



BOLI RONGHUA CAOZUO YU KONGZHI

玻璃熔化 操作与控制

□ 张丽霞 主 编
□ 茅力佐 都小菊 副主编



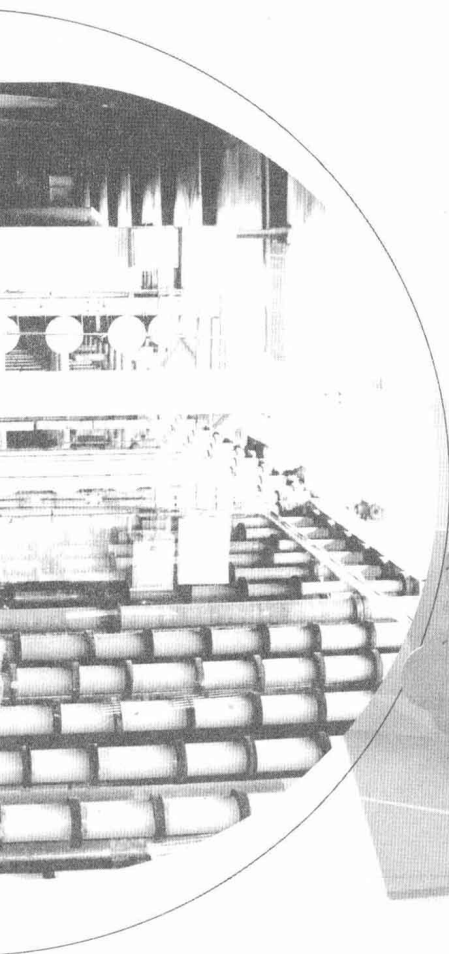
化学工业出版社

职业教育集团化办学成果
高职高专材料工程技术专业校企合作开发系列教材

▾ BOLI RONGHUA CAOZUO YU KONGZHI

玻璃熔化 操作与控制

□ 张丽霞 主 编
□ 茅力佐 都小菊 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

序

《国家中长期教育改革和发展规划纲要（2010~2020年）》中指出：“职业教育要面向人人、面向社会，着力培养学生的职业道德、职业技能和就业创业能力。到2020年，形成适应经济发展方式转变和产业结构调整要求、体现终身教育理念、中等和高等职业教育协调发展的现代职业教育体系，满足人民群众接受职业教育的需求，满足经济社会对高素质劳动者和技能型人才的需要”。

2008年1月18日，由全国唯一以建材命名的河北建材职业技术学院牵头，60多家建材企业、30多家职业院校、行业协会、科研院所加盟的河北省建材职业教育集团在秦皇岛正式成立。职教集团成立后，致力于实现专业与产业、企业、岗位对接，加快校企一体化建设；致力于实现专业课程内容与职业标准对接，加快构建新的专业课程体系；致力于实现职业教育紧贴行业经济发展需求，加强职业院校专业建设，探索课程教学改革；致力于实现教学过程与生产过程对接，推进人才培养模式改革；在建材职业教育集团化办学过程中，吸引了一大批建材企业参与到职业院校的人才培养模式改革、课程体系设置、教材建设、师资队伍建设中来。中国耀华玻璃集团等数十家成员单位企业都成为职教集团牵头单位——河北建材职业技术学院的紧密型实习实训基地。这些基地的建立，密切了校企合作，使职业院校能够充分了解行业、企业文化、企业需要的人才规格、企业岗位群能力标准等，并与企业共同进行基于工作过程的课程开发与设计，使专业课程设置更充分体现职业性、实践性和开放性的要求，课程内容更重视与职业标准的对接。河北省建材职业教育集团与化学工业出版社共同策划开发的高职高专院校材料工程技术专业系列教材项目，是河北省建材职业教育集团推进集团化办学的一项具体举措，也是探索校企紧密合作培养高端技能型专门人才的一次崭新尝试。

近年来，我国玻璃工业实现了快速稳定发展，生产快速增长，自主技术创新取得新进展，结构调整和节能减排取得新成效，国际化水平进一步提高。但承担着为玻璃行业培养技能型人才的职业院校，其专业课程教材的开发却严重滞后，在本套教材出版前，高职高专材料工程技术专业玻璃类教材还是一项空白，相关参考技术书籍也非常少，远远不能满足职业院校专业课程教学和行业企业职工培训的需要。为此，河北省建材职业教育集团与化学工业出版社商定，在河北建材职业技术学院校本教材的基础上，联合开发高职高专材料工程技术专业玻璃方向系列教材，本套教材包括《玻璃成形退火操作与控制》、《玻璃熔化操作与控制》、《玻璃配合料制备操作与控制》、《玻璃机械设备操作与维护》、《硅酸盐生产过程控制技术》和《玻璃生产管理与质量控制》。

