

电渣重熔冶金

徐宏武 高荣君 著

中国矿业大学出版社

前 言

采用电渣重熔冶金工艺,首先是其钢质综合性能优越,可以满足现代科学技术如核能、宇航、石化、国防等工业对金属材料耐高温、高压和高强韧等方面的苛刻要求;其次,其设备费用不高,易于制造,便于维修,操作易于掌握;再次,采用该种工艺便于充分发挥工程师们的构思与技巧,熔铸出各式各样的异形产品,以铸代锻,简化生产流程,提高金属利用率,节约人力、物力和财力。因而电渣重熔冶金工艺在国内外发展都很迅速,在特殊钢生产中占有越来越重要的地位。

本书主要是根据作者在设计、职工培训、调试和生产过程中接触的资料及亲自实践的经验进行整理,并加以系统化而编写的。本书在编写过程中得到了有关领导和一些同志的大力支持与热情帮助,在此深表感谢。由于笔者水平有限,缺点和错误在所难免,诚恳地希望读者批评指正。同时,作者向本书中所引文献的作者表示诚挚的谢意!

目 录

第一章 概述	(1)
第一节 电渣冶金简史.....	(1)
第二节 电渣重熔技术的现状.....	(2)
第三节 电渣重熔的经济性.....	(4)
第二章 电渣冶金的基本原理	(6)
第一节 什么叫电渣冶金.....	(6)
第二节 电渣重熔的热源及热分布.....	(6)
第三节 电渣重熔钢的结晶特点	(10)
第三章 电渣重熔用渣	(17)
第一节 炉渣在电渣重熔中的重要性	(17)
第二节 电渣重熔用渣的基本特性	(18)
第三节 电渣重熔常用渣系简介	(21)
第四节 渣料的技术要求	(21)
第四章 电渣重熔过程的冶金反应	(25)
第一节 电渣冶金反应的条件特点	(25)
第二节 脱硫	(27)
第三节 脱磷	(32)
第四节 去除夹杂物	(33)
第五节 脱气	(37)
第六节 化学成分的变化	(39)

第五章 工艺参数的选择及工艺操作	(43)
第一节 工艺参数的选择	(43)
第二节 重熔前的生产准备	(49)
第三节 电极和引锭板的准备	(51)
第四节 炉渣的选择及准备	(54)
第五节 结晶器及底水箱等的就位	(55)
第六节 引燃启动和炼渣	(59)
第七节 自耗电极的重熔	(64)
第八节 电渣锭的补缩	(72)
第九节 脱锭和保温	(73)
第十节 取样及电渣锭的打磨清理	(75)
第六章 电渣炉的机械构造	(76)
第一节 几种主要电渣炉的结构	(76)
第二节 结晶器	(79)
第三节 底水箱	(88)
第四节 电极夹持机构	(89)
第五节 夹持臂升降机构	(94)
第六节 夹持臂回转机构	(97)
第七节 抽锭机构	(98)
第七章 动力	(105)
第一节 水	(105)
第二节 气	(107)
第三节 电渣重熔用电的特点	(107)
第四节 电渣炉的短网	(111)
第五节 电渣炉的电气设备	(122)

第八章 电渣炉变压器的保护	(134)
第一节 电渣炉变压器的继电保护.....	(134)
第二节 电渣炉的温度和压力保护.....	(138)
第九章 电渣炉的控制	(140)
第一节 电渣炉的几种控制.....	(140)
第二节 电极夹持臂升降的自动控制.....	(143)
第三节 抽锭的自动控制.....	(155)
第四节 电极夹持臂及抽锭机构的快速 升降控制.....	(162)
第五节 电极夹持臂的旋转控制.....	(164)
第六节 电渣炉变压器强制油循环及换压 系统的控制.....	(167)
第十章 电渣重熔的环境保护	(172)
第一节 电渣重熔过程对环境的污染.....	(172)
第二节 电渣重熔的环境保护.....	(173)
第十一章 电渣冶金分类及与其它重熔冶金 的比较	(179)
第一节 电渣冶金的分类.....	(179)
第二节 电渣重熔与其它重熔冶金的比较.....	(198)
第十二章 电渣炉的调试及冶炼实例	(204)
第一节 电渣炉的调试.....	(204)
第二节 导电渣的冶炼实例.....	(213)
第三节 镍铬钼钒钢的重熔实例.....	(214)

