原，实现有价金属铜、钴、镍等回收和综合利用。该技术充分利用了液态炉渣的显热，有利于降低处理铜转炉渣时的能耗成本，有效提高铜、钴和镍的回收率。该技术已获得国家发明专利（ZL 201010600413.5）。

“非并网风电”应用于铝电解技术

我国是风能大国，风能开发利用潜力很大。然而，受风电在电网中所占比例的限制以及风机价格和风电成本居高不下等因素的制约，我国丰富的绿色风能资源却未能得到有效的开发利用。

“非并网风电”是中国特色风电发展之路的探索和实践。东北大学熔盐电解课题组从 2006 年开始进行“非并网风电”应用于铝电解技术的基础研究，开发出了适合于电流波动的铝电解槽和电解质体系，并进行了大型铝电解槽的物理场模拟和能量平衡计算，通过技术分析，制定了适合的工艺条件和操作规程，为“非并网风电”在铝电解系列的工业化应用奠定了基础。

将非并网风电应用于铝电解等高耗能产业对于充分利用风能、同时实现铝电解的节能减

排具有重要的意义。

基于该技术，课题组获得国家“973”课题一项，授权发明专利 5 项。

泡沫/多孔金属产品及其制备技术

泡沫金属是由金属相和气孔组成的复合材料，它把连续相的金属特点（如强度大，耐高温等）和分散相气孔的特性（如阻尼，隔热，隔声，消音，减震，屏蔽等）有机结合在一起，可广泛应用于交通运输、建筑机械、冶金化工、电子通讯、航天航空和军事工业等多个领域。东北大学 1996 年开始以熔体发泡法制备泡沫铝材料。在实验室中针对铝熔体的增黏理论、熔体搅拌过程中的流变学原理、熔体泡沫化行为的产生机制以及气泡的演化规律等理论问题进行了详细的研究，为泡沫铝制备技术原型的形成打下了牢固的基础，同时也得到了一套优化的工艺参数。1998 年中试试验取得成功，制备出 400mm×600mm 泡沫铝板材。2002 年~2005 年在国家三项“863”高技术课题支持下，建设了年产 5000 吨泡沫铝材料的工业试验线，制造出 800mm×1900mm 大规格泡沫铝板材。产品经国家权威部门检测，性能与日本同类产品相当，达到国际先进水平。2006 年 3 月 22 日，泡沫铝材料生产技术及其产品通过辽宁省科技厅和辽宁省经委组织的鉴定，与会专家认为该项技术填补了国内空白，达到世界先进水平。2008 年泡沫铝生产技术获辽宁省技术发明一等奖。图 1 为泡沫铝板材切割时的照片。



图 1 泡沫铝板材切割时的情景

在成功制备出泡沫铝板材的基础上，东北大学近年来陆续开发出泡沫镁、多孔铅等产品（见图 2、图 3），最近在多孔钛的制备方面也取得突破。至此，东北大学已经开发出多种泡沫/多孔金属产品，并形成了相应的制备技术。目前的主要工作是推广泡沫/多孔金属在相关领域中的应用。



图 2 泡沫镁材料的样品照片

图 3 多孔铅材料的样品照片



铝电解槽电极涂层技术

铝电解槽阴极炭块对铝液的湿润性较差，抗 Na 和电解质的如实渗透能力不强，电解质容易渗透到阴极炭块中并与其发生反应，降低阴极炭块的使用寿命；另一方面，铝电解槽阳极属于消耗性阳极，使用一段时间后便需要更换。因此，开发相关的技术延长铝电解阴、阳电极的使用寿命，在成本、环境效益和劳动强度上都是有利的。

东北大学熔盐电解课题组多年来一直从事铝电解槽阴极、阳极涂层的研究，取得了良好的研究成果。对于铝电解槽阴极，开发了带有二硼化钛涂层的铝电解阴极及其制备方法，将二硼化钛和碳粉在有机树脂胶作粘结剂的作用下，制成糊料，涂覆于电解槽阴极碳块底部，利用电解车间环境中较高的温度使糊料自行固化，之后，进行复合涂层的进一步固化和炭化，成为电解槽生产的阴极涂层。对于铝电解槽阳极，开发了一种铝电解用炭素阳极抗氧化的方法，将配置好的底层涂料均匀的涂覆在阳极表面，干燥后，将外层涂料涂覆在以涂过底层涂料的阳极表面，干燥后，去除水分。该方法不会引入杂质元素，同时涂层与基底的粘附性很好。

