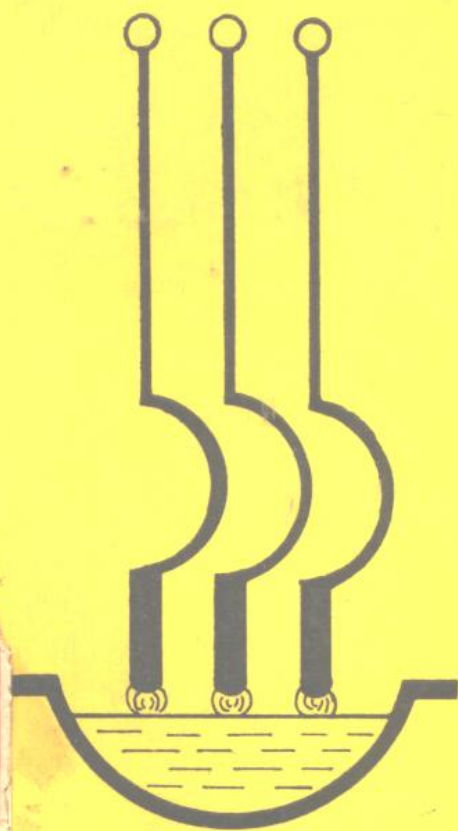


炼钢电弧炉的 电气设备

花皓 梁正敏 编著



机械工业出版社

76.18/81
262

炼钢电弧炉的电气设备

花皓 梁正敏 编著

(E4086/55)

2K486/09

机械工业出版社

本书系统地阐述了炼钢电弧炉主要电气设备（电炉变压器、电抗器、短网、高压断路器、电磁搅拌装置、静止式无功功率补偿器、电炉变电所，以及近年来新研制的晶闸管-电磁转差离合器式电极自动调节器、晶闸管-交流力矩电机式电极自动调节器等）的工作原理、设计计算、具体结构、调整、运行、维护检修等问题。还给出了基本计算公式、运行曲线及有关数据。

本书可供从事炼钢电弧炉电气设备设计、制造、调整、使用和维护方面的工程技术人员、维修电工及炼钢工人使用，亦可供大专院校电热设备、电冶金学及工业企业电气化自动化专业的师生参考。

炼钢电弧炉的电气设备

花皓 梁正敏 编著

责任编辑：余茂祚

封面设计：郭景云

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/16·印张 15 3/4·插页 1·字数 390 千字

1987年8月北京第一版·1987年8月北京第一次印刷

印数 0,001—6,397·定价：3.80 元

统一书号：15033·6716

前 言

炼钢电弧炉设备在冶金工厂和机械制造厂中得到了普遍的应用。现代化的电弧炉设备是不同形式的复杂的电气-机械设备的有机组合体，其中的关键设备是电气设备。随着半导体技术、控制技术及真空技术的飞速发展，给电弧炉电气设备带来了彻底的更新。为此，作者在参阅国内外有关资料及作者本人近三十年来在从事电弧炉电气设备的研究工作中所积累的经验而编写此书。

书中除了对电弧炉上配用的某些主要传统电气设备进行一般性讨论外，主要着重描述近年来新开发的电弧炉用电气设备，如晶闸管-转差离合器式电极自动调节器、晶闸管-交流力矩电机式电极自动调节器、真空断路器及静止式无功功率补偿器等。由于在新型调节器中采用了新元件、新线路及新执行环节，所以它的推广工作是相当繁重的，故在本书中以较大篇幅阐述新型调节器的工作原理、设计计算、具体结构、调整、运行、维护、检修等问题，以供使用新型调节器的工程技术人员、设备调整人员、维修电工及操作人员学习参考之用。

本书在编写过程中曾得到西安电炉研究所邹康宏总工程师、黎克仕高级工程师的指导和帮助。上海工业大学冶金系炼钢教研组、北京钢铁学院电冶金教研室、上海冶金设计院电力科，以及西安电炉研究所兄弟课题组都为本书提供了宝贵的资料。西安电力机械制造公司输变电成套设备研究所花辉同志为本书绘制了大量插图。本书稿编写后经西安交通大学黄俊教授审查，最后由陕西机械学院苏文成教授主审。作者对以上单位及以上同志致以衷心的感谢！

由于作者水平所限，叙述不当和错误之处在所难免，欢迎读者批评指正。

目 录

绪论	1	二、过电流保护装置	105
第一章 炼钢电弧炉	3	三、瓦斯保护装置	109
一、电弧炉工作原理及结构简述	3	四、温度指示器	109
二、电弧炉内炼钢工艺概述	4	五、电弧炉设备保护装置原理展开图	110
三、电弧炉电气设备主要元件	6	第七章 电炉变电所	111
四、电弧炉是巨大的电能用户	8	一、电炉变电所的供电线路	111
第二章 电弧基本理论	11	二、电炉变电所配电装置中的电气 设备	113
一、电弧现象的物理本质	11	三、电炉变电所的结构	122
二、电弧伏安特性与稳定燃弧条件	17	第八章 电极升降自动调节器	129
第三章 电炉变压器和电抗器	19	一、概述	129
一、电弧炉设备的工作特点	19	二、电极升降机构	131
二、电炉变压器的骨架及线圈结构	21	三、对电极自动调节器的要求	133
三、变压器的工作过程	24	四、调节对象及其特性	135
四、漏磁通	31	五、几种新型的电极自动调节器	138
五、电抗器	34	(一) 可控硅-转差离合器式自动调节器	138
六、变压器检查性的测定和试验	36	(二) 可控硅-交流力矩电机式(KJD 型)自动调节器	170
七、变压器二次电压的调节	44	(三) 电气-液压式自动调节器	195
八、变压器的冷却	47	六、炉底电阻对电弧炉调节器工作 的影响	196
九、变压器的维护	49	第九章 液态金属的电磁搅拌	202
第四章 短网(大电流线路)	52	一、用途和原理	202
一、短网概述	52	二、搅拌器	203
二、短网联接线路的选择	54	三、低频电源	204
三、短网导体的空间配置	56	四、搅拌装置的运行	205
四、短网电阻的计算	58	五、主要参数的确定	207
五、短网感抗的计算	66	第十章 静止式无功功率动态补偿	209
六、电极	72	一、用途和原理	209
七、短网导体的热平衡及允许负荷	74	二、静补装置容量的选择	212
八、功率转移现象	76	三、谐波滤波器	214
九、短网电参数的试验测定	78	第十一章 降低电炉炼钢电能消 耗的方法	217
十、短网电参数的物理模拟	84	一、缩短电抗器投入时间	218
第五章 电弧炉设备的用电规范	91	二、合理地降低电抗值	218
一、电弧炉设备的电气特性	91	三、减少石墨电极的接触电阻损耗	220
二、电弧炉最佳工作点的选择	98	四、减少短网附近钢结构中的损失	220
三、电弧炉不对称电压和电流的计算	100		
第六章 电炉变压器和主回路的 保护	104		
一、主回路内电气故障形式	104		