在本套教材的编写过程中，秦皇岛耀华玻璃工业园有限公司、秦皇岛玻璃工业研究设计院等多家玻璃企业及玻璃科研院所参与了本套教材的开发工作。参与本套教材编写的人员都是多年从事玻璃生产、设计的行业企业专家和职业院校教学一线专业教学名师和骨干教师，他们把自己生产、教学中取得的经验和成果毫无保留地充实到本套教材的内容中。

这套教材有三个特点：一是在教材编写整体思路上，将知识和技能重新解构与重组，建

立基于工作过程、融合最新技术和工艺知识、强调知识-能力-素质结构整体优化的教材编写体系；二是在课程设置与内容编排上，遵循课程与岗位对接，课程内容与职业标准对接的原则，力求突出课程内容的职业性、实践性和实用性，淡化课程内容的纯理论性，兼顾课程内容的时代性和前瞻性；三是在教材具体内容的组织上，融入了学历证书与职业资格证书的双重要求，充分体现了“双证书”制度和“以服务为宗旨，以就业为导向”的职业教育的特征，突出了创新性、先进性和实用性。这套教材的公开出版，将从根本上缓解材料工程技术专业玻璃方向教材缺乏的状况，同时标志着河北省建材职业教育在集团化办学方面又迈出了新的步伐。为此，在本套教材即将出版之际，衷心感谢一年来参加本套教材编写、审稿、编辑工作的同志们为之付出的辛劳，感谢各级教育主管部门、各相关院校及行业、企业领导的大力支持！同时，也将此套教材郑重推荐给广大读者。

河北省建材职业教育集团

2012年7月

前 言

近二十年来, 由于我国经济高速发展, 建筑业拉动和环保与节能的需求, 促进了我国玻璃工业快速发展; 玻璃从业人员越来越多, 但是关于玻璃生产技术的学术著作很少, 更没有适合高职高专的玻璃教材出版。

基于上述情况, 在不断与玻璃企业合作的基础上, 总结 20 年来的实践和教学经验, 与行业企业、科研院所的专家一起对本书进行了编写, 在编写的过程中力求突出以下特色。

1. 全书以浮法玻璃熔化操作和质量控制、浮法玻璃熔窑结构为重点, 兼顾保窑的一些基本知识, 除了重点介绍浮法玻璃熔化与熔窑, 还介绍了器皿玻璃熔窑及电熔窑, 同时对熔窑的新技术进行了介绍。

2. 教材面向熔化工岗位群, 突出实践性、实用性和应用性, 按熔化操作人员的知识、能力、素质要求, 构建职业技能和职业素质必备的知识、技能体系, 突出能力培养。

3. 在编写过程中, 吸收了项目化课程改革教学成果, 结合高职高专教育的教学特点, 做到教学内容与熔化工职业标准对接, 以适应材料工程技术专业(玻璃方向)学生学习和职业资格证书培训等不同的需要, 达到传授知识、培养能力的目的。

4. 编写中, 力求适应和满足从事玻璃生产的技术人员和操作者的迫切需要, 通俗易懂, 插入了大量的图片和照片, 使教学过程更加形象、直观, 增强了教材的可读性、实用性和实践性, 也使学生了解所学专业与实际应用的关联性。

5. 为适应案例教学和任务驱动式教学, 在书中引入了生产实际案例, 对案例进行了详细分析, 并在每章后面都增加了学习思考, 培养学生分析问题、解决问题的能力。

本书由河北建材职业技术学院张丽霞担任主编, 由中国建材国际玻璃公司茅力佐、河北建材职业技术学院都小菊担任副主编, 河北建材职业技术学院武丽华、陈国强、朱桐林、闫洪涛、秦皇岛耀华玻璃股份有限公司刘志海参加编写。具体分工如下: 刘志海编写绪论, 张丽霞编写 1、2、5 及第 6 章的 6.2~6.5 部分, 并负责全书的统稿, 茅力佐编写第 3 章, 都小菊编写第 4 章, 朱桐林编写第 6 章的 6.1 部分, 武丽华编写第 7、9 章, 陈国强编写第 8 章, 闫洪涛负责插图。

