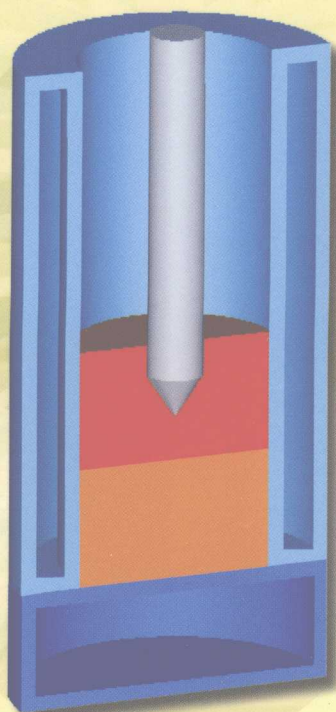


电渣熔铸过程控制 与模拟仿真

Process Control and Simulation in Electroslag Casting

耿茂鹏 孙达昕 著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

南昌大学科学技术学术著作丛书

电渣熔铸过程控制与模拟仿真

Process Control and Simulation in Electroslag Casting

耿茂鹏 孙达昕 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2008

内 容 提 要

本书介绍了电渣冶金和电渣熔铸的发展现状和作者自行研制的电渣熔铸试验装备及工艺试验过程,详细论述了电渣熔铸曲轴设备、自动控制系统和电渣熔铸金属液位自动检测系统。在建立电渣熔铸过程数学模型的基础上,对电渣熔铸过程渣池热电场、电极熔化过程、电渣熔铸工艺因素对金属熔池的影响以及电渣熔铸过程工艺参数优化系统等进行了较为深入的试验和模拟研究,对电渣熔铸过程和生产试验中出现的问题进行了理论上的分析与探讨。

本书可供电渣熔铸领域从事科学研究和生产实践的高等学校的师生和企业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电渣熔铸过程控制与模拟仿真/耿茂鹏,孙达昕著.北京:冶金工业出版社,2008.7

ISBN 978-7-5024-4519-5

I. 电… II. ①耿… ②孙… III. ①电渣熔铸—过程控制—模拟 ②电渣熔铸—模拟试验 IV. TF142

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 092400 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 刘小峰 美术编辑 李 心 版式设计 张 青

责任校对 王贺兰 责任印制 丁小晶

ISBN 978-7-5024-4519-5

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2008 年 7 月第 1 版,2008 年 7 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16;11.5 印张;4 彩页;283 千字;174 页;1-2000 册

36.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

电渣冶金属于超净、均质化的特种冶金范畴。电渣熔铸是将金属的精炼提纯、结晶凝固和成形集中到一个工序完成,使成形构件不仅具有良好的冶金质量和凝固质量,而且其形状和尺寸接近于最终产品,是物性转变的最佳短流程,因此电渣熔铸又属现代近净成形的范畴。电渣熔铸生产的铸件,材质纯净、组织致密、综合力学性能优良。20 世纪后期,电渣冶金和电渣熔铸技术取得了突飞猛进的发展,新工艺、新技术不断涌现,并相继开发出一批电渣熔铸复杂异形铸件,如大型发电机转子、水轮机叶片、船舶柴油机大型曲轴、各种高压容器、大型环件、各类轧辊、模具、透平涡轮盘、厚壁中空管、石油裂化管、齿轮毛坯、三通管、核电站压水堆主回路管道等。

20 世纪 90 年代,中国江西特钢厂的科技工作者开发出电渣熔铸曲轴一步整体成形技术,但由于它们的电渣熔铸设备比较原始,难以进行质量控制,废品率高;曲轴成形工艺不完善,曲拐部的空腔难以熔铸成形,熔铸出的曲轴毛坯加工余量过大;在熔铸过程中,因曲轴型腔复杂,钢水液位无法准确判断,自耗电极与结晶器之间容易发生打弧现象,甚至击穿结晶器而漏水,引发爆炸事故。为此,南昌大学与江西特钢厂合作,承担了江西省计委、江西省科委重点科技攻关项目和国家“863”计划新材料领域项目“电渣熔铸曲轴一步整体成形及应用开发”等多项课题,先后研制成功自动电渣熔铸试验机、电渣熔铸金属液位自动检测系统、自耗电极伺服进给控制系统、基于 PLC 的双机械手运动谐调控制系统、大型曲轴电渣熔铸设备及自动控制系统等多项重大成果,并在 2000 年前后研制出多种规格的柴油机曲轴,如山西柴油机厂的材质为 43CrNiMo、重 285kgF155 柴油机曲轴,材质均为 42CrMo 的石家庄高速风冷柴油机道依茨 FL912、913 曲轴、曼海姆 D302-2/3 曲轴和为一汽集团无锡柴油机厂大马力分厂特别开发出的重达 4~6t 的 G8300Z 和 16VG300 柴油机曲轴,上述产品均应用于生产。针对生产中出现的各种质量问题,作者又和他们的硕士、博士研究生一起进行了多年的试验和理论研究,在国内外学术刊物上发表了 40 余篇学术论文。为了进一步把研究成果贡献社会,作者将上述研究成果总结归纳,在几位博士的协助下(其中马新生博士第 1、3 章,饶磊博士第 2、4、5、7 章,尧军平博士第 6 章,唐建军博士第 8、9 章),写成这本《电渣熔铸过程控制与模拟仿真》。

本书共分 9 章,分别介绍了电渣冶金和电渣熔铸的发展现状和自行研制的电渣熔铸试验装备及工艺试验过程;详细论述了电渣熔铸曲轴设备、自动控制系

统和电渣熔铸金属液位自动检测系统;在建立电渣熔铸过程的数学模型的基础上,对电渣熔铸过程渣池热电场、电极熔化过程、电渣熔铸工艺因素对金属熔池的影响以及电渣熔铸过程工艺参数优化系统等进行了较为深入的试验和模拟研究,对电渣熔铸过程和生产试验中出现的问题进行了理论上的分析与探讨。