39850



五、将“增强相”移到1号电极上	221
六、制定合理的用电规范	221
七、小电炉并大电炉	222
八、烧嘴助熔及炉料预热	223
九、熔化期吹氧	224
十、缩短精炼期	224
第十二章 安全技术	225
一、工作时的安全规程	225

二、安全工作措施	229
第十三章 炼钢电弧炉设备的发	
展趋向	233
一、超高功率电弧炉	233
二、采用电子计算机控制电弧功率	242
三、电弧炉炼钢过程控制综合自动化	243
参考文献	245

绪 论

电弧炉是利用电弧的能量来熔炼金属的一种电炉。由于在电弧炉中能获得在其他冶金炉中所不能获得的高温，所以，许多对国民经济有重要意义的高级合金钢及特种合金都必须在电弧炉中进行冶炼。

现代炼钢电弧炉在国民经济当中是电能的巨大消费者。由于电力事业在最近十几年来飞速发展，因此炼钢电弧炉也相应地发展很快。

随着工业的不断发展，大量需要耐高温、耐高压和耐高速的机械设备，尤其是原子能、喷气技术及电子学等新技术的发展，更需要特殊耐高温、耐腐蚀和抗拉强度特高的材料，如喷气式飞机的耐热部件、大炮的炮身、坦克的装甲钢板及军舰上的不锈钢板等材料除电炉外，没有其他方法可以冶炼。又如工业上常用的不锈钢、耐热钢、轴承钢、高级变压器硅钢、高电阻合金、磁性合金、高速工具钢及高合金结构钢等也必须在电炉中冶炼。

近年来，在汽车和拖拉机制造业中，大量需要浇铸形状复杂且壁薄的铸钢件，而且要求这种铸钢件的精密度高、机械加工少。为了满足这一要求，必须使金属熔液充分地注满于铸模中，这就要求金属熔液具有良好的流动性，也就是要求有足够高的温度，这个问题也只有电弧炉中才能得到解决。因此可以说，浇铸异形铸钢件的铸造厂也是一种以电弧炉为主要生产手段的工业部门。

由此可见，电弧炉炼钢在国民经济当中已发展到非常广泛的地步。之所以得到如此广泛的发展，是由于电弧炉炼钢工艺同平炉、转炉炼钢工艺相比，前者具有一系列独特的优点：

1. 冶炼温度高，且容易控制，因而能够满足各类钢材对冶炼温度的不同要求。
2. 炉内气氛能够灵活控制，即炉内不仅能生成氧化性气氛，还能生成还原性气氛，从而有利于钢液的脱氧、脱硫和颇有成效地降低钢液中的非金属夹杂物。
3. 能充分回收废钢中的贵重合金元素，即合金元素烧损少。
4. 钢液的化学成分容易控制，且操作方便。
5. 炉子输入功率容易调节，因而容易实现炉子加热制度自动化。
6. 由于利用电能作为热源，因而能够避免燃料对钢液的沾污，而且热效率较高。
7. 设备结构紧凑、占地面积少、基建投资省、建厂速度快、生产机动灵活。

由于电炉炼钢法具有许多优点，所以，一些特殊钢厂及机械制造厂普遍采用电弧炉作为炼钢车间和铸钢车间的冶炼设备。就是地方上一些中、小型钢铁企业，为了满足地方工业对钢材品种的需要，也都装设了小型电弧炉。

电炉钢产量的提高及技术-经济指标的重大改进，均有赖于提高新建炉子的功率及容量。可是，对已有电弧炉设备的不断更新、合理使用，也是增加电炉钢产量及提高其质量的重要途径。

正确地解决冶炼工艺与用电规范二者之间存在的问题，并使每一冶炼期的操作正确无误，就能使炉子的运行具有良好的指标。就是说，只有当操作工艺和动力设备二者之间正确结合时，才能颇具成效地提高电炉炼钢生产率。相反，如果上述二因素没有配合好，则可能

得到出乎意料之外的不良结果。比如,在炼钢过程中或者在电炉设备维修过程中,常常暴露出某些工程师、工艺师、炼钢工长、炼钢工人及维修电工对电弧炉电气设备的基本理论和实际设备维修、操作不够熟悉。这样,就不可避免地使他们在全面掌握电弧炉电气设备方面产生了困难。为了解决这一问题,本书将着重讨论炼钢电弧炉电气设备有关理论问题及调整、运行、操作、维修等实际问题。

