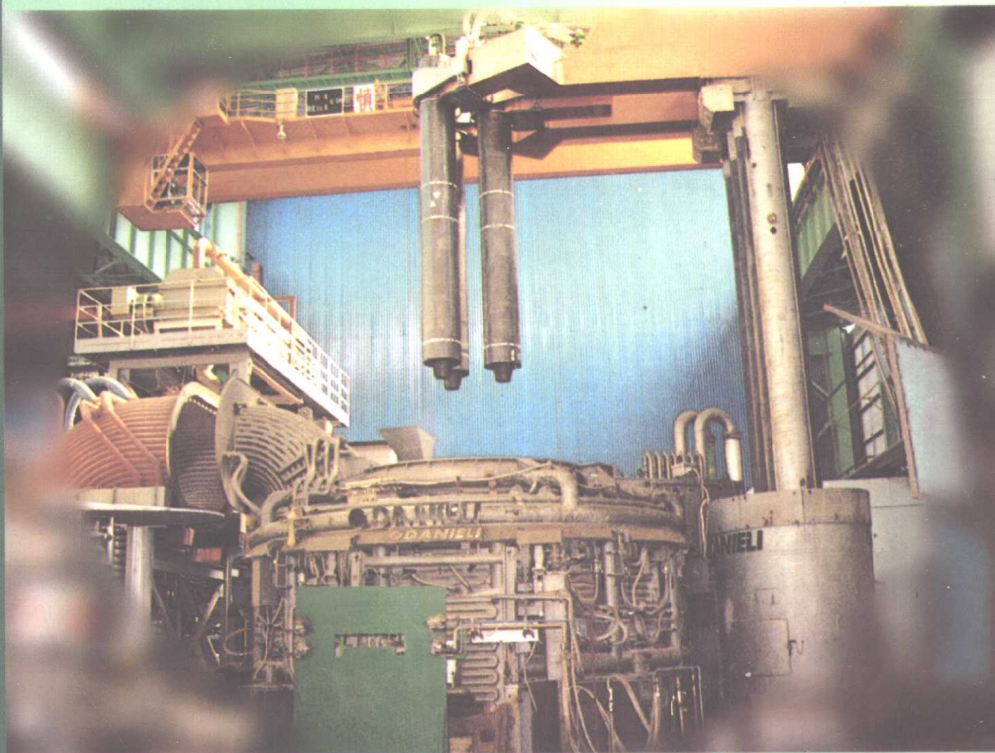


工业电炉

郭茂先 主编



冶金工业出版社

工业电炉

东北大学 郭茂先 主编

北京
冶金工业出版社
2002

图书在版编目(CIP)数据

工业电炉/郭茂先主编. —北京:冶金工业出版社,
2002.4
ISBN 7-5024-2950-6

I.工… II.郭… III.电炉-基本知识
IV. TM924

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 098856 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)
责任编辑 王秋芬 美术编辑 李 心 责任校对 卿文春 责任印制 李玉山
北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销
2002 年 4 月第 1 版,2002 年 4 月第 1 次印刷
787mm×1092mm 1/16;12.5 印张;303 千字;192 页;1-3000 册
25.00 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
(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

本书是根据高等学校热能工程专业“工业电炉”课程教学大纲编写的,除可作教材外,也可供与其有关的专业师生和工程技术人员参考。

全书共八章。前两章论述电炉的效能和电热理论基础,介绍工业电炉通用的基本规律;后六章分别介绍了电阻炉、电弧炉、矿热炉、感应炉、真空电炉和特种电炉的电热原理、炉子构造、热工特性和热工计算。作为教材,本书主要论述工业电炉的电热理论和炉子结构原理,以培养学生理论分析电炉热工过程和炉子构造的能力;为了理论联系实际,本书还介绍了与电炉配套的机电设备和生产工艺方面的基本知识。

书中关于工业电炉电热原理、电热转换机理和能量有效利用规律性的内容宜于教师讲授;而炉子构造形式和配套设备的章节是辅助内容,是工业应用电炉的实例,可以学生阅读为主,然后进行课堂讨论。

本书是在东北工学院 1983 年编印的《工业电炉》讲义的基础上,由东北大学、中南大学和北京科技大学热能工程系教师大幅度增删内容集体改编的。本书取材广泛,并且反映了本书编者的大量教学、科研成果。

本书引用的文献资料有的按教学需要进行了适当改编,例如电炉基本电路方程(式 2-18、式 2-27),实质是 $R-L-C$ 方程,见诸电工学,本书结合电炉的具体条件论述,给予新的名称。又如导体中磁电转换涡流微分方程,本书用自编的方法导出,既简捷又容易理解。

本书引用的编者教学科研成果,主要包括电炉生产率的表达式,短网理论,直接和间接电阻电热的加热时间计算式,电弧炉伏安特性和工作点理论,炼钢电弧炉最大电热效率工作电流计算式,物料感应加热时间计算式,矿热炉工作电阻及功率分布计算式等。

