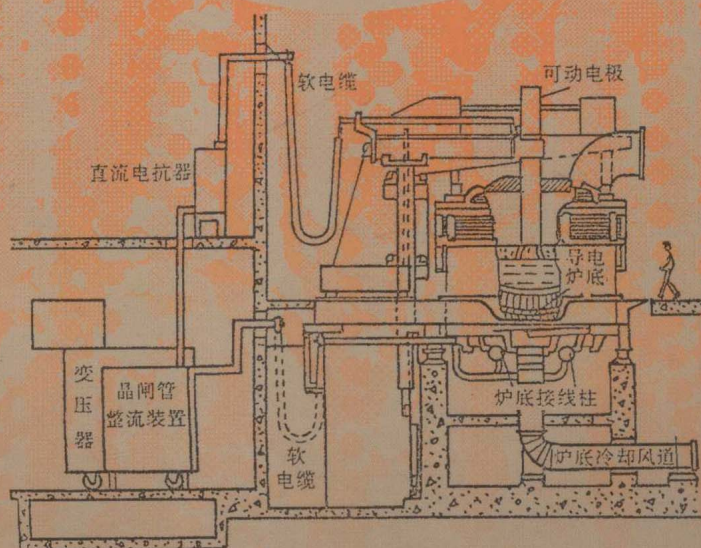
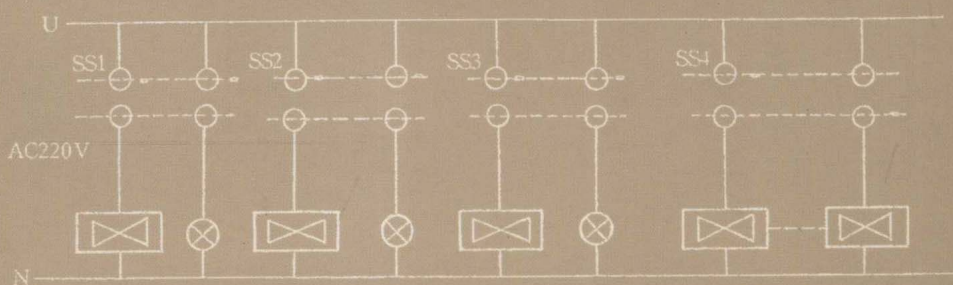


电弧炉炼钢 电气控制技术

陈勃红 李浚圣 编著



NEUPRESS
东北大学出版社

电弧炉炼钢电气控制技术

陈勃红 李浚圣 编著

东北大学出版社

内 容 摘 要

本书以交流电弧炉和直流电弧炉的电气设备及供电系统为基础,总结了大量的现场实际经验,并参阅国内外最新资料,对控制技术作以全面而深入的阐述。

本书是电弧炉炼钢的生产、操作人员学习电弧炉炼钢电气控制技术的知识,提高电弧炉炼钢操作及自动化控制水平的理想参考书。

本书可作为高等工科院校冶炼专业和自动化专业的学生熟悉电弧炉炼钢生产、了解电弧炉炼钢现场的电气设备和自动化控制技术、完成毕业设计的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

电弧炉炼钢电气控制技术/陈勃红,李浚圣编著. —沈阳:东北大学出版社,2001.12
ISBN 7-81054-670-8

I. 电… II. ①陈… ②李… III. 电弧炉-炼钢-电气控制 IV. TF345.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 070424 号

©东北大学出版社出版

(沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号 邮政编码 110004)

电话:(024)23890881(社务室) (024)23892538(传 真)

83687331(发行部) 83687332(出版部)

网址:<http://www.neupress.com> E-mail:neuph@neupress.com

沈阳农业大学印刷厂印刷

东北大学出版社发行

开本:787mm×1092mm 1/16

字数:222 千字

印张:8.875

2001 年 12 月第 1 版

2001 年 12 月第 1 次印刷

责任编辑:张德喜

责任校对:米 戎

封面设计:唐敏智

责任出版:杨华宁

定价:15.00 元

前 言

近 30 年来,世界电弧炉炼钢得到迅速发展,电炉钢产量占钢总产量的比例逐年增长,预计到 2010 年可望达 40%。从目前的发展趋势看,电炉钢除了在传统的合金钢领域继续保持优势外,在普通钢领域也表现出强劲的竞争态势。在电弧炉炼钢的近百年历史中,由于受到制造大功率高效整流设备的限制,长期以来三相交流电弧炉一直占据主导地位。近 15 年来,大型直流电弧炉炼钢技术,在超高功率交流电弧炉的基础上迅速发展起来,并在逐步取代交流电弧炉。

我国在超高功率供电技术、高压供电技术和电极调节控制技术等方面和国外有较明显的差距,三电“设计制造”水平不高,50t 以上的大型电炉绝大多数是花重金从外国引进技术和设备,只有少量 50~60t 电炉由国内设计制造。为了满足冶金企业电炉炼钢的生产、操作人员学习电炉炼钢电气控制技术,提高电炉炼钢操作水平和自动化控制水平的需要,适应高校自动控制专业教学和科研改革的新形势,特撰写了《电弧炉炼钢电气控制技术》一书。本书内容兼顾大、中、小电弧炉钢厂的需要,力求深入浅出,理论联系实际;总结了大量的现场实际经验,并参阅了大量参考文献和近期国内外资料,分别对交、直流电弧炉炼钢的电气设备和电气控制技术予以详细阐述。

