# 玻璃的电熔化与电加热

陈金方　编著
孙承绪　审校

华东理工大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

## 内 容 提 要

本书是一本针对中国国情编写的关于玻璃电熔化与电加热方面的参考书。该书的专业性和实用性较强，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、玻璃电熔窑的设计单位与配套材料厂家等。书中还介绍了上百例全电熔窑、火焰池窑的电助熔加热、供料道的电加热的典型实例。

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**

玻璃的电熔化与电加热/陈金方编著. —上海：华东理工大学出版社，2002.12

ISBN 7-5628-1340-X

Ⅰ.玻… Ⅱ.陈… Ⅲ.玻璃熔制—电加热—高等学校—教材 Ⅳ.TQ171.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 092500 号

**玻璃的电熔化与电加热**

**陈金方 编著 孙承绪 审校**

| | | | |
|---|---|---|---|
| 出版 | 华东理工大学出版社 | 开本 | 787×1092 1/16 |
| 社址 | 上海市梅陇路 130 号 | 印张 | 24 |
| 邮编 | 200237 电话(021)64250306 | 字数 | 575 千字 |
| 网址 | www.hdlgpress.com.cn | 版次 | 2002 年 12 月第 1 版 |
| 经销 | 新华书店上海发行所 | 印次 | 2002 年 12 月第 1 次 |
| 印刷 | 江苏句容市排印厂 | 印数 | 1-2350 册 |

ISBN 7-5628-1340-X/O·73 定价：50.00 元

# 序

凭藉着高温下离子能导电的特性，使人类找到一种新的能源来熔化玻璃，也就是说，使“用电”来熔化玻璃成为可能。经半个多世纪的实践，玻璃电熔突出的优越性使它得到了迅猛的发展。目前世界上半数以上的玻璃熔窑已采用了电熔，并且在 21 世纪内人们一致公认电熔技术是玻璃熔制技术主要的改革方向之一。

我国有着丰富的水电资源，我国正在大力发展核电，这些都能给我们提供大量廉价的电能，也即给玻璃电熔提供了坚实的物质基础，随着环保要求的不断提高，火焰熔窑已不能适应，而电熔窑在这方面却具有巨大的生命力。因而，从我国国情出发，玻璃电熔窑是今后的主要发展方向。

在我国西部大开发的进程中，对玻璃工业来说，玻璃电熔是一个主要的内容，为了迎接玻璃电熔将被广泛采用的热潮，必须作好技术准备和人员准备，更重要的是资料准备。所谓“兵马未动，粮草先行”，作者正是为了供给“粮草”而编写这本书的。

为了上述目的，本书的编写遵循“实用和实际”的原则，具体说，既结合实际情况又注重实用，在实用原则下尽量联系实际。本书作者既有丰富的理论基础和较广泛的知识面，又有多年的实践经验，相信本书的出版，一定能为我国玻璃工业作出应有的贡献。

孙承绪

2002 年 9 月

# 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、钾离子，它具有导电性能。当电流通过时，会产生焦耳热，若热量足够大，则可以用来熔化玻璃，这就是所谓“玻璃电熔”。

*1902* 年，沃尔克(*Voelker*)获准了一个基本专利，其内容是利用电流通过玻璃配合料产生的热来熔化玻璃。随着熔窑设计和电极的不断改进和发展，这种电熔方法得到广泛应用。*1920～1925* 年，挪威的雷德(*Raeder*)使用石墨电极，成功地实现了玻璃的全电熔。*1925* 年，瑞典的科尼利矶斯(*Cornelius*)用这种电熔窑生产琥珀色玻璃和绿色玻璃。该电熔窑采用薄层加料法，配合料浮在玻璃液表面。在电熔窑投产时，配以临时性的炉盖，当玻璃液位盖过电极，便撤去炉盖。所用的电极是大铁块，由于铁电极使玻璃着色，所以这种熔窑只能用于熔化有色玻璃，效果颇好。当时可达到 *1.40kWh/kg* 玻璃，所以这种作业在电能价格低的地区是可行的。这种电熔窑有些一直运行到最近几年。弗格森(*Ferguson*)在 *1932～1940* 年这一时期，采用“*T*”形电熔窑积极从事电熔的研究。

第二次世界大战期间，瑞士的波来耳(*Borel*)在电熔方面做了大量的研究发展工作，旨在解决燃料短缺的问题。波来耳的工作获得了成功，并由法国圣哥本(*St. Gobain*)公司加以推广，该公司还对电助熔做了实际的工作。

二战以后人们开始对钼电极感兴趣。佩恩伯瑟(*Penberthy*)设计的电极系统使用钼棒，*1952* 年玻璃工业开始广泛采用电助熔和全电熔。另一种是英国的格耳(*Gell*)和汉恩(*Hann*)于 *1956* 年提出的板状钼电极。

近 *20* 年来，玻璃电熔获得迅速推广。美国的瓶罐玻璃熔窑大约一半配备有电助熔，并且仍在不断增大，从早期的 *300kW* 增大到目前的 *800～1500kW*。发展趋势仍未停止，现已有了超级电助熔。