本书为多年生产试验和科学研究的总结,是参与课题研究的南昌大学教师、研究生,工厂的管理人员、工程技术人员和工人师傅辛勤工作的结晶。本书所述成果经过了科学实验和生产实践的考验,所引数据资料详实可信,对电渣熔铸科学研究和生产实践具有重要参考价值,可供高等学校教师、学生和企业工程技术人员参考。

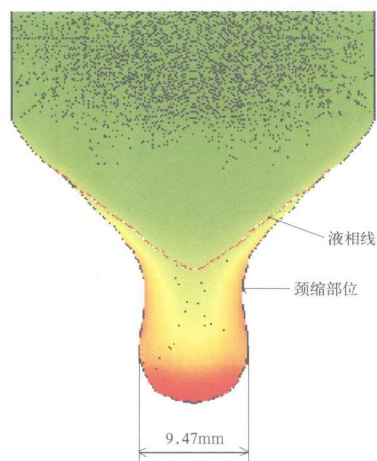
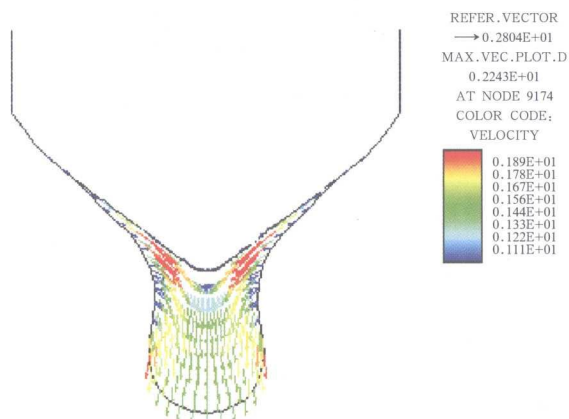
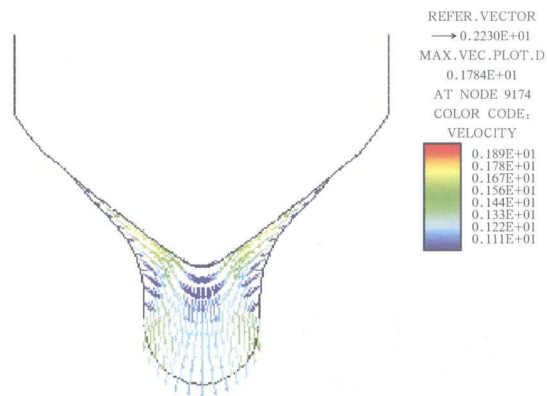
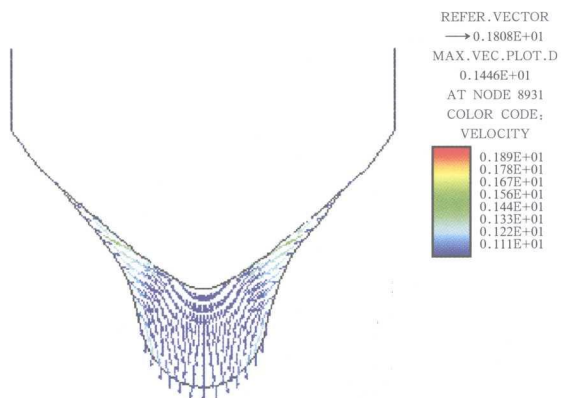
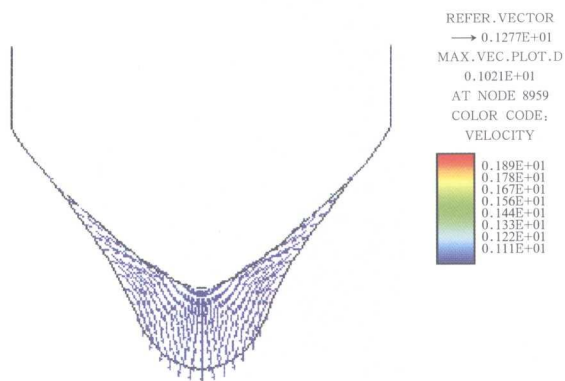
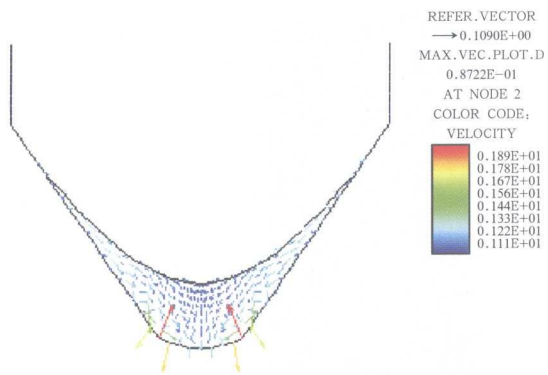
在课题的研究开发过程中,中国工程院院士李正邦教授、国家高技术新材料领域专家委员会首席科学家石力开教授、国家高技术新材料领域专家委员会委员欧阳世翕教授、责任专家王燧教授等先后莅临南昌大学指导,在此表示衷心感谢。

