

BOLIDIANRONGLU JISHU



玻璃电熔炉技术

陈金方 ■ 著



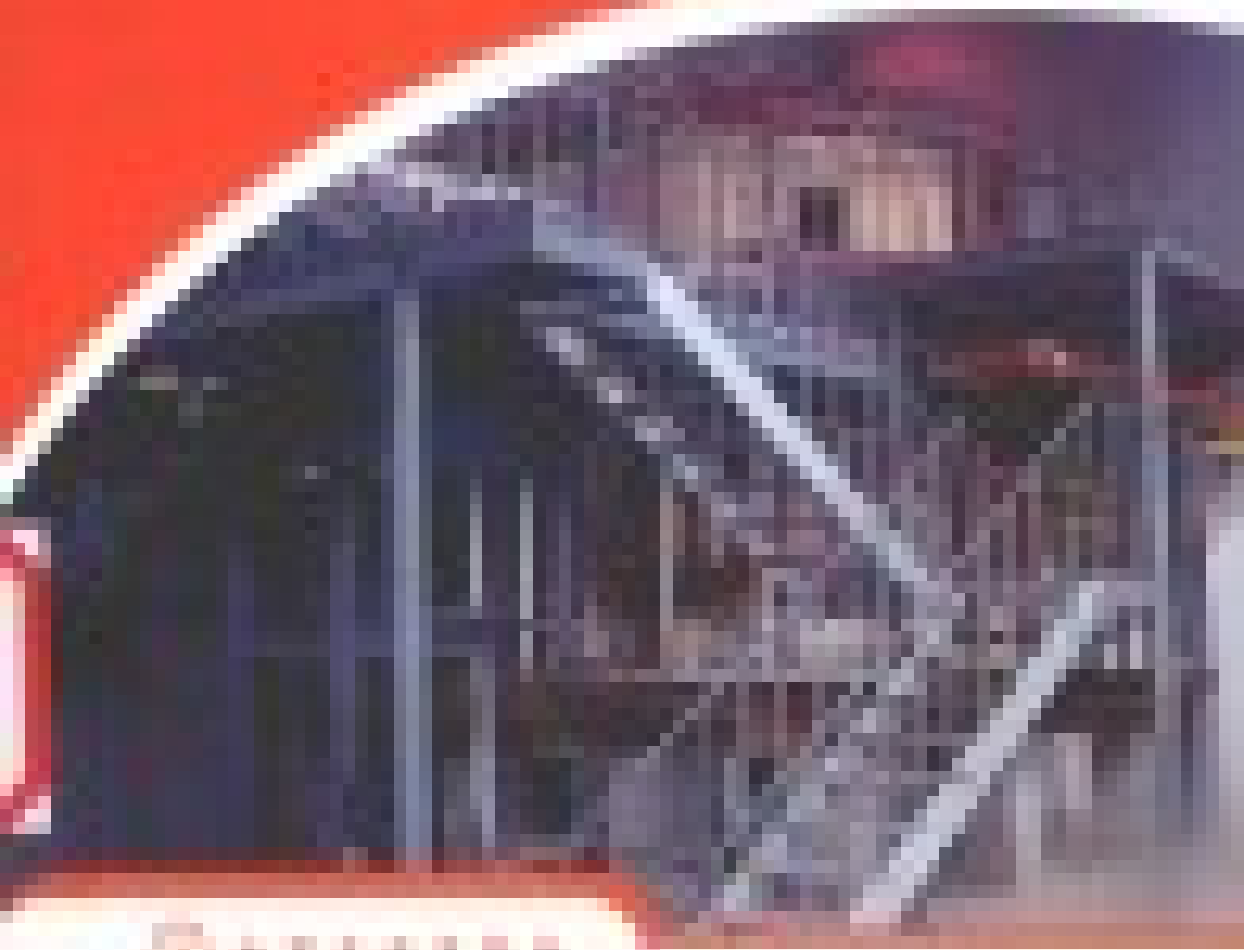
化学工业出版社

BOJIDIANTAOLU JISHU



玻璃电熔炉技术

张世明 著

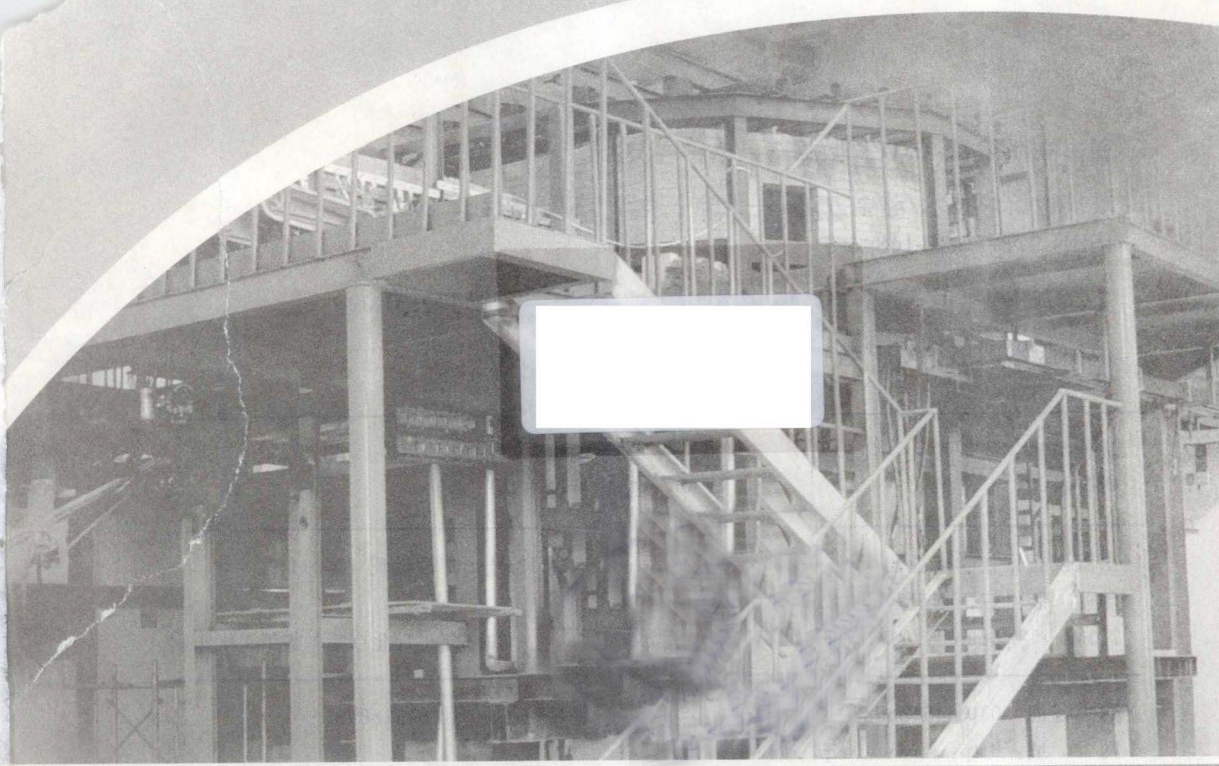


化学工业出版社

书八十二万册... BOLIDIANRONGLU JISHU

玻璃电熔炉技术

陈金方 ■ 著



化学工业出版社

北京·

· 北京 ·

50.00元

本书是一本系统全面介绍玻璃电熔窑炉及工艺的专业技术图书。作者依据自己二十八年的从业经验,突出了作者近五年来设计的三十多条电熔窑炉的经验和玻璃电熔领域发展的新内容。该书的专业性和实用性很强。书中介绍了玻璃电熔基础;全电熔玻璃窑;火焰池窑的电助熔加热技术;供料道的电加热。书中还介绍了近百例全电熔窑、火焰池窑的电助熔加热、供料道的电加热的典型实例,特别是增加了一些大型玻璃电熔窑的设计资料和运行参数。

本书可供玻璃厂的工程技术人员和有关的研究人员使用,也可作为高等院校学生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

