

电渣熔铸

李正邦 等 编



国防工业出版社

TG26
5
3

电 渣 熔 铸

李正邦 洪彦若 张祖贤
邹文正 谢继莹 周志喜 等编

国防工业出版社



A865791

内 容 简 介

电渣熔铸是在电渣重熔基础上发展起来的一项新技术,它兼具电渣精炼和铸造成型两种功能,是生产优质铸件的一条新途径。本书是在总结国内外电渣熔铸科研成果及生产经验的基础上写成的,对电渣熔铸的原理、熔渣的物理化学性能、电渣炉设备、电渣熔铸工艺、铸件性能及国外电渣熔铸技术的新发展作了较系统地介绍。可供从事电渣熔铸和使用电渣熔铸成品的工程技术人员阅读,亦可供高等院校电冶金专业和铸造专业师生参考。

电 渣 熔 铸

李正邦 洪彦若 张祖贤 等编
邹文正 谢继莹 周志喜

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张 18 ¹/₄ 427 千字

1981年8月第一版 1981年8月第一次印刷 印数: 0,001—2,200册

统一书号: 15034·2128 定价: 1.90元

前 言

电渣熔铸是一项跨专业的新技术。它兼具重熔精炼及铸造成型两种功能。电渣熔铸的问世，为生产优质毛坯开辟了一条新途径。

电渣熔铸在国外已应用于许多工业部门，受到工程界普遍重视。国内在发展电渣熔铸新工艺及研制电渣熔铸产品方面积累了一定经验。本书是在总结国内生产经验及科研成果的基础上，吸取了国外电渣熔铸方面先进技术而写成的。

电渣熔铸起源于电渣重熔。它的基本原理和主体设备——电渣炉与电渣重熔原则上无区别。鉴于电渣重熔出现较早，所积累的资料较充分、完整，所以本书一些章节借用了电渣重熔的数据和理论。

本书简述了电渣熔铸的优越性及采用电渣熔铸的原则，论述了电渣熔铸的重熔精炼过程及铸件结晶过程的原理；概述了电渣熔铸所使用渣的物化性能，以及电渣炉结构设计、熔铸工艺操作、铸件质量性能；最后概略地介绍了国外电渣熔铸发展的新动向。

本书第一章由钢铁研究院陶令辉同志编写；第二章由钢铁研究院李正邦、郑学锋、张家雯等同志编写；第三章由钢铁学院朱元凯、洪彦若同志编写；第四章由武汉钢铁设计院周志喜、李泰恭、李勤周同志编写；第五章由太原钢铁公司邹文正同志等编写；第六章由大冶钢厂谢继莹、黄国强同志编写；第七章由五二研究所张祖贤同志编写，参加校审的还有杜德昌同志。全书汇总校审修改工作由李正邦同志承担。本书是电渣熔铸方面的专业技术书，由于水平所限，缺点和错误之处，恳请批评指正。

编 者

一九七九·九

目 录

第一章 概述	1
第二章 电渣熔铸原理	3
2.1 电渣熔铸基本过程	3
2.2 电渣熔铸过程的热传递	8
2.3 冶金反应	14
2.4 电渣熔铸的凝固和结晶	30
第三章 熔渣的物理化学性能	40
3.1 电渣熔铸对渣的要求	40
3.2 相图	41
3.3 熔渣的表面张力、界面张力、浸润能力与附着功	45
3.4 密度	55
3.5 粘度	58
3.6 熔渣电导	64
3.7 热容	68
3.8 熔渣的透气性	71
3.9 渣的蒸汽压及安全性	77
3.10 常见电渣组元的性质及其确定原则	80
第四章 电渣炉	85
4.1 电渣炉工艺布置	85
4.2 电渣炉设备及结构	89
4.3 电渣炉车间辅助设备	134
第五章 电渣熔铸工艺	140
5.1 电渣熔铸工艺的选定	140
5.2 电渣熔铸操作	171
5.3 典型产品电渣熔铸工艺	185
第六章 电渣熔铸的冶金质量和铸件性能	195
6.1 电渣铸钢的纯净度	195
6.2 电渣铸钢的致密性及低倍组织	198
6.3 电渣铸钢化学成分、组织均匀性及显微组织	201
6.4 电渣铸钢的机械性能	215
6.5 电渣熔铸件的热处理及使用性能	229
第七章 国外电渣熔铸工艺的发展	240
7.1 电渣熔铸管材与棒材	240
7.2 复杂异型件电渣熔铸	258
7.3 液体金属的电渣浇注法	268
7.4 焊接钢锭与分批电渣浇注、自耗模电渣重熔	271
7.5 电渣熔铸技术在回收高合金金属废料中应用	277
7.6 进一步提高电渣熔铸产品质量的可能途径	278
7.7 电渣熔铸过程自动控制现代水平的简介	285

第一章 概 述

随着现代科学的发展,涌现出许多新技术及新工艺,进一步推动了现代工业向大型化、高速化、连续化和自动化的方向发展。

现代工业生产需要的优质合金钢及特种合金数量日益增多,对金属材料质量和性能要求不断提高,毛坯的重量和体积不断增加,因此必须大力发展冶炼(包括二次精炼)、浇铸、锻压及热处理工艺,同时必须建立大型冶炼、锻压及热处理设备,建筑高大厂房,增置一系列辅助设备。即使如此,对某些大型锻件异型产品在数量上仍然不能满足需要,质量上仍然达不到要求,尚存在着冶金质量差、模具损耗大、锻压废品率高、工序复杂、生产周期长、材料利用率低等一系列问题。

针对上述情况,近十年来国内外在电渣重熔工艺的基础上发展起来的一项新技术——电渣熔铸工艺,并已经成功地解决了某些大型锻件和异型产品的制造及质量等问题。它将有用地推动原子能、航空、造船、电力、石油化工以及重型机械工业的发展。

电渣熔铸工艺是把普通冶炼方法制成的钢电极,插入盛有高碱性熔渣的水冷异型结晶器中,同时进行再熔化精炼和锻造成型的工艺。

在电渣精炼过程中,钢渣反应温度高,渣池强烈搅拌,金属熔滴与高碱度渣充分接触,强化了钢渣界面反应,使金属及合金的纯净度大大提高;与精炼同时进行的金属与合金的凝固过程,是在水冷金属结晶器的强制冷却条件下进行的。凝固过程中金属熔池的上方始终保持一个高温的渣熔池,使得熔融金属自下而上地顺序凝固。因此,电渣熔铸金属的结晶组织均匀致密。