最近几年来,电炉设计工作者和使用部门,在设计和推广使用频繁操作式真空断路器、节能型电炉变压器、指标高超的交流力矩电机式电极自动调节器及搅拌效果良好的电磁搅拌器等方面所做的工作,以及在改造短网和制定合理用电规范方面所做的工作,对改善炼钢电弧炉的技术-经济指标,给予了强有力的保证。为了不失时机地传播和推广这些颇具经济效益的设备更新和设备改造方面的宝贵经验,本书将开辟专题,详细进行介绍。

在已有的电炉设备条件下,为了使熔炼时间、单位电能消耗、每吨钢的冶炼成本及功率因数均为最佳值,就必须在各种不同情况下制定最合理的用电规范和热工规范。

在炉料熔化期,熔化废钢进行得愈快,炉子的生产率就愈高。但是,在快速熔化的同时,还必须使电能消耗尽可能的小,电气设备运行正常。

对于新的现代化的高功率炉子而言,依靠配用较大容量变压器来最大限度地满足上述要求;而对于现有的电弧炉设备,则借助于改进变压器冷却效果及采取加大电流的方法来达到提高设备容量的目的。在一些10 t以上的炉子中,由于减少或取消了电抗器,改进短网的设计和配置,使其阻抗减少,结果达到了提高电弧功率的目的。采取以上措施后,就可以显著地缩短熔化时间及改善炉子的各项指标。

在整个精炼期,用电规范的制订应使液态金属及炉渣的温度变化曲线图形符合工艺要求的最佳曲线,为此目的,必须引入微型电子计算机实现用电规范的程序控制。具体地说,就是利用耐高温的热电偶(如钨-钼热电偶)或其他间接测温元件检测出金属熔池或炉壁的真实平均温度,并计及必须加入的合金材料及造渣材料数量,据此来决定精炼期每一阶段所需要的电弧功率,使得在该阶段的末期,钢液温度及化学成分完全满足工艺要求。因为所需要的不同温度是依靠不同的电压及功率来达到的。这样,就需要确定合理的电压切换次序,在每一级电压下的工作时间,即根据事先编制的数学模型确定合理用电规范,以便在保证金属及炉渣温度均符合既定规范的前提下,使电能消耗最少,炉衬寿命最长。为了这一目的,必须利用电子计算机来计算和控制,利用变压器有载调压开关,以功率调节系统和温度调节系统发出的信号来切换变压器电压。

近年来,在电热领域内,出现了一系列新工艺和新设备,它对自动化提出了更高的要求。所以,综合自动化广泛地用于各种不同形式的电炉和电热装置中,没有自动化,某些电热过程很难实现。试验研究表明,冶炼过程自动化可以降低废品率、提高产品质量和设备效率、提高劳动生产率、改善技术-经济指标,以及改善工人的劳动条件。因此本书以较大篇幅介绍最新型的电极升降自动调节系统及功率控制系统。

节省电能不是一项短时间的突击任务,而是所有工业部门,特别是耗电量特大的冶金部门的一项经常性的工作。不仅应当合理地使用每一度电,而且还应当经常发现和挖掘冶金设备所有各环节的节电潜力。合理地使用炼钢电弧炉的电能,不单单是降低单位电耗,而且还由于采用了先进的冶炼工艺,从而降低了炼钢生产成本,提高了劳动生产率和产品质量。为此,本书以一定篇幅介绍了国内外在电弧炉上较普遍采用的、并卓著成效的节电措施。

第一章 炼钢电弧炉

一、电弧炉工作原理及结构简述

电弧炉是一种利用电弧作为热源的炉子。这种炉子通常不作热处理加热工件之用，因为电弧的热量非常集中，被加热物不易被加热均匀。可是对于熔炼，这种炉子却非常合适。这是由于电弧功率非常大，用它来熔炼金属，可使熔炼过程进行得非常迅速，并且炉温可以很高。至于加热均匀与否，对熔炼来说并非重要问题。因为炉料在熔化以后，其温度会因对流作用或电磁力的搅拌作用而达到均匀。

电弧炉按其工作原理可分为直接加热电弧炉、间接加热电弧炉和电阻电弧炉三大类，如图1-1所示。炼钢电弧炉是直接加热式电弧炉，它的特点是：电弧在电极和炉料之间燃烧。炉料实际上亦为燃弧电极之一（图1-1 a）。在此类电炉中，直接处于高温电弧之下的炉料瞬间熔化。如果，炉料的熔点较低、气化温度低，则炉料大量气化，造成很大的损耗。另外，由于该种电炉的电极是直立的，不受弯曲的应力，所以电极尺寸可以加大。很显然，电极的尺寸大，则输入炉内的功率就可以加大，所以炉子容量不受限制，可以做成超大型的。综上所述可以认为：直接加热式电弧炉适合用来熔炼熔点较高、且产量较高的金属。所以在工业当中，主要用它来熔炼不同规格的特种钢，以及各种合金。特别适用于以下两种情况：第一，用来熔炼优质钢，因为电弧炉的炉温高，且调温方便，在炉内能够保持还原性气氛，从而能有效地去除硫、磷等有害杂质。第二，这种电弧炉还适宜在铸钢车间熔炼铸造钢。这一方面是由于浇铸钢件时，钢水需用量不多，电弧炉在容量匹配上容易满足浇注的要求；另一方面，还因为在电弧炉内熔化及精炼出来的钢水温度高、且流动性好，因而适宜用来浇铸形状复杂的铸钢件。