本书的全部例题都是自编的。部分例题是工程实际计算,用来说明电热理论的综合应用。

本书由郭茂先主编,参加编写工作的有周子民(3、5、7 章)、林传兴(4、6、8 章)、秦勤等(1、2 章)。本书由陈鸿复、陈文修、杨晶、应巧琴、李云奇等审阅。由于编写人员能力有限,书中不妥之处,敬请读者指正。

编 者

2002 年 1 月

目 录

概述	1
1 电炉效能与理论热耗	4
1.1 电炉的效能	4
1.1.1 电炉生产率	4
1.1.2 热能与电能单耗	5
1.1.3 热效率与电效率	6
1.2 理论热能单耗	6
1.2.1 物理热计算	7
1.2.2 化学热计算	8
2 电热理论基础	10
2.1 电热功率与直流电阻	10
2.1.1 电热功率	10
2.1.2 直流电阻	11
2.1.3 直流电路计算	13
2.2 交流电路与电炉功率	14
2.2.1 电阻电路与有功功率	15
2.2.2 电感电容电路与无功功率	16
2.2.3 电炉基本电路和视在功率	17
2.2.4 阻抗的星角转换	19
2.3 电磁感应	20
2.3.1 感应电动势	20
2.3.2 自感与互感	21
2.3.3 趋肤效应与邻近效应	24
2.3.4 交流电阻	25
2.4 传热	27
2.4.1 传导传热	27
2.4.2 对流传热	28
2.4.3 辐射传热	29
2.4.4 综合传热	31
2.5 短网理论	32
2.5.1 导体的允许电流密度	32

2.5.2	汇流排的电流分布与阻抗·····	33
2.5.3	单相短网·····	37
2.5.4	三相短网·····	37
3	电阻炉·····	40
3.1	电阻炉的类型及其工业应用·····	40
3.2	直接电热电阻炉·····	41
3.2.1	加热过程·····	41
3.2.2	加热时间·····	42
3.2.3	定流加热·····	43
3.2.4	定压加热·····	45
3.2.5	钢坯加热装置的经验计算·····	50
3.2.6	直接电热电阻炉炉例·····	50
3.3	间接电热电阻炉·····	52
3.3.1	间接电热电阻炉的电热原理·····	52
3.3.2	电热体·····	55
3.3.3	间接电热电阻炉的构造与热工·····	64
3.3.4	间接电热电阻炉的供电与温度控制·····	67
4	电弧炉·····	71
4.1	直流电弧炉·····	71
4.1.1	直流电弧的形成与结构·····	71
4.1.2	直流电弧的伏安特性·····	74
4.1.3	直流电弧炼钢炉构造与热工·····	76
4.2	交流电弧炉电热理论·····	78
4.2.1	交流电弧·····	78
4.2.2	炉膛传热·····	80
4.2.3	交流电弧炉的电热特性·····	84
4.3	三相电弧炼钢炉构造与热工·····	89
4.3.1	炉体结构及其尺寸·····	89
4.3.2	机械与附属设备·····	93
4.3.3	供电与电器设备·····	95
4.3.4	炼钢电弧炉系列与技术指标·····	98
5	矿热电炉·····	100
5.1	矿热电炉的电热转换及物料熔化过程·····	100
5.1.1	埋弧·····	100
5.1.2	料层电阻·····	102
5.1.3	电热转换过程与工作电阻·····	104

5.1.4	供电功率及工作电流与电压	107
5.1.5	电热功率分布与物料熔化	109
5.2	矿热电炉的构造	111
5.2.1	炉型与炉体主要尺寸	112
5.2.2	电极	114
5.2.3	供电系统与监控装置	118
5.3	矿热电炉的炉例	121
5.3.1	铁合金熔炼炉	121
5.3.2	冰铜熔炼炉	123
6	感应炉	125
6.1	感应电热理论基础	125
6.1.1	半无限厚平板的磁场强度分布与电流穿透深度	125
6.1.2	半无限厚平板的电流密度及感应功率分布	127
6.1.3	半无限厚平板吸收的功率与等效阻抗	128
6.2	无心感应炉	130
6.2.1	无心感应炉电热原理	130
6.2.2	无心感应炉构造	144
6.2.3	无心感应炉供电	150
6.3	铁心感应熔炼炉	153
6.3.1	铁心感应熔炼炉的电热转换与电动现象	154
6.3.2	铁心感应熔炼炉的构造	160
6.3.3	铁心感应炉供电	163
7	真空电炉	165
7.1	真空系统	166
7.1.1	真空系统的组成	166
7.1.2	真空泵	166
7.1.3	真空系统的材料	170
7.1.4	真空阀门及其他附件	170
7.1.5	真空计	171
7.1.6	真空系统计算	172
7.2	真空电炉	174
7.2.1	真空电阻炉	174
7.2.2	真空电弧炉	175
7.2.3	真空感应炉	175
8	特种电炉	177
8.1	电子束炉	177