电渣熔铸工艺包括精炼与凝固两个过程。它决定了电渣熔铸件的冶金质量和机械性能远远高于一般砂型铸件。大量的研究工作表明,对许多钢种来说,电渣铸态金属的冶金质量高于普通冶炼的变形金属,其性能不仅不低于普通冶炼的变形金属,甚至在一些指标上还超过普通冶炼的变形金属。所以,电渣熔铸工艺可以直接制造高质量的异型铸件,可与普通冶炼的同钢种锻压件相媲美。

机械工业中的产品毛坯,无非是用铸造、锻压或轧制成型的。一般来说,铸造异型毛坯的工艺要比其它方法经济合理,毛坯尺寸比锻坯或轧坯更接近产品的尺寸。但是,普通铸造毛坯的金属质量和性能均低于变形金属。这是因为熔化的金属以流股形式注入铸型时,与空气接触发生了二次氧化,另外熔融金属与造型材料相互作用,产生新的非金属夹杂物,从而降低了铸件的冶金质量和性能,特别是尺寸较大的铸造毛坯,在砂型中凝固缓慢,极易产生由于结晶和偏析而带来的各种缺陷。从现代的铸造技术来看,如:压力铸造、精密铸造和离心铸造,还没有哪一种方法,能使同一种金属达到或者超过变形金属的冶金质量和性能。

普通铸态金属经过变形(锻造、轧制)后,粗大的一次树枝状晶被破碎细化,气孔、缩孔和疏松被压合使组织变为致密。但是,变形不能提高金属的纯净度,也不能完全消除

铸态组织的化学不均匀性。特别是尺寸较大的锻造毛坯，由于铸锭金属冶金质量上的种种缺陷，严重影响它的使用性能；锻造和轧制工艺使变形件产生各向异性，尤其横向性能指标偏低；大部分高合金材料难于变形，产品的锻压废品率高；异型件的锻压毛坯另一个致命弱点是毛坯粗大，从而使锻压设备及工艺复杂，金属切削量大，材料利用率低。

电渣熔铸工艺从根本上解决了一般铸造工艺的主要矛盾，它综合了电渣重熔——获得高冶金质量的金属和铸造——浇铸异型零件精化毛坯的长处，并具有与普通冶炼的变形金属相近的致密组织以及无各向异性的特点。与普通锻件相比，电渣熔铸件的各項性能指标完全可以达到同钢种的变形金属指标，甚至还避免了锻件的一些不足之处。

在电渣重熔的基础上发展起来的电渣熔铸新工艺，是生产高质量异型件、精化毛坯的一条新途径。可以肯定，电渣熔铸工艺对解决某些大锻件和异型产品的制造及质量问题，具有很大的优越性和现实意义。

近些年来，电渣熔铸新工艺逐渐引起了国内外工程技术界的重视，许多工业部门在加紧研究和使用电渣熔铸产品。在发展这项新工艺方面，苏联、日本和美国的研究成果较多，其次是西德、捷克斯洛伐克、英国、瑞典和法国。我国在发展电渣熔铸新工艺以及研制使用它的异型件方面，也取得不少可喜的成果。

电渣熔铸的产品涉及到原子能、宇航、船舶、电力、石油化工以及重型机械等工业部门，异型件有各种各样的形状和尺寸，其最大重量达几百吨，最小的只有几十克。目前电渣熔铸的产品有：巨型发电机转子轴、船舶柴油机大型曲轴、各种高压容器、大型圆环件、各种类型的轧辊、动力管道的阀体、三通管、透平涡轮盘、厚壁中空管、核电站压水堆的主回路管道（直管、弯管）、石油裂化炉管（圆、椭圆及U型管）、齿轮毛坯、各种模具（包括冲压模具）和几十克的假牙。

实践证明，采用电渣熔铸具有下列优越性：

- （1）电渣熔铸设备简单，无需大型锻压设备及高大的厂房；
- （2）操作方便，易于掌握；
- （3）工序简化，缩短生产周期，节约工时，以生产某热强合金饼材为例，生产周期相对于锻件缩短了75%；
- （4）毛坯精化，减少金属切削消耗，提高了材料利用率，以电渣熔铸的曲轴为例，比锻造的节省金属材料50%；
- （5）成本低，以电渣熔铸复合冷轧轧辊为例，成本比同类材料锻造轧辊的降低40%；
- （6）电渣熔铸铸件金属纯洁、组织致密、成分均匀、性能不亚于同钢种锻件。

电渣熔铸工艺如同其它新工艺一样，其应用范围也有一定的局限性。选择电渣熔铸产品的对象，应综合考虑产品的技术经济指标。选择熔铸产品时可参考以下几条原则：

- （1）该产品用其它方法无法生产；
- （2）现有设备能力无法生产，或者需要大量投资建造庞大的锻压设备和辅助措施；
- （3）现有方法生产的毛坯需要花费相当多的劳动力和材料；
- （4）产品形状复杂，并且要求高质量高性能，同时也要兼顾提高金属材料利用率。

目前，国内外电渣熔铸工艺仍处于发展阶段，人们对“电渣熔铸”还要有一个实践——认识——再实践——再认识的过程；如何进一步研究和完善电渣熔铸的专用设备，保证工艺过程和产品质量稳定；进一步提高精炼效果，改善铸件的结晶组织；研究和制定适于熔铸件的热处理工艺和技术条件以及熔铸件的无损探伤等问题，还要做更多的工作。

第二章 电渣熔铸原理

2.1 电渣熔铸基本过程

电渣熔铸起源于电渣重熔，与电渣重熔的过程基本相同，它一方面对冶炼的钢进行再次精炼，另一方面又可直接铸成异型铸件。

2.1.1 基本过程

电渣熔铸的基本过程如图 2-1 所示。

电流通过液态熔渣产生的电阻热将金属电极熔化，熔化的金属汇聚成滴，穿过渣层进入金属熔池，然后在异型水冷结晶器内凝固成异型铸件的方法称为电渣熔铸，其基本过程见图 2-1。在铜制异型水冷结晶器 2 内，注入高温的液态熔渣 3，自耗电极 1 的一端插入熔渣内，来自短网 8 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，自耗电电极的顶部被渣池逐渐加热熔化形成金属熔滴，金属熔滴从电极端头脱落，穿过渣池进入金属熔池 4，由于水冷结晶器的冷却作用，液态金属逐渐地形成异型铸件 5。