目前全世界至少有 *100* 座全电熔窑，规模从 *4t/d* 至 *120t/d*。每年都要增加若干座，其规模在电助熔和全电熔这两个方面都在扩展。

近 *20* 年来，一种新概念即“混合熔化”已日益受到重视。这种概念是：先在熔融的配合料内部通电加热生产大约一半产量的玻璃，再在配合料上方用燃料加热生产另一半产量的玻璃。其目的是要降低每吨玻璃所需热量的总成本，与此同时仍保持如电熔窑玻璃那样的质量。

另一项主要的新发展是用电熔窑熔化铅晶质玻璃，供机器和手工生产高级餐具使用。大约在 *1964* 年棒状氧化锡电极投入工业应用，而且为这种电极发明了性能良好的电接触系统，为铅玻璃电熔建立了良好的基础。

近 *20* 年来的第三项发展，是推广了电加热料道。

第四项新发展是采用了“微型电熔窑”，用来生产优质玻璃，其熔化量可低到 *10kg/h*。

近 *20* 年来的第五项发展，是日益重视对环境污染的控制。从这方面来讲，电熔工艺具有相当重要的意义。

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，消除公害，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。因此，在国外玻璃电熔得到迅速的推广。

发达国家，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。

据鲁塞尔·布艾曼(*Russel Burman*) *1979* 年估计，世界上将近半数的玻璃熔窑都将采用电熔技术。

*20* 世纪 *60* 年代初期，我国玻璃纤维行业从研究池窑拉丝和代铂炉开始研究电熔工艺，至今已有几十年的历程。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。随着我国电力工业的发展，全电熔工艺的应用也会逐年增加。

玻璃电熔与传统的火焰加热熔融炉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融炉。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。

本书共分为四编。第一编讲述了玻璃电熔的基础知识，包括玻璃的导电行为、电极、供电与控制、电熔设备的电源选择、耐火材料等内容。

第二编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。对熔制钠钙玻璃、铅晶质玻璃、硼硅酸盐玻璃、氟化物玻璃、有色玻璃、玻璃纤维、瓷釉、电热坩埚窑、电熔日池窑、小型热顶电熔窑等 *10* 类典型的电熔窑进行了分类讲解(其中包括一些特种玻璃的小型电熔窑，汇编了已运行 *38* 座电熔窑的详细资料，几乎包括了所有品种的玻璃和所有类型的电熔窑)。

第三编讲述了火焰池窑的电助熔的设计、电极排列、功率分布、操作要点。对硼硅酸盐玻璃、铅玻璃、有色玻璃、平板玻璃、玻璃球等池窑的电助熔进行了分类讲解。

第四编讲述了料道电加热的基础理论、设计和操作要点。对硅碳棒、硅钼棒辐射电加热料道、通路的电加热、板状和棒状钼电极电加热料道、氧化锡电极电加热料道、混合式电加热料道、热套法电加热料道、料盆的电加热八类典型的电加热料道进行了详细的讲解。汇编了已运行的 *28* 条料道的详细资料(几乎包括所有的玻璃品种)。

由于文献的原文不全或复印得不太清楚，有少量文献的作者或译者没有列上，敬请见谅。

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。

本书写作中参阅了国内外大量的杂志，参考了许多学者的论文、论著，也结合了本人十多年来设计的十多条电熔窑(含电加热料道)的经验。我向对被引用了材料的杂志社、论著和论文的学者表示衷心的感谢。在该书的编写过程中和玻璃电熔技术的推广过程中得到了我的导师——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，我的妻子余亦乐女士帮助打印了部分书稿，在此表示衷心感谢。

陈金方

2002 年 2 月


需要全本请访问 www.ertongbook.com

# 目　录

## 第一编　玻璃电熔基础


1　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　混碱效应的应用实例 …… (6)
1.1.5　常用的熔融玻璃的电阻率—温度曲线 …… (7)
1.1.6　失调角和稳定性准数对玻璃电熔控制的影响 …… (10)
1.1.7　熔融玻璃电阻率的计算 …… (10)
1.1.8　玻璃的粘度 …… (12)
1.2　电极间玻璃液电阻的计算 …… (13)
1.2.1　欧姆定律的应用 …… (13)
1.2.2　板状电极间玻璃液电阻的计算 …… (14)
1.2.3　两支平行棒电极间的电阻 …… (15)
1.2.4　两列平行放置的棒电极的电阻 …… (15)
1.2.5　两支相对放置的棒电极的电阻 …… (16)
1.2.6　三相电极的电阻计算 …… (16)
2　电极 …… (17)
2.1　电极的选择原则 …… (17)
2.2　钼电极 …… (17)
2.2.1　钼电极的物理性能 …… (18)
2.2.2　钼电极的组织结构变化 …… (19)
2.2.3　钼电极的化学性能 …… (20)
2.2.4　钼电极的结构和布置 …… (24)
2.2.5　电极水套 …… (33)
2.2.6　钼电极临界电流密度和尺寸的选择 …… (39)
2.2.7　钼电极的蚀损与保护 …… (41)
2.2.8　钼电极的电缆联结 …… (43)
2.2.9　钼电极的使用及注意事项 …… (44)
2.3　氧化锡电极 …… (46)
2.3.1　氧化锡电极的概述 …… (46)