玻璃电熔炉技术/陈金方著. —北京:化学工业出版社, 2012. 8

ISBN 978-7-122-14846-9

I. ①玻… II. ①陈… III. ①玻璃熔制-电熔 IV. ①TQ171.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 158876 号

责任编辑: 窦 臻

文字编辑: 冯国庆

责任校对: 吴 静

装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 三河市延风印装厂

710mm×1000mm 1/16 印张 14 $\frac{3}{4}$ 彩页 8 字数 282 千字 2013 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 55.00 元

版权所有 违者必究

前言

玻璃在高温时是一种电导体。熔融玻璃液含有碱金属钠离子、钾离子、锂离子，它具有导电性能。当电流通过时，会产生焦耳热，可以用来熔化玻璃，这就是所谓“玻璃电熔”。

玻璃电熔窑炉又称玻璃电熔炉或玻璃电熔窑，主要分为三大类：①全电熔窑炉；②电气混合窑炉；③电助熔窑炉。

1. 全电熔窑炉

近30年来，玻璃电熔获得迅速推广。目前我国至少有500座全电熔窑，规模为0.3~120t/d。特别是最近5年，每年都要增加近百座电熔窑。

电熔方法有许多突出的优点，热效率可以高达80%~85%，节省能源，没有污染，改善劳动条件。熔制出的玻璃液成分均匀，产品质量高。生产过程便于实现自动化操作。

玻璃电熔化已广泛应用于光学玻璃、硼硅酸盐玻璃、铅玻璃、氟化物玻璃、瓶罐玻璃以及纤维玻璃的生产，其工艺已趋成熟。国内越来越多的玻璃熔窑都采用电熔技术。

建造玻璃电熔窑炉的流程见附图，包括设计图纸、订购材料、建窑炉、烤窑炉、调试窑炉等工序。

2. 电气混合窑炉

近年来，一种新概念即“混合熔化”已日益受到重视。这种概念是：在熔融的玻璃内部通电加热，同时在配合料上方用燃料加热。一个原因是降低每吨玻璃所需热量的总成本；还有一个原因是有些玻璃的电阻太大，全部用电加热则电压很高，操作不安全，用电气混合窑炉仍能保持如全电熔窑那样的玻璃质量。

3. 电助熔窑炉

目前在制造平板玻璃、特种仪器玻璃、器皿玻璃的火焰池窑中采用电助熔，耗电量不多，但对提高产品质量、增加产量、改善劳动条件诸方面都有良好的效果，发展前途广阔。预计在今后几十年内许多火焰池窑将广泛采用电助熔。

玻璃电熔与传统的火焰加热相比有着很大的优势。由于利用玻璃液直接作为焦耳热效应的导电体，所以玻璃电熔化的热效率远高于火焰熔窑炉。日出料量60t以上的玻璃电熔窑的热效率大于80%。另外，电熔窑的炉型结构

简单，占地面积小，控制平稳且易操作，并减少了原料中某些昂贵氧化物的飞散与挥发，降低噪声和改善环境污染，稳定熔化工艺和提高产品质量等，这些都是燃料炉难以比拟的。

我国拥有丰富的水力资源，加上新建的核电站，为玻璃电熔技术的推广应用提供了能源基础，因此玻璃电熔是今后的发展方向之一。

本书分为4篇，第1篇讲述了玻璃电熔的基础知识；第2篇讲述了全电熔玻璃窑的基础理论、设计要点、烤窑方法、运行的注意事项等；第3篇讲述了火焰池窑的电助熔窑炉的设计、电极排列、功率分布、操作要点；第4篇讲述了供料道电加热的基础理论、设计和操作要点。

