

《国家重点基础研究发展规划项目》

## 课题结题工作报告

项 目 名 称：新一代钢铁材料（超级钢）的重大基础研究

课 题 名 称：电磁场及其它外场对提高钢材料质量的作用  
(G1998061510)

课题负责人：赫冀成 教授

东 北 大 学

二〇〇三年九月

《国家重点基础研究发展规划项目》

## 课题结题工作报告

项 目 名 称：新一代钢铁材料（超级钢）的重大基础研究

课 题 名 称：电磁场及其它外场对提高钢材料质量的作用  
(G1998061510)

课题负责人：赫冀成 教授

东 北 大 学

二〇〇三年九月

中国钢铁工业协会 中国金属学会

为表彰在促进  
技术创新工作  
中做出重大贡献，以  
资鼓励。



获奖项目：现代电磁连铸技术的基  
础研究

获奖者：郝



奖励等级：二等

奖励日期：2002年11月

证书号：2002Z-2-06-01

## 一、课题计划完成情况

### (一) 课题的研究内容

1. 外场作用下钢液的流动控制规律;
2. 钢坯组织的细化均质化机理;
3. 外场下热处理对 1500MPa 级钢 (42CrMo) 晶粒细化的影响。

### (二) 课题的研究目标

1. 提供外场作用下的流场、温度场、铸坯凝固组织和溶质分布软件, 为工业生产提供工艺参数;
2. 试制出基本为全等轴晶的铸坯;
3. 磁场热处理对 1500MPa 级钢晶粒细化的作用。

### (三) 课题的主要工作概要

本课题将研究内容分成两个子课题进行:

子课题 1 电磁场及其它外场对凝固组织细化及均质化的作用

子课题 2 外场作用下热处理对 1500MPa 级钢 (42CrMo) 晶粒细化的影响

在 2001-2003 年度, 课题组按照研究计划任务以及首席科学家的要求, 主要进行了以下几方面的研究工作:

1. 连铸坯内流动、凝固和溶质分布的耦合数值模拟
2. 金属凝固微观组织的数值模拟研究
3. 电磁搅拌细化铸坯凝固组织的实验
4. 电磁场作用下钢液流动控制的研究
5. 强磁场对金属及合金凝固组织的影响
6. 外场作用下热处理对 1500MPa 级钢(42CrMo)晶粒细化的影响

### (四) 课题的主要研究成果

现将课题的主要研究成果汇报如下, 详细的研究报告见本项目的《课题结题研究报告》)

#### 4.1 连铸坯内流动、凝固和溶质分布的耦合数值模拟

此方面的研究课题主要完成了以下几方面的工作：

1. 对描述合金凝固过程的几种宏观及微观传输模型进行了理论分析；研究表明，将各微观溶质传输模型——杠杆模型、Sheil 模型、CK 模型、大中逸雄模型——与连续介质模型方程相结合，都可以模拟合金凝固过程，并通过模拟结果来分析铸坯内溶质偏析规律，得出以下结论：

- 1) 杠杆模型基于固、液相溶质完全扩散条件，固、液相溶质的偏析曲线较为平直；
- 2) Sheil 模型固相中无扩散，因此固相区碳偏析曲线的斜率较大；
- 3) CK 模型和大中逸雄模型则介于二者之间，固相区碳偏析曲线斜率较小，碳浓度值在截面上变化范围较小；
- 4) 模拟实际铸坯通常采用的液相有限混合模型，其模拟结果中碳浓度上下浮动较大，与固相有限扩散模型相比，具有一定的局限性；
- 5) 采用渗透率各向异性的公式进行模拟，固、液相中溶质的分配较均匀，碳的偏析率较小，并克服了各向同性条件下固相中碳浓度的波动。

2. 在理论模型分析的基础上，采用连续介质的动量、能量及溶质分布模型和杠杆定律，系统地建立了传输过程的耦合数学模型。针对 Fe-C 二元合金开发了无电磁场作用下的连铸坯内流动、凝固及溶质分布的耦合数值模拟软件。并在此模型的基础上，开发了适于模拟 Fe-C-P-S 多元合金体系凝固与溶质分布过程的数值计算软件，模拟结果表明：