8.1.1	工作原理	177
8.1.2	炉型与炉体结构	179
8.1.3	供电系统	180
8.2	等离子熔炼炉	180
8.2.1	基本原理	180
8.2.2	炉型与炉体构造	182
8.3	离子氮化炉	184
8.3.1	工作原理	184
8.3.2	炉子结构	185
8.3.3	供电与电控装置	185
8.4	高频电场加热设备	186
8.4.1	板极式电场加热	186
8.4.2	微波加热	187
8.5	聚焦加热设备	188
8.6	激光加热设备	190
参考文献		192

概 述

电炉的类型及其工业应用

电炉是一种利用电热效应所产生的热来进行加热材料的设备,以实现预期的物理、化学变化。例如,炼钢电弧炉是一座炉体有炉膛的设备,在其中利用弧光放电效应把电能变成热能,实现炉料的熔炼过程。

能是物质的一种属性,它反映物质做功的本领(能力)。电能是物质中电荷所具有的能量,热能是物质中分子或原子紊乱运动所具有的能量。物质中电荷运动时,在一定条件下,电力做功,电能转变为热能,即电热效应。 1A 电流通过 1Ω 电阻体时电功率为 1W ,每秒钟产生 1J 热量,即电热转换当量是 1W 等于 $1\text{J}/\text{s}$ 。

工业电炉指工业生产应用的电炉,通常由炉体和配套的机电装置组成。大型工业电炉规模宏伟,结构复杂,耗电量巨大。例如大型炼钢电弧炉,公称容量达 400t ,炉壳内径 11.6m ,所配专用变压器容量 $163\text{MV}\cdot\text{A}$ 。又如某公司有六条感应加热线,加热 300mm 厚的连铸板坯,总功率 210MW 。

工业电炉品种繁多,应用广泛。为了便于命名和研讨,将电炉按其特征进行分类:

- (1)按电热方式:电阻炉、感应炉、电弧炉、等离子炉、电子束炉、介质(微波)加热设备;
- (2)按加热方式:辐射型、对流型、传导型;
- (3)按炉内气氛:普通气氛、控制气氛、真空炉;
- (4)按炉体结构特点:立式、卧式、室状、直通式、箱式、井式、环形、罩式、熔池炉、坩埚炉、熔沟炉、凝壳炉等;
- (5)按物料输送方式:推料式、辊底式、履带式、步进式、台车式等;
- (6)按操作方式:间歇式、连续式;
- (7)按电源特点:直流、交流(工频、中频、高频);
- (8)按加热用途:熔炼、轧制、铸锻造、热处理、干燥等。

目前各种工业大多应用电炉,其应用举例列于下页表中。就炉子规模和耗电量而言,冶金工业是应用工业电炉量大的行业,它用于炼钢、炼铁合金、炼铝、炼铜、炼钛、合金熔炼、金属连铸连轧过程中的在线补充加热等。其次是机械工业,它主要用于工件的铸锻造和热处理,所用的炉型最多。电炉在化学工业、建材工业、轻工业、实验室等方面都有应用。

电炉炼钢是应用工业电炉的范例。在工业化国家中,电炉钢占粗钢总产量的 $20\% \sim 40\%$,而且越发达的国家,电炉钢所占的百分比越大。

电炉应用广泛,是因为和燃料炉比较,具有许多优点:

- (1)电热功率密度特大。电炉可以在较短的时间内把物料加热到需要的温度,达到燃料炉不能达到的高温。例如采用感应电热加热钢材,可以在几分钟甚至几秒钟内,把工件加热到 1000°C 以上。钨的熔点 $3390 \pm 60^\circ\text{C}$,只能用电炉熔炼。