第一章 概 述

第一节 电渣冶金简史

电渣重熔冶金在美国起源于埋弧焊。

电渣重熔基本原理最早是由美国的 R·K·Hopkins 于 1935 年提出的,并于 1939 年 3 月以“霍甫金斯法”命名,获美国专利。1941 年至 1945 年间,美国凯洛克(Kellogg)公司用此法生产了几百吨高速钢。1950 年对此法加以改进,用实心合金钢棒作自耗电极进行电渣重熔。由于当时美国真空电弧重熔技术相当完善,认为采用非真空状态的电渣重熔是技术的倒退,所以电渣重熔技术发展缓慢。直到 1965 年以后,由于尖端武器竞赛与国际市场的竞争,电渣重熔技术才被西方各国所认识,获得较快发展。美国的主要真空冶炼设备制造商 Consarc 公司开始转向生产电渣炉设备。

电渣重熔冶金在原苏联起源于电渣焊。

原苏联基辅巴顿焊接研究所于 1954 年开始了电渣重熔技术的研究,并于 1958 年在第聂伯特殊钢厂建立了第一台单相电渣炉。原苏联在电渣重熔技术方面进行了大量的卓有成效的工作,推动了该技术的发展。

我国电渣重熔技术的发展在世界上也是较早的,仅次于美国和原苏联。1958 年冶金部建筑研究院率先开始电渣冶金

研究,1959年以后,电渣重熔技术在我国得到飞速发展。我国许多厂建立了电渣重熔车间,建立起工业电渣炉。

我国首创了有衬电渣炉、液渣上注法启动、电极末端渣洗提纯理论和工艺参数选定方法。1965年我国建造投产了当时世界上第一台100吨电渣炉,可生产 $\phi 1500$ 至 $\phi 2100$ 、重50吨至100吨的电渣锭。目前我国已建造投产300吨大型电渣炉,为生产特大型优质钢锭开辟了新的途径。

至于其它各国,英国对电渣重熔技术的研究始于1960年,奥地利始于1962年,日本始于1963年,原西德和法国始于1965年,瑞典、原捷克斯洛伐克、澳大利亚、罗马尼亚、波兰、意大利、瑞士、新西兰、原东德等国发展起步就更晚了,但其发展是迅速的。

世界电渣重熔研究中心有原苏联基辅巴顿焊接研究所、英国设菲尔德的英国钢铁研究协会、美国匹茨堡梅隆大学研究所、日本三菱重工神户研究所等。

世界上制造电渣炉设备的主要有美国的 Consarc 公司、原西德的 Leybold-Heraeus 公司、英国的 Brilec 公司和奥地利的 Bohler 公司等。

第二节 电渣重熔技术的现状

由于电渣重熔技术日益显示出技术上和经济上的巨大优越性,因而无论在设备方面,还是在工艺方面,其发展都很迅速。电渣钢产量,逐年递增;重熔金属及合金的品种愈来愈多;电渣重熔的产品类型几乎无所不包。

该技术的发展现状主要表现在:

一、设备的大型化和多样化

为解决诸如核电站等工业所需要的 300 至 400 吨大型锻件的质量,国内外已建成投产了 200 至 300 吨的大型电渣炉。原西德 220 吨电渣炉已于 1971 年建成投产,我国 300 吨电渣炉已于 1981 年建成投产。

根据不同需要,电渣炉的结构及供电型式不尽相同,有单臂、双臂,也有四臂的;有单极、也有双极串联的;有固定式、也有抽锭式的;有单相、也有三相的…等等。

二、供电系统的科学化

(一) 电渣炉采用双极串联供电 电渣炉用电属于低电压大电流供电,电磁感应极大,涡流损耗较高。国内外采用双极串联供电,使感抗损耗降到最低。美国 Consarc 公司制造的电渣炉采用同轴供电,其道理也在于此。

(二) 电渣炉采用低频交流供电 电渣炉采用单相强电流供电,致使电网负载不平衡,使无功损失增高,电流频率愈高,则损耗愈大。因而在电渣炉供电系统配备直流变频器,用它产生低频交流电(一般为 4 至 10Hz)供电渣炉使用。此法原西德应用较多,我国有的厂家也已试用过。

三、利用电子计算机控制电渣重熔过程

为达到工艺稳定,提高电渣钢的质量,美国、原苏联等国都进行了使用电子计算机控制电渣重熔过程的研究并投入了大生产应用。

四、钢液面的自动控制

钢液面的自动控制,尤其在抽空心锭技术中,钢液面自动控制至为重要,世界各国都在努力研究。各国一般采用同位素传感器进行钢液面自动控制,美国、日本等国即采用此法,我

国有的厂家也采用此法,但此法有放射性污染,不受欢迎。原苏联首先成功地利用电磁原理(E形磁铁)进行钢液面自动控制,我国也非常成功地于1980年实现利用电磁原理对钢液面进行自动控制,效果很好。