- 1) 连铸坯凝固过程中，紊流流动仅在逐渐缩小的液穴内进行，且逐渐趋于平推流动。
- 2) 沿铸坯下行，凝固坯壳逐渐向铸坯中心推进，溶质在固相中的浓度不再变化，而液相中偏析率则逐渐加剧。由于固液相溶质元素再分配导致其浓度的差异，在铸坯内形成宏观偏析。
- 3) 多元合金中，不同元素的偏析各不相同。就所模拟的 C, P, S 来说，平衡分配系数较小的 P ( $k_p=0.13$ )、S ( $k_p=0.06$ ) 在截面上偏析较为严重；平衡分配系数较大的 C 元素 ( $k_p=0.2$ )，偏析较轻。
- 4) 沿铸坯下行，各元素的偏析均呈递增趋势。

3. 进行电磁场作用下传输过程的数值模拟，开发了电磁搅拌作用下 Fe-C 二元合金连铸坯的流动、凝固及溶质分布耦合计算软件，分别研究了不同搅拌方式下铸坯的溶质分布规律。如，水平旋转电磁搅拌对溶质分布的影响，并考察了搅拌器固有参数的影响；行波线性搅拌对凝固过程的影响；以及线性搅拌器布置参数的影响。

水平旋转电磁搅拌对溶质分布的模拟结果表明:

- (1) 水平旋转电磁搅拌在横截面内产生周向旋转电磁力, 在纵截面内产生向内挤压的电磁力, 量值均由铸坯表面向中心衰减, 驱使铸坯内流动及凝固过程发生变化。
- (2) 在水平旋转电磁搅拌作用下, 铸坯纵截面相应位置处产生上下两部分回旋流动, 受向内挤压电磁力作用, 流股类似于通过瓶颈又进入扩展区域的射流流动。横截面内, 旋转电磁力带动钢液进行回旋流动, 与无电磁搅拌时相应位置处的流场相比较, 周向旋转的流速较大。
- (3) 在搅拌位置偏下处的液穴中心, 温度呈现上升, 溶质浓度相应下降。
- (4) 电磁搅拌对糊状区及液穴内的溶质分布起到减低偏析的作用, 尤其对凝固前沿液穴内的溶质分布的影响更为突出。

水平旋转电磁搅拌器固有参数的模拟结果表明, 增大电源电流强度和电源频率, 可明显减薄凝固坯壳厚度, 并明显降低截面偏析; 加入磁轭和相位角采用 $45^\circ$ 搅拌, 可增强电磁搅拌效果。

行波线性电磁搅拌模拟结果表明:

- (1) 施加电磁搅拌时, 磁场矢量在每对极中间达到最大, 呈扇状分布, 电磁力主要分布在方坯侧面处, 数值沿横截面方向由铸坯表面向中心衰减。电磁力沿纵截面两个坐标轴方向均有分量, 是纵截面内产生旋转流动的根本原因。
- (2) 施加电磁搅拌时, 双侧搅拌在搅拌区出现涡流, 上部较圆, 下部较扁长; 流速在漩涡边缘数值达到最大, 逐渐向中心衰减。
- (3) 电磁搅拌可以减低溶质偏析, 使溶质分布更为均匀, 其作用主要体现在液相区, 对固相、糊状区的溶质分布也有一定影响。

线性搅拌器布置参数的模拟结果表明: 模拟结果表明:

- (1) 双侧线性搅拌, 两侧电磁力方向相反, 形成旋转力; 单侧搅拌时, 磁场和电磁力分布在靠近搅拌器的方坯一侧, 分布范围约占整个方坯的一半, 没有电磁搅拌的一侧没有分布。
- (2) 双侧线性搅拌, 钢液在搅拌区出现涡流, 上部较圆, 下部较扁长。单侧搅拌流场中并未形成圆形涡流, 而是出现了沿拉坯方向的扁长涡流。
- (3) 改变线圈相位差可以改变电磁力的方向。相同条件下, 向上搅拌的电磁力小于向下搅拌的电磁力。导致向上搅拌的流场涡旋流动幅度小于向下搅拌的情况, 且扁长涡流更靠近向上搅拌侧的壁面。