工业电炉的主要用途和所用设备举例

部门名称	用途	所用设备
冶金工业	熔炼普通钢	炼钢电弧炉
	熔炼合金钢	炼钢电弧炉,真空感应熔炼炉,真空电弧炉,电渣炉,电子束炉,等离子炉
	熔炼铜合金	感应熔炼炉
	熔炼铝合金	感应熔炼炉,间接电加热电阻炉,铝电解槽
	熔炼难熔金属,活泼金属	真空电弧炉,电子束炉,等离子炉
	生产铁合金、镍、铜、锌、锡等	矿热炉
	生产石墨电极	直接电加热电阻炉
机械工业	粉末冶金,制造硬质合金	电阻炉,感应炉
	制造半导体材料	电阻炉,感应炉,电子束炉
	钢铁材料,有色金属材料,玻璃等的加热和热处理	电阻炉,感应加热设备
	铸钢的熔炼	炼钢电弧炉,感应炉
	铸铁的熔炼	感应炉
	有色金属铸造的熔炼	感应炉,电阻炉,间接作用电弧炉
	铝、镁等轻合金铸造的熔炼	感应炉,电阻炉
化学工业	金属材料的锻造、冲压或挤压前的加热	感应透热炉,直接电热和间接电加热电阻炉
	制造电熔刚玉和碳化硅	矿热炉,直接电加热电阻炉
	干燥泥心、模子和木材	介质加热设备,电阻炉
	制造半导体器件	间接电热式电阻炉,感应炉
	加热塑料和各种绝缘材料	介质加热设备
	生产电石、氰盐、磷、二硫化碳等	矿热炉
	生产塑料、合成纤维、合成树脂、香料、药物,进行橡胶的硫化等	间接电加热电阻炉、介质加热设备
建材工业	生产玻璃、莫来石	矿热炉、直接电加热电阻炉
	铸石的熔炼	矿热炉、间接电加热电阻炉
轻工业	加热塑料、玻璃等材料,食品的烘烤,烤漆,纺织品的干燥等	间接电加热电阻炉、介质加热设备
实验室	测试、检验、科研与教学实验,新工艺试验,实验室生产	各种电炉

(2)电炉的温度易于准确控制。例如,铝合金材料或工件热处理用的空气循环炉,炉温偏差可以长期保持为 $\pm(3\sim 5)^{\circ}\text{C}$;有的实验室电炉,温度控制可以精确到 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

(3)电炉炉内气氛易控,可以是需要的气氛,也可以抽成真空。例如,硅钢带卷的连续退火炉的各个区段,可以控制为不同的气氛;难熔的活性金属,例如钛,只能用真空电炉熔炼。

(4)电炉的电热效率高,一般是50%~60%,有的达80%~90%。

(5)电热清洁卫生,不污染环境。

(6)电炉较易于实现生产过程的机械化和自动化,劳动条件好,劳动生产率高。

但是,工业电炉耗电量大,必须保证电能供应;就单位热能价格而言,一般是电热较燃料热价格高;电炉是成套机电设备,采用电炉通常投资较多。

电炉的发展

到19世纪末,伴随电力工业的发展,电炉才得到工业规模的应用。社会发展是推动科技发展的动力。在20世纪,适应工业(特别是材料工业)发展的需要,由于电炉具有一些燃

料炉不能比拟的功能,电炉得到快速发展。

在 19 世纪,一些学者的研究探明了电热现象的基本规律,为电炉的发展奠定了理论基础。1800 年,伏特(A. Volta)发明了伏特电池。1802 年,彼得罗夫(B. B. Петров)揭示了电弧的应用方法,指出可以用来熔炼矿石提取金属。1827 年,欧姆(G. S. Ohm)揭示了导电定律。1831 年,法拉第(M. Faraday)揭示了电磁感应现象;1834 年,楞次(H. F. E. Lenz)归纳出电磁感应定律,两位学者为感应电热奠定理论基础。1841 年,焦耳(J. P. Joule)根据自己的实验提出焦耳定律,确定了电能转变为热能的定量规律。人们认为,欧姆定律、焦耳定律、楞次定律是电热的基本定律。

1896 年,艾奇逊(Acheson)发明石墨化炉,是工业电炉的先例。1899 年,赫劳特(P. Herout)发明电弧炉。1927 年,英国电炉公司推出中频感应炉。在两次世界大战期间,适应军工需要,电炉得到发展,研制出品种繁多的工业电炉。1964 年,施维博(W. E. Schwable)试验成功超高功率电弧炉,为发展电弧炉炼钢作出重要贡献。20 世纪 50 年代至 60 年代,适应航天工业和原子能工业的需要,发展了真空电炉和一些特种电炉,如真空电弧炉、电子束炉、等离子电炉。20 世纪 70 年代,适应连铸钢坯连轧在线补偿加热的需要,发展了大功率感应加热装置;因为出现了高效率的可控硅整流设备,20 世纪 80 年代发展了直流电弧炉,1982 年第一座直流电弧炼钢炉在联邦德国投产。

新中国成立后,我国工业电炉发展很快,建立了自己的电炉制造工业,有一定规模的工厂有锦州电炉厂(主要产品是真空电炉)、长春电炉厂和西安电炉厂(电弧炉)、上海电炉厂和哈尔滨松江电炉厂(电阻炉)、长江电器厂和无锡电炉厂(感应炉)。20 世纪 60 年代初西安电炉研究所成立,制定了电炉行业的技术规范。一些设计院中设置工业炉组,从事工业电炉的设计与研制。东北大学、中南大学等院校开设工业电炉课程。我国已形成一支工业电炉的专业队伍。