中国是研究开发电渣冶金和电渣熔铸较早的国家之一,李正邦、曾乐、傅杰、张家雯、姜兴渭等老一辈冶金科技工作者,在电渣冶金理论研究和新工艺、新设备、新产品的开发方面,贡献了毕生的精力,为发展中国的电渣冶金事业做出了卓越的贡献,奠定了中国电渣冶金工业的发展基础。我们是1996年才接触电渣熔铸的,是电渣冶金领域的新兵,尽管在我们的研究中曾参阅了大量上述前辈和其他科技工作者的相关文献,但由于水平和研究条件所限,加之时间仓促,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者批评指正,在此谨表衷心谢意。

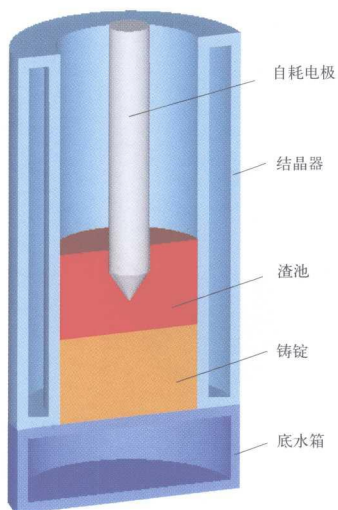
耿茂鹏 孙达昕
2008年2月22日

冶金工业出版社部分图书推荐

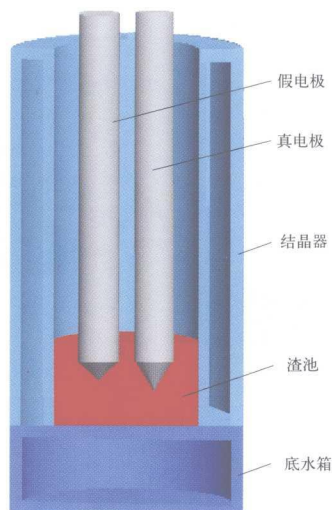
书 名	定价 (元)
材料成形工艺学	69.00
材料成形设备	46.00
材料成形实验技术	18.00
材料热工基础	40.00
材料研究与测试方法	20.00
工程材料基础	26.00
金属材料学	32.00
金属塑性成形力学	26.00
金属材料工程概论	26.00
金属凝固过程中的晶体生长与控制	25.00
金属电磁凝固原理与技术	20.00
自动控制原理 (第4版)	32.00
自动控制原理	25.00
自动控制原理习题详解	18.00
自动控制系统 (第2版)	15.00
电力拖动自动控制系统 (第2版)	35.00
参数检测与自动控制	39.00
冶金工业自动化仪表与控制装置安装通用图册 (上下) (2000)	280.00
冶金过程自动化基础	68.00
工业工程与系统仿真	45.00
冶金过程数值模拟分析技术的应用	65.00
冶金过程数值模拟基础	28.00
金属半固态成形理论与技术	29.00
材料成形计算机模拟	17.00
金属塑性加工有限元模拟技术与应用	35.00
实用模拟电子技术	28.50
钢铁冶金概论	24.00
钢铁冶金原理 (第3版)	40.00
钢铁冶金及材料制备新技术	28.00
矿物直接合金化冶炼合金钢——理论与实践	26.00
微合金化钢	25.00
薄板坯连铸连轧微合金化技术	58.00
石油天然气管道工程技术及微合金化钢	85.00
特殊钢丛书——钎钢与钎具	53.00
快速凝固 Cu - Cr 合金	18.00
焊接材料研制理论与技术	20.00