## 4.2 金属凝固微观组织的数值模拟研究

开发了金属凝固微观组织预测的数值计算软件,探讨了浇注温度、冷却强度对等轴晶形成的影响。

研究表明,采用 CA-DFD 微宏观耦合模型模拟合金微观组织,直观再现了柱状晶、等轴晶的形成和柱状晶向等轴晶的转变,实现了随机形核及晶粒竞争生长,定量反映了基于凝固时间步长变化的过冷度对微观组织的影响,能够对金属凝固微观组织形成进行仿真预测。模拟结果表明:

1) 在不同的冷却条件下分别得到等轴晶和柱状晶组织。晶粒首先在水冷铸造壁处形核,形成边界等轴晶区,之后部分晶粒随着热流方向继续生长,形成竞争生长的柱状晶区,且具有明显的优先生长方向,同时晶粒数目减少。

2) 当冷却强度增大后,液态金属冷却速度增大,过冷度增大,形核数目增加,晶粒得到细化,等轴晶区扩大,当增加到一定程度时,得到完全的等轴晶组织。

## 4.3 电磁场作用下流体流动控制的研究

以钢的连铸为对象,开发了三维电磁场以及电磁场与场、温度(凝固)场以及夹杂物迁移的耦合数值计算软件。并对板坯电磁制动的电磁场特性进行了研究,讨论结构参数和电磁参数对磁场分布的影响。

对电磁力控制下的流体流动和结晶器内夹杂物的迁移行为进行了数值模拟研究。模拟结果表明:

1) 单条形电磁场产生与钢液的流动方向相反的电磁力,抑制了钢液对窄面的冲击及向下的流动,结晶器下部的涡流消失,形成活塞流,使结晶器下部钢液的温度分布趋于均匀;但是上返流量增加,使得液面处钢液温度升高。

2) 双条形电磁场具有明显的分区控制效果。下部电磁场抑制了下降流,而液面附近的上部电磁场则明显地抑制了液面附近的流动,使上回流区基本消失,显著降低弯月面处钢液速度,使得弯月面较为稳定,有利于防止保护渣的卷入。

3) 施加电磁场缩短了夹杂物在结晶器内的运动路径,有利于非金属夹杂物的上浮;在相同的电磁流动控制条件下,从水口上边缘和两侧边缘附近出来的非金属夹杂物更易上浮;双条形电磁场明显地比单条形电磁场更有利于夹杂物的上浮,而且粒径越大,效果越明显。

板坯电磁制动的电磁场特性研究表明:

1) 在水平剖面上,组合式全幅二段电磁制动装置磁场基本上保持了独立的全幅一段电磁制动磁场的分布特性;垂直剖面上,工作区域附近,上下磁场方向相反的组式磁场的分布趋势与传统全幅二段相似,上下磁场方向相同的组式磁场的上下磁铁间没有形成封闭的回路。

2) 在相同条件下,与其他两种磁装置相比上下磁场方向相反的组式全幅二段电磁制动装置在工作区的磁场量值较大,分布均匀。

3) 对于上下磁场方向相反的组式全幅二段电磁制动装置,其结构参数和电磁参数对磁场分布的影响如下:

a) 磁感应强度(Y轴方向)随铁芯厚度的减小而增加。

b) 磁感应强度分布量值随铁芯宽度的减小而增加。

c) 磁感应强度分布量值随磁极间隙的增加而减小,随线圈匝数和电流强度的增加而增加。

#### 4.4 电磁搅拌细化铸坯凝固组织的实验研究

采用自行设计的单向凝固实验装置,并结合计算机数据采集系统进行了有无电磁搅拌作用下铸坯的浇铸实验,对电磁搅拌作用下的工艺参数和电磁参数对铸坯凝固组织的作用效果及作用规律进行了系统的研究。同时,分析研究了电磁搅拌强度和搅拌时间对铸坯断面溶质分布的影响。实验结果表明:

1) 在搅拌强度较大且搅拌作用时间也较长的情况下,凝固前沿枝晶会出现偏斜、折断、甚至破碎重熔,而使等轴晶比率提高,从而验证了电磁搅拌促进凝固组织细化的机械效应作用机理。

2) 对实验过程中的热工参数测试结果表明:电磁搅拌促进了铸坯内热量的尽快耗散,使铸坯内形核范围扩大,形核数量增多,从而验证了电磁搅拌促进凝固组织细化的过热耗散机理。

3) 在相同工艺参数下,有电磁搅拌作用时,铸坯内热量释放较快,冷却水升温较快且温升较高。同时,搅拌强度越大,搅拌作用时间越长,铸坯内热量的耗散越快。此外,与无电磁搅拌相比,经过电磁搅拌的铸坯内温度分布较为均匀,冷却面附近温度梯度较小,冷却速度较慢。

4) 在相同工艺参数下,铸坯凝固组织中等轴晶所占比率随搅拌强度的增大和搅拌作用时间的延长而增加。在采取低过热度浇注的同时,还应采用电磁搅拌,才能获得晶粒细小的全等轴晶凝固组织。

5) 从电磁搅拌对溶质分布的影响来看,电磁搅拌有促进溶质分布均匀的作用。但是当搅拌强度太大时,有使溶质分布的均匀性降低的趋势;随着搅拌时间的增加,碳元素的分布均匀性增强,而硫元素的均匀性降低。

#### 4.5 强磁场对金属及合金凝固组织的影响

对具有不同磁性的金属和合金在磁场中的磁感应强度以及磁化力最大位置的凝固组织的变化进行了研究和比较

1) 强度和磁化力对金属凝固组织的作用机理不同, 磁感应强度对凝固组织的原始晶粒度有影响, 而磁化力对晶粒的取向有影响。

2) 物质在强磁场作用下的晶粒度减小; 反磁性物质在强磁场作用下的晶粒度增大。

#### 4.6 外场作用下热处理对 1500MPa 级钢(42CrMo)晶粒细化的影响

对强磁场作用下的 Fe-C 合金的高温相平衡及先共析转变动力学特性进行了理论研究, 即在理论修正的基础上, 利用相变的驱动力模型, 将磁场的作用以附加驱动力的形式引入, 对磁场作用下 Fe-C 二元合金系部分相图进行了理论模拟计算; 通过对磁场作用下合金结构钢(42CrMo 钢)的高温相变过程、材料的微观组织结构的研究, 研究了稳恒强磁场的作用效果、作用机理及其在材料处理领域的应用前景; 通过对比有电场与非电场回火 42CrMo 钢的显微组织和性能, 初步探讨了电场对该种合金结构钢回火进程的影响。

对 42CrMo 合金结构钢进行有无强磁场作用的热处理工艺实验表明:

1) 磁场对先共析转变产生很大的影响。

2) 强磁场作用下试样在相变过程中产生的铁素体和珠光体沿外磁场方向呈链条状分布。

3) 图象分析结果表明, 磁场使先共析转变量增加, 而且先共析转变量随着磁场强度的增加而增加。

磁场对高温扩散型相变组织的实验表明:

1) 当样品被快速冷却时, 磁场对高温扩散相变也产生明显的动力学影响。

2) 在相同的快冷条件下, 无磁场时样品的显微组织为贝氏体, 而施加磁场时样品的显微组织仍为铁素体加珠光体的平衡组织。由此说明磁场使相变 C 曲线明显左移, 促进先共析及共析转变, 在快冷条件下得到完全退火组织。

3) 硬度测试结果表明其硬度为 HB192-211, 在最佳切削加工硬度范围之内, 因此, 该结果可形成磁场快速退火新工艺。

磁场对回火转变组织的实验表明:

1) 磁场可对析出碳化物的种类产生影响。对于不同结构的碳化物, 当解理面与共格面为同一晶面时, 析出可加速解理断裂, 使材料的韧性降低。冲击试验表明, 磁场低温回火后材料的冲击性能明显增加(10%)。