1 电炉效能与理论热耗

现代化的工业电炉的主要任务就是高效能地加热物料。回顾炉子的发展过程,实际上就是围绕提高炉子的效能,针对存在的问题而进行反复地分析研究和改进的过程。

评价一座炉子的生产效能,最基本的技术指标是生产率、电能及热能单耗、热效率。为了获得最佳经济效益,希望这三个指标都好。三者互相关联,彼此制约,但是各有独自特性,并非简单的联系。其中生产率是基础,生产率高是能源单耗低和热效率高的前提条件。这三个指标都与工艺条件有关,为了改善这三个指标,炉子工作者应对相关的生产工艺有所了解,并进行必要的研讨。

评价电炉效能的一个基本依据是加热物料所需的理论热耗。

1.1 电炉的效能

1.1.1 电炉生产率

众所周知,电炉的生产率与加热物料所需的热、炉子用电功率、通电时间、炉子系统的热效率(含变电和输电的电效率),以及产品的成品率等技术条件和指标有关,有必要建立关系式。

电炉的生产率等于单位作业时间内的合格产品量,即生产率(kg/h)

$$G = \frac{m^*}{\tau_z} \quad (1-1a)$$

式中, m^* 为合格产品量, kg; τ_z 为作业时间, h。对于间歇生产炉, τ_z 为完成一个正常生产周期的时间, 对于连续生产炉为连续正常生产时间。

在作业期间, 可能有部分时间不供电, 如间歇式炉在进出料时停电。通电时间率

$$k_t = \frac{\tau_t}{\tau_z} \quad (1-1b)$$

式中 τ_t 为通电时间, h。

在通电期的电热量为

$$\int_0^{\tau_t} P_a d\tau = P_0 \tau_t \cos \varphi \quad (1-1c)$$

式中, P_a 为有功功率, P_0 为视在功率, kV·A; $\cos \varphi$ 为平均功率因数。

在作业期间炉子热平衡

$$(3600 P_0 k_t \tau_z \cos \varphi + Q_q) \eta = m B^* \quad (1-1d)$$

式中, Q_q 为其他热源(如燃料燃烧热)供热, kJ; η 为炉子的综合热效率; m 为物料量, kg; B^* 为理论热耗, 等于在热效率为 100% 的条件下把物料加热到要求温度所需的热, kJ/kg。令

$$k_d = \frac{3600 P_0 k_t \tau_z \cos \varphi}{3600 P_0 k_t \tau_z \cos \varphi + Q_q} \quad (1-1e)$$

称为电热率。而成品率

$$k_c = \frac{m^*}{m} \quad (1-1f)$$

综合以上诸式,得到电炉生产率

$$G = 3600 \frac{P_0}{B^*} K \eta \cos \varphi \quad (1-1)$$

其中

$$K = \frac{k_t k_c}{k_d}$$

式中, K 称为工艺系数,其值取决于生产工艺条件,它反映工艺操作对炉子生产率的影响; P_0 为电炉变压器额定容量,表示允许的最大供电功率。公式(1-1)是电炉的一个基本关系式,反映了有关因素对生产率的影响。它表明提高生产率的途径:改进电热方法,改进炉体结构和机电设备,改进物料条件,改进工艺操作。超高功率炼钢电弧炉的成功,就是一个典型实例,要点是把 P_0/m 的值趋近翻番。

对于已经生产的电炉,根据式(1-1)检查它的生产率,分析该式右边包含的因素,研讨改进的可能性,从而拟订改进措施。设计电炉时,根据给定的生产率和工艺条件,应用该式计算炉子的功率。

1.1.2 热能与电能单耗

热能和电能单耗这两个技术指标,用来反映炉子生产的能源耗用水平。热能单耗指获得单位合格产品炉子系统所耗用的热能,其中耗用的电能,称为电能单耗。

用统计法或热平衡法可测算这两个指标。统计法是根据统计数据,用下式计算热能单耗 B_t (kJ/kg 或 MJ/t) 和电能单耗 B_e (kW·h/kg)

$$B_t = \frac{Q}{m^*} \quad B_e = \frac{P}{G} \quad (1-2)$$

此法比较简便,但是由于在统计所取的时间内炉子工况变动,计算所得是统计期间的平均值,又因不涉及炉子热工过程,不能确切反映影响单耗水平的因素。

另一方法是热平衡测算法,它的优缺点与统计法相反。在炉子工况稳定时,炉子系统处于热平衡状态,输入和输出炉子系统的热流应相等

$$Q_{\lambda} = Q_{\text{出}} = Q$$

即

$$3600P + Q_q = Q_y + Q_s + 3600P_s \quad (1-3)$$

式中, P 为电源供给炉子的电功率, kW; Q_q 为其他热源供热,如燃料与电极燃烧放热、物料带入的物理热、物料化学反应放热, kJ/h; Q_y 为用于加热物料的有效热,除升至规定温度所需的热外,还包括物料的干燥耗热,物料化学反应吸热, kJ/h; Q_s 为炉体的各种热损失,如炉体向环境的散热,炉渣、出炉气体与冷却水带走的热, kJ/h; P_s 为炉子系统各种电损失,如电源变压器与短网的电损失, kW。