本书共分 5 章,第 1 章对电弧炉炼钢的发展、冶炼工艺的特点做了概要介绍;第 2 章对交流电弧炉的电气基础知识予以阐述;第 3 章分别对交流电弧炉和直流电弧炉的电气设备及供电系统进行了较详细的阐述;第 4 章针对交流电弧炉电气控制系统,分别对电炉炼钢基础级的自动化控制设计,电极升降调节控制系统的建模及智能复合优化设计两个方面进行了较详细的阐述;第 5 章针对直流电弧炉的电气控制系统,分别对直流电弧炉的基本工作原理,电极调节控制系统的建模、控制算法、控制系统设计,直流电弧炉供电控制系统设计、电极调节控制技术、DCS 集散控制系统设计、过程控制系统设计、大型直流电弧炉的建造,结合国内外直流电弧炉实例进行较详细的阐述和介绍。

本书作为电气自动化控制技术图书,可供从事电炉炼钢的工程技术人员和生产管理人员参考使用,也可作为高等工科院校冶炼专业和自动化专业的学生了解电弧炉炼钢生产、学习电弧炉炼钢现场的电气设备和自动化控制技术、进行毕业设计的教学参考书。

在编著本书过程中得到了东北大学信息科学与工程学院博士生导师顾树生教授的悉心指导和帮助,得到了沈阳大学信息工程学院原忠虎教授、沈重机械集团公司刘向左高级工程师的大力协助,在此谨表示衷心的感谢。由于编著者水平所限,书中可能存在一些不足之处,欢迎读者批评指正。

编著者

2001 年 6 月

目 录

1 电弧炉炼钢概述	1
1.1 电弧炉炼钢的发展	1
1.2 电弧炉炼钢的特点	1
1.3 电弧炉炼钢过程简述	2
1.3.1 碱性电弧炉炼钢过程简述	2
1.3.2 酸性电弧炉炼钢过程简述	2
1.3.3 超高功率电弧炉炼钢过程简述	3
2 交流电弧炉电气基础	4
2.1 交流电弧电路基础知识	4
2.1.1 电弧的电气特性和稳定措施	4
2.1.2 电弧稳定的物理状态	5
2.1.3 交流电弧的波形	5
2.2 交流电弧炉的电气特性	6
2.2.1 三相电弧炉电路的基本计算	6
2.2.2 功率特性计算举例	9
2.3 电弧炉冲击负荷	11
2.3.1 电弧炉冲击负荷	11
2.3.2 冲击负荷允许值	12
2.3.3 冲击无功负荷	12
3 电弧炉炼钢的电气设备	14
3.1 交流电弧炉的主回路	14
3.1.1 电炉钢厂的供电	14
3.1.2 电弧炉的主回路	17
3.2 隔离开关和高压断路器	18
3.2.1 隔离开关	19
3.2.2 高压断路器	19
3.3 电弧炉变压器	25
3.3.1 电弧炉变压器的作用及工作特点	25
3.3.2 电弧炉变压器的基本结构	26
3.3.3 电弧炉变压器的调压	26
3.3.4 电弧炉变压器的冷却	27
3.3.5 电弧炉变压器的故障、保护及维修	28

3.3.6	电弧炉变压器参数	29
3.3.7	电弧炉变压器的继电保护设置	29
3.4	电抗器	31
3.4.1	电抗器的作用与选择	31
3.4.2	电抗器的构成及维护	33
3.5	短网	33
3.5.1	短网的构成及特点	33
3.5.2	短网的布置	34
3.6	直流电弧炉的主回路	36
3.6.1	直流电弧炉概述	36
3.6.2	供电主结线及设备布置	37
3.6.3	晶闸管整流装置供电方式	40
3.6.4	电压波动	41
3.6.5	高次谐波	42
3.7	直流电弧炉的整流接线	43
3.7.1	直流装置的连接方式	43
3.7.2	脉冲数和移相角的选择	45
3.8	整流装置	45
3.8.1	直流电弧炉用整流变压器	45
3.8.2	整流器	47
3.9	直流电弧炉电极	50
4	交流电弧炉炼钢的控制系统	52
4.1	电极升降自动控制系统	52
4.1.1	可控硅—直流电机式调节器	54
4.1.2	可控硅—交流力矩电机式调节器	54
4.1.3	可控硅—电磁转差离合器式调节器	55
4.1.4	交流变频调速式电极自动调节器	56
4.1.5	电液随动阀—液压传动控制调节系统	56
4.1.6	微机电极自动调节系统	57
4.1.7	常用电极自动调节器的性能指标比较	57
4.2	液压、水冷、气动控制系统	57
4.2.1	液压控制系统	57
4.2.2	水冷控制系统	58
4.2.3	气动控制系统	58
4.3	计算机在电弧炉炼钢过程中的应用	59
4.4	PLC 控制系统	60
4.4.1	电弧炉 PLC 控制系统的构成	61
4.4.2	电弧炉 PLC 控制系统的功能	61
4.4.3	电弧计算机监视与管理功能	85
4.5	电极控制系统的智能优化控制	88