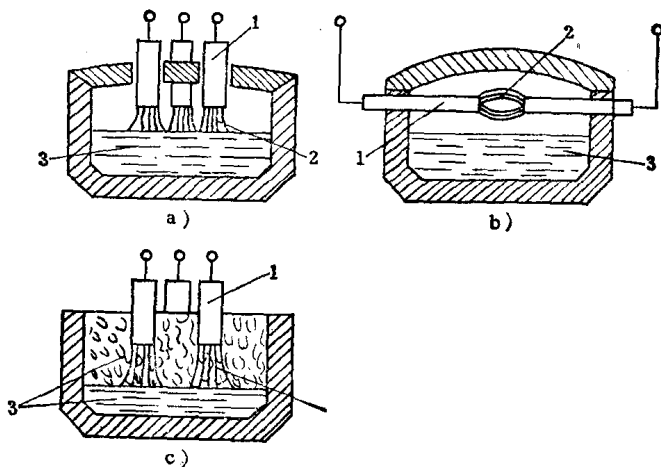


图1-1 几种工业用电弧炉示意图

a) 直接加热式电弧炉 b) 间接加热式电弧炉 c) 电阻电弧炉
1—电极 2—电弧 3—炉料(熔池)

现代化的炼钢电弧炉均为直接加热、炉底不导电式电炉。该电炉按直接加热金属的原理进行工作，电弧发生在每一电极与金属炉料之间，已熔化的金属则形成负荷的中性点。三相直接加热式电弧炉简图如图1-2所示。

电炉系由特种电炉变压器供电。电炉变压器是电炉设备的重要组成部分。

电炉由一圆筒形的、内部用耐火砖筑砌的钢制炉壳和炉盖组成。根据炉衬（耐火材料）的化学成分之不同，可分为碱性、酸性和中性三种。

电炉的结构形式主要取决于装料方法。现代化的电弧炉大多数是炉顶装料。炉顶装料要采用特制的料筐。料筐外形为一钢制的圆筒，用钢板制作的锥形链板作活动筐底。

炉顶装料与炉门装料相比，前者具有许多优点，它可以大大缩短装料时间及减轻工人的劳动量。由于缩短了装料时间，则热损失可以减少，单位电耗和电极消耗均可明显降低，因而大大地提高电炉的生产率。此外，用料筐装料时，能使炉膛填满炉料，且装填规则，这一点对电炉运行极为有利。用炉顶装料法装料时可将炉料一次、最多二次全部装入炉内，不需要多次装料，同时能保证在炉料中混有不需要全部破碎的较大块废钢铁块。

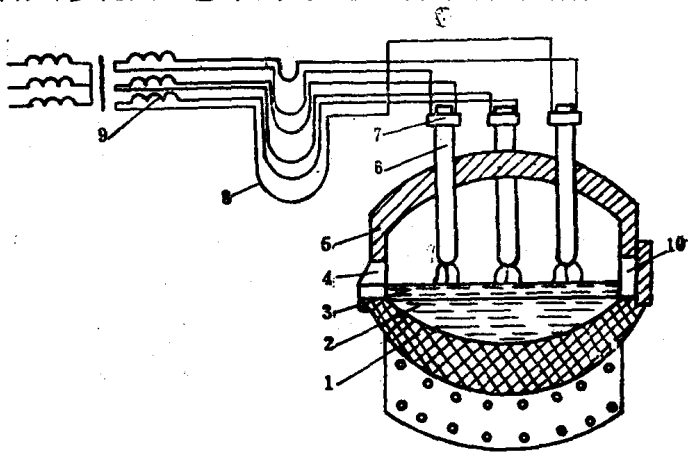


图1-2 三相电弧炉构造简图

1—炉底 2—钢液 3—渣层 4—流钢嘴 5—炉顶 6—电极
7—电极夹持器 8—短网 9—电炉变压器 10—炉门

炉顶装料式电炉可分成三种主要类型：

1) 炉盖旋开式电炉 这种结构的电炉，炉盖先行提起，然后同立柱一起绕垂直轴旋转，使炉子工作室敞露，以备装料；

2) 炉盖移出式电炉 这种结构的电炉炉壳固定不动，而炉盖、立柱及升降臂一起顺着炉架轨道往炉门或出钢口方向移出；

3) 炉体移出式电炉 这种结构的电炉，其炉盖被装在固定吊架上的机构稍微提起一段距离，之后炉体从架子下边移出。

我国电炉制造厂生产的新式电弧炉大多数是炉顶装料、炉盖旋开式电炉。

现代化的炼钢电弧炉是电气、冶金和机械部分的结合体。在最近十多年来，电弧炉的发展和完善是伴随着电气设备和机械设备可靠性的提高、新型电极调节系统的出现和炉衬寿命的延长、高功率和超高功率技术的发展而发展的。目前，电弧炉消耗的电能约占总发电量的10~15%。可见，炼钢电弧炉设备在国民经济当中获得了广泛的应用。

二、电弧炉内炼钢工艺概述

电弧炉炼钢的主要原料为废钢、废铁、生铁，铸造、轧钢和其他车间的回炉钢、以及各材料（如铁合金、镍等）。

炉内原料的性质及其数量，应根据被熔炼钢的品种及其化学成分而定。但是，对所有的废钢铁提出以下基本要求：

青洁、少锈，因为锈是含水的铁氧化物，锈蚀严重的废钢会增加钢中含氢量，会降低钢和合金元素的收得率，也增加了对钢中成分控制的困难；不得沾有泥，因为它们会降低炉料的导电性能，延长冶炼时间；废钢中的夹杂物要少，因为对钢液的污染，排除它们又需要增大渣量，并且会因此而增加电能和造渣材料油污要少，因为油污会使钢中含氢量增加。