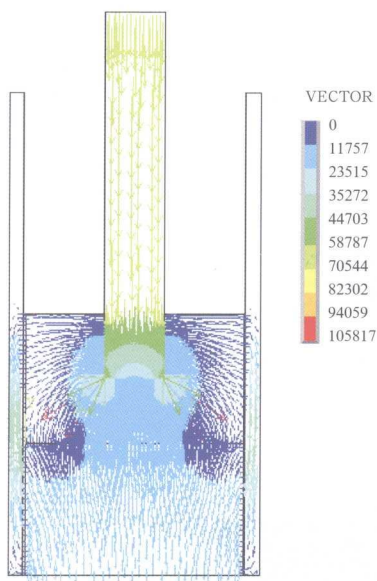
自耗电极末端在渣液中的熔化过程模拟图



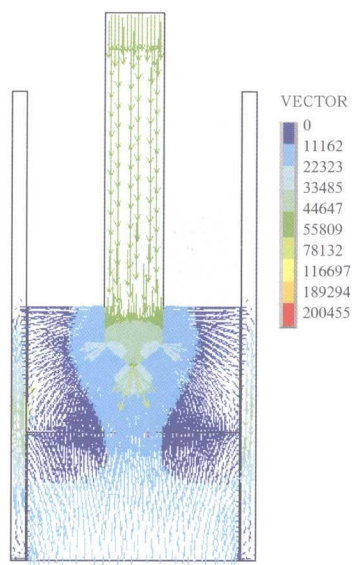
单电极熔铸系统 CAD 模型



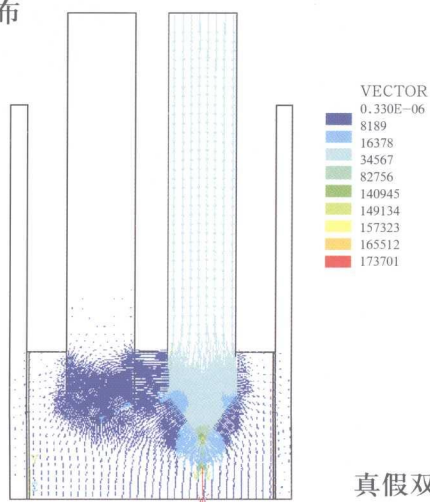
真假双电极熔铸系统 CAD 模型



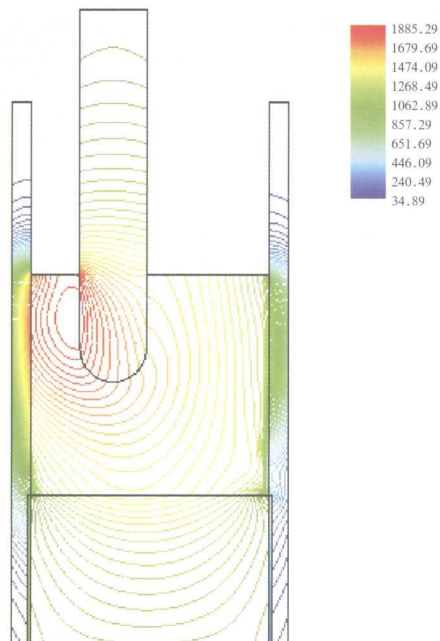
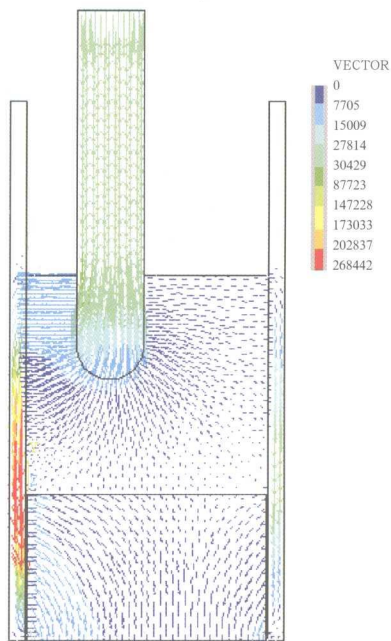
平底电极模型电流密度分布



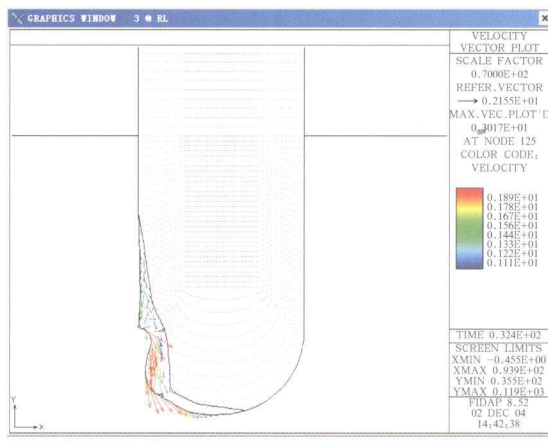
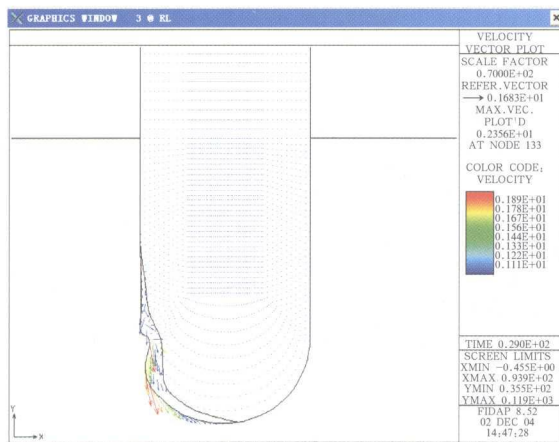
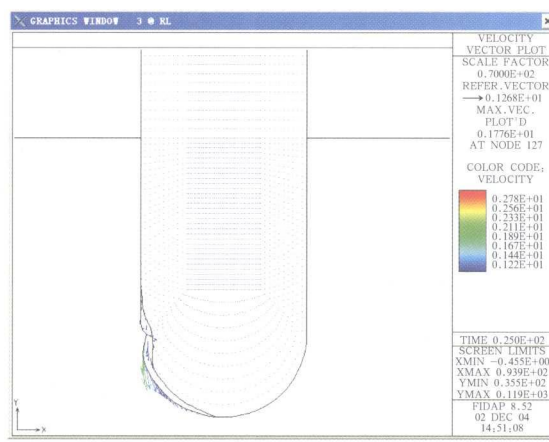
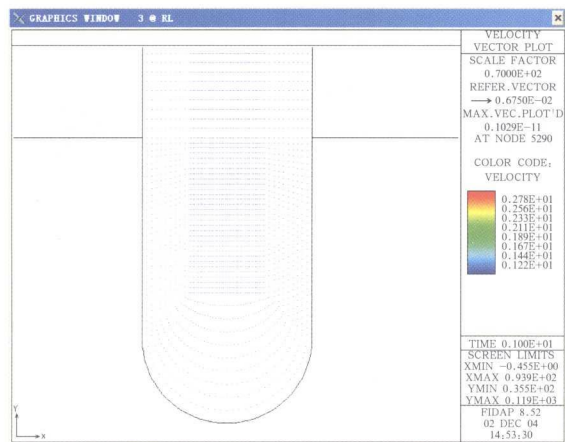
锥形底电极模型电流密度分布