本书在编写过程中, 由中国耀华玻璃集团公司的马玉聪高级工程师担任主审, 在此表示感谢; 还要感谢秦皇岛耀华玻璃工业园有限公司的曹宝成、李雪莲, 秦皇岛宝生熔窑热工工程有限公司的米庆轩对书稿进行了审阅并提出了许多宝贵的意见和建议; 另外, 还要感谢秦皇岛奥格玻璃有限公司的陈宝良、河北南玻玻璃有限公司的陈国、李聚锋、张建明等对书稿提出了很多宝贵建议。在编写过程中, 还借鉴和采纳了许多专家的研究成果, 在此, 对这些专家学者表示衷心的感谢和崇高的敬意。

本书可作为高职高专和高等院校应用型本科材料类相关专业的教学用书, 也可作为玻璃

行业企业的培训教材，同时也是工程技术人员的技术参考用书。

由于编者水平有限，不当之处在所难免，恳请各教学单位、企事业单位及读者在使用本教材时给予批评指正，以便修订时加以改进。

编 者
2012 年 7 月

目 录

0

1

2

绪 论	1
玻璃的熔化基础	4
1.1 玻璃熔制工艺原理	4
1.1.1 硅酸盐形成和玻璃形成	5
1.1.2 玻璃液的澄清和均化	6
1.1.3 玻璃液的冷却	16
1.1.4 影响玻璃熔制过程的主要因素	18
1.2 熔窑工作原理	20
1.2.1 熔窑内玻璃液的流动	20
1.2.2 玻璃熔窑内的换热	25
1.3 熔化率与热效率	27
1.3.1 熔化率	27
1.3.2 热效率	28
学习思考题	29
玻璃熔化工艺过程控制与操作	30
2.1 温度制度与火焰控制	30
2.1.1 温度制度	30
2.1.2 火焰的控制	32
2.1.3 燃油熔窑的温度与火焰控制	33
2.1.4 燃天然气熔窑的温度与火焰控制	38
2.1.5 燃发生炉煤气熔窑的温度与火焰控制	41
2.1.6 温度控制的操作要领	43
2.1.7 熔化工操作方法	44
2.1.8 使用不同燃料的能耗计算参考	45
2.1.9 浮法玻璃生产企业常使用的燃料及性能	48
2.2 投料操作与液面控制	52
2.2.1 投料操作与工艺要求	52
2.2.2 液面的工艺控制	54
2.3 泡界线的形成与控制	57
2.3.1 泡界线的形成机理	58

2.3.2	料堆、泡界线的控制	59
2.4	窑压的控制	60
2.4.1	窑压的分析	60
2.4.2	窑压的控制要领	62
2.5	某日熔化 500t 浮法玻璃熔窑操作参数	62
2.5.1	必保工艺参数	62
2.5.2	要求参数	63
2.6	熔化质量缺陷的控制	63
2.6.1	波筋	63
2.6.2	夹杂物	63
2.6.3	气泡	64
2.6.4	光学变形	64
2.6.5	结石	64
2.7	熔窑的日常巡检	65
2.8	窑内火焰调整的方法	66
2.9	熔化工的岗位职责	66
	学习思考题	67

3

平板玻璃熔窑结构及尺寸确定

69

3.1	玻璃熔制部分结构选型	69
3.1.1	投料口	69
3.1.2	熔化部	74
3.1.3	卡脖和冷却部的结构	81
3.1.4	窑体冷却	84
3.2	热源供给部分结构	85
3.2.1	燃油或天然气的小炉	86
3.2.2	燃煤气的小炉	90
3.2.3	小炉的保温	92
3.3	余热回收部分	93
3.3.1	蓄热室	93
3.3.2	余热锅炉	100
3.4	排烟供气部分结构	100
3.4.1	烟道系统	100
3.4.2	烟道闸板	103
3.4.3	换向设备	103
3.4.4	熔窑废气余热的利用	104
3.5	玻璃熔窑的结构设计	104
3.5.1	玻璃熔窑图纸	104
3.5.2	设计步骤	105
3.5.3	浮法玻璃熔窑的设计方案	107
3.5.4	某 600t/d 熔窑结构的主要尺寸与技术指标	108