4.5.1 液压式电极调节系统的数学模型 88

4.5.2 电极升降智能复合控制 92

4.5.3 电极控制策略的选择 98

5 直流电弧炉炼钢的控制系统 101

5.1 直流电弧炉控制的基本原理 101

5.1.1 直流电弧炉功率控制的基本原理..... 101

5.1.2 直流电弧炉电极控制的基本原理..... 102

5.2 直流电弧炉电极控制系统的建模及控制算法 104

5.2.1 电极控制系统的数学模型..... 104

5.2.2 直流电弧炉电极控制算法..... 105

5.3 直流电弧炉控制系统设计 108

5.3.1 供电控制系统设计..... 108

5.3.2 电极控制技术..... 111

5.3.3 分布式计算机集散控制系统..... 112

5.3.4 直流电弧炉炼钢车间的过程控制系统..... 125

5.3.5 大型直流电弧炉的建造..... 129

参考文献..... 134

1 电弧炉炼钢概述

1.1 电弧炉炼钢的发展

近年来世界电炉钢的生产发展很快,随着二步炼钢法的兴起和 20 世纪 70~80 年代电炉自身采用了诸如超高功率技术、水冷炉壁、水冷炉顶、偏心炉底出钢、氧燃烧嘴、吹氧、喷碳、泡沫渣工艺等新技术,使得电炉钢生产不仅在传统的合金钢领域中继续保持优势,而且在普通钢范围内也表现了强大的竞争力。

自 20 世纪 80 年代初世界上第一座直流电弧炉问世以来,电炉钢的生产突飞猛进。2000 年,电炉钢约将占世界钢产量的 34.4%,到 2010 年预计将达到 40% 或更高,与氧气转炉平分秋色。

目前,我国仍以交流电弧炉生产电炉钢为主,这种趋势目前仍不会改变。交流电弧炉在受到新兴直流电弧炉冲击的同时,在提高生产率和改善各种单耗方面也不断取得进展;而直流电弧炉的诸多优点使其在未来的电弧炉炼钢中具有广阔的发展前景。

1.2 电弧炉炼钢的特点

电弧炉炼钢是以废钢铁料为主要原料,以各种微量合金和造渣料为辅料,以电能为热源,利用电极与炉料间产生的电弧的高温来加热和熔化炉料,经过一系列的物理化学反应,最后形成成分和温度合格的钢产品。

电弧炉炼钢具有以下优点:

(1) 能灵活掌握温度。电弧炉中电弧区温度高达 4000℃ 以上,远远高于炼钢所需的温度,因而可以熔化各种高熔点的合金。通过电弧加热,钢液温度可达 1600℃ 以上。在冶炼过程中,通过对电流和电压的控制,可以灵活掌握冶炼温度,以满足不同钢种冶炼的需要。

(2) 热效率高。电弧炉炼钢没有大量高温炉气的热损失问题,因而热效率高,一般可达 60% 以上,比转炉炼钢的热效率高。

(3) 炉内气氛可以控制。氧气转炉吹入大量氧气是熔炼得以进行的必要条件,平炉熔炼过程中为了保证完全燃烧,必须在熔炼室中保持一定的过剩空气系数,因而在这些炉子中,熔炼自始至终是在不同程度的氧化性气氛下进行的。在电弧炉中没有可燃气体,根据工艺要求,既可造成炉内氧化性气氛,也可造成还原性气氛,这是转炉和平炉无法达到的。因而在碱性电弧炉炼钢过程中能够大量地去除钢中的磷、硫、氧和其他杂质,提高钢的质量,合金的回收率高且稳定,钢的化学成分比较容易控制,冶炼的钢种也较多。

(4) 设备简单,工艺流程短。电弧炉的主要设备为变压器和炉体,基建费用低,投产快。电弧炉以废钢为原料,不像转炉那样以铁水为原料,所以不需要一套庞大的炼铁和炼焦系统,因而流程短。

电弧炉炼钢法的不足之处:由于电弧的电离作用,使炉内空气和水汽大量离解,溶入钢液中,因而电炉钢中氢和氮含量比转炉钢和平炉钢的高。

炼钢电弧炉根据炉衬耐火材料性质的不同,可分为碱性电弧炉和酸性电弧炉。碱性电弧炉炉衬用镁砖、白云石砖砌筑,炉盖用高铝砖砌筑。冶炼时造碱性渣,以石灰为主,能大幅度地去除钢中的有害元素磷、硫和其他杂质,原料范围广,钢的质量好,冶炼品种多。既可生产普通钢,又可生产优质钢;既可生产碳素钢,又可生产合金钢。酸性电弧炉炉衬用硅砖、石英砂与水玻璃打结而成,炉盖用硅砖砌筑。冶炼时造酸性渣,以石英砂为主,冶炼过程中不能去除硫和磷,故其应用受到了限制。但酸性电弧炉具有生产率高、钢液的铸造性能好、钢成本低等优点。

1.3 电弧炉炼钢过程简述

1.3.1 碱性电弧炉炼钢过程简述

碱性电弧炉炼钢的工艺方法可归纳为3种:氧化法、不氧化法、返回吹氧法。氧化法是最基本的方法,其他两种方法是在氧化法的基础上发展起来的。这里,以氧化法为重点予以介绍。