目前，阴极涂层技术已应用于广西百色银海铝业有限公司和河南豫港龙泉铝业有限公司；阳极抗氧化技术已应用于中国铝业股份有限公司沁阳实验厂，均达到了良好的节约能源和延长电解槽寿命的效果。

基于上述技术，课题组获得横向课题三项，授权发明专利 3 项。

微波技术合成碳化硅和碳化钛粉体材料

采用微波技术合成碳化钛粉体材料，利用的含碳原料可为活性炭、焦炭、煤、炭黑及废旧碳块和碳渣等含碳物料，含钛原料可为二氧化钛及金红石等含钛的物料。该技术是将原料进行预处理，然后控制适当的条件，将预处理后的物料放在微波场中进行合成，再经后处理得到碳化钛粉体材料。该技术利用微波技术可显著提高生产效率和降低能耗。

采用微波技术合成碳化硅粉体材料，利用的含碳原料可为活性炭、焦炭、煤、炭黑及废旧碳块和碳渣等含碳物料，含硅原料可为石英砂、白炭黑及各种含硅的废渣等，还可将稻壳进行预处理后作为合成的原料。该技术是将原料进行预处理，然后控制适当的条件，将预处理后的物料放在微波场中进行合成，再经后处理得到碳化硅粉体材料。该技术的优点在于可有效解决固体废弃物的环境污染问题，利用微波技术可显著提高生产效率和降低能耗。该技术已获得国家发明专利（ZL200810228440.7）。

高耐蚀性 Zn-Al-Mg-Si-RE 合金镀层

钢铁是现有工业应用最广泛和用量最大的金属材料，但是钢铁在水、土壤及空气中都极易发生腐蚀。据统计，全球每年因钢铁腐蚀造成的经济损失约 7 千亿美元。我国腐蚀与防护学会 2007 年的统计报告表明，我国每年因腐蚀造成的损失高达 5000 亿元，约占国民经济总产值 6% 左右。随着工业化的推进，空气污染有日益加剧的趋势，因此钢铁的防腐保护显得更加重要。我国是钢铁生产大国，我国的钢铁产量从 1996 年开始一直居世界第一，但是我国钢铁的市场竞争力不强，其原因在于我国高品质合金钢和镀锌钢板的质量不高。

本课题组结合工业生产的技术需求研发了 Zn-5Al-Mg-Si-RE、55Al-Zn-Mg-Si-RE、Zn-5Al-Mg-RE、Al-Si-Mo-Ni-RE 和 Al-Zn-Si-Ce 等多元合金镀层，大幅提高了 Zn-5Al 和 55Al-Zn-1.6Si 合金镀层的耐蚀性，提高了钢材的使用寿命，获辽宁省科技进步三等奖。

该技术已申请发明专利 7 项，其中 5 项已获授权。Al-Si-Mo-Ni-RE 在辽宁省朝阳市金达钛业有限公司工业应用，大幅降低了还原蒸馏炉的氧化速度，提高了炉体的使用寿命，提高了企业的经济效益。Al-Zn-Si-Ce 在葫芦岛锌业股份有限公司等企业工业应用，检测结果表明镀层厚度均匀，耐蚀性得到大幅提高，得到了用户的一致好评，为企业创造了良好的经济效益。部分产品的技术指标如表 1。

表 1 主要产品的技术指标

产品名称	耐蚀性	镀层厚度/ μm
------	-----	---------------------

Zn-5Al-Mg-Si-RE	为纯锌镀层的 23 倍	10-25 μm
55Al-Zn-Mg-Si-RE	为纯锌镀层的 16 倍	20-40 μm
Zn-5Al-Mg-RE	为纯锌镀层的 11 倍	15-30 μm
Al-Si-Mo-Ni-RE	为纯铝镀层的 3 倍	50-400 μm