4

学习思考题..... 108

玻璃熔窑用耐火材料的性质及选取 110

4.1	熔窑用耐火材料的性质	110
4.1.1	高温作业性质	110
4.1.2	物理性质	111
4.1.3	机械性质	112
4.2	耐火材料类型	112
4.2.1	烧结耐火材料	112
4.2.2	熔铸耐火材料	112
4.2.3	不定形耐火材料	112
4.3	浮法玻璃熔窑常用耐火材料	113
4.3.1	硅砖	113
4.3.2	黏土砖	115
4.3.3	高铝耐火材料	117
4.3.4	碱性耐火材料(含镁耐火材料)	118
4.3.5	电熔耐火材料	120
4.3.6	轻质耐火材料	123
4.3.7	不定形耐火材料	124
4.4	熔窑用耐火材料的选取	126
4.4.1	玻璃窑用耐火材料的选用原则	126
4.4.2	耐火材料在窑炉中使用时的损坏情况	127
4.4.3	浮法玻璃窑用各部位耐火材料的选用	128
4.5	延长耐火材料使用寿命的措施	133
	学习思考题	134

5

熔窑的热修和异常事故的处理 136

5.1	熔窑的热修	136
5.1.1	池壁砖的热修	137
5.1.2	蓄热室格子砖的热修	138
5.1.3	小炉喷出口平碓和反碓的热修	139
5.1.4	喷嘴砖的热修	139
5.1.5	典型热修案例	140
5.2	异常事故的处理	145
5.2.1	停电	145
5.2.2	停水	146
5.2.3	停助燃风	146
5.2.4	漏玻璃液	146
5.2.5	停油(燃料)	147
5.2.6	停雾化介质	147
5.2.7	冷却装置漏水	147
5.2.8	玻璃断板	148

5.2.9	熔窑闸板钢丝绳断落	148
5.2.10	空气交换器链条断裂的处理	149
5.2.11	空气交换器故障	149
5.2.12	熔窑大碓烧流落碓滴	149
5.2.13	跑料事故	149
5.2.14	投料故障	150
5.2.15	停配合料	150
5.2.16	泵房停油	150
5.2.17	油罐冒罐	151
5.2.18	锡槽闸头子的熔化操作	151
5.3	常见事故及处理案例	151
5.3.1	烤窑过程中常见事故及处理案例	151
5.3.2	熔化部常见事故及处理案例	154
5.3.3	蓄热室常见事故及处理案例	161
5.3.4	玻璃熔制质量事故及处理案例	163
	学习思考题	164

6

熔窑的冷修、砌筑与烤窑

166

6.1	熔窑的冷修放料（俗称放水）	166
6.1.1	利用玻璃放料水池放料	166
6.1.2	水淬法放水	168
6.2	熔窑的砌筑	169
6.2.1	浮法玻璃熔窑的砌筑要求	169
6.2.2	浮法玻璃熔窑施工质量控制	171
6.3	熔窑砌筑的技术要求	177
6.3.1	熔窑砌体的一般技术要求	177
6.3.2	窑炉各部位砌体具体技术要求	178
6.4	窑炉钢结构安装要求	180
6.4.1	总则	180
6.4.2	窑炉钢结构各主要部位具体要求	180
6.5	浮法玻璃熔窑的热风烤窑和烤窑前的准备	181
6.5.1	热风烤窑	181
6.5.2	烤窑前的准备工作	183
6.5.3	点火烤窑	184
6.5.4	热装窑	186
6.5.5	某生产线热风烤窑案例	188
	学习思考题	191

7

器皿玻璃熔窑

193

7.1	玻璃熔窑的分类	193
7.2	器皿玻璃熔窑概述	194

7.3	坩埚窑	194
7.3.1	坩埚窑的分类	194
7.3.2	坩埚窑的特点	195
7.3.3	坩埚窑的结构	196
7.3.4	坩埚窑的控制与操作	202
7.4	蓄热式马蹄焰池窑 (简称马蹄焰池窑)	205
7.4.1	马蹄焰池窑的特点 (与横焰窑相比)	205
7.4.2	马蹄焰池窑的结构	206
7.4.3	马蹄焰窑的砌筑	215
7.4.4	池窑的烘烤升温操作	217
7.4.5	熔窑的其他操作	221
	学习思考题	227

8

玻璃电熔技术与电熔窑

228

8.1	玻璃电熔技术	228
8.1.1	玻璃电熔技术原理	228
8.1.2	影响玻璃液导电性的因素	228
8.2	电极	229
8.2.1	钨电极	229
8.2.2	钨电极的形式及布置	230
8.2.3	电极保护设备 (电极水套)	232
8.2.4	氧化锡电极	233
8.3	电熔窑电源与供电控制	233
8.3.1	玻璃电熔窑的电源要求与选择	234
8.3.2	供电与控制	235
8.4	全电熔窑用耐火材料	235
8.4.1	烧结锆刚玉砖	235
8.4.2	电熔锆刚玉砖	236
8.4.3	电熔刚玉砖	236
8.4.4	电熔锆铬刚玉砖	236
8.4.5	电熔石英砖	236
8.4.6	电熔锆英石砖	236
8.5	全电熔窑炉	237
8.5.1	全电熔窑的特点	237
8.5.2	全电熔窑的分类	237
8.5.3	应用案例	239
8.6	火焰熔窑电助熔技术	239
8.6.1	熔窑电助熔的优缺点	240
8.6.2	电助熔熔窑的电极配置及操作工艺要点	241
	学习思考题	243