2.3.2 氧化锡电极的物理性能 …… (46)
2.3.3 氧化锡电极的化学性能 …… (50)
2.3.4 氧化锡电极的制造工艺 …… (51)
2.3.5 几种常用的氧化锡电极 …… (51)
2.3.6 氧化锡电极的安装和使用 …… (52)
2.3.7 氧化锡电极的的蚀损 …… (54)
2.4 硅碳棒电热元件 …… (54)
2.4.1 硅碳棒的物理性能 …… (54)
2.4.2 硅碳棒的化学性能 …… (55)
2.4.3 硅碳棒的老化和涂层保护 …… (56)
2.4.4 硅碳棒的规格与型号 …… (56)
2.4.5 硅碳棒的电气联接 …… (58)
2.4.6 硅碳棒使用的注意事项 …… (58)
2.5 二硅化钼发热元件 …… (59)
2.5.1 硅钼棒的理化性能 …… (60)
2.5.2 安装方法 …… (61)
2.5.3 使用要点 …… (61)
2.5.4 硅钼棒元件参考数据 …… (62)
2.6 石墨电极 …… (64)
2.7 铂电极 …… (65)
2.8 冷却水系统 …… (65)
3 供电与控制 …… (68)
3.1 供电及控制系统 …… (68)
3.1.1 可控硅＋隔离变压器 …… (68)
3.1.2 可控硅＋磁性调压器 …… (69)
3.1.3 感应调压器＋隔离变压器 …… (70)
3.1.4 抽头变压器 …… (72)
3.1.5 T形变压器 …… (73)
3.1.6 几种调压器的性能比较 …… (73)
3.2 可控硅控制系统 …… (75)
3.2.1 接隔离变压器的可控硅系统 …… (75)
3.2.2 接磁性调压器的可控硅系统 …… (76)
3.2.3 接过零触发的(周波控制器)的可控硅控制系统(调功器) …… (76)
3.2.4 接移相控制器的可控硅控制系统(调压器) …… (78)
3.3 可控硅的触发系统及触发仪表 …… (79)
3.3.1 恒流控制 …… (79)
3.3.2 恒温控制 …… (81)
3.3.3 恒电阻控制 …… (82)
3.3.4 调功器(周波控制器) …… (83)

3.3.5 可控硅调压移相控制器(TG－Y1/3－A/B型) …… (83)
3.4 电加热闭环控制方案 …… (83)
3.5 变压器的设计选型 …… (84)
3.5.1 变压器的设计选型 …… (84)
3.5.2 变压器选择的注意事项 …… (84)
3.6 供电及控制系统设计过程中的注意事项 …… (85)
3.7 控制柜的设计与制造 …… (86)
3.7.1 电熔化所需的基本设备 …… (86)
3.7.2 仪表控制柜 …… (86)
3.7.3 对控制系统的要求 …… (87)
3.7.4 开关 …… (87)
3.7.5 快速熔断器的选择 …… (87)
3.7.6 可控硅元件的选取 …… (88)
4 玻璃电熔窑的电源选择 …… (90)
4.1 玻璃电熔窑的熔化电源 …… (90)
4.2 玻璃电熔窑的应急电源 …… (90)
4.3 功率因素的提高 …… (92)
4.3.1 功率因数补偿方法 …… (92)
4.3.2 功率因数的计算 …… (93)
4.3.3 补偿容量的确定 …… (94)
5 砌窑材料 …… (96)
5.1 烧结锆刚玉砖 …… (96)
5.2 电熔锆刚玉砖 …… (96)
5.3 电熔刚玉砖 …… (98)
5.4 电熔锆铬刚玉砖(AZCS) …… (101)
5.5 电熔石英砖 …… (103)
5.6 电熔锆英石砖 …… (103)
5.7 耐火材料的钻孔 …… (103)

## 第二编　全电熔玻璃窑

6 全电熔玻璃窑概述 …… (107)
6.1 全电熔窑的优缺点 …… (107)
6.1.1 全电熔窑的优点 …… (107)
6.1.2 全电熔窑的缺点 …… (108)
6.2 全电熔窑的分类 …… (109)
6.2.1 热顶电熔窑 …… (109)
6.2.2 半冷顶电熔窑 …… (109)
6.2.3 冷顶电熔窑 …… (109)
6.2.4 熔化含有高挥发性组分的玻璃电熔窑 …… (110)