铸件由下而上逐渐地凝固，使金属熔池和渣池不断向上移动。上升的渣池首先在水冷结晶器内壁上形成一层渣壳，这层渣壳不仅使铸件表面平滑光洁，也起到保温隔热作用，并使更多的热量从铸件传给底部冷却水，这将更有利于铸件结晶过程自下而上地进行。

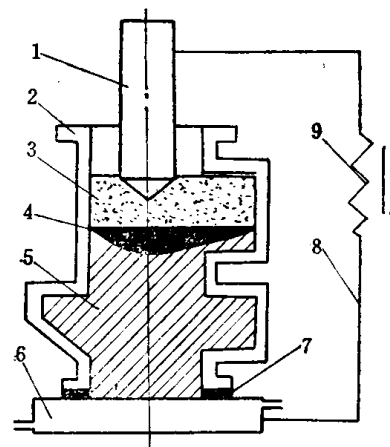


图2-1 电渣熔铸原理图

1—自耗电电极； 2—水冷异型结晶器；
3—渣池； 4—金属熔池； 5—熔铸件；
6—底水箱； 7—绝缘； 8—短网； 9—
变压器。

2.1.2 电极的熔化

电极熔炼的特点与电极形状、尺寸和冶炼电制度、渣池深度有关。电极熔化过程是否正常，往往反映在电极熔化末端的形状上面。当电极下降速度由慢到不断加快时，电极熔化末端的形状及埋入渣池的深度都有显著的变化，见图 2-2。其变化情况如下：

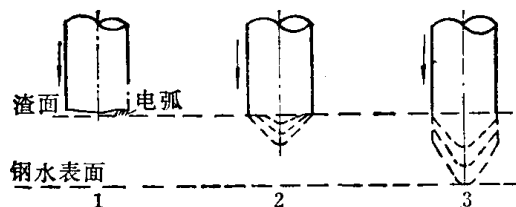


图2-2 电极熔化特点图

1—电极低速下降时； 2—稳定的电渣过程电极下降速度； 3—电极下降速度过大时。

（1）电极下降速度过低，电极末端呈平的端面，在电极端面的边缘有熔滴汇聚的凸起出现。电极熔化过程中，金属熔滴在电极端面，当熔滴下落的瞬间，有电弧放电产生，此时电流波动很大，至此电渣过程已破坏。

（2）当加大电极下降速度，即增加冶炼电流时，电极末端凸起。如果再逐渐增加电极下降速度，电极末端中心汇聚的凸起将越来越大，并

逐渐呈锥形，直至最后形成正常锥体。此时电流电压波动越来越小，趋向稳定，这是稳定的电渣过程。这时的电制度为冶炼最佳电力制度。

(3) 如果继续加快电极下降速度，电极末端的锥面外凸，自耗电极未熔化部分深埋入渣池中。这时如果保持这个下降速度，可以观察到电流逐渐地增大，如再继续加快电极送进就有可能造成电极与金属熔池的短路现象。

第1种情况是在电极与渣面之间可以直接观察到电弧放电。第3种情况是电极与金属熔池之间短路时，渣池因过热而沸腾出现电弧放电。当熔滴脱离电极端部的瞬间，电极端部和金属熔池表面之间，周期地发生弧光放电。从示波器照相上看到的电压和电流正弦波形曲线的畸变证明了这种特殊的电弧过程是存在的。图2-3上电流电压的峰值相当于熔滴脱离电极端部的一瞬间。

综上所述稳定的电渣过程范围，是在使电极端部和渣面产生弧光放电，和使电极端部深插入渣池与金属熔池产生弧光放

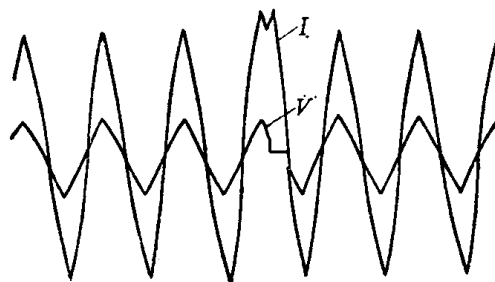


图2-3 电极和金属熔池之间电弧放电时，电压和电流正弦波形曲线的畸变

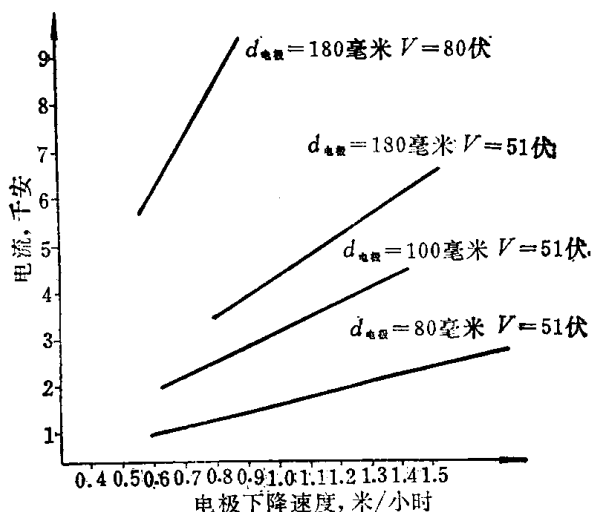


图2-4 电流同电极下降速度的关系
(渣系AHΦ-6) (1)

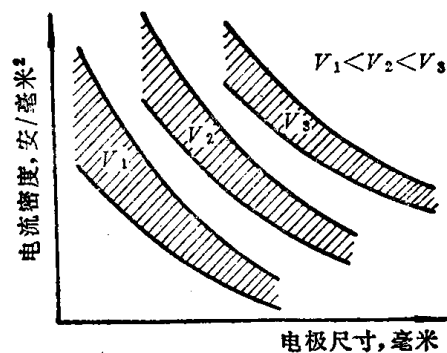


图2-5 通过电极的电流密度、电极尺寸和电压对电渣过程稳定性的影响

电之间。

当电压、炉渣化学成分及渣量，电极截面等条件相同时，随着电极下降速度的增加，放电间隔的距离减小，相当于渣池的电阻降低。从而增加了冶炼电流的强度。所以冶炼电流的大小同电极下降速度之间近似于直线关系^[1]，见图2-4^[1]。