五、电渣浇注

这是一种既提高钢质又十分经济的重要方法,耗电量仅为一般电渣重熔法的八分之一至七分之一,在当今能源紧张的世界具有颇重要的意义。美国已对此进行了研究,我国有的厂家也进行了试生产,效果很好。

六、锭中心钻孔重熔法—MHKW法

为保证几百吨大型普通钢锭质量,将其中心部位钻空而后在钻空部位进行电渣重熔。

七、直接成型电渣熔铸件

直接成型电渣熔铸是电渣重熔的一个极其重要的分支。世界各国对这一技术都颇为重视,发展极为迅速。而电渣熔铸的空心坯件更是电渣熔铸的重大成就之一。目前不少国家都着重发展电渣铸管以用于火炮炮管、石油用管、原子反应堆壳体、化工等高压容器及各种管坯。从小小的假牙到发电机大型转子,电渣熔铸几乎无所不能。

第三节 电渣重熔的经济性

现在,还较普遍地存在着一种偏见,似乎电渣重熔钢所制造的产品一定比一般钢的要贵。持这种看法的人认为:与一般钢相比而言,电渣钢必须增加重熔所需的额外费用。

可以毫不夸张地说,电渣钢在各方面优越的收益足以补

偿重熔所花的费用。从全局看,从长远看,电渣钢产品更显物美价廉。

首先,电渣重熔钢较一般钢有非常高的锭子收得率。一般来说,小于 20 t 的锭子,电渣锭的收得率可提高 10%~15%,对大锭子而言,提高得更多,可达 25%左右。

其次,电渣钢可减轻或消除一般钢的一些缺陷,如非金属夹杂、白点、气孔、锻造和加工期间引起的缺陷等等,这在经济上有很大的意义。

第三,电渣重熔可把废品率大大降低,较一般钢而言废品率至少降低 50%,在某些情况下降低得更多。值得指出的是,废品往往发生在制造周期的末尾,因此,最后即使废品率稍微有所下降,在经济上看也是收益颇大的。

第四,电渣锭较一般钢锭所需锻造量要小,这也可使重熔费用得到一定的补偿。

大量事实说明,电渣钢尽管比一般钢成本稍高,人们宁可用电渣钢而不用一般钢。这是因为电渣钢具有一系列优点,在世界上正飞快地得到发展。在高合金和超合金领域,它正和真空电弧炉及电子束炉竞争,在中型和大型锻件生产中,它实际上处于垄断地位。

第二章 电渣冶金的基本原理

第一节 什么叫电渣冶金

电渣冶金一般通称为电渣重熔,是利用炉渣作为电阻和提纯剂,熔渣和钢液的精炼及钢锭结晶都在一个水冷结晶器中进行从而可控制钢锭结晶的一种冶金方法。一般亦称 ESR 法,即 Electro-Slag Remelting。

用于进行电渣重熔的设备叫电渣重熔炉,简称为电渣炉。

电渣重熔原理见图 2-1 所示。

电渣重熔法,利用符合要求的自耗电极在熔融渣池电阻热的作用下熔化成液滴,经过渣洗,在水冷结晶器内形成浅平金属熔池,在熔渣的保护下自下而上地顺序凝固,最后形成表面优良的电渣锭。

经过电渣重熔的钢锭,金属洁净,成分均匀,组织致密。硫可降到 0.001%;氧可脱到 25ppm 以下,钢中夹杂物总量可降到 40ppm 以下。夹杂少,偏析小,强度大,韧性高,各向异性小。这些优点对高强度厚壁管用钢的生产尤为重要。

第二节 电渣重熔的热源及热分布

电渣重熔的热源来自电流通过熔融渣池所产生的焦耳

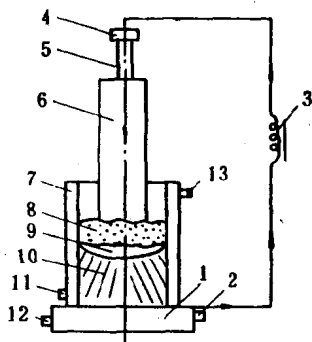


图 2-1 电渣重熔原理图

- 1—底水箱; 2—底水箱出水口;
3—电源; 4—电极夹持器;
5—假电极; 6—自耗电极;
7—结晶器; 8—渣池; 9—熔池;
10—电渣锭; 11—结晶器入水口;
12—底水箱入水口;
13—结晶器出水口