6.2.5 熔化深色玻璃的电熔窑 …… (111)
6.2.6 小型电熔窑 …… (111)
6.2.7 中型和大型电熔窑 …… (111)
6.3 全电熔窑一览 …… (111)
6.3.1 Gornelius 电熔窑 …… (112)
6.3.2 Souchon-Neuvesel 窑 …… (113)
6.3.3 Borel 窑 …… (114)
6.3.4 W. Konig 窑 …… (116)
6.3.5 Grebenshtchirkov 窑 …… (117)
6.3.6 Penberthy 窑 …… (118)
6.3.7 双室电熔窑 …… (118)
6.3.8 铅晶质玻璃电熔窑(T 型窑) …… (121)
6.3.9 六角形竖井式电熔窑(德国 SORG 公司设计的 VSM 电熔窑) …… (122)
6.3.10 “波歇”(Pochet)窑 …… (123)
6.4 全电熔窑的熔制特性及其对配合料的要求 …… (124)
6.4.1 电熔窑中的液流情况 …… (124)
6.4.2 熔制特性 …… (124)
6.4.3 对配合料的要求 …… (124)
6.5 玻璃电熔窑是玻璃厂防止环境污染的有力举措 …… (125)
6.5.1 全电熔窑的熔化反应降低了有毒气体(如 $SO_2$、$NO_X$)的排放量 …… (127)
6.5.2 降低有害的挥发性玻璃组分 …… (127)
6.5.3 降低挥发到空气中的尘粒 …… (127)
6.5.4 降低了窑炉周围的操作温度 …… (127)
6.5.5 降低了噪音 …… (128)
6.6 玻璃全电熔窑的技术经济分析 …… (128)
6.6.1 粉尘或废气净化设备 …… (128)
6.6.2 能源消耗和热效率 …… (128)
6.6.3 基建投资 …… (129)
6.6.4 节约的挥发性原料 …… (130)
6.6.5 玻璃电熔窑的技术经济分析实例 …… (130)
7 全电熔窑的结构设计 …… (132)
7.1 全电熔窑的形状 …… (132)
7.2 全电熔玻璃窑炉的加料 …… (134)
7.2.1 垄式加料机 …… (135)
7.2.2 螺旋式加料机 …… (135)
7.2.3 皮带振动式加料机 …… (136)
7.2.4 作扇形回转运动的皮带式加料机 …… (136)
7.2.5 带振动槽的加料机 …… (136)
7.2.6 旋转播料式加料机 …… (136)

7.2.7 可倾翻的旋转播料式加料机 …… (137)
7.2.8 带旋转料仓的加料机 …… (138)
7.3 供电电源和电极连接 …… (138)
7.3.1 单相系统 …… (139)
7.3.2 两相系统 …… (139)
7.3.3 三相系统 …… (140)
7.4 全电熔窑主要尺寸的确定 …… (142)
7.4.1 全电熔窑熔化面积的确定 …… (143)
7.4.2 全电熔窑熔化池最佳深度的确定 …… (143)
7.5 全电熔窑各部位耐火材料的合理选用和窑的保温 …… (143)
7.5.1 全电熔窑各部位耐火材料的合理选用 …… (143)
7.5.2 电熔窑的保温 …… (143)
7.6 全电熔窑的热平衡计算 …… (144)
7.7 电极插入方式的选择 …… (144)
7.8 供电变压器电流和电压的确定 …… (145)
8 玻璃全电熔窑的烤窑和运行 …… (146)
8.1 电熔窑的烤窑 …… (146)
8.1.1 烤窑要求 …… (146)
8.1.2 电熔窑的烤窑过程 …… (146)
8.1.3 电熔窑的烤窑过程遇到的问题和解决办法 …… (147)
8.2 电熔窑的操作 …… (147)
8.2.1 熔化温度和输入功率 …… (148)
8.2.2 熔化量(翻转限 Turn-Down Limit) …… (148)
8.2.3 配合料覆盖层 …… (149)
8.2.4 电极插入深度 …… (149)
8.2.5 玻璃组成及配合料 …… (149)
8.2.6 玻璃的出料速度 …… (150)
8.2.7 停电问题 …… (150)
8.2.8 电极和电极冷却水套 …… (151)
8.2.9 更换电极 …… (151)
8.3 电熔窑的运行 …… (151)
8.3.1 热顶电熔窑的运行 …… (151)
8.3.2 冷顶电熔窑的运行 …… (153)
8.4 电熔窑的运行实例 …… (155)
[例 1] 小型玻璃电熔窑的运行实践 …… (155)
[例 2] 小型硼硅酸盐玻璃电熔窑操作和换料经验总结 …… (157)
[例 3] Laurens－Pieree 玻璃公司玻璃电熔窑的运行情况 …… (159)
[例 4] 熔制铅晶质玻璃的“T”形电熔窑的运行 …… (160)
9 全电熔窑的典型实例 …… (162)