本书可供玻璃厂的工程技术人员和有关的研究人员使用，也可作为高等院校学生的教材。

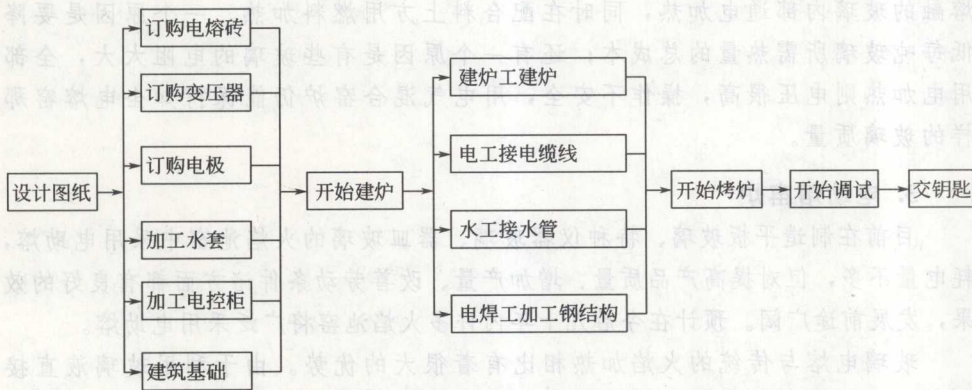
笔者参阅了国内外大量的杂志，参考了许多学者的论文、论著，结合本人30多年来设计的近百座电熔窑（含电加热料道、电助熔窑炉）的经验，编写成书。对被引用材料的著作和论文的学者表示衷心的感谢。

在该书的编写和玻璃电熔技术的推广过程中得到了笔者的导师——著名的玻璃窑炉专家孙承绪教授的精心指导，干大川教授对部分书稿提出了宝贵的意见，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中不足之处在所难免，希望广大读者批评指正。

陈金方

2012.3.01



附图 建造玻璃电熔窑炉的流程

目 录

第 1 篇 玻璃电熔的基础

第 1 章 玻璃的导电行为

3

1.1 熔融玻璃的电导率	3
1.1.1 玻璃的导电性	3
1.1.2 熔融玻璃电导率和温度的关系	3
1.1.3 熔融玻璃电阻率与化学成分的关系	4
1.1.4 常用的熔融玻璃的电阻率-温度曲线	5
1.1.5 失调角和稳定性准数对玻璃电熔控制的影响	8
1.1.6 熔融玻璃电阻率的计算	9
1.2 电极间玻璃液电阻的计算	10
1.2.1 欧姆定律的应用	10
1.2.2 板状电极间玻璃液电阻的计算	11
1.2.3 两支水平棒电极间的电阻	12
1.2.4 两列平行放置的棒电极的电阻	13
1.2.5 两支相对放置的棒电极的电阻	13
1.2.6 三相电极的电阻计算	14
1.3 电加热时电位场和温度场的分布	14
1.3.1 均匀电场中的情况	14
1.3.2 非均匀电场中的情况	15

第 2 章 电极

16

2.1 钼电极	16
2.1.1 钼电极的化学组成	17
2.1.2 钼电极的杂质含量	17
2.1.3 钼电极的结构	17
2.1.4 钼电极布置	19
2.1.5 水平棒状钼电极	19
2.1.6 垂直棒状钼电极	19

2.1.7 顶插的棒状钼电极	20
2.1.8 板状电极	21
2.2 电极水套	23
2.2.1 直接冷却水套	23
2.2.2 间接冷却水套	23
2.3 氧化锡电极	24

第3章 供电与控制

26

3.1 可控硅+隔离变压器	26
3.2 可控硅+磁性调压器	27
3.3 感应调压器+隔离变压器	29
3.4 抽头变压器	29
3.5 T形变压器	30

第4章 玻璃电熔窑的电源选择

33

4.1 玻璃电熔窑熔化电源的稳定性和供电质量的要求	33
4.2 玻璃电熔窑的应急电源	33

第5章 砌窑材料

36

5.1 烧结锆刚玉砖	36
5.2 电熔锆刚玉砖	36
5.3 电熔刚玉砖	38
5.4 电熔锆铬刚玉砖	40
5.5 电熔石英砖	41
5.6 电熔锆石英砖	42
5.7 耐火材料的钻孔	42