1.3.1.1 氧化法

氧化法冶炼工艺由补炉、装料、熔化期、氧化期、还原期和出钢6个阶段组成。其工艺流程如下:

(1) 补炉。将上一炉炉内残渣和残钢迅速扒出,然后将炉体损坏的部分迅速修补,以保证下一炉钢正常冶炼。

(2) 装料。目前电弧炉普遍采用顶装料。废钢按所冶炼的钢种进行配料装入料罐内,装料时将炉盖升起旋开,开除炉体,露出炉膛,再用吊车吊起料罐将炉料一次加入炉内。

(3) 熔化期。从通电开始到炉料全部熔清的阶段称为熔化期。熔化期的主要任务是迅速熔化全部炉料,并且要求去除部分磷。熔化期一般采用吹氧助熔以加速熔化和节省电能。

(4) 氧化期。当炉料全部熔清后,取样分析进入氧化期。氧化期的任务是:继续最大限度地降低钢液中的磷含量;去除钢种气体和夹杂物;将钢液温度加热到高于出钢温度 $10\sim 20^{\circ}\text{C}$ 。

(5) 还原期。主要任务是:脱氧;脱硫;调整钢液的化学成分;调整钢液的温度。

(6) 出钢。钢液脱氧良好,化学成分符合要求,温度达到出钢温度,炉渣合乎出钢要求,即可出钢。

1.3.1.2 不氧化法和返回吹氧法

不氧化法的特点是在冶炼过程中没有氧化期,不能去磷和去气,钢液的化学成分基本上取决于配料成分。

返回吹氧法的特点是在炉料中配入大量的合金返回钢,熔清后吹氧进行脱碳沸腾。其冶炼过程中不能去磷,主要用于回收铬、钨等合金元素,现在高速钢和不锈钢大多采用此法冶炼。

1.3.2 酸性电弧炉炼钢过程简述

酸性电弧炉冶炼工艺有两种方法:氧化法和不氧化法。氧化法冶炼分补炉、装料、熔化期、氧化期、还原期和出钢阶段。不氧化法没有氧化期。

氧化法工艺流程如下:

(1) 补炉。将炉内残渣残钢扒出,用石英砂材料补炉。

(2) 装料。与碱性电弧炉装料法相同。

(3) 熔化期。熔化期所需时间与全炉冶炼时间的比值大于碱性炉。

(4) 氧化期。主要任务是:依靠脱碳反应去除钢液中的气体和非金属夹杂物;依靠脱碳反应加热钢液略高于出钢温度。

(5) 还原期。主要任务是:脱氧;调整钢液的化学成分;调整钢液的温度。

(6) 出钢。钢液脱氧良好,化学成分符合要求,温度达到出钢温度,即可出钢。

1.3.3 超高功率电弧炉炼钢过程简述

传统的电弧炉操作是在一座炉子内完成熔化、氧化和还原 3 个不同时期的冶炼,既要完成熔化、脱磷、脱碳升温,又要进行脱氧、脱硫、去气、去除非金属夹杂物,合金化以及温度、成分的调整,因而冶炼周期长,限制了电弧炉生产率的提高。

现代超高功率电弧炉炼钢工艺只在电弧炉中保留熔化、升温 and 脱磷、脱碳等必要的精炼,以尽可能大的功率进行熔化、升温操作,而把那些需要较低功率的其他精炼操作过程移到二次精炼炉中进行,解决了炼钢周期长、能耗高等问题。超高功率电弧炉与普通功率电弧炉相比,在单位时间内输入到电弧炉内的能量要大 2~3 倍,使电弧炉炼钢周期由原先的几个小时缩短到 60min 以下,大幅度地减少了冶炼过程中的热损耗,其热效率、总效率、生产率都有显著的提高。

2 交流电弧炉电气基础

2.1 交流电弧电路基础知识

2.1.1 电弧的电气特性和稳定措施

电弧是具有电流增加而电压就减小的下降特性(负电阻特性)的不稳定且可自由伸缩的电阻体。为了稳定控制电弧电流,在电源和电弧之间必须设有图 2-1 所示的带电抗器的特别稳定电路。假若没有电抗器,和短路现象一样,电流几乎瞬间增大,很容易导致电气设备的破坏。

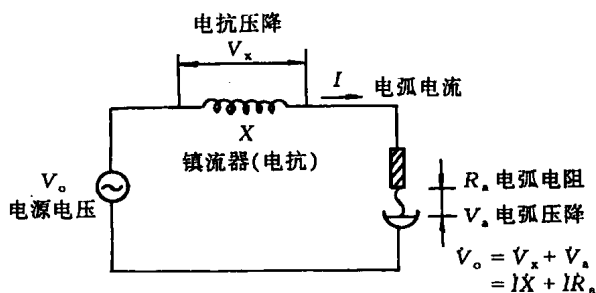


图 2-1 基本电弧电路

图 2-2 说明,电弧自身具有的负电阻特性和由于插入扼流电抗后电弧电路变为正电阻特性的状态。由图 2-2 可看出,电弧的稳定电流依据电抗大小而变化。感应电抗除使电路损失功率小、电弧稳定外,还有抑制高次谐波成分的效果。另外,半周波起电弧时,由于电压的上升,还有使电弧迅速再点弧的效果,有助于提高交流电弧的稳定性。