9.1 使用硅钼棒间接加热的电热坩埚窑 …… (162)
[例 1] 双坩埚室的电热坩埚窑 …… (162)
[例 2] 熔制铅晶质玻璃的电热坩埚窑 …… (162)
9.2 熔制钠钙玻璃的全电熔窑 …… (163)
[例 3] 日产 6t 钠钙玻璃全电熔窑 …… (163)
[例 4] 日产 0.5t 白料眼镜玻璃的小型电熔窑 …… (164)
[例 5] 日产 3t 灯泡玻璃的全电熔窑炉 …… (167)
[例 6] 日产 6t 灯泡玻璃的全电熔窑 …… (169)
9.3 熔制铅玻璃的电熔窑 …… (171)
9.3.1 铅晶质玻璃的熔制 …… (171)
9.3.2 铅晶质玻璃电熔窑的现状及发展前景 …… (171)
9.3.3 铅晶质玻璃全电熔窑内电极的选用 …… (171)
[例 7] 日产 7t 铅晶质玻璃的电熔窑 …… (172)
[例 8] 用钼电极熔制铅晶质玻璃电熔窑 …… (173)
[例 9] 日产 1.3t 的铅晶质玻璃电熔窑 …… (174)
[例 10] 日产 3t 的铅晶质玻璃电熔窑 …… (174)
[例 11] 日产 9t 的铅晶质玻璃电熔窑 …… (174)
[例 12] 用棒状氧化锡电极的电熔窑 …… (176)
[例 13] 用块状氧化锡电极的电熔窑 …… (177)
[例 14] 日产 1～3t 铅晶质玻璃的电熔窑 …… (178)
[例 15] 日产 12t 铅晶质玻璃的电熔窑 …… (179)
[例 16] 熔化钡晶质玻璃的电熔窑 …… (180)
[例 17] 熔制铅晶质玻璃的三相电熔窑 …… (181)
[例 18] 日产 12t 的铅玻璃电熔窑 …… (183)
9.4 熔制硼硅酸盐玻璃的电熔窑 …… (185)
9.4.1 减少硼挥发的机理 …… (185)
9.4.2 厚料层垂直深层电熔技术 …… (186)
9.4.3 高硼硅玻璃熔化特点及使用电熔的优越性 …… (187)
[例 19] 日产 1.5t 高硼硅玻璃的电熔窑 …… (189)
[例 20] 日产 150kg 高硅氧玻璃的电熔窑 …… (192)
[例 21] 日产 1.4～1.8t 硼硅玻璃的电熔窑 …… (194)
[例 22] 熔化无碱铝硼硅酸盐玻璃的小型电熔窑 …… (196)
[例 23] 日产 25t 和 40t 的高硼硅玻璃的电熔窑 …… (197)
[例 24] 生产派来克斯硬质玻璃的电熔窑 …… (200)
9.5 熔制氟乳浊玻璃的电熔窑 …… (201)
[例 25] 日产 300kg 玻璃马赛克的电熔窑 …… (201)
[例 26] 日产 7t 氟化物玻璃的电熔窑 …… (202)
[例 27] 日产 4～6t 氟乳浊玻璃的电熔窑 …… (203)
[例 28] 日产 3t 氟乳浊玻璃的电熔窑 …… (204)

需要上本请访问: www.ertongbook.com

［例 29］ 日产 0.5～1.5t 乳白玻璃的电熔窑 …… (206)
［例 30］ 日产 1.5t 乳白玻璃电熔窑 …… (208)
9.6 熔制有色玻璃的电熔窑 …… (210)
［例 31］ 熔制有色玻璃的电熔窑 …… (210)
［例 32］ 日产 1.5t 黑色玻璃的电熔窑 …… (212)
9.7 玻璃纤维电熔窑 …… (214)
［例 33］ 日产 2.5t 耐碱玻璃球的电熔窑 …… (214)
［例 34］ 日产 300kg 耐碱玻璃纤维的电熔窑 …… (216)
9.8 熔制瓷釉的全电熔窑 …… (222)
9.8.1 熔制瓷釉电熔窑概述 …… (223)
9.8.2 熔制瓷釉电熔窑的设计和应用 …… (223)
［例 35］ 日产 1～1.5t 钛白粉搪瓷瓷釉电熔窑 …… (225)
［例 36］ 熔制搪玻璃底釉和面釉的电熔窑 …… (227)
9.9 电熔日池窑 …… (228)
［例 37］ 日产 500kg 硬质玻璃的电熔日池窑 …… (228)
9.10 小型热顶电熔窑 …… (231)
［例 38］ 生产支架玻璃杆的全电熔窑 …… (231)

## 第三编　火焰池窑的电助熔

10 火焰池窑的电助熔的意义 …… (237)
10.1 池窑电助熔的优缺点 …… (238)
10.2 电助熔加热的技术经济分析 …… (241)
11 电助熔池窑的设计和操作要点 …… (243)
11.1 电助熔窑内的电极布置和功率配置 …… (243)
11.2 电助熔加热功率的计算 …… (248)
11.3 电助熔池窑耐火材料的选择 …… (249)
11.4 电助熔池窑的操作要点 …… (249)
12 电助熔池窑的实例 …… (251)
12.1 生产硼硅酸盐玻璃的电助熔池窑 …… (251)
［例 1］ 生产安瓿玻璃的电助熔池窑 …… (251)
［例 2］ 生产高硼硅仪器玻璃的电助熔池窑 …… (253)
12.2 生产有色玻璃的电助熔池窑 …… (256)
［例 3］ 生产翠绿色瓶的电助熔池窑 …… (256)
［例 4］ 生产香槟酒瓶的电助熔池窑 …… (257)
12.3 生产平板玻璃的电助熔池窑 …… (262)
［例 5］ 生产平板玻璃的电助熔池窑 …… (262)
［例 6］ 燃发生炉煤气的蓄热式马蹄焰池窑的电助熔池窑 …… (263)
12.4 玻璃球窑的电助熔技术 …… (268)
［例 7］ 用重油为燃料的电助熔池窑 …… (268)