当增加电极截面时，必须明显地增加电流才能获得稳定的电渣过程，然而维持稳定的电渣过程所要增加的电流比电极截面增加的倍率小。因此随着电极截面的增加，稳定过程需要的电流密度相对减少了。

随着电压的提高，稳定电渣过程需要通入较大的电流密度，见图2-5。

2.1.3 熔滴的形成和过渡

电渣重熔过程中，金属自耗电极以熔滴的形式通过渣层进入金属熔池。离开电极端部的熔滴，在他们进入金属熔池之前往往分散、细碎，它的平均尺寸及通过渣层所走的距离

都取决于重熔过程中的电压、电流的大小，炉渣的成分和数量，电极的截面和重熔金属的成分，电流的种类和极性等。汇集在电极端部的熔滴受重力和电动力的作用，见图 2-6。这些力使熔滴脱离电极，而炉渣同熔滴的介面张力则阻止熔滴脱落。

当重力和电动力超过介面张力时，即发生熔滴的脱落。汇集在电极端部的熔滴，在体积增大的过程中缩小了放电间隔的距离，而增加导电性，电流增长到最大值的瞬间熔滴脱落。

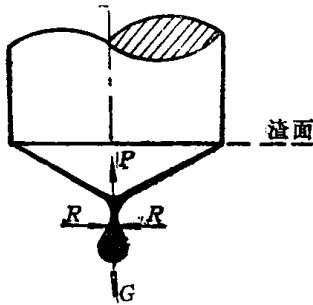


图2-6 汇集在电极端部熔滴上的作用力
G—重力；R—电动力；P—表面张力的合力。

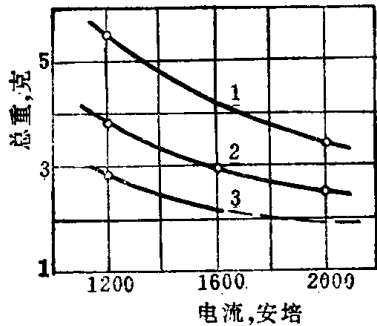


图2-7 用不同直径的电极时熔滴重量同电流的关系
1— $d_{\text{电极}} = 60$ 毫米；2— $d_{\text{电极}} = 40$ 毫米；
3— $d_{\text{电极}} = 30$ 毫米。

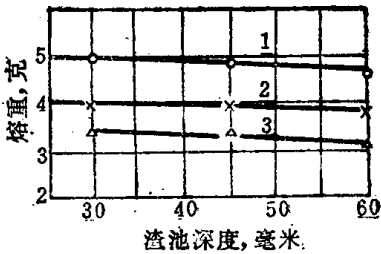


图2-8 在不同电压下渣池深度与金属熔滴重量关系⁽¹⁾
1—31伏；2—41伏；3—49伏。

用示波照相方法研究熔滴过程得出这样的结论：熔滴过渡的频率随着电极供给速度以及相应电流的增加而增加。熔滴的重量随着电流的增加而减少⁽¹⁾，见图 2-7。这是由于电动力随着电流的增加而增加，从而促使了熔滴的脱落。

熔滴脱落与电压的关系见图 2-8。如果提高电渣过程的电压，使炉渣的温度升高，钢渣的介面张力降低，会促使熔滴过渡频率增加，熔滴尺寸减小。由图 2-5 及表 2-1 可看出增加电压的影响大于增加电流的影响。由图 2-7 可看出熔滴重量随着电极截面的增大而增

表2-1 金属熔滴过渡特征表

过 程 参 数	1 秒 钟 内 过 渡 的 熔 滴 数	熔 滴 的 平 均 重 量 （克）	熔 滴 的 平 均 直 径 （毫 米）
电极速度： $v = 155$ 米/小时焊接			
32伏	4.27	0.55	5.2
44伏	5.0	0.47	4.91
56伏	9.0	0.25	4.0
工作电压： $V = 40$ 伏			
交流电：			
$V = 78$ 米/小时	1.67	0.71	5.6
155米/小时	5.0	0.47	4.9
300米/小时	9.0	0.51	5.0
直流正接：			
78米/小时	2.0	0.60	5.3
155米/小时	8.3	0.29	4.1
300米/小时	17.0	0.27	4.0
直流反接：			
78米/小时	3.2	0.37	4.5
155米/小时	14.8	0.16	3.4
300米/小时	26.0	0.18	3.5

加。由图 2-8 又可看出改变渣池的深度对熔滴重量影响不大。

熔滴特征与电渣过程中所用电流种类和极性的关系见表 2-1。从表中看出使用交流电时熔滴的尺寸最大，直流电反接时尺寸最小，直流电正接时介于二者之间。而使用交流电时熔滴的过渡频率最小，使用直流电反接时熔滴的过渡频率则最大。

当电渣铸锭结束后，从已凝固的渣饼里发现有球状金属颗粒。对不同的电流种类和极性，其颗粒的重量和尺寸见表 2-2^[1]。它远比表 2-1 用示波器所测得的熔滴尺寸小，这意味着示波器所测得的是熔滴形成的频率，而在渣池中熔滴受到熔渣粘滞阻力、电磁力、重力及渣池热对流等作用，可能被破碎，见图 2-9。

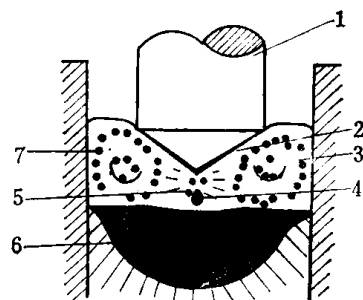


图2-9 细碎的金属熔滴形成的示意图

1—自耗电极；2—积聚在电极端面上的液体金属层；3—渣池；4—脱落的金属熔滴；5—细碎的熔滴；6—金属熔滴；7—随热流循环的碎熔滴。

表2-2 在不同电流种类和极性电渣重熔时金属熔滴的尺寸及数量

电流种类与极性	凝固渣层中残留不同尺寸熔滴的重量 (克)								示波器测得熔滴平均重量 (克)
	>2.5 (毫米)	1.6~2.5 (毫米)	1.0~1.6 (毫米)	0.4~1.0 (毫米)	0.25~0.4 (毫米)	0.16~0.25 (毫米)	0.10~0.16 (毫米)	<0.10 (毫米)	
交流电 33伏/1600安	0.25	0.20	0.24	0.49	0.16	0.08	0.01		1.43
直流电 33伏/正接	0	0.32	0.12	0.32	0.22	0.20	0.04	0.02	1.24
直流电 33伏/反接	0	0	0	0.16	0.40	0.44	0.14	0.12	1.26