2) 高温回火时, 磁场可使碳化物呈球状析出, 而无磁场时, 碳化物则沿马

氏体边界呈片状析出。同时磁场对高温回火过程中的再结晶具有明显的抑制作用，该现象与磁场使相变点提高的结果一致

电场对回火组织及性能的实验表明：

1) 在 400°C 回火时，电场促进了淬火 42CrMo 钢回火过程中碳从过饱和固溶体中的脱溶和碳化物的析出，电场回火样品析出的片状碳化物较相应的非电场回火样品粗大；

2) 在 600°C 回火时，电场促进基体回复与碳化物的球化，电场回火样品的碳化物较相应的非电场回火样品球化明显且粗大，并较非电场回火样品的冲击韧性提高近 10%

## 二、课题的研究水平与创新性

1. 电磁流体流动控制（电磁制动）技术是当今国际材料与冶金领域研究的前沿课题。瑞典 ABB 公司、日本川崎公司等人在广泛开展电磁连铸技术的开发工作。但是，在其相关软件开发方面，文献报道的多是在单一物理场作用下对流体流动、夹杂物迁移行为进行数值计算研究。本课题开发完成了恒稳磁场作用下连铸过程中电磁场、流场、温度（凝固）场等多场耦合的数值计算软件以及其夹杂物迁移行为的数值计算软件；同时，研究了各种电磁参数和结构参数对磁场分布特性的影响规律，这些基础研究的结果对恒稳磁场作用下流体流动的控制工艺制定和电磁制动器的优化设计，开发高效的电磁连铸技术具有指导意义，研究成果达到国际先进水平。

2. 铸坯凝固组织的细化和溶质的均匀化对最终产品的质量和性能具有重要的影响。日本、韩国、瑞典、美国都有关于铸坯凝固过程中溶质分布方面的数值模拟研究报道。但是，文献报道的都是二元合金溶质分布计算和无电磁场作用下的溶质分布数值计算。本课题的创新性之一在于开发完成了多元合金溶质分布计算软件和低频电磁搅拌作用下连铸钢坯的流场、温度（凝固）场、溶质分布等多种物理场耦合作用的数值计算软件，能够合理描述连铸坯的凝固及溶质元素的宏观偏析规律，分析电磁搅拌对连铸坯内的溶质分布的作用规律；同时，可研究和优化各种工艺参数和不同电磁搅拌形式对铸坯内溶质分布的影响作用。这些成果对制定电磁搅拌新工艺，优化设计搅拌器具有重要的实用价值。研究成果达到国际先进水平。

3. 采用电磁搅拌技术，结合铸坯凝固过程温度场的测试与控制，优化外场的工艺参数及浇铸工艺条件，浇铸获得了接近 100% 等轴晶的铸坯凝固组织，居国内领先水平。

4. 在电磁搅拌细化铸坯凝固组织机理研究方面，自行设计了单侧水冷铜壁的凝固实验装置，配备计算机数据采集系统对铸型凝固过程中的若干热工参数进行实时测量。此方面的工作直接测试了电磁搅拌作用下铸坯凝固过程中的重要参数，为分析电磁搅拌机理和设计搅拌工艺和设备提供了重要的基础资料。实验研究工作结合金相检验分析和热工分析，揭示了电磁搅拌促进凝固组织细化的过热耗散机理，进一步阐述了电磁搅拌及其工艺参数和电磁参数对铸坯凝固组织细化

和溶质均匀化的作用规律,对工业生产中电磁连铸工艺制度的制定和优化具有重要的指导作用。

5. 利用 bcc-Fe 的磁化率实验数据对 Weiss 模型进行的修正,首次提出了在 Curie 点附近及以上温度利用短程有序系数取代 Weiss 分子场系数计算 Curie 点以上温度 bcc-Fe 的磁化强度。该工作成功地解决了 Weiss 模型和电子能带模型在计算材料磁化强度由低温(低于 Curie 点)到高温(高于 Curie 点)随温度变化规律所遇到的困难,大大增加了 Weiss 模型的有效温度适用范围,使后续的磁场作用下的相平衡模拟成为可能。该研究成果接近国际先进水平。