9.1	全氧燃烧技术	244
9.1.1	全氧燃烧技术的优点	245
9.1.2	全氧燃烧熔窑的结构特点	246
9.1.3	全氧燃烧熔窑与空气熔窑的对比	247
9.1.4	玻璃熔窑全氧燃烧技术应用的影响因素	248
9.1.5	玻璃熔窑 0 号小炉全氧辅助燃烧技术	251
9.1.6	全氧燃烧技术国内外应用现状	253
9.2	玻璃熔窑的全保温技术	253
9.2.1	概述	253
9.2.2	熔窑各部位的保温	254
9.3	玻璃熔窑富氧燃烧技术	255
9.3.1	富氧燃烧技术原理	255
9.3.2	富氧燃烧技术优点	256
9.3.3	富氧燃烧技术的应用	257
9.4	余热发电技术	258
9.4.1	玻璃熔窑余热发电系统建设原则和要求	258
9.4.2	余热发电技术及系统配置	259
9.4.3	余热发电的主要设备	260
9.4.4	典型吨位玻璃熔窑烟气余热发电设计装机容量及应用	260
9.5	减压澄清	261
9.5.1	减压澄清的机理	261
9.5.2	减压澄清的优点	264
9.6	浸没式燃烧	264
9.7	蜂窝碓	265
	学习思考题	265
	参考文献	266

0 | 绪 论

玻璃熔化的发明具有偶然性。据传，大约在公元前 3400 年古埃及的“前王朝时期”，一些旅行家在一次长途旅行中，由于天气发生急剧变化，不得不在近海的一个山谷里住下来。于是他们便在那里生火取暖，歇脚煮食。几天过去，天气回转，大海变得风平浪静，他们喜出望外，准备继续旅行。可是，当他们收拾行李，准备离开那个山谷时，突然发现：在烧过饭的余烬里，有一粒粒白色鳞片状的东西，闪闪发光。这是什么东西呢？他们惊奇地拾起这些莫名其妙的“鳞片”，带着它们踏上了旅程。这奇怪的“鳞片”到底是什么呢？

几千年过去了，人们终于揭开了这个谜。其实，这就是人类最早在无意中制成的玻璃。那些古埃及的旅行家，为何在那里烧了 12 天的饭，就制造出“玻璃”来了呢？原来，这一海域具有丰富的“海砂”，这些细砂遇到柴火燃烧时，由于木柴燃烧产生含有碱性碳酸钠的木炭灰，这样，靠木柴燃烧热度和碳酸钠的化学作用，就把细砂粒熔化了。冷却后，重新结晶，就生成了一粒粒透明体——玻璃。

人工制造玻璃的起源拟可追溯到公元前 2000 年的美索不达米亚时代，当时埃及的美索不达米亚人就开始有目的地用石头烧制玻璃。到了第 18 王朝（公元前 1580～公元前 1350 年），尼罗河沿岸的阿玛尔纳城镇就建起了玻璃工厂，这可以认为是年代最古老的玻璃厂。不过那时的玻璃制品，价值贵如黄金，仅能用作装饰方面。公元前 1500 年时的埃及玻璃除了珠宝玉石类之外，还有小盆、小瓶之类的器物。这些容器是先以细铁棒混合泥土与马粪做坯芯，然后在外表面抹上玻璃液并装饰各种颜色玻璃色丝，勾勒波浪形花纹，待玻璃冷却后，将其中的坯芯取出，即完成玻璃容器制品。

原始板状玻璃的问世，大约比珠宝、器皿类玻璃制品晚 2000 年左右，在第 18 王朝以后 1000 多年的公元前 1 世纪时候，罗马人发明了玻璃的吹制技术，从而进入了玻璃史上第一个量产时代，使得玻璃不再只是奢侈品，而成为日常用品。其生产技术向当时罗马帝国所属的欧罗巴各地流传而进一步传到东方的波斯，便形成了西亚系统的玻璃生产。到了 12 世纪，玻璃产品逐渐成了一种繁荣发达的行业，出现了举世闻名的威尼斯玻璃。