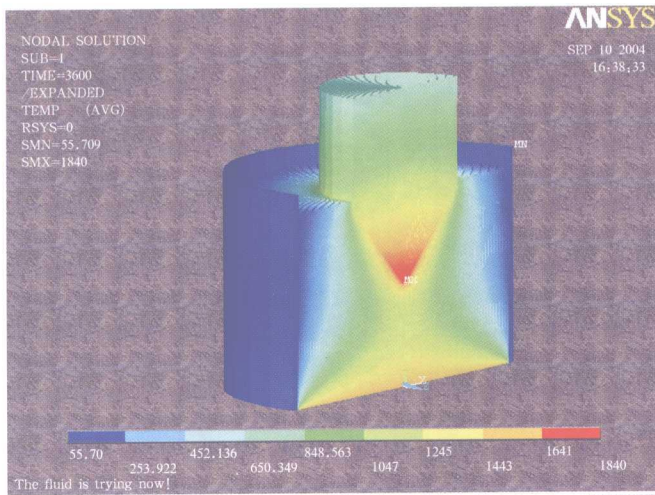
真假双电极系统电流密度分布



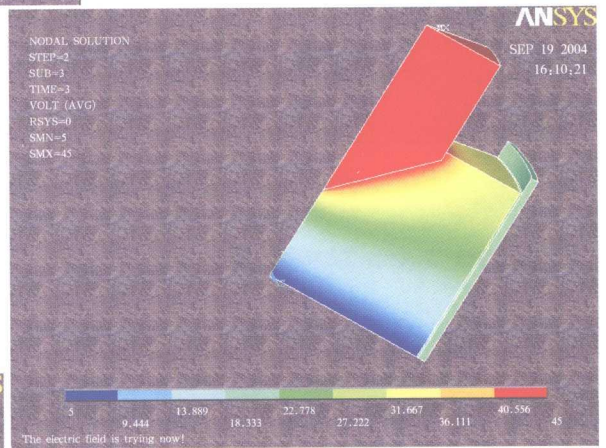
熔铸系统出现结晶器侧向击穿时电流密度分布和温度分布图



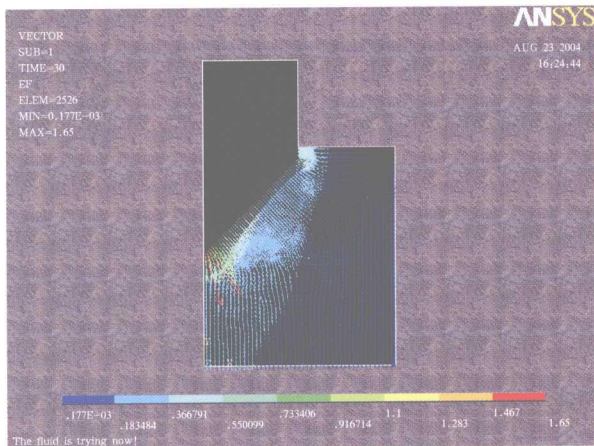
自耗电极出现偏心时在渣液中的不对称熔化过程模拟图



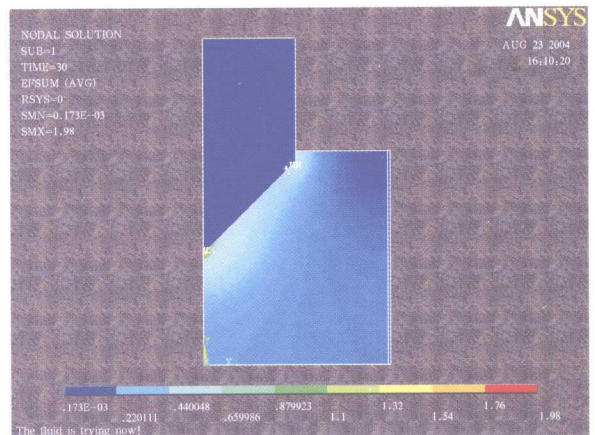
渣池温度场图



渣池电位场图



渣池电场矢量图



渣池电场图

目 录

1 绪论	1
1.1 电渣重熔(电渣熔铸)过程的原理	1
1.2 电渣重熔(电渣熔铸)过程的特点	2
1.3 电渣重熔(电渣熔铸)技术的发展	3
参考文献	8
2 电渣熔铸试验装备及工艺试验	9
2.1 电渣熔铸试验装备	9
2.1.1 连续式自耗电极输送机构	9
2.1.2 结晶器及工作平台部分	9
2.1.3 电力系统及自耗电极输送机构自动控制系统	9
2.1.4 化渣系统	10
2.1.5 辅助系统	11
2.1.6 渣池测温系统	11
2.2 电渣熔铸试验材料	11
2.3 电渣熔铸工艺试验	12
2.3.1 单因素熔铸工艺试验	12
2.3.2 多因素工艺试验	15
2.3.3 自耗电极熔化机理试验	17
参考文献	20
3 电渣熔铸过程的数学模型	21
3.1 电渣熔铸数值模拟技术研究的进展	21
3.1.1 自耗电极熔化过程的数值模拟研究状况	21
3.1.2 熔铸过程中渣池热电场的研究状况	24
3.1.3 熔铸过程中渣池磁场流场的研究状况	26
3.1.4 凝固过程中微观组织模拟的研究状况	26
3.2 电渣熔铸系统中有关的数学模型	29
3.2.1 基本假设与计算区域	29
3.2.2 熔铸系统能量守恒方程	30
3.2.3 熔铸系统电场分布方程	32
3.2.4 熔铸系统连续性方程	32