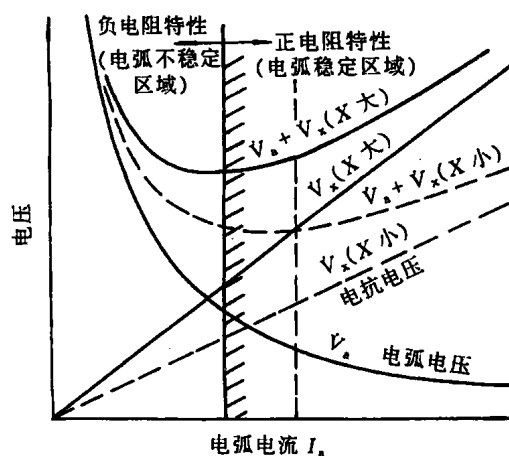


图 2-2 电弧电流、电压特性

电弧稳定所必需的电抗容量用 $X'(\%)$ 表示(参照图 2-3), 计算式为:

$$X' = \frac{IX}{E} \times 100\% \quad (2-1)$$

如图 2-2 所示,电路电抗越大,电弧稳定区间就越大,即使是比较低的电流,电流也稳定。

一般在冷料点弧的情况下, $X' > 60\%$ ($\cos\Phi < 0.8$) 是电弧稳定的大致范围。如果电弧周边的气体温度足够高,即使 $X' > 40\%$ ($\cos\Phi < 0.916$), 电弧也稳定。 X' 说明见图 2-3, X' 和功率因数的关系可以用下式表示:

$$\cos\Phi = \sqrt{1 - \left(\frac{X'}{100}\right)^2}$$

或

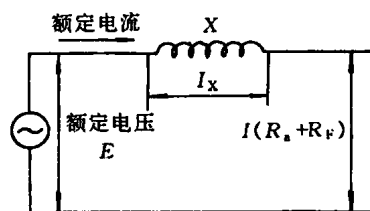


图 2-3 X' 说明图

$$\frac{X'}{100} = \sqrt{1 - \cos^2 \Phi} \quad (2-2)$$

中型炉及大型炉稳定电弧所必需的电抗通常可由短网、电极以及炉用变压器充分提供。而小型炉从炉用变压器到电弧的距离短,各导体相互接近,固有电抗不足,为了稳定作业有必要在一次侧设置附加电抗器。是否在一次侧设置附加电抗器的界限定为变压器容量 $10\text{MV}\cdot\text{A}$ 。

2.1.2 电弧稳定的物理状态

交流电炉电弧稳定的条件如下:

- ① 大电流电弧即电弧越粗电弧越稳定;
- ② 电弧越短越稳定;
- ③ X' 越大越稳定,周波数越高越稳定,例如 60Hz 的电流比 50Hz 的易于稳定;
- ④ 周围气体温度越高越稳定;
- ⑤ 周围气体越不流动越稳定;
- ⑥ 周围气体压力越高越稳定;
- ⑦ 周围气体的组成对稳定性有影响,渣的存在提高稳定性;
- ⑧ 外部磁场的影响越少越稳定;
- ⑨ 电弧能自由转移稳定性提高。

2.1.3 交流电弧的波形

图 2-4 表示具有稳定电路的空气中电弧电压和电流的波形。在图 2-4(a) 中,电压 $A \rightarrow B$ 上升期间因为两极间有前半周的残留离子,所以就有像 $A \rightarrow B'$ 那样微小的电流流动。电压变为 B (称为再点火电压) 开始放电,随着电弧发生电阻减少,电流就如 $B' \rightarrow C'$ 那样增加,而电压就像 $B \rightarrow C$ 那样降低。到 E 点电弧电压随电源电压一起降低,电流也减少至 E' , 电压、电流都变为零。图中虚线表示电源电压波形。

$A \rightarrow B'$ 期间从电流几乎接近零起,电流波形变成如图 2-4(a') 所示,可看到每半周波断一次电弧。电弧的温度在十分高的情况下,大部分离子将保留到下半周波, $A \rightarrow B$ 间的再点火电压则几乎看不到。这时,电压、电流波形如图 2-4(b) 所示大致接近正弦波。

如果以实际炉况来说,图 2-4(a') 表示冷料熔化初期,图 2-4(b) 表示从炉子温度以充分上升的熔化末期到熔池平展时期的波形。

实际炉子的电弧因为两电极的材质、形状不同,电流在正负半周波的差异很大。并且在废钢熔化期因电极前端和废钢的相对位置每时每刻都在变化,电弧电流的波动激烈,电流波形畸变意味着有大范围的高次谐波成分。一般来讲,波动随着熔化的进行而减少。