［例 8］ 用煤气为燃料的电助熔池窑 …… (270)
12.5 生产玻璃瓶罐的电助熔池窑 …… (272)
［例 9］ 生产青白料瓶的电助熔池窑 …… (272)

## 第四编 供料道的电加热

13 供料道电加热的概述 …… (276)
13.1 供料道工作原理及其加热现状 …… (276)
13.1.1 对供料道的要求 …… (276)
13.1.2 供料道加热的现状 …… (277)
13.2 供料道电加热的优越性 …… (278)
13.3 供料道电加热分类 …… (279)
13.3.1 直接式、间接式和混合式电加热 …… (279)
13.3.2 小流量、中流量、大流量供料道 …… (279)
13.4 供料道电加热时的技术经济分析 …… (280)
13.4.1 设备投资 …… (280)
13.4.2 设备的折旧 …… (280)
13.4.3 与柴油加热供料道的比较 …… (281)
13.4.4 电加热时成品率的提高 …… (283)
14 供料道电加热的设计 …… (285)
14.1 料道加热方式的选择 …… (285)
14.1.1 辐射式和埋入式电加热的比较 …… (285)
14.1.2 混合式电加热的采用 …… (285)
14.2 料道与工作池的接口 …… (286)
14.3 电加热料道能耗的计算和变压器功率确定 …… (286)
14.3.1 电加热能耗的计算 …… (287)
14.3.2 变压器功率的确定 …… (288)
14.4 电极配置 …… (288)
14.5 电加热料道用的耐火材料和保温材料 …… (289)
15 供料道电加热的使用 …… (290)
15.1 埋入式供料道电加热时电位场和温度场的分布 …… (290)
15.1.1 均匀电场中的情况 …… (290)
15.1.2 非均匀电场中的情况 …… (290)
15.1.3 供料道电加热时玻璃液的电位场和温度场分布 …… (291)
15.2 埋入式供料道电加热时玻璃液产生气泡的原因 …… (292)
15.2.1 钼电极中的碳含量 …… (292)
15.2.2 玻璃液温度 …… (292)
15.2.3 电流密度 …… (293)
15.2.4 玻璃添加剂 …… (293)
16 供料道电加热实例 …… (295)

16.1 用硅碳棒的辐射式电加热 …… (295)
16.2 成型通路的电加热 …… (302)
16.3 用板状钼电极的电加热 …… (306)
16.3.1 板状与棒状钼电极加热供料道的比较 …… (306)
16.3.2 板状电极的作用区域 …… (307)
16.3.3 变压器电工参数的确定 …… (307)
16.3.4 板状钼电极料道的启动与保护 …… (307)
16.3.5 影响板状钼电极使用寿命的因素 …… (308)
16.4 用棒状钼电极的电加热 …… (323)
16.5 氧化锡电极加热的供料道 …… (337)
16.6 热套法电加热 …… (341)
16.6.1 料道内衬砖材料和引电材料 …… (341)
16.6.2 引电片的布置 …… (342)
16.6.3 效果和发展方向 …… (342)
16.7 辐射式电热元件和埋入式电极相结合的混合电加热料道 …… (343)
16.8 含料盆电加热的料道 …… (348)
16.9 人工挑料口的电加热 …… (350)
16.10 料道着色 …… (351)
17 玻璃电熔窑设计单位和配套材料主要厂家 …… (352)
17.1 江苏大学材料科学与工程学院玻璃组 …… (352)
17.2 张家港五洲变压器有限公司 …… (353)
17.3 重庆市潼南电熔耐火材料有限公司 …… (354)
17.4 新密市东方耐火材料有限公司 …… (354)
17.5 广州市岭南耐火材料公司 …… (355)
17.6 西安临潼硅碳棒厂 …… (356)
17.7 河南省登封市钨钼材料厂 …… (357)
主要参考文献 …… (358)

# 1 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。硅酸盐玻璃具有一个远程无序的网络结构，除了共价键结合的硅和氧原子外，网络结构还包含玻璃改良剂离子，它们是相对自由的，特别是碱金属离子。在玻璃网状结构中结合能力最弱的也是碱金属离子，它们是电流的载体。在石英玻璃和硼硅酸盐玻璃中，只含有少量的碱金属离子，则导电性较差。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 $Na^+$ 离子相比，$K^+$ 离子半径较大，迁移受到的阻力也较大。相反，$Li^+$ 离子半径比 $Na^+$ 离子半径小，但由于 $Li^+$ 离子结合能力强，因此，$Li^+$ 离子迁移比 $Na^+$ 离子困难。所以，$Na^+$ 离子最有利于增加玻璃液的导电性。