注：重熔钢为3KII，结晶器直径100毫米，渣系CaF—BaO。

2.1.4 熔池形状

电渣熔铸的过程中金属熔池的形状和大小直接影响熔铸件的结晶，从而影响钢锭的质量。金属熔池的形状与电极熔化和工艺参数有着密切的关系。

随着电流的增加，即随着电极下降速度的增加，金属熔池的特点如图 2-10 所示。

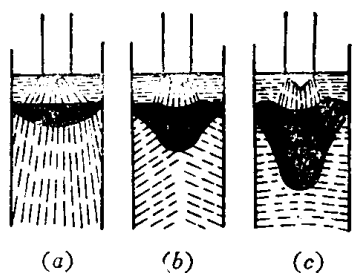


图2-10 随着电极下降速度的增加，电极熔化和金属熔池形状变化的特点
a—低速；b—中速；c—高速。

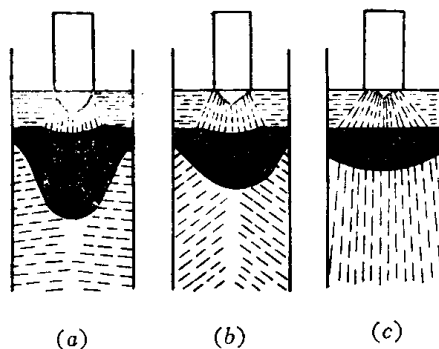


图2-11 增加电压时电极熔化和金属熔池形状变化特点
a—低电压；b—中等电压；c—高电压。

电极下降速度加快，金属熔池深度增加，导致铸锭结晶特点改变，使晶体的生长方向接近于径向状，这种铸锭的组织接近普通钢锭，因此要选用适当的冶炼电流，即合适的电极下降速度，以保证电渣铸锭具有理想的轴向结晶。

金属熔池形状与电压的关系如图 2-11 所示。

随着电压的升高，金属熔池底部向扁平方向发展，晶体的生长方向逐渐接近于轴向，熔池温度趋向均匀，因而提高了铸锭表面质量。但过分地提高电压可以导致渣池沸腾，破坏电渣过程，产生电弧过程。

图 2-12 所示为金属熔池形状与渣量的关系。

当其它参数不变时，金属熔池深度随着渣量的增加而减少，这是由于渣量增加渣池变深，消耗于维持炉渣处于熔融及过热状态的热量就增加，因而保持金属熔池的熔融及过热状态的热量就大大地减少。过分地加大渣量使得金属熔池体积小、温度低而影响钢锭的质量。金属熔池的深度随导热性的增加而减少，见表 2-3。

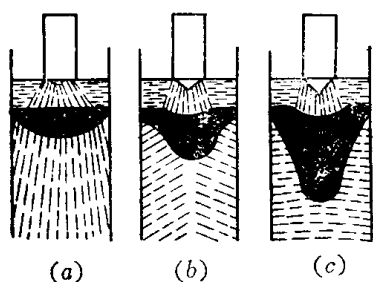


图2-12 随着渣池深度变化电极熔化和金属熔池形状变化特点
a—浅渣池；b—中等渣池；
c—深渣池。

表2-3 金属熔池形状与金属导热性的关系^[2]

	导热性 (千卡/米·秒)			金属熔池深度 (毫米)
	100°C	300°C	600°C	
铜	0.900	0.880	0.822	10
阿姆老铁	0.163	0.132	0.094	53
ЭИ4374A 合金	0.031	0.039	0.054	74

2.1.5 电渣过程的整流效应

交流电弧在不同温度的两极之间放电时，由于高温电极的热电子发射能力强，产生了整流效应，在电弧炉用石墨电极熔化金属炉料时往往发生这一现象。

在电渣重熔及电渣熔铸过程中，在结晶器和底水箱未绝缘情况下，电流主要经过：电极-渣池-金属熔池-底水箱回路。部分电流通过：电极-渣池-结晶器-底水箱回路。因此在结晶器壁内和渣池间出现火花放电，甚至引起结晶器壁的侵蚀。图 2-13 所示为在线路内接直流电流表测得直流分量 I_0 ，并用示波器对电流电压波形照相，发现电流正弦曲线的中心线偏移和电压曲线的中心线分离，证实线路附加了直流分量。

为了进一步研究电渣熔炼整流效应，Д. А. Дудко 曾进行以下实验^[1]。

由表 2-4 看出，直流分量的大小与熔炼电流的大小有关，熔炼电流越大直流分量也

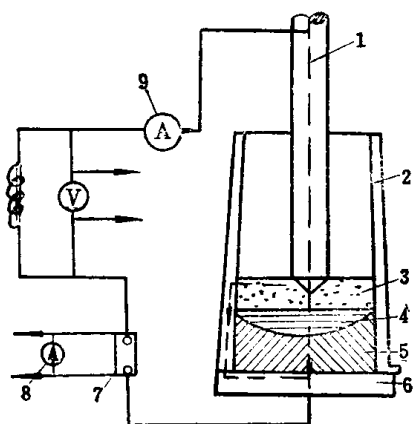


图2-13 测量和记录直流分量示意图
1—自耗电电极；2—结晶器；3—渣池；4—金属熔池；5—钢锭；6—底盘；7—分流器；
8—直流电流表；9—交流电流表。

表2-4 直流分量与渣池电阻关系

熔剂成分	I (安)	I ₀ (安)	
		渣深 H _渣 = 40 毫米	渣深 H _渣 = 80 毫米
100% CaF ₂	1500	70	950
	1800	105	525
	2400	175	700
68% CaF ₂ 32% TiO ₂	1500	70	400
	1800	105	595
	2400	210	820
68% CaF ₂ 32% Cr ₂ O ₃	1500	35	105
	1800	40	175
	2400	70	350