威尼斯玻璃生产的最盛时期为 15～16 世纪。那时，各种颜色玻璃的生产、涂釉、镀金、刻花等精致美丽的装饰加工技术都已达到相当高的水平。当时，威尼斯共和国根据欧洲各国的需要，生产供应了彩绘玻璃、玻璃锦砖、酒杯及其他具有高度艺术装饰性的玻璃器皿，还有玻璃镜、窗玻璃、花灯等，几乎独占了整个欧洲市场。但因玻璃作坊容易起火，曾引起过火灾，所以自 1291 年起，玻璃作坊就全部迁往威尼斯北面 2 公里左右的姆拉诺岛（Murano），并与外界隔绝形成了一种产业保护政策。进入 16 世纪，开始有玻璃工匠逃到岛外，分散到欧洲各地，逐渐把威尼斯的玻璃技术传播到各个地方。

到了相当于文艺复兴时期、巴洛克风格、洛可可风格的 17～18 世纪，在捷克斯洛伐克、法国、英国等国家，玻璃制造技术在某些方面有了显著的进步。



捷克斯洛伐克的波希米亚地区，盛产优质硅石，又有森林资源为燃料，为发展玻璃工业奠定了基础。但是那里的地理条件不利——没有海港，难以进口纯碱。为了克服这一困难，人们便采树烧灰作碱的原料，由于使用了这种含钾量多的木炭，便制造出来折射率和透明度比以往都高的优质玻璃，诞生了今天仍然誉为波希米亚玻璃的高级玻璃。

在法国，路易十四时代便建立了王室所属的玻璃厂。17世纪后半叶，已能用铸造法制造出大面积的玻璃镜和平板玻璃。

人类从开始采用原始的、手工的方法到开始采用机械化连续方法制造平板玻璃，大约又经历了3300年漫长的演变过程。当人们发现煤炭这种燃料资源的价值后，人类开始了18世纪后期的产业革命，对于玻璃的历史也带来了划时代的大变革。这个时期，玻璃技师致力于研究烧煤的玻璃熔窑和玻璃成形工艺的机械化。另一方面，研究以食盐为原料制碱，以改变过去依靠天然碱和木炭的状态。伴随氨碱法制造纯碱技术的推广应用，制造玻璃的成本大幅降低。于是，玻璃工业算是完成了向近代大规模生产的转变，终于从一门艺术进入了工业生产的时代。

早期的熔窑以烧煤的横口坩埚窑和直火式坩埚窑，以及半煤气坩埚窑为主，由于是隔着坩埚壁进行间接加热，热效率低。而且在坩埚窑中，熔化、澄清、成形的各个操作阶段，每日要周期性地反复，坩埚和它所在的熔窑均需经受激烈的温度变化，耐火材料极易损坏。由于坩埚的意外破裂，玻璃液一漏出，熔窑也就不能再工作，这样的事故屡见不鲜。使这种生产效率低的熔化方法一举得到飞跃发展的是弗里德里希·西门子（Fridrich Siemens）及其兄弟们的协助下完成的“西门子式玻璃熔窑”。这种玻璃熔窑效仿使用焦炉煤气或发生炉煤气的炼钢平炉的加热方法（即蓄热式发热炉），使玻璃液在广阔的受热面上移动，借以连续地进行熔化、澄清乃至引上成形操作。这种连续式的玻璃熔窑于1873年在比利时获得成功，从其中制造出了高质量的大块平板玻璃。比利时由此一跃而以生产优质平板玻璃的国家驰名于世。

虽然玻璃出现时间很长，但是玻璃熔窑的发展主要是在20世纪。大致可分为下面几个阶段。

(1) 奠基阶段（1920年以前） 此阶段确立了玻璃熔窑的基本结构和基本窑型，但是由于燃料以煤为主，砖材低级（黏土砖），因此熔窑的效率很低，玻璃质量不够好，在该阶段坩埚窑占主要地位。

(2) 缓慢发展阶段（1920~1945年） 该阶段的特点是电熔耐火材料的出现和采用，促使窑温提高（达1430~1450℃）和窑龄延长（达两年）。

(3) 飞跃发展阶段（1945~1960年） 此阶段是一个重要的发展阶段，采用高热值燃料（重油）为手段，配合熔窑结构的局部改进（如箱式蓄热室），使玻璃熔化温度从1430~1450℃提高到1500~1530℃，同时提高了玻璃的质量和产量。在此阶段采用了薄层投料、池底鼓泡、机械搅拌和电助熔等新工艺、新技术。同时为了稳定正常的生产，普遍采用了窑温、窑压、液面等自动控制技术。在本阶段电熔窑也有很大的发展。本阶段达到的各项指标如下：