影响玻璃导电能力的因素有：①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。②玻璃的结构状态和网络空隙的大小。一价阳离子愈多，桥氧离子减少，结构疏松，网络空隙增大，电阻率下降。③玻璃中添加网络外体离子（如 $R^{+2}$、$Zr^{+4}$）时，这些离子充填于网络空隙内，阻碍碱金属离子移动，电阻率上升。④添加 $B_2O_3$、$Al_2O_3$ 时，若形成硼氧四面体，则结构趋于紧密，网络空隙减小，电阻率上升。铝氧四面体大于硅氧四面体，使网络空隙增大，电阻率下降。

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、粘度等。熔体的电导率是玻璃电熔化电气系统设计的重要依据。玻璃液的粘度，它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，电导率约为 $10^{-13}\sim10^{-15}\Omega^{-1}\,cm^{-1}$，介电强度约在 $3\times10^3\sim1\times10^5$ V 之间。当玻璃被加热时，其导电性能随温度升高而明显增强。熔融状态下的玻璃电导率约在 $0.1\sim1.0\Omega^{-1}\,cm^{-1}$，完全变成了导电体，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离子导电，即和电解液一样通过带电离子的迁移来实现。玻

璃电导率随温度变化的关系式为：$\log\rho=\log\frac{1}{\sigma}=A+B/T$，式中 $\rho$——玻璃的电阻率；$\sigma$——玻璃的电导率；$T$——绝对温度 K；$A$，$B$——与玻璃状态有关的常数。该公式适用于 20℃～500℃和 1000℃～1450℃两个温度范围。玻璃电阻率和电导率关系式为 $\rho=1/\sigma$。

图 1.1.1 给出了某种钠钙玻璃的电阻率曲线。由图 1.1.1 可知，电阻率随温度升高而急剧降低，当温度达到较高值后，$\rho$ 的变化趋于平缓，在低温段，曲线有着明显的拐点，该点温度与玻璃的软化点相对应，在玻璃电熔化中常称之为“起始导电温度”。由于在电熔化和电加热中研究的对象是高温液态玻璃，所以仅对于 1000℃以上的玻璃电阻率感兴趣。

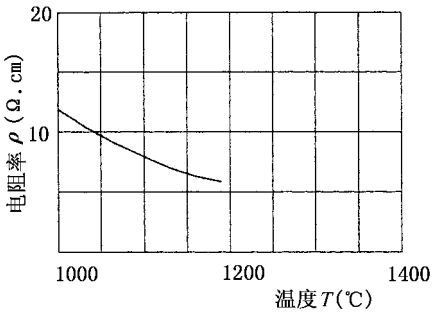



图 1.1.1 钠钙玻璃的电阻率与温度关系

在钠钙玻璃熔化池中，电极间的平均温度一般为 1350℃～1400℃。料道电加热中，约在 1050℃～1200℃。对于硬质硼硅玻璃，则熔化池电极平均温度约为 1400℃～1550℃，电热料道约在 1200℃～1400℃。对于钠钙玻璃电阻率和温度曲线，可以把 1050℃到 1150℃之间一段近似为直线，用线性方程表示为 $\rho=36.25-0.025T$（Ω·cm），式中 $T$ 为℃；可以把 1350℃～1450℃之间一段近似表达为 $\rho=13.7-0.006T$（Ω·cm）。

在电熔化中，如果用电阻法反映玻璃液温度，则在 100℃范围内数字电阻仪可按线性化进行设计。当使用电极导电法测量电阻以代替热电偶温度时，亦可按线性化处理，但要注意其线性范围约 100℃。对于硼硅玻璃（如九五料），这个范围约为 60℃。

### 1.1.3 熔融玻璃电阻率与化学成分的关系

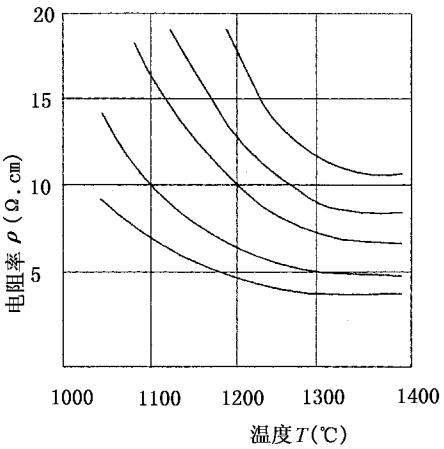



图 1.1.2 钠（钾）铅玻璃的电阻率与温度关系

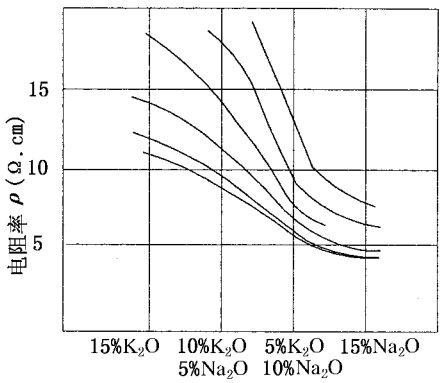



图 1.1.3 各种温度下碱金属含量与电阻率的关系

在大多数玻璃的电熔中，玻璃的电阻率取决于温度和碱金属含量。图 1.1.2 和图 1.1.3 示出了约含 25％氧化铅（PbO）和 15％碱（$R_2O$）的玻璃的电阻—温度曲线，其中氧化钠（$Na_2O$）和氧化钾（$K_2O$）以各种比例存在。从图 1.1.3 中可以看出，即使碱（$R_2O$）含量、质量