式(1-3)称为热平衡方程。在炉子生产正常、工况稳定时,进行热平衡测试,用仪表逐个测定 Q_{λ} 和 $Q_{\text{出}}$ 包含的具体项目。综合测试值,用式(1-2)计算单耗。此法的优点,一是准确,因为测试是精心组织的,测试值由 $Q_{\text{出}}$ 是否等于 Q_{λ} 而得到校核;二是剖析了炉子热工过程,因为热平衡方程中的每个项目,都是反映热工过程的一个方面,分析测试结果,可明确存在的问题和科学地研讨改进措施。

1.1.3 热效率与电效率

热效率和电效率这两个指标用来反映供入炉子系统能源的利用率。根据热平衡方程,炉子的综合热效率

$$\eta = \frac{Q_y}{Q} \times 100 = \frac{Q_y}{3600P + Q_q} \times 100 \quad (\%) \quad (1-4)$$

电效率
$$\eta_e = \left(1 - \frac{P_s}{P}\right) \times 100 \quad (\%)$$

炉体热效率
$$\eta_t = \frac{Q_y}{3600(P - P_s) + Q_q} \times 100 = \frac{Q_y}{3600(P - P_s)(1 + k)} \times 100 \quad (\%)$$

炉体电热效率
$$\eta_{et} = \eta_e \eta_t = \frac{Q_y}{3600P(1 + k)} \times 100 \quad (\%)$$

热电比
$$k = \frac{Q_q}{3600(P - P_s)}$$

炉子的热效率反映炉子系统的电能供热与其他能源供热之和的有效利用率,又称综合热效率。炉体热效率反映供入炉体的电热与其他热之和的利用率,由于物料加热在炉体中完成,它是炉子系统的主体,有必要单独列出炉体热效率。

热电比是供入炉体的其他热源供热量与电热量之比。若炉子单纯由电能供热,热电比等于零。

电效率反映炉子输电装置与电路中电能损耗程度,电效率高表示供入炉体的电能所占的比率大。电热效率表示供入炉体的电能有效利用率。

对于存在其他热源供热的电炉,如炼钢电弧炉,热效率和电热效率的含义不同,热效率反映电能供热和其他能源供热的综合热效率,而电热效率特指电能的热效率。若电炉仅由电能供电,则两者数值相等,含义相同。

如果电效率很高,例如有些电阻炉的 η_e 超过 0.95,则炉子的热效率、炉体热效率和电热效率的值彼此接近。

大多数电炉的电效率为 0.8~0.95,炉体热效率为 0.5~0.8,综合热效率为 0.4~0.75。

电炉完全或基本用电供热,有的电炉燃烧燃料辅助供热。对热能的评估不仅有量的方面,而且有质的方面。由电能转变的电热,和由燃料燃烧放出的燃料热比较,电热的资用性高,是质量较优的热。只有在特定的条件下,燃料热才能和电热等效。

1.2 理论热能单耗

理论热能单耗是炉子热工的一个重要数据,在计算电炉生产率和热效率时,就要应用这个数据。

理论热能单耗定义为在热效率为百分之百的条件下,按工艺要求加热物料获得单位合格产品所需的热量。通常,理论热能单耗(kJ/kg)

$$B_t^* = B_1^* + B_2^* + B_3^* + B_4^* - B_5^* \quad (1-5)$$

式中, B_1^* 为加热物料升温所需的热,一般是从炉子入口处状态加热到出口处状态,如果工艺要求在炉中达到的温度高于出口处温度,则指加热到炉中最高温度所需的热; B_2^* 为完成相变的热; B_3^* 为干燥物料脱水所需的热; B_4^* 为化学反应吸热; B_5^* 为化学反应放热。

理论热能单耗是说明耗能的理论最小值。如果炉子单纯用电供热,它就是理论电能单耗。其值取决于物料条件、工艺机理和对产品的要求,而与加热方法、炉子构造与操作无关。正因如此,它是炉子热工计算和效能评估的科学依据。通常由理论计算求出理论热能单耗。

“单位产品”中的单位,通常是质量单位,若是别的单位,应予注明。

入炉的原料量若不等于出炉成品量,则在理论热能单耗计算之前,应进行物料平衡计算,预先确定物料的“理论”单耗。然后,按原料理论消耗量,计算每种原料或某种成分加热到要求温度所需的热,按式(1-5)综合,才能算出理论热能单耗。