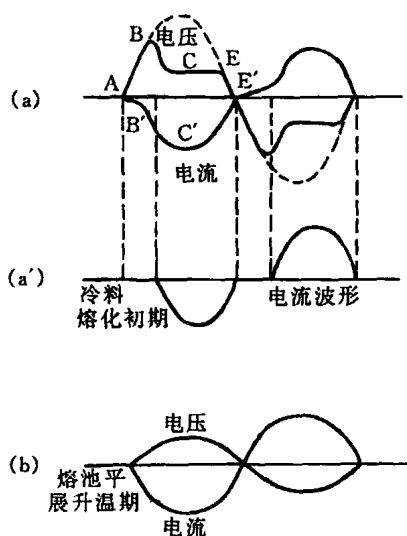


图 2-4 交流电弧的电压、电流波形

稳定状态的交流电弧特性, 根据试验和数学公式已相当明确, 但实际上废钢熔化期的电弧特性远比其复杂。

2.2 交流电弧炉的电气特性

交流电弧炉的电气特性是决定电力输入形式的基础。图 2-5 表示包括电源系统的电弧炉电力装置全系统图。

电弧炉以特高压配电, 经过总降压变电站主变压器送至炉用变压器, 再由炉用变压器变换为适合于发生电弧的二次电压。

假设电弧炉电路为正弦波交流电和三相平衡电路, 按照惯例, 首先分析构成它的单相等值电路, 而且将这些特性全部换算到炉用变压器的二次侧表示。这样, 电弧电路与实际相比就简单多了。

2.2.1 三相电弧炉电路的基本计算

三相电弧炉的电路图如图 2-6 所示。图 2-6 (a) 是三相电弧炉电路, 图 2-6 (b) 是三相平衡的单相等值电路。

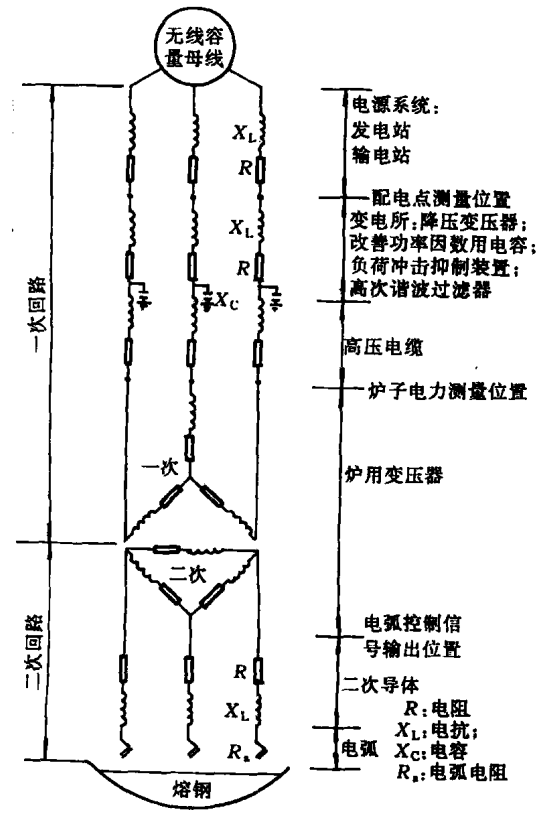
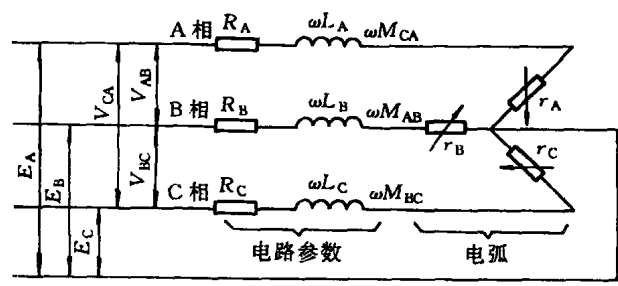
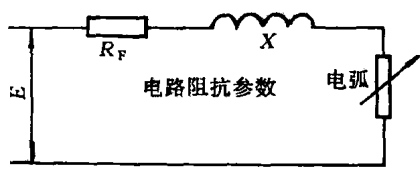


图 2-5 电弧炉装置的全系统图



(a) 三相电弧炉电路



(b) 单相等值电路

图 2-6 电弧炉电路

E_A, E_B, E_C ——A, B, C 各相的相电压; V_{AB}, V_{BC}, V_{CA} ——A, B, C 各相的线电压; R_A, R_B, R_C ——各相电阻; $\omega L_A, \omega L_B, \omega L_C$ ——各相自身电抗; $\omega M_{AB}, \omega M_{BC}, \omega M_{CA}$ ——各相间互感电抗; r_a, r_b, r_c ——各相电弧电阻。

(1) 符号说明:

S_T ——视在功率(炉用变压器负荷), $kV \cdot A$, $MV \cdot A$;

V ——电炉变压器的二次分接线电压(各相线间电压), V ;

E ——电炉变压器的二次分接相电压(各相与中性线间电压), V ;

I ——二次电流(作业中电弧电流), kA ;

$\cos \Phi$ ——功率因数(炉用变压器一次侧);

Z ——电弧炉电路总阻抗(一次侧, 变压器, 炉子), $m\Omega$;

X ——电弧炉电路总电抗, $m\Omega$;

R ——电弧炉电路总电阻, $m\Omega$, $R = R_F + R_a$;

R_F ——除电弧电阻外炉子全系统的电阻, $m\Omega$;

R_a ——电弧电阻, $m\Omega$;

g ——电弧柱的电位梯度, V/mm ;