(2)废钢中不得混有铅、锌、锡等有色金属。因为铅的熔点低，比重大，易沉入炉底，造成穿炉事故；锌易挥发，其氧化物对炉顶有侵蚀作用；锡会引起钢的热脆性。

(3)根据炉子大小，废钢要有合适的块度，并且绝对不得混有密闭容器或爆炸物，以防止引起爆炸事故。

为了改变废钢的尺寸、形状，以适应冶炼要求，对废钢必须进行加工处理。目前，世界各主要产钢国家，都很重视利用国内废钢资源，且回收、加工业已形成一种工业体系——废钢铁工业。其加工处理设备向大型、高效率发展，以便为钢铁、铸造工业提供加工优良的废钢铁精料。

电弧炉内的整个炼钢过程一般分为三个时期，即固体炉料熔化期、氧化期和还原期。

熔化期的任务就是将固体炉料熔成钢液。在此期间内，还进行金属夹杂物（碳、硅、锰、磷等）的氧化和钢液吸收氢和氮气。这些夹杂物经氧化后形成一复杂的化合物，称为炉渣。

为了便于电弧燃着和燃烧，还常常在电极下面的废钢块上覆盖以焦炭块，使得在通电时电极与焦炭形成两个电极。

开始熔化时，并不希望电极与大块炉料相接触，因为在此情况下很难燃着电弧和保持电弧稳定燃烧。特别是在冷炉和冷料情况下，电弧很短、很不稳定，同时金属块间的飞弧及电弧飞溅于熔融金属块上都使电弧长度剧烈变化。电弧若经常中断，炉料的熔化时间必延长，电流也经常发生剧烈的冲击，结果使电能消耗增加，设备的功率因数降低。

因此，在熔化初期，必须加强调节器的调节作用，在该期内，电极自动调节器必须保证：(1)自动点弧；(2)以足够的灵敏度调节电炉的输入功率，同时在调节过程中不应产生振荡；(3)迅速地消除炉料崩塌所引起的短路和比较大的扰动。

电弧燃着并稳定燃烧之后，电极底下的金属即开始熔化，熔化的金属流到炉底最低部分，经过一段时间，便在那里形成钢液池。为了加速金属的熔化，应将尚未熔化的金属从炉帮处推入钢液内。

在形成第一批钢液（熔池）之后，便需往炉内掷入石灰，进行造渣。炉渣能除掉金属中的夹杂物，并能防止钢液冷却、防止钢液被气体所饱和和被电极增碳。

随着炉料的逐渐熔化，石灰也被熔化，这样在熔化完毕时，全部钢液上部皆覆盖有一层炉渣。

炉料熔化时间长短，在很大程度上取决于输入炉内的电功率、炉料质量及其在炉膛内的装填情况。此外，也与电极自动调节器的调节质量有关。为了缩短熔化时间，在该期内，变压器通常在超载20%的情况下运行。

氧化期的任务是：1)从钢液中除去溶于其中的大量气体（主要是氢气）和非金属夹杂物；2)使钢液的温度和成分均匀；3)将磷除至规定的限度以下；4)把钢液温度均匀加热至高于出钢温度。这些任务的完成，主要是通过脱碳反应所造成的钢液沸腾。

为了有效地完成上述1和2两道工序，需要使炉内钢液具有高度流动性。钢液的强烈流动性是依靠向炉中加入铁矿石来达到的。此时，产生使碳强烈氧化的条件。一氧化碳的气泡由钢液中逸出，当该气泡经过钢液层时，它吸收溶于钢液中的其他气体，并将它们自钢液中除去。在此时期内，通过向沸腾的钢液内添加石灰，和通过一次或多次扒渣来降低钢液中的含磷量（通常应降低到0.015～0.02%）。钢液被加热好了之后，即开始扒除氧化渣和使钢液增碳（如果需要的话），同时还要向钢液表面投入还原剂。还原剂由萤石和石灰石组

成。

当钢液沸腾时，钢液及炉渣表面的波动可能使电流周期地连续变化至额定值的 $\pm 10\sim 20\%$ 。它使调节器不断地进行调节。这一时期的电弧相当长，故在任何扰动下，任何型式的调节器均能稳定工作，不需过分移动电极。

从加入还原剂时开始，即进入熔炼的末期——还原期，也称钢液的精炼期。

还原期的任务是：1) 使钢和炉渣还原；2) 除去钢液中的氧和硫，使其含量达到规定的要求；3) 调整钢液的化学成分，达到熔炼钢种所要求的成分；4) 加热钢液至正常出钢温度。

在熔炼合金钢时，钢液多半是经炉渣来还原的，为此需向炉渣中加入粉碎的碳还原剂（焦炭、木炭和电极碎块）。

炉内具有还原炉渣时，能保证将氧和硫从钢液中引入炉渣内。

在白渣或者电石渣下还原完毕，并加入为获得规定化学成分的钢种所需的一定数量的合金元素以后，就对钢液进行最后还原（用硅铁合金、铝等来还原），最后倾炉出钢。

有合金返回钢时，熔炼过程采用返回熔炼法。此时，炉料中大约有 $60\sim 80\%$ 为合金返回钢， $20\sim 40\%$ 为含碳、磷较低的软铁和铁合金。返回熔炼法的熔炼过程特点是无氧化期，因为炉料系由经过挑选的返回钢料所组成，这种返回钢料的化学成分能保证获得规定成分的钢液。采用返回熔炼法熔炼时，能明显地提高炉子生产率，且能大大地降低电能消耗及铁合金消耗。

在酸性炉衬电弧炉中的炼钢过程与在碱性炉中不同。

在酸性炉衬电弧炉的氧化期，由于形成含有过量氧化硅的酸性炉渣，因而既不能从钢液中除去磷，也不能从钢液中除去硫。

在氧化期内形成的磷和硫的化合物是不稳定的，它们不能进入炉渣内，它们还在不断地分解，使有害的杂质又重新进入钢液内。因此，对用于酸性熔炼的炉料，在硫和磷的含量方面必须要有严格的要求。