3.2.5	熔铸系统动量方程	33
3.2.6	电极熔化过程中电极固相率与温度的关系	34
3.3	电渣熔铸系统边界条件处理	34
3.3.1	自耗电极与其边界条件	35
3.3.2	渣池与大气界面条件	35
3.3.3	结晶器与其边界条件	36
3.3.4	铸锭底与底水箱接触边界条件	37
3.4	有限元与变分原理	37
3.4.1	有限元简介	37
3.4.2	轴对称相变问题的变分原理	38
	参考文献	42
4	电渣熔铸过程渣池热电场数值模拟	47
4.1	电渣熔铸中渣池热电场数值模拟	47
4.1.1	物理模型	47
4.1.2	电渣熔铸中渣池稳态时的电位场	48
4.1.3	电渣熔铸中渣池稳态时的温度场	50
4.1.4	电极下部的渣池中心高温区形成机理	52
4.2	真假双电极熔铸过程的渣池热电场模拟	55
4.2.1	物理模型	55
4.2.2	模拟结果与分析	56
4.3	电渣熔铸过程中结晶器被击穿的数值模拟	57
4.3.1	结晶器被击穿问题的提出	57
4.3.2	不同渣深和偏心度的渣池热电场数值模拟	58
	参考文献	64
5	电极熔化过程数值模拟	65
5.1	电极熔化过程物理模型	65
5.1.1	电极熔化过程 CAD/CAE 建模	65
5.1.2	CAD/CAE 模型信息传递	67
5.2	自耗电极熔化过程数值模拟	67
5.2.1	电极熔化初始阶段的数值模拟	67
5.2.2	电极熔化稳定阶段的数值模拟	71
5.3	关于自耗电极熔化的评定指标	77
5.3.1	自耗电极的熔化率	77
5.3.2	熔铸电流有效功率因数的计算	81
5.3.3	电极锥头提纯系数的计算	82
5.4	熔铸工艺参数对电极熔化过程的影响	83
5.4.1	熔铸电流对电极熔化过程的影响	83

5.4.2	渣池深度对电极熔化过程的影响	86
5.4.3	冷却水量对电极熔化过程的影响	89
参考文献		92
6	电渣熔铸过程工艺因素对金属熔池的影响	93
6.1	工艺因素对金属熔池影响的试验	93
6.1.1	试验装置、方法和数值模拟的数学模型	93
6.1.2	试验结果	93
6.1.3	数据处理	94
6.2	工艺因素对金属熔池影响的分析	94
6.2.1	电流对金属熔池的影响	94
6.2.2	渣池深度对金属熔池的影响	96
6.2.3	冷却水流量对金属熔池的影响	98
6.2.4	电极填充比对金属熔池的影响	100
6.2.5	自耗电极端部形状对金属熔池的影响	102
6.2.6	电极偏离中心程度对金属熔池的影响	103
6.3	结论	104
参考文献		105
7	电渣熔铸过程工艺参数优化	106
7.1	电渣熔铸过程工艺参数优化系统	106
7.2	电渣熔铸工艺参数最优化数学模型的建立	106
7.2.1	性能指标的确定	108
7.2.2	多目标优化函数的确定	108
7.2.3	设计变量的选择	110
7.2.4	约束条件的确定	110
7.3	神经网络的建立	110
7.3.1	人工神经元数学模型	111
7.3.2	误差反向传播训练网络(BP网络)	111
7.3.3	神经网络模型的建立与训练	112
7.4	遗传算法	114
7.4.1	遗传算法的基本概念	115
7.4.2	遗传算法实现中的一些基本问题	115
7.4.3	遗传算法工具箱介绍	117
7.5	电渣熔铸工艺参数优化系统的实现	118
7.6	电渣熔铸工艺参数优化结果输出和检验	119
7.6.1	优化结果输出	119
7.6.2	优化结果分析与检验	120
参考文献		121

8 电渣熔铸曲轴设备及自动控制系统	122
8.1 电渣熔铸曲轴单机成形设备及自动控制系统	122
8.1.1 自耗电极自动输送机构结构及特点	122
8.1.2 电极自动输送机构的机械设计	123
8.1.3 自耗电极夹持机构的协调控制(顺序控制)	125
8.1.4 电渣熔铸自耗电极伺服进给自动控制	132
8.2 系统的抗干扰问题	139
8.2.1 硬件抗干扰措施	140
8.2.2 软件抗干扰措施	140
9 电渣熔铸金属液位自动检测系统	141
9.1 电磁式金属液位自动检测系统	141
9.1.1 电渣熔铸金属液位的检测环境	141
9.1.2 检测方案分析	141
9.2 电渣熔铸金属液面电磁法检测系统	143
9.2.1 金属液面电磁传感器	143
9.2.2 检测系统的组成及信号处理	144
9.2.3 零点残余电压的处理	145
9.2.4 传感器的标定	145
9.2.5 电磁传感器检测金属液位存在的问题	147
9.3 电渣熔铸金属液位测重法检测系统	148
9.3.1 测重法检测金属液位的基本原理及方案选择	148
9.3.2 测重法检测金属液位的机械传动系统	149
9.3.3 测重法检测金属液位系统的硬件设计	151
9.3.4 检测系统的程序设计	156
附 录	164
附录一 “电渣熔铸曲轴一步整体成形及应用开发”成果之一： 自动电渣熔铸曲轴试验机	164
附录二 “电渣熔铸曲轴一步整体成形及应用开发”成果之二： 电渣熔铸金属液位自动检测系统	166
附录三 “电渣熔铸曲轴一步整体成形及应用开发”成果之三： 大型曲轴自动电渣熔铸机的研制	169
附录四 “电渣熔铸曲轴一步整体成形及应用开发”成果之四： 关于 G8300Z 曲轴(4t)产品试制	170
附录五 国家“863”项目“电渣熔铸曲轴一步整体成形及应用开发” 专家验收意见	172
附录六 南昌大学最新研制成功的自动电渣熔铸机和柴油机曲轴(照片)	172

1 绪 论

电渣熔铸（electroslag casting, ESC）技术是在电渣重熔（Electroslag Remelting, ESR）的基础上发展起来的一种新技术，属超净、均质化的特种冶金范畴。电渣熔铸将金属的精炼提纯、结晶凝固和成形集中于一个工序完成，使成形件不仅具有良好的冶金质量和凝固质量，而且其形状尺寸接近于最终产品，是物性转变的最佳短流程，因此电渣熔铸属于现代近净成形（near net shape components）技术范畴，生产的铸件材质纯净、组织致密、综合力学性能优良。国内外电渣冶金取得了突飞猛进的发展，新工艺、新技术层出不穷，形成了一个跨专业、跨行业的新学科。因此，美国材料咨询局将电渣熔铸称为“跨世纪的技术”^[1]。