理论热能单耗计算涉及物理热和化学热的计算。

1.2.1 物理热计算

物料的物理状态,可用它的温度、压力和体积这三个参量来描述。使物理状态改变所需的热称为物理热。加热物料升温所需的热,改变物态所需的潜热,都是物理热。

加热物料,使其升温所需的物理热

$$Q = m \int_{t_1}^{t_2} c_p(t) dt \quad (1-6)$$

相应的
$$B_1^* = \frac{Q}{m} = \int_{t_1}^{t_2} c_p(t) dt$$

因为
$$\int_{t_0}^{t_1} c_p(t) dt = h_1 \quad \int_{t_0}^{t_2} c_p(t) dt = h_2$$

则
$$B_1^* = \Delta h = (h_2 - h_1) \quad (1-7)$$

上两式中, m 为被加热物质量, kg; c_p 为被加热物比热容, kJ/(kg·°C); t_1, t_2 为加热开始和终了温度, °C; h_1, h_2 为被加热物开始和终了的比焓, kJ/kg; t_0 为测算比焓的基准温度, 20°C 或 0°C。

比热容随温度变化的关系式是实验式,适用于一定温度范围,应用时注意。如果在一定温度范围内比热容变化不大或者按线性规律变化,式(1-6)简化为

$$Q = m \bar{c}_p (t_2 - t_1) \quad (1-8)$$

式中, \bar{c}_p 为指定温度范围内平均比热容。

若从文献可查得比焓值,最好用式(1-7)计算,因为比焓值往往是直接测定值,较准确。式(1-8)通常适用温度范围很窄,须慎用。

上列关系式可用于固体物料的升温计算,也可用于液体或熔体物料的升温计算。

使物料完成物态变化(相变)所需的潜热,一般可由文献查出。

物料含水方式有二,一是附着水,二是结合水。脱除附着水所需的是物理热,应用上述关系式计算。在常压下,水在 100°C 汽化,汽化潜热为 2257 kJ/kg。低于 100°C 脱除附着水的变化叫蒸发,蒸发热与温度和压力有关,在标准状态下为 2491 kJ/kg。蒸发脱水,可利用有关文献中比焓与湿量图计算所需的热量。脱除结合水较难,所需温度较高,通常在一定温度区间完成,由实验或文献明确所需的热。

[例 1-1] 文献报道石墨在 300~3200K 范围的比热容

$$c_p = 1.8586 + 1.2893 \times 10^{-4} T - 2.5647 \times 10^{-5} T^{-2} + 4.5197 \times 10^{-7} T^{-3} \quad \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

求由常温加热到 2600°C 的理论热耗

$$B_1^* = \int_{300}^{2873} c_p dT = 4811 \quad \text{kJ}/\text{kg}$$

或
$$B_1^* = \frac{1}{3600} \int_{300}^{2873} c_p dT = 1.336 \text{ kW} \cdot \text{h/kg}$$

[例 1-2] 碳钢 ($w_C = 0.54$) 的比焓如下:

$t/^\circ\text{C}$	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1250
$h/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	47.3	95.9	151.6	208.9	268.4	343.3	422.9	547.6	620.1	686.6	760.7	831.5	868.8
Δh_{100}		48.6	55.7	57.3	59.5	74.9	79.6	124.7	72.5	66.5	74.1	70.8	37.3

求由 20°C 加热到 1250°C 的理论热耗。

根据 100°C 的比焓按线性规律外延, 20°C 的比焓

$$h_{20} = 0.2 \times 47.3 = 9.5 \text{ kJ/kg}$$

理论热能单耗

$$B^* = h_{1250} - h_{20} = 868.8 - 9.5 = 859.3 (\text{kJ/kg}) = 0.2387 \text{ kW} \cdot \text{h/kg}$$

考查上表数据, 明白碳钢比焓随温度变化是非线性的。但在 100~500°C 及 800~1250°C 区间, 近似为线性规律。只是 700~800°C 区间, 比焓差特大, 这是因为磁性转变。此例提示我们, 慎用平均比热容计算热耗。

[例 1-3] 脱除每千克附着水所需的理论热耗。

在压力为 101.325 kPa 时, 过热蒸汽的比焓如下:

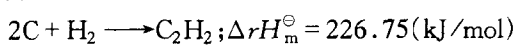
$t/^\circ\text{C}$	100	200	300	400	500
$h/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} / \text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1})$	$\frac{2676}{0.7433}$	$\frac{2875}{0.7986}$	$\frac{3074}{0.8539}$	$\frac{3277}{0.9103}$	$\frac{3488}{0.9689}$

这说明脱水耗热量大, 若非必要, 应避免用电炉脱水。

1.2.2 化学热计算

加热过程中物料自身的反应热, 并非一概计入理论热能单耗。计入的反应热, 是工艺必需的有效益的反应热。例如在加热炉加热金属, 金属氧化造成损失, 所放的热不计入。

根据化学反应方程计算反应热, 它的数量等于理论值。例如硅钢片退火电炉, 为提高质量, 通氢脱碳, 生成乙炔, 化学反应为



其中, $\Delta_r H_m^\ominus$ 为反应的标准反应热 (298K), 可由物理化学手册查出或热化学计算确定。其值为正, 表示反应吸热, 为负则放热。折算得到

$$B_4^* = k \times \frac{\Delta_r H_m^\ominus}{\text{指定反应物由反应式确定的摩尔质量}} \quad (1-9)$$