越大。

渣子的成分不同, 则渣池的电阻就不同, 而通过结晶器的直流分量也就不同。渣池深度增加, 而通过结晶器的直流分量 I_0 也增加。

实践表明: 由于横向分流产生的电流效应使热损失增加, 所以在钢锭或铸锭表面将出现小孔眼, 致使结晶器内壁留下疤痕, 而且对变压工作也不利, 所以从工艺角度出发应尽量避免对结晶器和底水箱绝缘。

然而近年来也有人主张利用直流分量对渣产生电解效应来弥补易氧化元素的烧损。

2.2 电渣熔铸过程的热传递

在电渣熔铸过程中, 主要由于金属与熔渣的精炼作用 and 在水冷结晶器中的金属定向结晶作用, 提高了被重熔金属的质量。精炼反应强度随金属与渣的温度提高而加强, 金属的定向结晶只有在沿着由铸锭表面向金属熔池曲面的方向放热时才能实现^[20]。电渣过程中渣池和金属熔池中热的放出和分配已证明对于被重熔金属的组织 and 性能有决定性的影响^[21]。因此, 电渣过程中热的放出和分配是其它物理过程和化学反应的基础。

近年来, 各国电渣工作者对电渣热传递的研究更加深入, 已发表了一些关于各种形式结晶器中热传递的实验研究^[3, 6, 11, 13, 14, 17, 21, 22, 23] 和对电渣冶金系统热传递过程的数学模型^[5~12, 19, 23] 方面的文章。

2.2.1 电渣熔铸过程中渣池的热源分布及渣池和铸锭中的温度分布

在电渣熔铸过程中, 主要由电流通过渣池所产生的电阻热, 熔化电极并使液体金属熔池保持一定的形状。在单相熔炼时, 渣池中电流主要从电极端部流向金属熔池表面。这一区域称为放电区, 热量主要在放电区放出。三相熔炼或双极串联熔炼时, 电流不仅能从电极端部流向金属熔池, 而且也在各电极端部之间流过。

如粗略地估计渣池的体积热源密度, 可以认为是均匀分布的, 有些热传递模型也是这样处理的^[6]。然而, 根据渣池中电流分布的数据, 又不能认为在渣池容积内均匀分布着焦耳热源。放热的不均匀性是由渣池各点不同的电流密度和不同的电导率值引起的。

许多研究者测定过渣池各点的电位和温度分布^[3, 13, 14, 15]。结果表明, 放电区的电流密度较大, 温度较高。也有人用低温溶液或导电纸作过渣池电位的模拟研究工作^[18]。近年来, 开始用数字方法来确定渣池电位和热源。Mitchell 和 Joshi^[7] 用一个阻抗网格模型求得了渣池的电位分布, 见图 2-14。当考虑渣池热源的不均匀分布时, 可按公式 (2-1) 计算单位体积熔渣的放热^[4, 11]:

$$q = 0.24 \sigma |\text{grad} \varphi|^2 \quad (2-1)$$

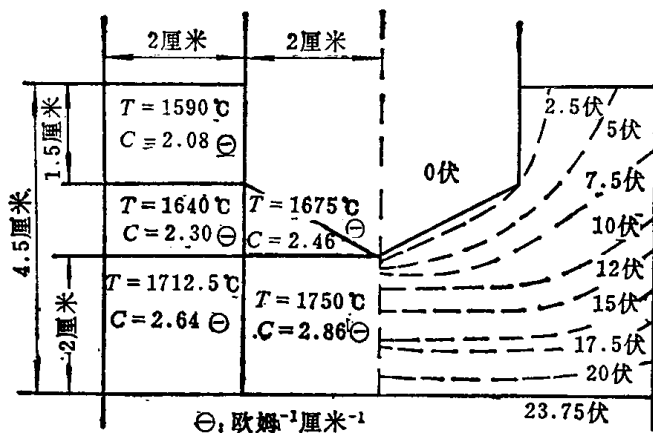


图2-14 Mitchell和Joshi 的渣阻模型

近年来, 开始用数字方法来确定渣池电位和热源。Mitchell 和 Joshi^[7] 用一个阻抗网格模型求得了渣池的电位分布, 见图 2-14。当考虑渣池热源的不均匀分布时, 可按公式 (2-1) 计算单位体积熔渣的放热^[4, 11]:

式中 φ ——渣池的场电位；

σ ——渣池各点的电导率。

对于实用上准确的角度，可以认为渣池的电场在一个足够长的时间间隔内达到稳定。这时，电位的分布可由拉普拉斯方程

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (2-2)$$

或按方程

$$\text{div}(\sigma \text{grad} \varphi) = 0 \quad (2-3)$$

确定。在这种情况下，渣池的电位场即方程 (2-2)、(2-3) 的解只决定于边界状态。图

2-15 表示在 180 毫米直径的结晶器中采用 AHΦ-6 渣熔炼时的渣池电位和热源分布^[3]。图 2-16 表示双极熔炼 500×1250 毫米²截面扁锭时，渣池中的功率热源分布^[11]。由图 2-15 可以看出，最大的热源密度 $q_v = 150$ 卡/厘米³·秒在接近于电极末端的区域内，在距电极表面 15 毫米的地方，热源密度减小了 15 倍。当充填系数减小时，放热的不均匀性增加。由图 2-16 可见，双极冶炼时最大的放热区不是在电极附近而是在电极之间，而且渣高和极间距对热源分布有很大影响。