在酸性炉衬电弧炉的还原期中，要除去钢液中的氧气和使钢液的成分及温度达到所需的数值。它与碱性炉衬还原期所不同之处在于钢液被酸性炉渣“自还原”。为了加快还原，需往钢液中加入还原剂——硅铁、锰铁和铝。

酸性炉衬的电弧炉适宜熔炼异形铸件用钢，特别是薄壁铸件和小铸件。这种电炉允许周期性工作，因为酸性炉衬即使经常受冷也具有较碱性炉衬为高的耐久性。同碱性电炉相比，酸性电弧炉的生产率较高，而电能、耐火材料、还原剂和电极的消耗均较低。

在酸性炉衬电弧炉中炼钢的缺点是：不能除去钢液中的磷和硫；此外，在酸性炉衬电弧炉中很难熔炼出含碳量低的钢，如低于 0.2% 。

在生产高级合金钢的电冶炼工厂的炼钢车间内，主要使用碱性炉衬电弧炉。

三、电弧炉电气设备主要元件

电弧炉的供电线路原理图示于图1-3。该线路可分成以下几个部分：

1) 主回路（进线隔离开关——高压断路器——电抗器——电炉变压器——短网——电弧）；

2) 保护和信号回路（图中未示出）；

- 3) 检测计量回路;
- 4) 电极升降自动调节电路;
- 5) 电炉设备辅助机械供电线路。

电弧炉电气设备中的主要元件为电炉变压器, 它与普通电力变压器不同, 具有许多结构上的特点 (参见第三章)。

电炉变压器的特征是低压侧电流非常大, 因此应将它安装在由它供电的电炉附近。现代化的电弧炉配备有高功率或超高功率变压器。

使用高功率变压器, 对于熔炼优质钢的工艺而言具有特殊意义: 高功率变压器可以加快固体炉料的熔化时间; 在氧化期, 可从高功率变压器取得产生强烈沸腾和迅速提高钢液温度所必须的功率。有了高功率变压器, 就能够熔炼高质量钢材。

电抗器是同电炉变压器串联联接的电感线圈。20 t (9MVA) 及以下的电弧炉均附有电抗器。电抗器通常只在熔化初期接入, 以便在发生运行短路时用来限制短路电流数值。

在选择电抗器的感抗值时, 应使运行短路电流数值不超过变压器额定电流的 2.5~3.5 倍, 该冲击电流值对电弧炉电气设备应无危害。此外, 电抗器还能保证电弧燃烧稳定。

电抗器的感抗值, 应在炉子运行过程中仔细选定。为了能够选择最佳感抗值起见, 通常在电抗器的线圈上装设可调节抽头。

炼钢电弧炉设备的工作特点是频繁接通和断开电炉变压器, 后者的接通和断开是靠高压断路器来完成的。可见, 高压断路器是在极其繁重的条件下工作的。

关于电弧炉的平均通断次数问题, 国外曾做过统计^[1]。例如, 对于具有多级电压的无励磁电动调压变压器的电炉通断频度而言, 在一年运行期间, 其通断次数共达 2.5~3 万次; 对于只有两个电压级段的小型电炉变压器来说, 该次数也在 5~6 千次以上。由于电弧炉用高压断路器的通断次数多, 所以其主触点磨损很快, 为此, 必须选择质量好、性能优越的真空断路器。

当前, 国内大多数炼钢电弧炉均配装机电式电极升降自动调节器, 特别是近年来出现的可控硅-铁磁体空心转子交流力矩电机式电极升降自动调节器。它具有灵敏度高、稳定性好、可靠性高、维修方便、节省能源、造价低廉等优点。所以, 目前许多特种钢厂和其他铸钢厂均广泛地采用它来取代性能较差的直流电机式调节器。

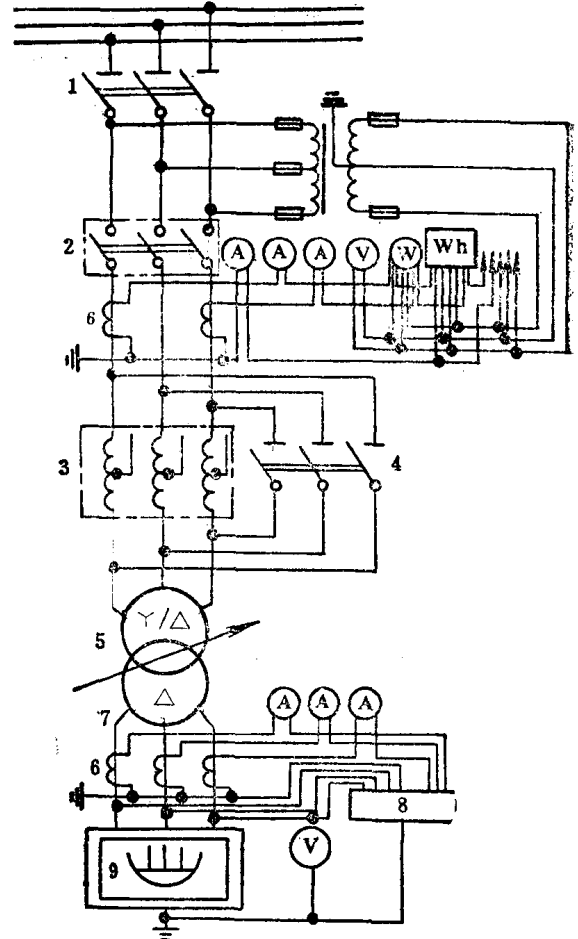


图1-3 电弧炉供电线路原理图

- 1—进线隔离开关 2—高压断路器 3—外附电抗器
4—电抗器分接开关 5—电炉变压器 6—电流互感器 7—短网 8—调节器 9—电弧炉

四、电弧炉是巨大的电能用户

电弧炉的工作特点是需要很大的电功率，一台三相电炉变压器的容量可达几千到几万千瓦安，且其所需功率数值在炉子工作期间急剧地大幅度地波动。

在熔炼期间，功率的变化是由于工艺特点和电弧燃烧的不稳定所引起的。

在不同的冶炼周期，炉子所需功率是不相同的。在熔化期，所需功率最大；在氧化期，所需功率低于熔化期；而在还原期，所需功率明显下降，其值取决于为了进行化学反应和补偿电炉热损失所需的热量。