百分组成相同，钾铅玻璃的阻值仍显著高于钠铅玻璃。

玻璃熔体的导电性能和化学成分密切相关。其导电性是参与输送电流的离子数、电子的电荷数、离子的迁移率的函数。离子的迁移率决定于阳离子运动时的摩擦阻力，且摩擦阻力随离子半径的增大而增大。同时亦受阳离子和带负电的 $SiO_4$ 四面体吸引的影响。离子半径大、运动阻力大、迁移要慢一些。等电荷时，大一些的阳离子被带负电荷的四面体吸引过去要少一些。

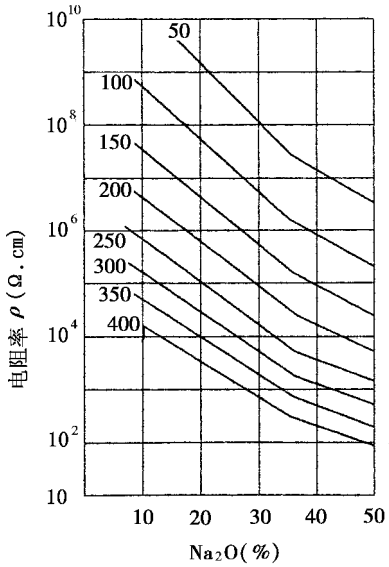



图 1.1.4 $Na_2O$ 含量对二元 $Na_2O$-$SiO_2$ 玻璃电阻率的影响

(1) 二价和三价离子的影响：关于二价离子对玻璃电阻率的影响与它们的离子半径有关，它们的存在改变了键强和碱金属离子的激活能量，从而影响了电阻率大小。对于三价离子的影响，则主要考虑他们网状结构的间隙大小，间隙的大小则影响钠离子的迁移率。

虽然二价和三价离子对玻璃电导率有影响，但和碱金属离子相比，它们的影响是有限的。

(2) 一价离子的影响：决定玻璃液电阻率的主要因素是钾、钠含量，其中钠离子的影响更大。图 1.1.4 给出了一组 $Na_2O$ 含量对二元 $Na_2O$-$SiO_2$ 玻璃电阻率的影响曲线。图 1.1.4 表明，$Na_2O$ 含量的增加使玻璃电阻率几乎呈直线下降。

玻璃中常用的碱金属有 $Na_2O$、$K_2O$ 和 $Li_2O$。它们对玻璃电阻率的影响决定于它们的离子半径和它们在网状结构中的键强。离子半径大，迁移时所受阻力就大，所以受阻力大小的顺序是 $K^+ > Na^+ > Li^+$。而键强大，与周围其它离子会产生更强的静电场，从而亦影响迁移率，$Li^+$ 比 $Na^+$ 小，键强更大。综合之，钠离子对电阻率的影响为三者之最，而钠在玻璃中的使用亦比锂和钾更为普遍，所以钠含量常作为确定玻璃液电阻率的主要参数。

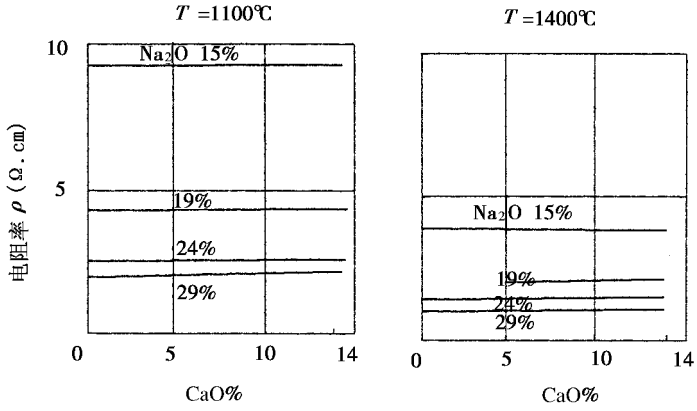



图 1.1.5 钠钙玻璃中用 CaO 代替 $SiO_2$ 时玻璃电阻率的变化

(3) 混合碱效应：两种碱金属离子在玻璃中混合使用，还会产生“混合碱效应”，使电阻率增大。玻璃液中有电流通过时，碱金属离子一定要通过硅酸盐网状结构的间隙，半径比较小的离子(例如钠离子)较易通过；半径比较大的离子(例如钾离子)则较难通过，甚至于被捕

需要全本请访问 www.ertongbook.com