从含铜镍废塑料镀层中回收有价金属的研究

铜和镍被广泛用作塑料件的表面镀层，具有耐磨、耐腐蚀、美观的作用。随着金属镀层的使用量不断增加，从含有铜和镍的废塑料镀层中回收金属不仅具有废旧资源高效利用的特点，也是环境保护的必然趋势。为了从废旧铜镍复合镀层中回收再利用铜和镍，需要解决金属镀层与塑料基体分离以及铜镍分离的问题。

本发明采用工业上价廉的硫酸溶液进行浸出，浸出过程中加入含硫的腐蚀剂，在实现金属镀层与塑料基体分离的同时，利用铜、镍与硫的亲合力不同，使铜和镍达到分离的效果。

本发明避免了使用腐蚀性强的硝酸及盐酸做浸出剂，而是使用工业上价廉的硫酸，设备防腐易解决；在铜、镍的分离方面，克服了以往传统工艺中采用铁粉置换，之后增设单独步骤除铁的难题；铜、镍经分离后以铜以硫化物渣形式存在，能够作为高品位铜精矿直接销售，镍以纯净的硫酸镍溶液形式存在。经本方法得到的铜、镍中间产品回收率高，后续处理工艺灵活，工艺简单，方法新颖，实用性强。

贵金属冶金与材料关键工艺与装备技术

针对贵金属原料杂质种类繁多、贵金属失散严重、生产能耗大、贵金属产品附加值低等共性问题，杨洪英教授的研究团队与国外贵金属冶金和材料生产领域的龙头企业合作，研发了基于复杂物料金材料的绿色高效回收技术，通过对涉及的多个复杂工艺流程进行改造和技术升级，突破基于复杂物料的贵金属材料的高附加值、低用量、低成本和长使用寿命等集成关键技术和工艺装备。通过工艺矿物学研究发展了先进的预处理技术和设计合理的绿色生产方案，开发出新型贵贱金属分离试剂，选择合成新型贵金属提纯试剂，实现高纯贵金属粉末的可控分离，研发了特殊杂质的定向去除方法，并形成基于复杂二次物料的贵金属产品制备的绿色制备技术，开发了贵金属合金的铸锭气孔率、表面缺陷、均匀性等创新性熔铸设备和微控制技术，实现贵金属合金的新循环利用模式，提高复杂二次物料的金等贵金属的综合利用率并形成示范生产线。新技术使得金的回收率在现有基础上提高 30% 以上；复杂含金二

次物料的利用率不低于 99%，高纯金靶材的晶粒度 $<100\ \mu\text{m}$ ，失效含金材料再利用率高于 99%。技术应用于金川集团有限公司、沈阳东创贵金属材料有限公司等。

研究过程中形成授权发明专利 5 项；发表学术论文 12 篇，其中 SCI 检索 6 篇次。

生物冶金关键技术

生物冶金属于环境友好冶金，被认为是 21 世纪最具竞争力的技术。杨洪英教授的研究团队长期以来在难处理含砷金矿、铜矿、钴镍矿、锌矿、铀矿以及尾矿的金属综合提取方面做出突出贡献。拥有生物搅拌槽浸技术、生物堆浸技术以及包覆技术等多项技术，成果显著。培育出了多种优良的浸矿菌种，积累丰富的研究数据和现场实践经验，形成我国自主知识产权的生物冶金核心技术。通过对于国内的广西、四川、贵州、湖南、云南、江西、安徽、辽宁、陕西、河北、新疆、青海等省区以及赞比亚、希腊、朝鲜等国家的金矿、铜钴矿石、镍矿石研究，已拥有耐钴 30g/L、耐砷 16% 的优良高效细菌，技术指标优越，工艺节能环保，成本低易于操作，形成了先进的生物浸出技术，为资源有效利用、提供了一条崭新的途径。研究过程中形成授权发明专利 15 项；发表学术论文 100 余篇，其中 SCI、EI 检索 50 篇次。