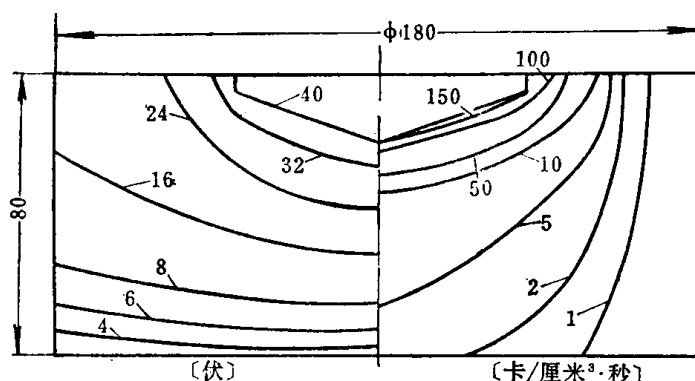


图2-15 在180毫米直径结晶器中采用AHΦ-6渣熔炼时的渣池电位和热源分布

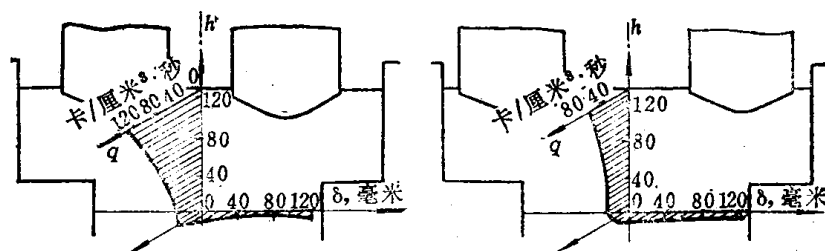


图2-16 双极熔炼500×1250毫米²截面扁锭时渣池功率热源分布

为了了解电渣铸锭各处的温度分布，特别是根据熔炼参数预测金属熔池的深度和形状，进而制定合适的工艺参数，电渣冶金工艺者非常重视用数字技术研究渣池和铸锭的温度场。

渣池的温度分布可以按渣池的热源和边界条件及热传导方程来确定，铸锭的温度分布也可根据热传导方程和边界条件确定。边界条件通常可以由实验确定。渣池的辐射和结晶器冷却壁边界条件一般较好确定，而渣池与金属熔池交界面的热交换条件则不太好确定。在文献〔5〕中取金属熔池镜面温度与渣池相等，这相当于熔渣和金属之间的热交换系数为无限大。文献〔3〕、〔7〕是按热流条件给出的，即认为渣池与金属有一个温度差，通过交界面的热流包括由金属熔滴过渡的热流和熔渣与金属之间的对流的热流。在文献〔3〕中作了专门的实验，以确定在非自耗电极情况下熔渣与金属之间的热交换系数。采用较精确的边界条件可以使计算出的熔池形状更接近于实际。在计算中还会遇到金属或熔渣的热物理性能及由于液体金属凝固潜热放出而出现的金属熔池两相区等问题，可以采取一些简化处

● 式中 ∇ 为倒三角算符，div 为散度，grad 为梯度，详见高等数学。

理方法^[8]来解决。

对于电极布置和结晶器形状较复杂的电渣熔铸产品, 用数字方法确定温度分布是很重要的。图 2-17 所示为一个加宽渣池的结晶器中热源分布情况^[19], 可根据这种分布和边界条件确定渣池的温度场。

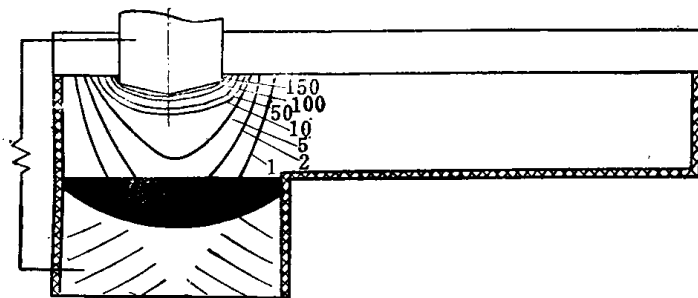


图 2-17 加宽渣池的结晶器中渣池的热源分布 (数字单位为卡/厘米³·秒)

2.2.2 电渣过程放出的总热量及分配^[15]

电渣过程一般可以分为升温-正常冶炼-补缩三个阶段。通电熔炼后, 渣温不断升高, 如果各种参数比较合适, 可以达到一个较稳定的状态。本节按这种稳定状态来讨论放出的总热量及分配。

对于单相交流重熔炉, 电渣过程中单位时间内产生的热量 (或热流) 可按下式计算:

$$\left. \begin{aligned} Q &= 0.86 UI \cos \varphi \text{ (千卡/小时)} \\ \text{或} \quad Q &= 0.86 I^2 R \cos \varphi \text{ (千卡/小时)} \\ Q &= 0.86 \frac{U^2}{R} \cos \varphi \text{ (千卡/小时)} \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$

式中 I ——重熔电流;

R ——熔池等效电阻;

$\cos \varphi$ ——功率因数。

对于三相交流重熔炉:

$$Q = 0.86 \cdot 3 UI \cos \varphi \quad (2-5)$$

式中 U 、 I ——表示每相的电压、电流。

电渣过程中渣池放出的热量消耗主要在熔化电极、使渣池和金属熔池维持熔融和过热状态、结晶器和底盘热损、渣池辐射热损以及废气带走的热量等方面。上述各项消耗的大小比例, 即热量分配的特征取决于熔炼制度、结晶器断面和渣池高度、所用熔剂的导电性等一系列因素。图 2-18 表示熔铸时的热分配概况。下面按图中符号来分析渣池放热的各项消耗。

(1) 消耗于预热和熔化自耗电极的热量, 其中也包括由熔渣传给金属熔滴的热量。这一部分热量属于有用消耗, 它的大部分由金属熔滴带入金属熔池;

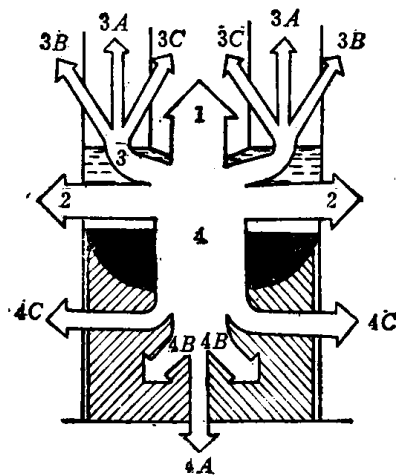


图 2-18 电渣过程中渣池放热的各项消耗

(2) 借助于熔渣与结晶器壁接触面的热传导,由渣池传给水结晶器壁并由结晶器的冷却水带走的热量。这部分消耗是相当大的,但不应看作是无用损耗,因为它首先用来维持整个渣池处于熔融和过热状态;