熔化玻璃品种	玻璃熔化温度 /℃	熔化率 /[t/(m ² ·d)]	单位耗热量 /[kJ/kg]	窑热效率 /%	窑龄/年	周期熔化量 /[t/(m ² ·周期)]
平板玻璃	1550~1590	1.3~1.5	11000~12000	25	~4	2500 以上
瓶罐玻璃	1540~1560	2~2.3	8360 以下(大窑) 10500 以下(小窑)	30(大窑) 25(小窑)		

(4) 持续发展阶段（1960~今） 燃料方面由重油逐步转向天然气，耐火材料方面提高



了锆刚玉砖的含锆量，熔窑结构方面窑池宽度加宽、蓄热室加高、卡脖处设吊墙和窑坎等，同时加强了窑体保温、采用局部辅助加热、纯氧助燃等技术。该阶段还发展了火焰与电联合加热的新窑型，使各项指标得以大幅度提高。具体各项指标见下表。

熔化玻璃品种	玻璃熔化温度/℃	熔化率 /[t/(m ² ·d)]	单位耗热量 /(kJ/kg)	窑热效率 /%	窑龄 /年	周期熔化量 /[t/(m ² ·周期)]
平板玻璃	1560~1610	2~2.5 用电辅助加热时:4	烧油时 5000(大型窑)8300(中型窑)	40~45	~7	4500 以上
瓶罐玻璃		3.5(大窑) 2.5~3(中型窑) 2~2.5(小型窑)	烧煤气时 10500(小型窑) 7100(大型窑) 12500(小型窑)			6000 以上

玻璃熔窑是玻璃生产的关键热工设备，常被比作玻璃工厂的“心脏”。了解玻璃熔窑的结构，掌握玻璃熔化操作的知识，将对生产优质玻璃起着非常重要的作用。本书将是关于玻璃熔化的最新参考材料和玻璃专业学生和工程技术人员的好帮手。

1 | 玻璃的熔化基础

1.1 玻璃熔制工艺原理

将配合料经过高温加热形成均匀的、无气泡的（即把气泡、条纹和结石等减少到容许限度）并符合成形要求的玻璃液的过程称为玻璃的熔制，玻璃熔制是玻璃生产过程中很重要的环节。玻璃的产量、质量、合格率、生产成本、燃料消耗和熔窑寿命等都与玻璃熔制有密切的关系。因此，要生产出优质玻璃制品而且保证整个生产过程顺利进行，必须进行最合理的玻璃熔制。

玻璃的熔制是一个很复杂的过程，它包括一系列物理的、化学的和物理化学的现象和反应。其综合结果是使配合料形成了透明的玻璃液。如果不能掌握配合料各组分在熔制时所发生的这些反应以及这些反应对熔制过程的影响，将很难定出合理的熔制作业制度。各种配合料在形成透明的玻璃液过程中有一些基本相同的现象和反应。

(1) 物理过程 包括配合料的加热，吸附水分的蒸发，某些单一组分的熔融，某些组分的多晶转变，个别组分的挥发（ Na_2O 、 K_2O 、 B_2O_3 、 PbO 等）。

(2) 化学过程 包括固相反应、各种盐类的分解、水化物的分解、化学结合水的排除、组分间的相互反应及硅酸盐的生成。

(3) 物理化学过程 包括低共熔物的生成，组分或生成物间的相互溶解，玻璃和炉气介质之间的相互作用，玻璃液和耐火材料的相互作用，以及玻璃液和其中夹杂气体的相互作用等。

以上这些现象的发生因配合料组成不同，发生的次序可能不同，对应的温度也不一致。

由于玻璃的熔制是在高温下发生各种复杂的反应，所以很难获得最精确的结论。玻璃熔制过程大致可分为五个阶段：硅酸盐的形成、玻璃液的形成、玻璃液的澄清、玻璃液的均化、玻璃液的冷却。这些阶段互不相同，各有特点，但又相互密切联系，在实际熔制过程中，各阶段之间没有明显的界限。下面分别简单介绍玻璃熔制五个阶段的特点。

(1) 硅酸盐的形成 配合料入窑后各组分在加热过程中，经过一系列的物理变化、化学变化，主要的固相反应结束，大部分气态产物从配合料中逸出。在这一阶段结束时，配合料变成由硅酸盐和二氧化硅组成的不透明烧结物。制造普通钠钙硅酸盐玻璃时，硅酸盐的形成在 $800\sim 900^\circ\text{C}$ 基本结束。