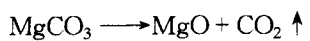
$$B_4^* = k \times \frac{226.75 \times 10^3}{2 \times 12} = 9.448 \times 10^3 k (\text{kJ/kg})$$

式中, k 为脱碳需热单位物料中指定反应物的含量, kg/kg。

[例 1-4] 求电熔镁石的理论热能单耗。

电熔镁石是结晶的氧化镁, 是制造高级耐火材料的原料。电熔镁石的生产是将菱镁矿 (含 MgCO_3 约 98%) 或其他含 MgO 的矿石放在矿热电炉中熔炼, 得到结晶氧化镁。现讨论用菱镁矿生产电熔镁石的理论单耗。

菱镁矿入炉后, 大约在 1000K 完成反应



称为煅烧。进一步加热把 MgO 熔化。由于 MgO 的熔点高达 2825°C, 只能使位于电极下方

的物料局部熔化。随着电极上升,熔池上升,而熔池下面早先形成的熔体结晶凝固。炉子周期生产,产出一个凝坨,含结晶氧化镁 97%~99%,破碎成一定的粒度出售。

为简化问题,认为 $MgCO_3$ 和 MgO 都是纯净的,按上列反应式计算理论热能单耗。由文献查出的有关数据列入表 1-1。

表 1-1 用菱镁矿生产电熔镁石的热化学数据

项目名称	$MgCO_3$	MgO	CO_2
生成热 $\Delta H_{298}^\ominus / kJ \cdot mol^{-1}$	-1112 ± 15	-601.2 ± 0.84	-394 ± 0.13
比热容, $c_p / J \cdot (mol \cdot K^{-1})$	$77.91 + 57.7 \times 10^{-3} T - 17.4 \times 10^5 T^{-2} (298 \sim 750K)$	$48.99 + 3.14 \times 10^{-3} T - 11.72 \times 10^5 T^{-2} (298 \sim 3098K)$	$44.14 + 9.04 \times 10^{-3} T - 8.54 \times 10^5 T^{-2} (298 \sim 2500K)$
熔点/℃	—	2825	—
熔化潜热/ $kJ \cdot mol^{-1}$	—	77.4	—
摩尔质量/ $g \cdot mol^{-1}$	84.33	40.32	44.01

电熔镁石的化学变化过程如图 1-1 所示。实际沿实线箭头所示的途径进行。但是,文献只给出了标准生成热 H_{298}^\ominus ,只好认为反应沿虚线箭头所示的途径进行。根据盖斯定律,两种途径的热效应相等。于是,认为熔炼过程是 $MgCO_3$ 在 298K 时分解,产生的 CO_2 加热到 1000K,而 MgO 加热熔化并且过热到 3150K。

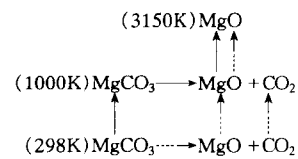


图 1-1 用菱镁矿生产电熔镁石的化学反应过程

(1) $MgCO_3$ 分解吸热

$$Q_1 = \Delta H = (-601) + (-394) - (-1112) = 117 \times 10^3 kJ/kmol$$

(2) 加热 CO_2 的热

$$Q_2 = \int_{298}^{1000} c_p dT = \int_{298}^{1000} (44.14 + 9.04 \times 10^{-3} T - 8.54 \times 10^5 T^{-2}) dT = 33093 kJ/kmol$$

(3) 加热 MgO 的热

为了简化问题,认为加热到熔点和过热到 3150K 的比热容相同,即把两个加热阶段合并计算。

$$Q_3 = \int_{298}^{3150} c_p dT = \int_{298}^{3150} (48.99 + 3.14 \times 10^{-3} T - 11.72 \times 10^5 T^{-2}) dT = 151480 kJ/kmol$$

(4) 熔化潜热

$$Q_4 = 77.4 kJ/mol = 77.4 \times 10^3 kJ/kmol$$

(5) 完成全过程的热

$$Q_5 = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 379.0 \times 10^3 kJ/kmol$$

(6) 理论热能单耗

已知 MgO 的千克摩尔质量为 40.32kg,则

$$B_t^* = \frac{379.0 \times 10^3}{40.32} = 9400 kJ/kg = 2.611 kW \cdot h/kg$$

电熔镁石的耗电量很大,生产实际达 3800kW·h/t 左右。如果把分解过程改在另一燃料炉中完成,所得的煨后料(叫轻烧粉)投入电炉中熔炼,可以大幅度节电,并提高产品质量。熔炼轻烧粉,理论热能单耗

$$B_t^* = \frac{Q_3 + Q_4}{3600M} = \frac{151480 + 77400}{3600 \times 40.32} = 1.5768 kW \cdot h/kg$$