1.1 电渣重熔（电渣熔铸）过程的原理

电渣重熔（电渣熔铸）是把普通冶炼方法制成的自耗电极，插入盛有高碱性熔渣的水冷结晶器中，进行再熔化精炼成形的工艺^[2,3]。电渣重熔（或电渣熔铸）的工艺过程基本原理如图 1-1 所示。在铜制水冷结晶器内，注入高温的液态熔渣，自耗电极的一端插入熔渣内，来自短网的电流通过自耗电极进入渣中，产生电阻热将渣加热至高温，自耗电极的端部被加热逐渐熔化成金属熔滴，在重力的作用下从电极端头脱落，穿过渣池进入金属熔池。由于水冷结晶器的冷却作用，液态金属逐渐形成铸锭或异形铸件。在正常熔铸情况下，电流从电极进入渣池后，要通过金属熔池和凝固铸件再由底部水箱和短网返回到变压器。通过对熔铸电压、电流等参数的控制，来控制电渣熔铸的工艺过程。

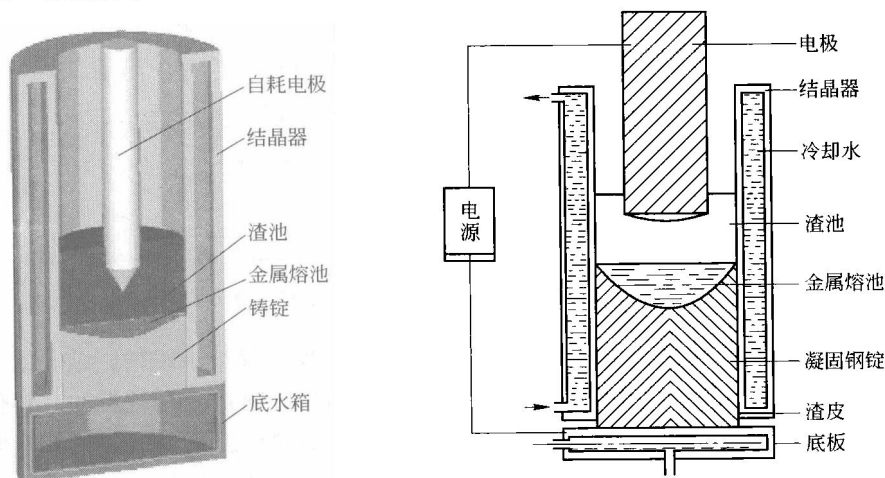


图 1-1 电渣熔铸原理图

1.2 电渣重熔（电渣熔铸）过程的特点

电渣重熔（电渣熔铸）方法可以生产出高质量的金属铸锭（件），它与其他铸造方法相比，有着显著的特点：

（1）电渣重熔（电渣熔铸）金属的熔化、浇注和凝固均在一个较封闭的环境中实现。整个熔铸过程始终在液态渣层下进行而与大气隔绝，因而最大限度地减轻了大气对金属液的污染，减少了钢水的氢、氮的增加和钢的二次氧化。另外，由于熔化和凝固均在水冷铜制结晶器中完成，因而没有普通冶炼和铸造方法由于耐火材料造成对钢水污染的缺点。

（2）电渣重熔（电渣熔铸）具有良好的冶金反应热力学和动力学条件。熔铸过程中渣池温度通常在 1750°C 以上，而电极下端至金属熔池中心区域的熔渣温度可达 1900°C 以上^[2]。因此，重熔过程中渣的过热度可达 600°C 左右，钢液的过热度可达 450°C 左右（如图 1-2 所示），高温的渣池促进了一系列物理化学反应的进行。良好的动力学条件还表现在电渣重熔过程中钢渣能充分地接触，在电极熔化末端、熔滴滴落过程及金属熔池的三个阶段中钢渣接触面积可达 $3200\text{mm}^2/\text{g}$ 以上，反应十分充分。同时在电磁力的作用下渣池被强烈搅拌，不断更新钢渣接触界面，强化了冶金反应，促进了熔渣对有害杂质元素和非金属夹杂物的吸收。因此，电渣重熔（电渣熔铸）具有精炼提纯作用，可获得高冶金质量的铸件或铸锭。