(2) 玻璃液的形成 烧结物连续加热时就开始熔融，易熔的低共熔物首先开始熔化，在熔化的同时发生硅酸盐与剩余的二氧化硅的互溶。到这一阶段结束时，烧结物变成了透明体，再没有未发生反应的配合料颗粒了。但是玻璃液中含有大量气泡，而且此时玻璃液本身在化学组成和性质上也不均匀，有很多条纹。熔制普通玻璃时，玻璃液的形成在 $1200\sim 1250^\circ\text{C}$ 完成。

(3) 玻璃液的澄清 玻璃液继续加热, 其黏度降低, 并从中放出气体, 即进行去除可见气泡的过程。熔制普通玻璃时, 澄清在 1400~1500℃ 结束。这时玻璃液的黏度约 10Pa·s。

(4) 玻璃液的均化 玻璃液长时间处于高温下, 其化学组成逐渐趋向均一, 即由于扩散作用, 使玻璃液中条纹、结石消除到允许限度, 变成均一体。玻璃液的均一性, 可通过测定不同部位玻璃的折射率或密度来鉴定。熔制普通玻璃时, 均化可在低于澄清的温度下完成。

(5) 玻璃液的冷却 将澄清均化后的玻璃液温度降低 200~300℃, 使玻璃液具有成形所必需的黏度。在冷却过程中应不破坏玻璃的质量。浮法玻璃冷却阶段结束时的温度在 1100~1050℃。

实际上钠钙硅酸盐系统玻璃产量较大, 占一半以上, 因此主要阐述关于这类玻璃组成的反应过程。

1.1.1 硅酸盐形成和玻璃形成

玻璃配合料的组成十分复杂, 不同条件下得到的实验数据也不尽相同, 因此各组分发生的各种反应和现象不再一一介绍, 只介绍单组分在加热时的多晶转变和变化, 见表 1-1。常见的四组分混合物 (SiO₂ 72.59%, CaO 8.63%, MgO 3.55%, Na₂O 15.23%) 加热时的主要变化见表 1-2。

表 1-1 单组分加热时的多晶转变和变化

组 分 名 称	加热时的反应	温度/℃
石英 SiO ₂	多晶转变	
	β 石英 \rightleftharpoons α 石英	575℃
	α 石英 \rightleftharpoons α 鳞石英	870℃
	α 鳞石英 \rightleftharpoons α 方石英	1470℃
	熔化	1710℃
纯碱 Na ₂ CO ₃	分解 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{Na}_2\text{O} + \text{CO}_2 \uparrow$ 有 SiO ₂ 时反应加速 炉气中 CO ₂ 含量对分解有影响	700℃ 左右开始分解 849~852℃
	熔化	
碳酸钾 K ₂ CO ₃	分解 $\text{K}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{K}_2\text{O} + \text{CO}_2 \uparrow$ 熔化	410℃ 左右开始 >891℃
石灰石 CaCO ₃	分解 $\text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{CaO} + \text{CO}_2 \uparrow$ 熔化	500℃ 左右开始 1290℃
菱镁矿 MgCO ₃	分解 $\text{MgCO}_3 \rightleftharpoons \text{MgO} + \text{CO}_2 \uparrow$ 熔化	300℃ 左右开始 >2500℃
白云石 MgCa(CO ₃) ₂	分解先 MgCO ₃ 后 CaCO ₃	700℃ 左右 MgCO ₃ 分解完全, CaCO ₃ 分解很少
芒硝 Na ₂ SO ₄	多晶转变	
	无水芒硝(斜方晶系) \rightleftharpoons 偏位芒硝(单斜晶系)	235℃ 左右
	熔融 分解 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \rightleftharpoons \text{Na}_2\text{O} + \text{SO}_3$ (有还原剂时, 反应加速)	884℃ 1200℃ 左右开始
氧化铝 Al ₂ O ₃	熔化	2010℃
长石		
Na ₂ O · Al ₂ O ₃ · 6SiO ₂	熔化	1100℃
K ₂ O · Al ₂ O ₃ · 6SiO ₂	熔化	1170℃
CaO · Al ₂ O ₃ · 6SiO ₂	熔化	1550℃
重晶石 BaSO ₄	多晶转变	
	斜方晶形 \rightleftharpoons 单斜晶形	1149℃
	熔化	1580℃