清洁、高效综合利用红土镍矿中有价组元的新工艺、新技术

镍是重要的战略有色金属，而红土镍矿的开发利用是世界性的难题。现行的火法和湿法工艺一般均存在着高能耗、高成本、高污染的问题，没有考虑资源的综合利用。在国家发展循环经济、环境保护的国策前提下，开发“清洁、高效综合利用红土镍矿中有价组元的新工艺、新技术”具有重要意义。翟玉春教授的学术团队依托 973 课题“氧化矿中金属硅酸盐的转化机制”，开发了“清洁、高效综合利用红土镍矿中有价组元的新工艺、新技术”，采用硫酸焙烧技术提高了 Ni、Mg 的提取率，使 Ni、Mg 的综合回收率均达到 90% 及以上，领先国内外处理低品位红土镍矿（平均镍品位 0.6%）各种工艺技术的提取率和回收率水平。采用冷凝成酸技术吸收焙烧烟气中 SO_3 、 SO_2 ，使焙烧烟气排放达到标准，得到的硫酸循环利用。采用碱溶技术对红土镍矿中含量最高的二氧化硅进行了深度开发。并实现了除杂的精确控制和自循环除钙技术，通过分步沉镁得到了优级品的微细和超微细碱式碳酸镁产品，提高了产品的品质。

“清洁、高效综合利用红土镍矿中有价组元的新工艺、新技术”是绿色化、高附加值综合利用的工艺技术，既实现了红土镍矿中有价组元镍、铁、镁、铝、硅的分离提取，镍、铁、镁、铝、硅均可以成为产品，实现综合利用，又不污染环境。其技术可行、经济合理、环境友好、设备简单。

研究过程中形成授权发明专利 2 项，发表学术论文 70 余篇，其中 SCI 检索 20 余篇。研究成果被国家科技部专家组评定为优秀。

清洁、高效提取粉煤灰中氧化铝的新工艺、新技术

粉煤灰是煤燃烧产生的固体产物，粉煤灰的堆存已经给环境带来了很大的危害。粉煤灰特别是高铝粉煤灰，是一种含氧化铝的非铝土矿资源。在全世界范围内开展了诸多的研究，代表性的方法有预脱硅+碱石灰烧结法、传统的石灰石烧结法、酸法等。在当前大力开展节能降耗，发展循环经济及创建环境友好型企业的形势下，开发粉煤灰类铝资源的综合利用技术具有重大而深远的战略意义。用高铝粉煤灰制备氧化铝替代铝土矿的大量进口，可以缓解我国铝土矿资源严重依赖进口的局面；可以形成高铝煤炭-电力-氧化铝-铝深加工的循环经济产业链，可以实现资源价值的最大化；保护环境、节约土地。翟玉春教授的学术团队与中煤集团、华电集团合作，开发出了常压预脱硅法碱溶法、硫酸法、硫酸铵法等工艺技术。其中常压预脱硅焙烧法于 2006 年完成了该工艺技术的中试，并有山西省科技厅组织了鉴定，鉴定结果为国内领先、国际先进。硫酸法和硫酸铵法，可以实现粉煤灰中的二氧化硅和氧化铝的综合提取利用，制备冶金级氧化铝和白炭黑或硅酸钙产品，实现了变废为宝、变害为利是高附加值、绿色化综合工艺，将粉煤灰中的有价组元铝、硅、铁都回收利用，实现了粉煤灰的高附加值、绿色化综合利用。硫酸铵法于 2010 年完成了日处理 4t 粉煤灰的扩大化试验和中试，并已完成工业化初步设计。铝的提取率达到 90%； SiO_2 的提取率达到 96%。

研究过程中申请发明专利 8 项，发表学术论文 40 余篇。

新型冶金成分传感器的研制开发

针对我国航空、航天、核工业、船舶等领域用高品质金属材料精确控制氧、氢、锰、铬、钨、钼成分含量的重大需求，开发具有我国自主知识产权的高灵敏度冶金传感器。国内外目前通用的金属材料成分测定方法，皆为对固体合金进行局部取样分析，其分析过程周期长、操作复杂，且信息采集处理滞后、取样代表性不足，难以在整个生产过程中监控元素含量，无法满足现代化连续大生产的要求。研发高灵敏度与快速动态响应的化学传感器，是解决金属熔体中元素含量在线实时监测这一难题的最可行方案。美、日、欧等发达国家和地区已开发了在线元素监测装置，我国尚处于对国外技术的简单模仿阶段，创新性不足，关键装置技术水平差距较大，亟需研究开发检测精确的在线、快速、连续测试技术及装置。厉英教授的研究团队开展了多种固体电解质功能陶瓷的研究，对固体电解质的制备及性能做了大量的基础研究工作，建立了规范化的组织、结构、成分和性能测试分析方法，在固体电解质化学