X' ——电弧炉电路电抗百分数, %;

P ——电路有功功率, kW , MW ;

P_L ——电路损失功率, kW , MW ;

P_a ——电弧功率, kW , MW ;

E_a ——电弧电压, V ;

Q ——无功功率, $kVAR$, $MVAR$;

η ——电效率, %;

I_s ——短路电流(电极前端短路), kA ;

$\cos \Phi_s$ ——短路时功率因数;

$\cos \Phi_{om}$ ——电路最大输入功率时功率因数;

$\cos \Phi_{am}$ ——最大电弧功率时功率因数;

P_{max} ——电路最大输入功率, kW , MW ;

I_{om} ——电路最大输入电流, kA ;

P_{am} ——最大电弧功率, kW ;

I_{am} ——最大电弧功率时电流(也称最佳电流), kA 。

(2) 基本计算公式:

① 视在功率(kVA):

$$S_T = \sqrt{3} VI \quad (2-3)$$

$$S_T = 3EI \quad (2-4)$$

② 有功功率(kW):

$$P = S_T \cos \Phi = 3EI \cos \Phi \quad (2-5)$$

③ 电抗百分数(%):

$$X' = \frac{IX}{E} \times 100\% \quad (2-6)$$

④ 功率因数:

$$\cos \Phi = \frac{P}{S_T}$$

或

$$\cos \Phi = \sqrt{1 - \left(\frac{X'}{100} \right)^2} \quad (2-7)$$

⑤ 电路损失功率(kW):

$$P_L = 3I^2 R_F \quad (2-8)$$

⑥ 电弧功率(kW):

$$P_a = P - P_L \quad (2-9)$$

⑦ 无功功率(kvar, Mvar):

$$Q = S_T \sin \Phi = 3I^2 X \quad (2-10)$$

⑧ 电效率(%):

$$\eta = \frac{P_a}{P} \times 100\% \quad (2-11)$$

⑨ 电弧电流(kA):

$$I_a = \frac{S_T}{\sqrt{3}V}$$

或

$$I = \frac{E}{Z} = \frac{E}{\sqrt{(R_F + R_a)^2 + X^2}} \quad (2-12)$$

⑩ 电弧电压(V):

$$E_a = E \cos \Phi - IR_F$$

$$E_a = IR_a$$

或

或

$$E_a = \frac{P_a}{3I} \quad (2-13)$$

⑪ 电弧电阻(mΩ):

$$R_a = \frac{E_a}{I} \quad (2-14)$$

⑫ 电弧长(mm):

$$L = [E_a - (20 \sim 40)] / g \quad (2-15)$$

⑬ 短路电流(kA):

$$I_s = \frac{E}{\sqrt{(R_E^2 + X_s^2)}} = \frac{E}{X_s} \sin \Phi_s \quad (2-16)$$

这时的功率因数角:

$$\Phi_s = \arctan \frac{X_s}{R_F} \quad (2-17)$$

⑭ 电路最大输入功率(kW):

即 $X = R_a + R_F$ ($\Phi = \pi/4$) 时

$$P_{\max} = \frac{3}{2} \times \frac{E^2}{X} = \frac{V^2}{2X} \quad (2-18)$$

这时的电流 I_{om} 及功率因数 $\cos \Phi_{om}$:

$$I_{om} = \frac{E}{\sqrt{2}X} \quad (2-19)$$

$$\cos \Phi_{om} = 0.707 \quad (2-20)$$

⑮ 最大电弧功率:

当 $R_a = \sqrt{R_F^2 + X^2}$ ($\Phi = \frac{\Phi_s}{2}$) 时

$$P_{am} = \frac{3}{2} \times \frac{E^2}{R_F + \sqrt{R_F^2 + X^2}}$$

或

$$P_{am} = \frac{3}{2} \times \frac{E^2}{X} \tan \frac{\Phi_s}{2} \quad (2-21)$$

这时的电流 I_{am} 及功率因数 $\cos \Phi_{am}$:

$$I_{am} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{E^2}{\sqrt{R_F^2 + X^2} + R_F \sqrt{R_F^2 + X^2}}$$

或

或

$$I_{am} = \frac{E}{X} \sin \left(\frac{\Phi_s}{2} \right)$$

$$I_{am} = \frac{I_s}{2 \cos \Phi_{am}} = \sqrt{\frac{P \tan \Phi_{am}}{3X}} \quad (2-22)$$

$$\cos \Phi_{am} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{R_F}{\sqrt{R_F^2 + X^2}}}$$

或

$$\cos \Phi_{am} = \cos \left(\frac{\Phi_s}{2} \right) \quad (2-23)$$

⑯ 电弧喷射指数(相当于以前炉壁耐火材料烧损指数 RI):

$$ABI = \frac{P_a E_a}{3D^2} \quad (2-24)$$

式中 D ——从电极侧面到炉壁的最短距离, cm。

2.2.2 功率特性计算举例

图 2-7 是依据 65/75t 电弧炉(炉用变压器 $S_T = 50\text{MVA}$, F650V-R500V-300V 每挡 25V), 设分接线电压 $V = 600\text{V}$ 的熔化期, R_F , X 一定(假设炉用变压器电抗与分接头电压无关, 保持定值)的情况下, 根据式(2-4)~(2-23)的计算, 以电弧电流为变数时绘制的功率特性曲线, 又称功率圆图。