6. 首次提出中碳合金结构钢的磁场快速完全退火法,目前该方法已经申报国家发明专利。应用磁场快速完全退火方法,可使中碳低合金结构钢经预备热处理后组织细小(晶粒尺寸约  $10\mu\text{m}$ )、均匀、硬度适中(HB192~197)。因此,本方法既可以取代传统的完全退火,改善锻造组织与切削加工工艺性能,也可以取代处理中碳合金结构钢的传统的正火加高温回火工艺,在消除带状组织的基础上,改善材料的切削加工工艺性能。这一方法对改革传统工艺,将磁场处理技术直接应用于实际生产,具有极有益的影响。

7. 在淬火合金结构钢(42CrMo)进行电场回火的研究中,首次发现电场作用下样品经高温回火后冲击韧性提高 10% (其他力学性能变化很小)。这一结果将给电场热处理技术的应用研究产生积极影响。

### 三、实施效果

(农业、能源、信息、资源环境、人口与健康、材料等领域的项目应重点评价研究成果预期解决国家重大需求的实质性贡献和作用;科学前沿项目应重点评价研究成果的原创性和科学性价值、对学科发展的推动作用及国际影响)

铸坯凝固组织的细化和溶质的均匀化对最终产品的质量和性能具有重要的影响作用。超级钢的开发要求连铸能够提供成分均匀、高等轴晶比率的钢坯,以提高轧材的性能。电磁搅拌技术作为提高铸坯等轴晶比率、改善铸坯内部质量的重要手段之一,对改善连铸坯凝固组织发挥了显著作用,近些年来,随着连铸比的不断提高以及连铸生产品种不断扩大,特别是一些特殊钢由模铸生产转为连铸生产,对电磁搅拌工艺提出了新的要求,需要对其细化凝固组织的作用机理和规律进行新的认识,以对电磁搅拌工艺和设备的设计提供基础资料。本课题以电磁搅拌为手段,结合连铸坯内流动、凝固和溶质分布的耦合数值模拟软件的开发,以及电磁搅拌作用下钢坯凝固过程中热工参数的测试和变化规律的分析,探讨其细化和均质化的机理和作用规律,对指导和优化电磁连铸生产工艺,提高铸坯等轴晶的比率,扩大连铸生产品种,具有重要的现实意义。

电磁流体流动控制,即电磁制动技术,是近些年新开发的电磁连铸技术之一,已经在日本等发达国家得到应用。其主要作用是在运动的钢水通过恒稳磁场时,就会在钢水内部形成感生电流回路,此感应电流于磁场相互作用就会形成一个与钢水运动速度平行但方向相反的制动力。一方面,此制动力减缓并重新分配了来自水口的钢水主股流,改善了非金属夹杂物和气泡的上浮条件,也减少了结晶器液面的波动,防止卷渣,起到净化钢液的作用;另一方面,可减少高拉速浇铸时高温钢水对薄坯壳的冲击,防止漏钢事故的发生。目前,提高拉速是提高现有连铸机产量、提高连铸机利用率的有效途径,也是连铸发展的主要方向之一。特别是对于薄板坯连铸连轧技术尤为重要。

在我国,广州珠江钢厂、邯郸钢铁公司和包头钢铁公司于1997年初以“捆绑”方式从SMS公司引进3条薄板坯连铸连轧生产线。接着,国家又已经批准唐钢、通化、马钢、涟源等企业建设薄板坯连铸连轧生产线,另外,珠钢、邯钢又建设了第二条生产线。“十五”期间,全国薄板坯连铸连轧机的数量发展到近十台套。拟建的几套薄板坯连铸连轧生产线基本上都预留了应用电磁制动技术的工位,但除珠江钢厂第二条生产线引进德国电磁制动技术外,其它的还没有应用此技术,我国目前还没有掌握此工艺与生产技术。因此,开展此方面的研究对发展我国高效连铸和薄板坯连铸连轧技术具有重要的现实意义。