第2篇 玻璃的全电熔窑炉

第6章 全电熔玻璃窑炉概述

45

6.1 全电熔窑的优缺点	45
6.1.1 全电熔窑的优点	45
6.1.2 全电熔窑的缺点	46
6.2 全电熔窑的分类	46
6.2.1 冷顶电熔窑	46

6.2.2	熔化含有高挥发性组分的玻璃电熔窑	47
6.2.3	熔化深色玻璃的电熔窑	48
6.2.4	超小型电熔窑	49
6.2.5	中型电熔窑和大型电熔窑	49
6.3	国内常用全电熔窑	49
6.3.1	双室电熔窑	49
6.3.2	铅晶质玻璃电熔窑	50
6.3.3	六角形竖井式电熔窑	52
6.4	全电熔窑的加料	52
6.4.1	皮带振动式加料机	52
6.4.2	做扇形回转运动的皮带式加料机	53
6.4.3	带振动槽的加料机	53
6.4.4	旋转播料式加料机	53
6.4.5	带旋转料仓的加料机	54

第7章 全电熔窑的结构设计

56

7.1	全电熔窑的形状	56
7.2	电源供电和电极连接	58
7.2.1	单相系统	59
7.2.2	两相系统	59
7.2.3	对称型三相系统	60
7.3	全电熔窑主要尺寸的确定	61
7.3.1	全电熔窑熔化面积的确定	61
7.3.2	全电熔窑熔化池最佳深度的确定	62
7.4	全电熔窑各部位耐火材料的合理选用和窑的保温	62
7.5	电熔窑的热平衡计算	62
7.6	电极插入方式的选择	63
7.7	供电电流、电压的确定	63

第8章 全电熔窑的烤窑和运行

64

8.1	电熔窑烤窑	64
8.1.1	烤窑要求	64
8.1.2	电熔窑的烤窑过程	64
8.2	电熔窑的操作	65
8.2.1	保证正常条件下的电-热平衡	65
8.2.2	熔化量	65

8.2.3	熔化温度和输入功率	66
8.2.4	配合料覆盖层	66
8.2.5	建立合理的熔制温度曲线和稳定的玻璃液流	67
8.2.6	电极插入深度	67
8.2.7	玻璃组成及配合料	67
8.2.8	气泡问题	70
8.2.9	停电问题	70
8.2.10	电极和电极冷却水套	70
8.2.11	更换电极	71
8.3	冷顶电熔窑的运行	71
8.3.1	熔化特性	71
8.3.2	运行	71
8.3.3	调节	72
8.4	电熔窑的运行实例	72
8.4.1	小型玻璃电熔窑的运行实践	72
8.4.2	小型硼硅酸盐玻璃电熔窑操作和换料经验总结	74
8.4.3	某大型玻璃电熔窑的运行情况	77
8.4.4	T形电熔窑的运行	78

第9章 全电熔窑的典型实例

81

9.1	熔制钠钙玻璃的全电熔窑	81
【例1】	日产6t灯泡玻璃的电熔窑	81
【例2】	日产30t器皿玻璃的全电熔窑情况介绍	82
【例3】	日产30.0t大型钠钙玻璃的电熔窑的设计、施工、烤窑、 调试与运行	84
【例4】	日产70.0t钠钙玻璃的大型电熔窑的设计	86
9.2	熔制铅玻璃的电熔窑	88
【例5】	三座日产12t铅玻璃电熔窑的总结	89
【例6】	日产2.0t铅玻璃的电熔窑	94
【例7】	熔化钡晶质玻璃的电熔窑	97
9.3	熔制硼硅酸盐玻璃的电熔窑	98
【例8】	熔制硼硅酸盐玻璃的电熔窑的窑形、冷炉顶、配方三者 关系	98
【例9】	日产1.0t高硅氧玻璃球的电熔窑	100
【例10】	中性硼硅药用玻璃电熔窑的实践	105
【例11】	日产30t高硼硅玻璃的电熔窑	109