在熔炼过程中，输入炉内功率的变化情况，可从容量为25 t、变压器容量为9000kVA的电炉负荷图（图1-4）中清楚地看出。负荷变化图是根据有功电度表积算值进行绘制的，炉子采用双渣法冶炼低合金钢，各冶炼阶段耗电量的相对比例如表1-1所示。从表中可以看到，电炉是一个很大的电能用户，这台电炉的用电量相当于一个中、小县城的用电量。其中尤以熔化期电耗最大，占总电耗的64.5%。因此节电就要狠抓熔化期。

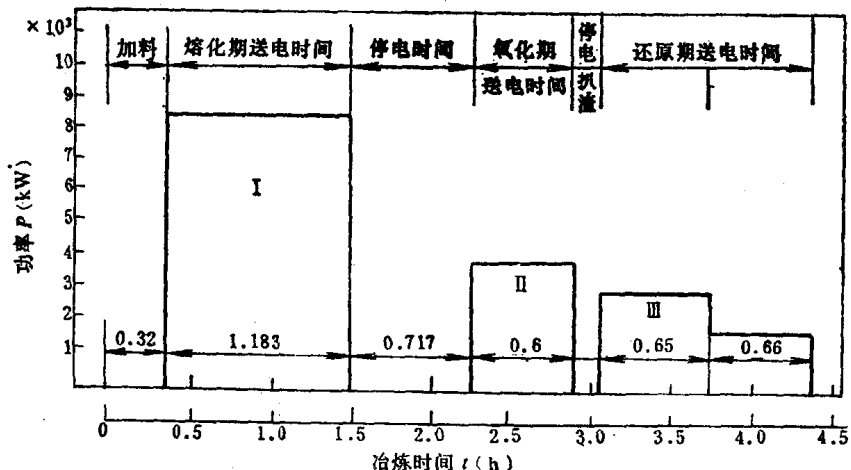


图1-4 9MVA电炉变压器在熔炼时期的负荷图表

I—熔化期 II—氧化期 III—还原期

表1-1 各冶炼期的电耗比较

冶炼阶段	通电时间(h)	平均功率(kW)	耗电量(kW·h)	单位电耗(kW·h/t)	电耗百分比(%)
熔化期	1.183	8350	9900	395	64.5
氧化期	0.6	5850	2310	92.5	15.1
还原期	0.65~0.66	1890~2900	3130	125	20.4
合计	—	—	15340	612.5	100

虽然电炉功率是自动进行调节的，但电炉变压器的实际负荷图与图1-4所示的仍稍有差别。如果采用快速记录式三相瓦特表来记录电炉变压器的负荷变化，就可观察到比较真实的功率瞬时变化情形。

图1-5所示为记录式瓦特表所记录的功率波动曲线。

如果说氧化期和还原期所需功率在数值上较为恒定，那么在熔化期，此功率则剧烈波动。

开始熔化时, 功率的波动是由于点燃冷炉料时电弧燃烧的不稳定所引起的。当出现第一批钢液和全部炉料均达高温时, 功率波动即行减轻, 当熔化完所有金属炉料之后, 实际上即不再有功功率波动。

在金属熔化末期, 炉料被熔成几个井, 上部料块逐渐受热而塌向钢液中。此时, 电极常常被塌下的金属块所短路。因而, 频繁地发生在其余电极下仍燃着电弧的单相短路。

这种短路导致电流急剧波动, 此电流仅由电炉设备主回路的感抗来限制。此时, 电流虽然急剧增加, 但是没有电弧功率, 故吸收的有功功率很低。为什么电流增加, 吸收的功率反而降低呢? 这是由于短路回路功率因数很低的缘故, 在短路回路中, 感抗占主导作用。除了熔化期中炉料崩塌产生短路外, 在电炉通电燃弧时, 还经常产生两相和三相短路。因为, 唯一的燃弧方法就是将电极同金属炉料相接触。此时, 不可避免地使电流急剧增加, 此电流仅由电炉设备主回路(由电抗器、变压器、短网和电极组成的回路)的电抗来限制。