图 2-7 中, 电弧从石墨电极和装入物接触(短路)开始。这时不存在电弧, 流过系统最大的

短路电流 I_s 。通过电极控制装置的动作,电极上升,开始形成短弧,电流为 I_s 。这时电路输入功率 P 极低,只是包括含电极的电路损失的功率 P_{Lmax} 。

在提起电极形成短弧期间,电流减少的同时,输入功率 P 和功率因数迅速提高,由电路电阻产生的 P_L 也减少。电弧功率 P_a 为输入功率 P 和 P_L 之差。

当电弧长度进一步变长,功率因数 $\cos\Phi = 0.707$ 时,输入功率达到最大值 P_{max} 。超过这一点,输入功率 P 就降低,本例中,当功率因数约为 0.75 时,电弧功率 P_a 达最大值。

如再上提电极,电流就又减少,在功率因数 $\cos\Phi = 0.8$ 时,进入所谓低电流长电弧的高功率因数作业区域。可是随着功率因数的上升,电弧的稳定性逐渐降低。如果从这个状态进一步减少电流,功率因数进一步提高,电弧就进入不稳定区域,直至最终电弧消失。这个电弧的不稳定界限,因炉况而异。

电路损失功率 P_L 从电极前端短路到电弧消失与电弧电流二次方成比例降低。电弧功率最大的电流 I_{am} 与电路输入功率最大的电流 I_{om} 相比,微低一些。这时的功率及电流为最佳功率 P_{am} 和最佳电流 I_{am} ,而且这时的功率因数约为 0.7,几乎处在中央区域。在这个最佳条件下,对于给定的分接线电压可得到最高水平的电弧能。

电弧功率 P_a 不能直接测量,但测量输入功率是可能的。最大功率 P_{max} 可由 $P_{max} = \frac{V^2}{2X}$ 求出。这表示,即使改变分接线电压 V 也能通过保持 $\frac{V^2}{2X}$ 为定值来得到同一最大输入功率。这样,最大输入功率取决于与变压器容量无关的分接线电压和电路阻抗参数。

在分接线电压改变时,作为功率圆图的抛物线 P, P_a 常常沿 x, y 轴两方向扩展或缩小。表 2-1 为图 2-7 各点数据。

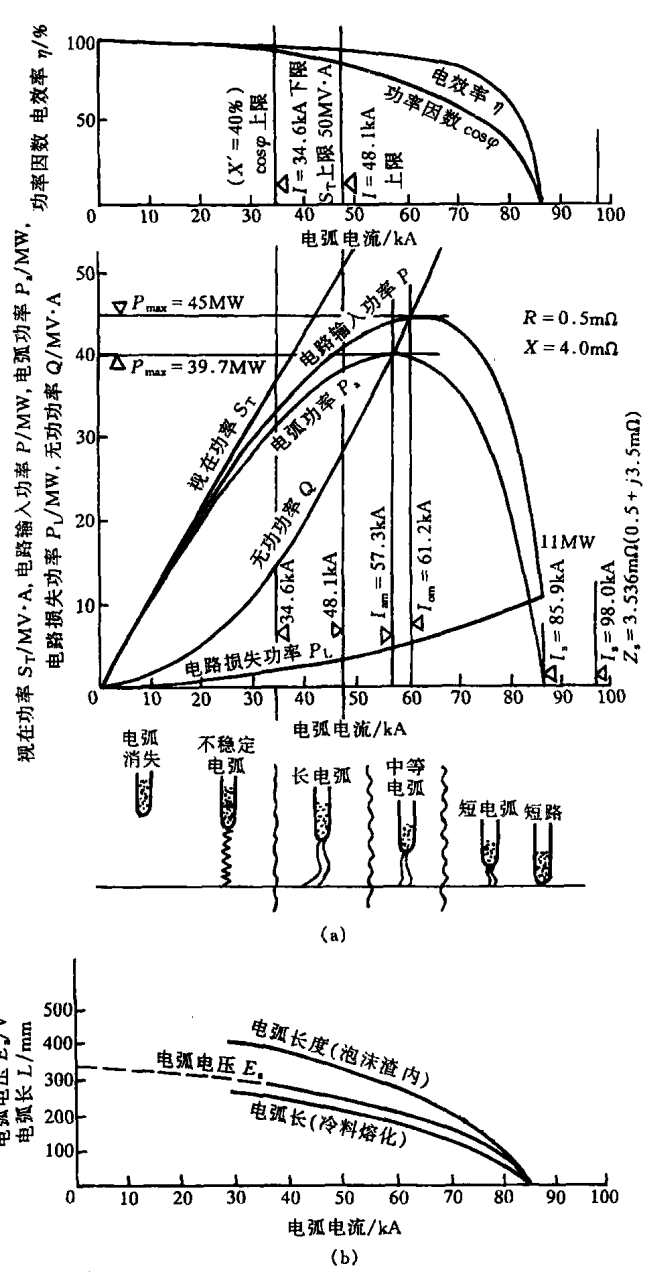


图 2-7 功率圆图