本课题以数值模拟手段,对恒稳磁场作用下钢液流动、去除夹杂物的各种物理现象和各种形式电磁制动器进行了深入的基础研究,并优化设计了电磁制动器的结构参数,设计了电磁制动器装置,为该项技术的进一步开发提供了很好的基

础资料。

强磁场以其强大的无接触能量作用必将对材料的凝固过程、相变过程产生深刻的影响，会产生许多新的现象，其中蕴涵着大量的新技术和新理论，也预示着一个新的学科——“强磁场材料科学”。本研究从实验和理论角度研究了超导强磁场对金属凝固过程，以及对中碳合金结构钢连续冷却转变和回火转变的影响，发现了一些新的现象，具有较高的理论价值，同时又有较强的实际应用前景，为材料组织、性能优化与控制提供了全新的概念及技术手段。

#### 四、人才培养、合作交流、数据共享等方面的情况

在课题执行过程中,先后有3名博士后、17名博士研究生、11名硕士研究生参加本课题的研究工作。其中,已出站博士后1人,毕业博士12人,毕业硕士5人。具体情况如下:

1) 博士后出站和博士毕业留校工作5人,其中,一人被评为辽宁省优秀骨干教师,两人次分别被晋升为教授和副教授。

2) 博士毕业后进入其它高校博士后流动站的有5人,两人入清华大学博士后流动站,一人入复旦大学博士后流动站,一人入山东大学博士后流动站,一人到加拿大 McGill University 做博士后。

3) 毕业硕士5人中,两人考取清华大学博士研究生,一人(赴俄罗斯莫斯科国立技术大学攻读博士学位。

近三年,课题组与日本东北大学、日本名古屋大学、德国伊尔梅瑙技术大学、法国 Metz 大学的 LETAM 国家实验室、日本新日铁、韩国浦项公司进行多种形式的学术交流:

1) 四人次作为日本东北大学客座研究员,赴日本进行磁场作用下金属凝固和相变方面的研究。

2) 德国伊尔梅瑙(Ilmeau)技术大学热磁流体力学研究所 A. Thess 教授来东北大学举办讲座。一名高级访问学者赴德国从事两年的磁流体计算研究;2003年10月,双方将在德国举行“中德双边材料电磁过程(EPM-Electromagnetic Processing of Materials)学术研讨会”。

3) 与法国 Metz 大学的 LETAM 国家实验室进行了广泛的合作与交流,一人次作为双方联合培养的博士赴法国 Metz 大学学习和工作,从事磁场作用下金属材料相变过程的研究。另有两人次教授被聘为该校的客座教授,从事磁场作用下金属材料相变过程的研究。

4) 两人次参加2002年在韩国浦项举行的超级钢国际会议;七人次参加2003年在法国举行的第4届材料电磁过程国际会议。

6) 在日本名古屋大学获得博士学位的两MI名博士参加此项目研究。

与本课题相关的研究成果“现代电磁连铸技术的基础研究”在2002年度获得中国冶金科学技术一等奖,辽宁省自然科学二等奖。

## 五、经费的使用和管理

课题经费的使用和管理严格按照科学技术部和财政部制定的“国家重点基础研究专项经费财务管理办法”来执行,保证了研究工作的顺利进行。

课题经费拨款数254.6万元,支出情况如下:人员费5.404万元,设备费68.455万元,管理费11.4万元,国际合作费12.8万元,其他相关费156.541万元,共计支出254.6万元。其他相关费用的使用包括材料费、燃料及动力费、测试及化验费、国内差旅费、出版与资料费、会议费、专家咨询费和其他费等。

课题执行过程中,课题负责人按照课题任务的要求,加强课题管理,组织优势力量,围绕课题目标开展攻关。积极接受首席科学家的工作安排,及时调整工作重点,抓住研究中出现的苗头,把握方向,协调各方面力量,注重发挥年轻学者的作用,形成了一支年轻化、专业知识结构优化的学术队伍。课题组以研讨会、学术报告会、讲座、交流访问、合作研究等多种形式,进行经常性学术活动,活跃了学术思想,促进了研究工作深入进行。