9.4	熔制乳白玻璃的电熔窑	110
	【例 12】 日产 5t 乳白色氟化物玻璃电熔窑的设计与运行	111
	【例 13】 日产 30t 仿瓷乳白玻璃的全电熔窑	114
	【例 14】 日产 30t 氟化物乳白玻璃瓶全电熔炉	118
9.5	熔制有色玻璃的电熔窑	119
	【例 15】 日产 24t 高档有色玻璃瓶的电熔炉	119
	【例 16】 熔化黑色玻璃的全电熔窑的设计与运行	121
9.6	熔制微晶玻璃的电熔窑炉	125
	【例 17】 日产 30t 微晶玻璃的电熔炉	125
9.7	电熔日池窑	130
	【例 18】 日产 2t 工艺品玻璃的电熔日池窑	130

第 3 篇 火焰池窑的电助熔

第 10 章 火焰池窑电助熔的意义

135

10.1	池窑电助熔的优缺点	136
10.1.1	大幅度地提高熔化率	136
10.1.2	提高玻璃的熔化质量	136
10.1.3	减弱上部火焰空间的燃烧强度、延长炉龄	136
10.1.4	减少因结石缺陷造成的产品损失	137
10.1.5	灵活调节出料量	137
10.1.6	稳定热点和加强有效对流	137
10.1.7	节能	138
10.1.8	炉温的控制更为方便	138
10.1.9	投资少、上马快	138
10.1.10	减少污染	139
10.1.11	池窑电助熔可有的放矢在玻璃熔化池内产生热量	139
10.1.12	棒状钼电极	139
10.1.13	缺点	139
10.2	电助熔加热的技术经济分析	139
	【例】 燃油池窑和燃油-电助熔池窑技术经济指标的比较	139
10.3	电气混合电熔和电助熔加热	140

第 11 章 电助熔池窑的设计和操作要点

141

11.1	电助熔池窑内的电极布置和功率配置	141
------	------------------------	-----

【例 1】	电助熔系统的功率的配制和操作	142
【例 2】	一个三相供电系统和三个单相供电系统的比较	143
【例 3】	电极配制不合理的电助熔系统	144
【例 4】	较理想的电极配制电助熔系统	145
【例 5】	两个布置实例	145
11.2	电助熔加热功率的计算	146
11.3	电助熔池窑耐火材料的选择	147
11.4	电助熔池窑的操作要点	147

第 12 章 玻璃窑炉的电助熔实例

150

12.1	全氧燃烧玻璃窑炉的电助熔	150
【例 1】	10m ² 全氧燃烧玻璃窑炉的电助熔	150
12.2	马蹄焰池窑的电助熔	152
【例 2】	生产有色玻璃瓶的电助熔窑炉	152
【例 3】	蓄热式马蹄焰池窑的电助熔	154
【例 4】	生产硼硅灯具玻璃的电助熔池窑	155
12.3	横火焰池窑的电助熔	157
【例 5】	日产 600t 浮法玻璃的横火焰池窑的电助熔	157
12.4	双碓池窑的电助熔	160
【例 6】	日产量 13t 玻璃的双碓池窑的电助熔	160

第 4 篇 供料道的电加热

第 13 章 供料道的电加热的概述

165

13.1	供料道工作原理及其加热现状	165
13.1.1	对供料道的要求	165
13.1.2	供料道加热的现状	167
13.2	供料道电加热的优越性	167
13.3	供料道电加热分类	168
13.3.1	直接式、间接式和混合式电加热	168
13.3.2	小流量、中流量、大流量供料道	168
13.4	供料道电加热时的技术经济分析	169
13.4.1	设备投资	169
13.4.2	设备的折旧	170
13.4.3	与柴油加热供料道的比较	170

13.4.4	电加热时成品率的提高	170
【例】	某厂在两条供料道上进行了供料道电加热的技术改造	170

第14章 供料道电加热的设计

171

14.1	料道加热方式的选择	171
14.1.1	辐射式和埋入式电加热的比较	171
14.1.2	混合式电加热的采用	171
14.2	料道与工作池的接口	172
14.3	电加热料道能耗的计算和变压器功率确定	172
14.3.1	电加热能耗的计算	173
14.3.2	变压器功率的确定	174
14.4	电极配置	174
14.5	电加热料道用的耐火材料和保温材料	174