(3) 渣池镜面的辐射热,可分为三部分:对大气的辐射热及被废气带走的热 $3A$,辐射给结晶器的热 $3B$ 以及辐射给电极的热 $3C$ 。而其中只有 $3C$ 因为它用于电极的预热所以是属于有用的;

(4) 渣池通过与金属熔池的交界面传到金属熔池的热量以及由金属熔滴带入的热量。这部分热量又可分为三部分:铸锭传给底盘的热量 $4A$,铸锭通过传导(熔池中金属通过渣-渣壳与结晶器壁接触)或辐射(在下部渣皮和结晶器壁之间形成间隙)传给结晶器壁的热 $4C$ 和储存于铸锭中的热量 $4B$ (如果铸锭脱出后热送至加热炉,这部分热量还可能有一部分是有用的)。

2.2.3 热平衡方程式及各部分热量确定方法^[6,15,16]

当熔铸过程达到稳定后,在单位时间内渣池所放出的热量应与电极熔化、渣池向结晶器壁和向周围环境的热辐射、经结晶器壁传给冷却水的热量和经过渣-金属界面传递的热量相等。用于电极熔化的热量与继续由熔滴变为钢锭的热量在热平衡中可以合成一项—用于铸锭的热量。故热平衡方程式可写成:

$$Q_{\text{放出}} = Q_{\text{渣-水}} + Q_{\text{锭}} + Q_{\text{结-辐}} + Q_{\text{周-辐}} \quad (2-6)$$

下面讨论式(2-6)中各项热量的确定方法。

1. 渣池放出的总热量 $Q_{\text{放出}}$

渣池放出的总热量可按公式(2-4)计算。通常按结晶器或电极尺寸选择电流大小,然后按熔渣等效电阻确定工作电压。熔渣等效电阻可按放电区为圆柱体或圆锥体的简化方法计算,也可由模拟实验确定^[6,7,23]。

2. 由渣池经结晶器壁传到冷却水的热量 $Q_{\text{渣-水}}$

确定这部分热量的方法很多。对于稳定情况,如能确定进水温度、出水温度和水流量,即 $Q_{\text{渣-水}}$ 可按式确定:

$$Q_{\text{渣-水}} = G(t_{\text{出}} - t_{\text{入}}) \quad (2-7)$$

式中 G ——水流量。

为了精确地确定这部分热量随时间的变化情况和在结晶器壁各部位热负荷的分配,多采用装在结晶器壁孔洞中的热流计来测定各点的热流 q ^[3],若求总热流可以逐段积分。当测得了靠近结晶器壁处熔渣或金属的温度后,即可用下式确定由渣池到冷却水的热传导系数 K :

$$q = K(t_{\text{渣}} - t_{\text{水}}) \quad (2-8)$$

K 值对于电渣铸锭的凝固计算和设计结晶器是个很重要的参数。根据文献[21]得知,工业条件下的重熔炉 K 值为 $(4.5 \sim 5.0) \times 10^2$ 千卡/米²·小时·度。上面给出的是由实验确定的渣壳、气隙、结晶器壁的综合热传导系数,也可以由渣壳与结晶器材料的传热系数来确定液渣到渣壳的传热系数。即:

$$Q_{\text{渣-渣}} = AK(T - T_r) = (T_r - T_0)h/R(\delta) \quad (2-9)$$

式中 A ——渣与渣壳的接触面积;

T ——靠近渣壳处的熔渣温度；

T_f ——渣的凝固温度；

T_0 ——结晶器水温；

h ——渣池高度；

$R(\delta)$ ——渣壳与结晶器的热阻，

$$R(\delta) = \frac{1}{2\pi r_m} \left(\frac{\delta}{\lambda_r} + \frac{\Delta R}{\lambda_m} \right)$$

λ_r 、 λ_m ——渣壳及结晶器内壁材料的热传导系数；

r_m 、 δ 、 ΔR ——分别为结晶器半径、渣壳厚度及结晶器内壁厚度。

3. 渣池表面的辐射热损失

这部分热损失通常只占渣池放出热量的 5%，并且比较容易确定。实验研究中可按置于渣气界面以上的热流计的读数来确定。一般按斯蒂芬-波尔兹曼公式计算渣池对结晶器壁的辐射热及对周围环境的辐射热：

$$Q_{\text{辐}} = K S_1 \varepsilon_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (2-10)$$

式中 K ——波尔兹曼常数；

S_1 ——放热表面面积；

ε_1 ——辐射表面的黑度；

T_1 、 T_2 ——分别为发射和吸收表面的温度。

采用上式是因为在电渣熔炼过程中，吸热表面（即渣帽以上结晶器内表面）和电极表面，总是远远大于辐射表面（即电极和结晶器之间的间隙中熔渣的表面积），这时放出的热量只与放热面积有关，而与吸热表面无关。

4. 用于钢锭的热量 $Q_{\text{锭}}$

在实验研究中，测定了渣池放出的热量 $Q_{\text{放出}}$ 和渣池经结晶器壁传到冷却水的热量 $Q_{\text{渣-水}}$ ，以及渣池的辐射热 $Q_{\text{辐}}$ 以后，就可以由热平衡方程式确定 $Q_{\text{锭}}$ 。

在工艺设计或设计结晶器冷却系统时，往往要计算整个冶炼过程所消耗的热能。这时热平衡方程式的右边还应包括熔化炉渣的热量 $Q_{\text{渣}}$ ， $Q_{\text{渣}}$ 和 $Q_{\text{锭}}$ 的计算是先求熔渣和金属的单位热容 Q ，再根据锭重和渣量计算出 $Q_{\text{锭}}$ 和 $Q_{\text{渣}}$ ，即按下式进行计算^[6,16]。计算举例见 3.7 节。

$$Q = \int_{T_0}^{T_m} C_p dT + L \quad (\text{千卡/克分子}) \quad (2-11)$$

式中 C_p ——熔渣或金属的克分子热容；

L ——潜热。

2.2.4 电渣过程热效率^[11,20]

电渣过程的热效率是指熔炼过程中有效利用的能量与熔炼中消耗的总能量之比。它决定于工艺参数和设备结构，是重要的技术经济指标。

如上所述，在理论上重熔 1 吨钢只需 400 千瓦小时，而在电渣重熔条件下实际消耗为 1000~2000 千瓦小时。即重熔的热效率为 0.2~0.4。