热,其热量按下式计算:

$$Q = I^2 R t \quad (J)$$

式中 I ——通过渣池的工作电流, A;

R ——两极间熔渣的电阻, Ω ;

t ——通电时间, s。

电渣重熔过程中,电流由变压器副边一端通过自耗电电极、熔渣渣池、金属熔池、钢锭、底水箱,回到变压器副边另一端构成回路,见图 2-1。对于双极串联电渣炉,电流就是由变压器副边一端经过一根自耗电电极、熔渣渣池、另一根自耗电电极回到变压器副边另一端构成回路。当电流通过熔渣渣池时,熔渣作为一个电阻体产生焦耳热。

渣池中放出的热量要消耗在自耗电电极的熔化、维持渣池和金属熔池的过热状态、冷却水的加热等等。热量消耗受到很多因素影响,在此仅作定性阐述。

电渣重熔热分布示意图见图 2-2。

一、有效热耗

1. 自耗电电极的预热、熔化及使金属熔滴过热到一定程度所需要的热量。这部分热量是必不可少的,属于有效热。这部分热量如过小,对钢的质量不利,生产率又太低,经济上不合理。这部分热量如过大,容易导致渣洗不充分,钢的精炼进行

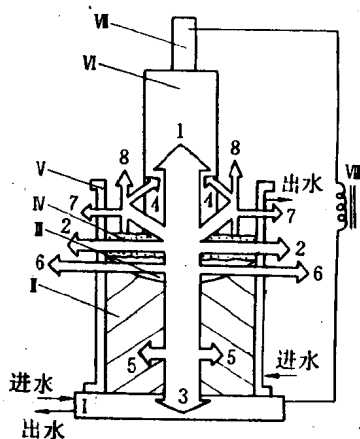


图 2-2 电渣重熔热分布示意图

I—底水箱, II—电渣锭, III—熔池, IV—渣池,

V—结晶器, VI—自耗电极, VII—假电极, VIII—变压器

1~5—有效热耗, 6~8—无效热耗

得不好, 钢质低劣, 虽然生产率高但也是废品, 经济上也不合理。因此, 工艺设计要特别重视这一部分热量, 力求达到合理。只要这部分热量设计合理, 就可为生产经济合理、质地优良的电渣锭创造较好的条件。理论和实践表明, 保持钢液熔池呈偏平状, 控制钢液熔池深度为结晶器直径的 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ 较为适宜, 这样的热量供给为合适。

2. 熔渣池与结晶器壁接触界面热传导所导致的热耗及用来维持整个渣池处于熔化和过热状态的热耗。该部分热耗也属有效热耗。该热量在钢锭质量和经济方面占很重要的地位。当熔渣池深度这个工艺参数选择不当, 渣池过深时, 冷却水通过结晶器壁可带走整个输入热量的 50% 以上, 使电耗急

剧增加,成本提高。在保证钢质的前提下合理地降低渣池深度可大大降低电耗,按我们的经验可降低电耗 19% 左右^[1]。这部分热耗的大小直接影响着渣皮的状态,也直接影响着钢锭表面质量的好坏。一般渣皮厚度控制在 1~2mm 为佳。

3. 电渣锭传给底水箱被冷却水带走的热损耗。这部分热耗意义颇大,它关系到电渣锭的定向结晶—轴向结晶—电渣重熔这一极其重要的冶金特点。我们主张应加强底水箱冷却强度,底水箱出水温度以不高于 25℃ 为佳。我们应用了这一做法,效果很好。

4. 渣池表面辐射给自耗电电极的热。这部分热量用来加热自耗电电极,属有效热耗。

5. 重熔过程储于锭中的热量。这部分热量对裂纹敏感性钢尤为重要。比如含有 1%~3%Ni 的钢在冷却到 300~400℃ 时最易形成裂纹,而储于钢锭中的热量使之不低于 400℃,脱锭后进保温罩缓冷,该部分热量慢慢散失掉,保证钢锭不出现裂纹。

二、无效热耗

6. 金属熔池通过锭子、渣皮传给结晶器壁的热量,由冷却水带走。

7. 渣池表面向结晶器壁辐射的热量,由冷却水带走。

8. 渣池表面辐射给大气的热量、渣池表面蒸发和逸出废气所带走的热量。

第 7 项和第 8 项可以采取的措施,如增大填充比以降低热耗,我们的实践充分证明了这一点,电耗降低,成本下降^[1]。

从理论上讲,熔化一吨碳钢需消耗电能 400kWh,而电渣重熔一吨钢所需电耗往往高达 2000kWh,就当代最好水平来

说,电耗也达 $1000\sim 1300\text{kWh/t}$,电渣重熔的热效率很少超过 33% 。所以,电渣炉是一个热效率很低的冶金设备。电渣炉的热损耗主要是水冷系统的强化冷却——而这一强化冷却又是电渣重熔的命脉,通过强化冷却可控制结晶,提高钢的质量。但大大提高钢质所带来的收益足可补偿热效率较低这一损失的。