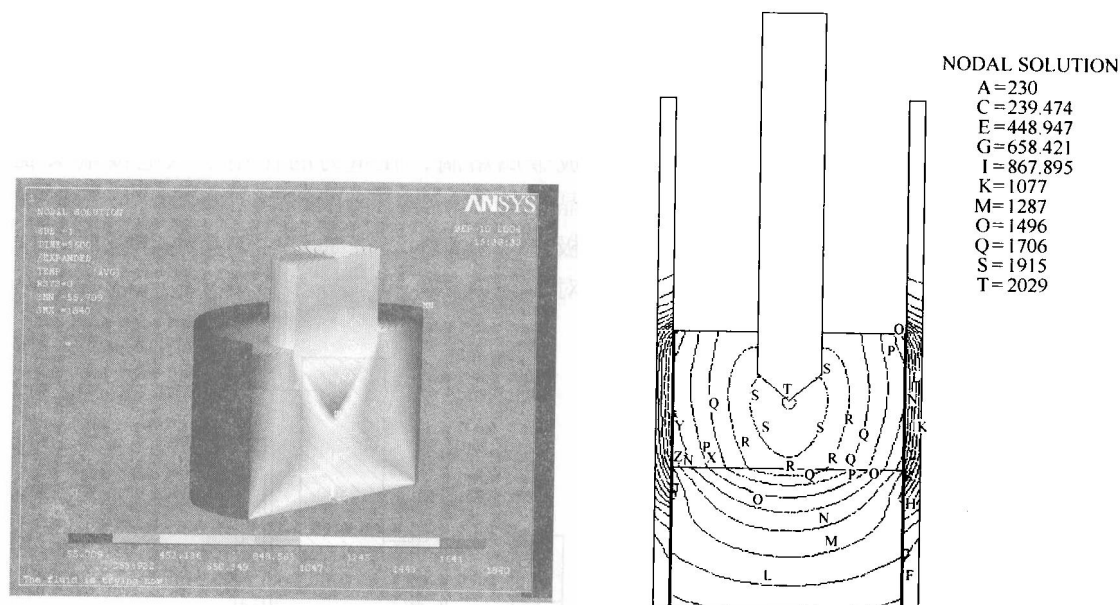


图 1-2 电渣熔铸过程渣池热电场模拟图

（3）熔融的高温渣池创造了自上而下的顺序凝固条件，保证了铸件内结晶组织的均匀致密。在电渣熔铸过程中，电极的熔化和熔融金属的结晶凝固是同时进行的。铸件上端始终有发热的渣池和液态金属熔池，相当于一个大的发热的冒口，既可保温又有足够的液态金属补充凝固过程的收缩，可以有效地消除一般铸件的缩孔和疏松等铸造缺陷，所以电渣重熔（电渣熔铸）铸件的组织致密、成分均匀。由于结晶器中的金属受到底部和侧面强制

水冷，冷却速度很大，金属的凝固只在很小体积内进行，使得固相和液相中的扩散受到抑制，减少了成分偏析并有利于夹杂物的重新分配。同时，这种凝固方式可有效地控制结晶方向，可以获得趋于轴向的结晶组织。

(4) 在电渣重熔（电渣熔铸）过程中，由于结晶器壁的强制冷却，渣池侧面形成渣壳。在合理的工艺条件下，金属熔池与结晶器壁有一定的接触高度。金属熔池在上升过程中部分凝固的渣皮重新熔化，使渣皮薄而均匀，金属在这层渣皮的包裹中凝固，使铸件表面十分光洁^[4]。另外，渣皮的存在能减少径向传热，有利于形成轴向结晶条件。

1.3 电渣重熔（电渣熔铸）技术的发展

电渣重熔（电渣熔铸）技术起源于20世纪40年代的美国，发明者 R. K. Hopkins 获得了“电铸锭法”专利。但由于缺乏理论研究，R. K. Hopkins 及其同事长期误认为电渣过程是“埋弧过程”，所以该技术未获推广^[5]。现代电渣冶金技术是由前苏联发展起来的。乌克兰巴顿电焊研究院在埋弧焊接过程发明了电渣焊，在其基础上开发出电渣冶金技术。1958年，乌克兰德聂伯尔特钢厂建成了世界第一台0.5t工业电渣炉，使电渣冶金进入了工业化生产进程。进入60年代，出于航空航天及军备竞赛的需要，苏联对电渣冶金开展了大量的研究工作，极大地推动了电渣冶金的发展。而美国和西欧的一些国家，在真空电弧重熔与电渣重熔二者之间，经历了七年激烈竞争后确认，电渣重熔不仅设备简单，易于操作，成本较低，而且在质量方面，除去气不如真空电弧重熔外，结晶组织、脱硫及去除夹杂物的能力、钢锭表面质量等均优于真空电弧重熔。因此，很多航空材料转向由电渣重熔设备生产。由于很多国家都致力于发展电渣冶金，电渣冶金（电渣熔铸）技术进入飞跃发展的年代。据有关资料报道，现在世界电渣钢生产能力超过120万t/a，电渣熔铸的产品有400多个品种，涉及到原子能、宇航、船舶、电力、石油化工以及重型机械等工业部门。电渣重熔（电渣熔铸）的发展主要表现在以下几个方面：

(1) 钢锭大型化已成为电渣冶金发展的必然趋势。最初各国工业电渣炉容量仅为0.5t，大一些的一般也不超过3t。80年代中期，很多国家都有了50t以上的电渣炉，印度等发展中国家也建立了88t电渣炉。目前，世界上最大的电渣炉是我国上海重型机器厂的200t电渣炉及德国萨尔钢厂的165t电渣炉。世界上最大的电渣钢生产厂家是乌克兰德聂伯尔特钢厂，拥有22台电渣炉和年产10万t电渣钢的生产能力。上海重型机器厂的200t电渣炉18年来摸索出一套成熟的工艺，在工艺上的创新是：低氢控制，凝固控制和低铝控制^[6]。

(2) 关于电渣热封顶（ESHT）技术^[7]。电渣热封顶（ESHT）即电渣热补缩技术，主要用于大型铸锭和大型铸件的电渣热封顶。其目的都在于减小缩孔深度，消除疏松和偏析，提高铸锭及铸件的密度和成材率。大型铸锭的电渣热封顶是将一般冶炼方法冶炼的钢液浇入盛有渣料的钢锭模。由于熔渣的密度大大小于钢液，因此在锭模内钢液上面迅速形成一个渣池，将金属电极或石墨电极插入渣池，适量输入电能即可进行热封顶，如图1-3所示。采用金属电极热封顶，可使金属液以熔滴的形式不断地填充缩孔，效果优于石墨电极。但必须制备与铸锭化学成分相同的“本钢种”金属电极。

(3) 关于电渣中心填充技术。电渣中心填充技术是米德威尔—海宾斯托（Midvale-