第15章 埋入式供料道电加热时玻璃液产生气泡的原因

176

15.1	钼电极中的碳含量	176
15.2	玻璃液温度	176
15.3	电流密度	177
15.4	玻璃添加剂	178

第16章 供料道电加热实例

180

16.1	用硅碳棒的辐射式电加热	181
16.2	成形通路的电加热	183
16.3	用板状钼电极电加热的供料道	184
【例1】	生产药用小瓶的板状钼电极电加热的供料道	184
【例2】	生产保温瓶的板状钼电极加热的供料道	185
【例3】	某制瓶生产线的板状电极电加热的供料道	187
【例4】	生产玻璃器皿的板状钼电极加热的供料道	188
【例5】	生产茶色啤酒瓶的板状钼电极加热供料道	189
16.4	用棒状钼电极电加热的供料道	192
【例6】	生产器皿玻璃的棒状钼电极电加热的供料道	192
【例7】	拉管线棒状钼电极电加热的供料道	194
【例8】	中性玻璃的棒状钼电极电加热的供料道	195
16.5	用氧化锡电极电加热的供料道	196
【例9】	某器皿厂用氧化锡电极电加热的供料道	196
16.6	辐射式电热元件和埋入式电极相结合的混合电加热	198

【例 10】 硅碳棒和钼电极相结合的混合电加热的供热料道	199
16.7 电加热着色料道	201
16.8 电加热（人工）挑料口	202
16.9 料盆的电加热	203
【例 11】 用双滴料生产 15mL 黄料小瓶的电加热料盆	203
【例 12】 采用氧化锡电极加热的料盆	205
【例 13】 采用硅碳棒辐射加热的料盆	206

参考文献

207

附录一 1985~2011 年陈金方副教授承接设计和施工的玻璃电熔

窑炉的主要项目

209

附录二 陈金方副教授设计和施工的玻璃电熔窑炉的项目照片

212



第1篇

玻璃电熔的基础





第1章

玻璃的导电行为

1.1 熔融玻璃的电导率

玻璃电熔是将电流通过电极引入玻璃液中，通电后两电极间的玻璃液在交流电的作用下产生焦耳热，从而达到熔化和调温的目的。玻璃液之所以具有导电性，主要是因为电荷通过离子发生迁移。

硅酸盐玻璃除了共价键结合的硅原子和氧原子外，网络结构还包含碱金属离子，它们是电流的载体。在钠钙玻璃中除了离子数量外，离子的强度和离子的半径也影响玻璃液的导电性。与 Na^+ 相比， K^+ 半径较大，迁移受到的阻力也较大；相反， Li^+ 半径比 Na^+ 半径小，但由于 Li^+ 结合能力强，因此， Li^+ 迁移比 Na^+ 困难。所以， Na^+ 最有利于增加玻璃液的导电性。

影响玻璃导电能力的主要因素是玻璃组成中的碱金属离子浓度及离子半径。离子的半径减小，浓度增加，电阻率则下降。

要了解玻璃电熔中的许多现象，必须熟知熔融玻璃的性质，主要是指玻璃熔体的电导率或电阻率、黏度等。熔体的电导率是玻璃电熔化电气系统设计的重要依据。玻璃液的黏度不仅是玻璃熔化的最基本参数，而且也是熔炉模拟技术中选择模拟液的重要依据。

1.1.1 玻璃的导电性

在室温下玻璃是电的绝缘体，电导率为 $10^{-15} \sim 10^{-13} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。当玻璃被加热时，其导电性能随温度升高而明显增强。熔融状态下玻璃的电导率约为 $0.1 \sim 1.0 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ，完全变成了导体，用作焦耳效应的发热体是足够的。

电熔化能用来熔化几乎所有品种的玻璃以及某些呈现高阻值的硅酸盐材料。各种玻璃的电导率随其成分不同可有很大差别，对同一种玻璃，电导率则是温度的函数。

1.1.2 熔融玻璃电导率和温度的关系

高温下玻璃熔体的导电属于离子导电。玻璃电导率随温度变化的关系式为：