一个普通功率炼钢电弧炉系列参数列于表 1-2 中。

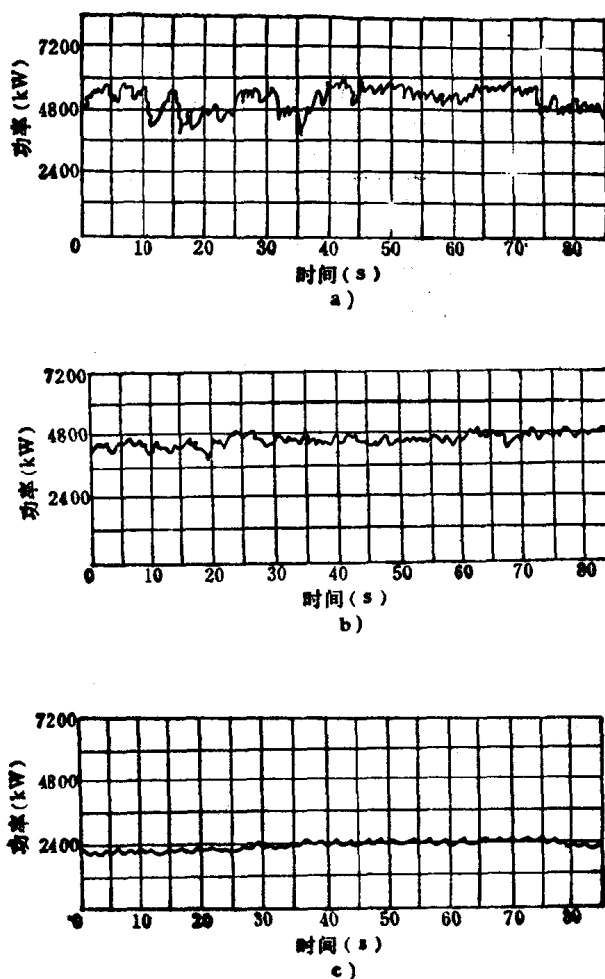


图1-5 在不同冶炼期内电炉功率变化图

a) 熔化期 b) 氧化期 c) 还原期

表1-2 普通功率炼钢电弧炉系列的主要参数

电炉额定容量(t)	0.5	1.5	3	5	10	20	30	50	75	100
炉壳内径(m)	1.6	2.1	2.5	3.0	3.5	4.2	4.6	5.2	5.8	6.4
变压器额定容量 ^① (MVA)	0.65	1.25	2.2	3.2	5.5	9	12.5	18	25	32
一次电压(kV)	10(或6)					35	35(或110)			
二次电压及调压级数(V)	200	210	220	240	260	300~140	340~150	380~160	430~170	480~180
	170	180	190	210	240					
	116	121	127	139	210					
	98	104	110	121	139	12级以上	12级以上	12级以上	12级以上	12级以上
额定工作电流(kA)	1.88	3.44	5.78	7.71	12.21	17.31	21.21	27.38	33.6	38.53
电极直径(mm)	150	150~200	200	300	350	400	450	450	500	550
电抗器额定容量 ^② (kVar)	120	200	250	320	350	400	—	—	—	—
电抗器电抗压降 ^③ (%)	13.5	16	11.4	10	6.4	4.4	—	—	—	—
电抗器安装形式	内 附					外 附	—	—	—	—
变压器阻抗压降 ^③ (%)	10~11	9~10	8~9	7~8	7~8(10或35kV) 8.5~9.5(110kV)			6~7(35kV) 7.5~8.5(110kV)		
短网电抗压降, 不小于(%)	5	8	12	15	20	26	28	32	35	38

① 变压器额定容量系指二次电压最高时的容量;

② 0.5~10t炉电抗器附设在变压器内部(内附式), 20t炉的电抗器是外附式。

③ 变压器阻抗压降(%)是指变压器二次电压最高时的相对值。当变压器采用漏磁组结构时, 因无电抗器, 此时变压器阻抗压降的最大值应小于表列变压器和电抗器阻抗压降之和。

第二章 电弧基本理论

一、电弧现象的物理本质

电弧能够熔炼金属，而且还能在金属的氧化物和还原剂混合的情况下使前者还原。这些独特的性能都已应用于炼钢炉和矿热炉中。当讨论在电弧炉内点燃大功率电弧时，必须了解它的特殊性，即：

- 1) 电弧炉中的电弧应连续不断地燃烧，并应有足够的稳定性；
- 2) 在电弧炉内燃烧的电弧，应当在较低的电压和很大的电流状态下维持极大的功率；
- 3) 电弧在封闭的空间内燃烧时，四周的内表面能吸收电弧辐射出来的功率。因此，即使在同一熔炼过程中，电弧的燃烧条件也会随着表面温度和物理性质不同而剧烈地变动。这样，当功率一定时，电弧也能够改变它的几何尺寸和物理特性（如电流通过方式、温度、辐射强度、弧流和弧压曲线形状等）。

研究表明，产生和维持电弧的必要条件是自由电子从被加热的阴极表面发射，这个过程被称为热电子发射。热电子发射可用下式描述：

$$J = AT^2 e^{-\frac{b_0}{T}} \quad (2-1)$$

式中 J ——饱和电流密度 (A/cm^2)；

T ——阴极表面温度 (K)；

A 和 b_0 ——与阴极材料和表面状态有关的系数，纯钨在真空中的 $A = 60.2 A/(cm^2 \cdot K^2)$

$b_0 = 52400 K$ 。

纯钨阴极在真空中的热电子发射电流密度与阴极表面温度之间关系如表 2-1 所示。

表2-1 纯钨电极热电子发射的电流密度

阴极表面温度(K)	1500	2000	2500	3000	3500
电流密度(A/cm ²)	10^{-7}	10^{-3}	0.3	14	225

被氧化物和其他混合物沾污的阴极表面具有更高的热电子发射能力，这时阴极的电流密度要比纯净阴极的高许多倍。

如果在阴极表面附近加有高压电场 ($10^6 \sim 10^7 V/cm$)，那么将发生强力电子发射，通常称为场致电子发射（此时与阴极表面温度无关）。

在电弧放电中，可以分成三个组成部分：阴极区、弧柱区和阳极区。

试验研究证明，阴极区的长度非常短，只有 $10^{-6} cm$ ，即阴极表面附近气体中电子的自由行程距离短。阴极电压降接近于阴极表面附近气体电离化电位数值： $U_K \approx V_L$ 。

阴极区的电场强度为 $10^6 V/cm$ ，这就表明场致电子发射过程是在阴极表面进行的。

作为一次电子发射源泉的阴极斑点是建立阴极表面电弧的基础。阴极斑点的电流密度决定于阴极斑点电子发射总和，而且在不同条件下，有时是热电子发射占优势，有时是场致电