值得指出的是,电渣重熔供电网路属低电压大电流供电网路,功率因数很低,一般在 $0.6\sim 0.8$ 左右,无功损耗很大。如网路考虑不周,设计欠合理,能量损耗更大。因而,电渣重熔工作者必须在这一方面给以重视。电渣重熔采用双极串联或同轴供电,可使功率因数 $\cos\phi$ 达 0.95 以上,此法在我国应该推广。我国有的厂家,不考虑能耗,使用钢结晶器,造成巨大的无功损耗,应该禁止。

第三节 电渣重熔钢的结晶特点

电渣重熔钢的凝固结晶,同样也遵循金属学中凝固结晶的普遍规律。但是,电渣重熔客观上的冷却传热条件别具一格,电渣重熔钢锭的凝固结晶也有自己的特点。

电渣重熔的冷却传热特点见图2-3。底水箱的冷却强度最大,底水箱上面板是用导电和导热优良的紫铜板做成的,冷却水出水温度要求不高于 25°C 。大部分热量由此通过冷却水带走。再者,结晶器也是水冷的,内壁采用紫铜做成,在凝固的电渣锭和结晶器内壁之间有一层薄渣壳(一般为 $0.5\sim 2\text{mm}$),由于渣和钢液在凝固后的体积收缩,又导致钢锭和渣皮间、渣皮和结晶器内壁间形成一层气隙,渣皮和气隙起着隔热作用,

这样就促使热流大致沿轴向往底水箱方向散失。而用其它方法生产的钢锭如普通铸锭、真空电弧重熔锭、电子束炉重熔锭，则不完全具备以上冷却和传热条件。

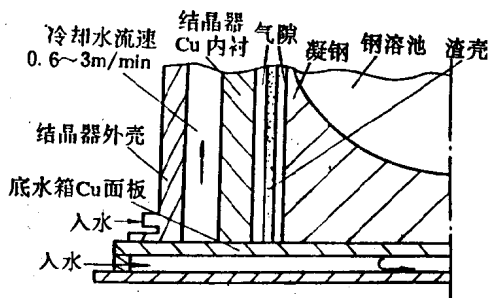


图2-3 电渣重熔的热传导

各部分传热系数($\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$)；冷却水3065~6129；

Cu内衬122615；0.25~2mm厚渣壳2554~102179；

0.05~0.25mm厚气隙1021~7151；13mm厚钢凝层8173

另外，电渣重熔法的熔池和钢液过热较其它工艺也有自己的特点，见示意图2-4。普通铸锭注速（相当于熔速）达50~300t/h，连铸的注速达10~200t/h，电子束重熔法熔化率与真空电弧重熔法及电渣重熔法相当，达0.2~1t/h。普通铸锭、连铸、电子束炉、真空电弧炉、电渣重熔这五种工艺的熔池深度依次减少，冷却速度依次加快。其中，电渣重熔法的过热度最小，因自耗电极一到达熔点熔化汇集成液滴并下落形成熔池，熔池呈浅平状，见照片图2-5。

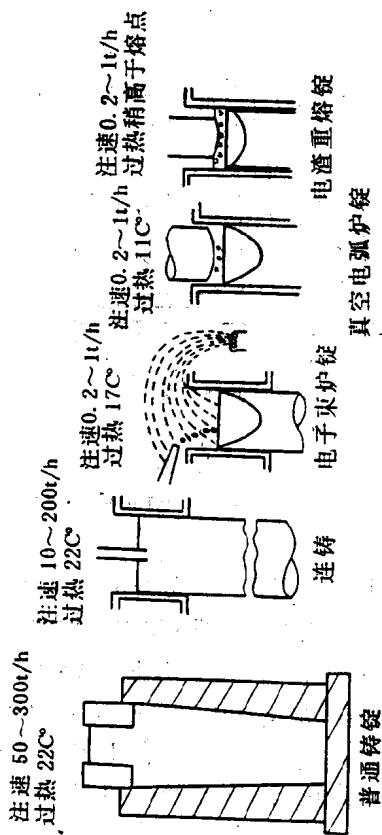


图 2-4 不同工艺铸锭注速或熔速和熔池过热的比较