传感器方面研制出了氧、氢、镧、钇等一系列传感器，开发出了精密化学传感器探头的制备技术。开发的铝熔体氢化学传感器，填补了国内空白，与国外同类设备相比，开发的氢传感器具有高精度、长寿命、低成本的技术优势，其测量重现性、量程、响应速度、寿命等核心性能均达到且部分指标超过了国外同类设备。

研究过程中形成多项发明专利，相关研究成果发表在《Metallurgical and Materials Transactions B》、《金属学报》、《JMST》等高水平期刊共计 80 余篇，其中 SCI 收录 20 篇。

含砷金精矿生物氧化液综合回收利用的技术

生物氧化提金新技术会产生大量酸性含砷废液，属强腐蚀性有毒废水，须通过治理达标后才能排放。黄金生产中对含砷废水处理一般仅局限于无害化，如铁盐或钙盐使砷以砷酸盐的形式沉淀下来，然后高温固化后废弃，产生大量废渣，外运耗费大量人力、财力，增加了黄金的生产成本，同时酸性含砷生物氧化提金废液中的砷、铁、硫等有价元素也浪费掉。以辽宁某黄金企业为例，对含砷金精矿生物氧化工段每天产出生物氧化液 $500\text{m}^3/\text{d}$ ，其中含砷 $5\sim 7\text{kg}/\text{m}^3$ ，含铁 $15\sim 20\text{kg}/\text{m}^3$ ，一直采用石灰中和沉淀法进行处理，其中的砷、铁得不到回收，每天还要产生硫酸钙、砷酸铁和氢氧化铁等氧化渣 $150\text{t}/\text{d}$ ，需送入防渗尾矿库安全堆存。不仅造成砷、铁资源浪费，存在环境风险隐患，而且造成尾矿库固定资产投资增高。

为进一步提升生物氧化提金技术的先进性和实现节能减排目标，东北大学田彦文、李建中、李在元团队对此进行了研究开发，攻关组在调研的基础上进行了两年试验室研究，确定了生物氧化液中砷、铁回收的技术路线和方法，于 2007~2009 年进行了生物氧化液砷、铁回收的扩大试验，优化了工艺，并取得了预期的效果，为工业生产应用提供了依据。目前，在国家发改委和财政部重大成果转化项目的支持下，该项目正筹划产业化阶段。经过财务测算和分析，本项目第一期（平均值）年销售收入 17800 万元，年利润总额 1788 万元，年税后利润 1341 万元。项目总投资收益率 34.2%，项目资本金净利润率 62.6%，税前财务净现值 6032 万元。

该项技术已达到国际先进水平，对我国生物氧化提金技术从整体上是一个补充。研究过程中形成授权发明专利 2 项；发表学术论文 10 余篇。

熔盐电化学技术制备金属、合金以及功能材料

利用熔盐电化学技术，绿色环保、短流程制备金属、合金以及功能材料，实现材料化冶金过程。许茜教授的研究小组研究和开发了领用熔盐电脱氧技术制备金属钽粉、铌粉、铌钽合金粉体， AB_5 型镍基稀土储氢合金粉体，该金属和合金粉体材料的颗粒形貌和尺度可以调控，且颗粒之间接触良好，可以应用于电池材料以及电容器材料。利用熔盐电化学方法制备了碳纳米管、碳纳米粉体，以及金属表面的碳膜修饰。碳膜的相组成为石墨和无定形碳，且碳膜与金属基体结合良好，提高了金属的表面抗氧化性，以及实现金属基体表面具有自润滑性。以上研究得到国家自然科学基金委和辽宁省自然科学基金委的资助。已发表相关学术论文 20 余篇，SCI 和 EI 收录 11 篇。

