

驥 夫 編

节能型耐火纤维工业炉

7

江苏科学技术出版社

内 容 提 要

本书综合了国内外有关节能型耐火纤维工业炉的资料和文献,比较系统地介绍了节能型耐火纤维工业炉技术,主要包括国内外耐火纤维发展的动态、生产方法及工艺,耐火纤维的理化性能及其测试、节能机理及其实用技术,耐火纤维工业炉的热工计算与设计。

本书可供冶金、机电、化工、建材、轻纺、国防等工业部门从事能源与节能工作的科技人员及大专院校热能工程等有关专业师生参考,从事能源与节能的技术工人也可以参考。

节能型耐火纤维工业炉

骥 夫 编

出版:江苏科学技术出版社

发行:江苏省新华书店

印刷:高淳印刷厂

开本787×1092毫米 1/32 印张6.75 字数145,000

1987年3月第1版 1987年3月 第1次印刷

印数1—3,000册

书号:15196·218 定价:1.30元

前 言

在工业生产中，大量使用各种类型的热力设备。工业炉就是其中最主要的一种。它是国家能源消耗的大户之一，约占全国总能耗的1/5。这个大户在能源利用上存在很大的浪费，如我国的连续式加热炉的热效率平均在30%左右，可是日本的平均热效率为50%左右，节能型在56%以上。可以看出，搞好工业炉的节能是一项很迫切和带有长远策略性的任务。

采用节能型耐火纤维工业炉，是工业炉节能的有效途径之一。

节能型耐火纤维工业炉，是采用一种新型耐火纤维保温材料作为工业炉的炉衬。这种耐火纤维炉衬新技术，从1965年以后，在主要工业化发达国家得到了迅速发展，被誉之为“工业炉结构的巨大革命”。国外还把它和快速加热炉、自身预热烧嘴作为现今节能的三项主要措施。

我国在七十年代后期，对这一工业炉节能新技术也开始了研究，并很快得到了推广应用。

可是迄今为止，我国还没有一本比较系统地专门介绍节能型耐火纤维工业炉的书籍，供从事工业炉节能工作的同志参考。

为了促进这一重要的工业炉节能新技术的开展，满足从事这方面工作的科技人员和管理人员的需要，我们搜集了国内外有关这方面的技术资料，把它编写成书，便于有关同志

使用，并期望本书在节能工作中作出有益的贡献。

编写本书的部分资料来源于有关会议交流资料和期刊、文献，在此谨向这些会议交流资料和期刊文献的同志表示衷心的感谢，因为没有这些同志的辛勤劳动，要完成这本书的编写工作是很困难的。

本书在编写过程中得到了何华生、杨纪珂、刘文庆、顾德骥、周保国、唐化南以及华东区域能源研究会节能学科委员会有关同志的支持与帮助，有的同志还提供了有关资料，在此谨表示衷心的感谢。此外，蒋福娣、吴音、文健飞、王鸿骥等同志也为本书付出辛勤的劳动，作者于此一并致谢。对本书的不足之处，恳切希望同行给予批评与指正。

骥 夫

1984年2月于上海

目 录

前 言	1
第一章 国内外耐火纤维发展的情况	1
§1 国外耐火纤维发展的情况	1
§2 国内耐火纤维发展的情况	6
第二章 耐火纤维的分类、生产方法及生产工艺	9
§1 耐火纤维的种类	9
§2 耐火纤维的生产方法及生产工艺	11
第三章 耐火纤维的理化性能及测试	32
§1 耐火纤维的理化性能	32
§2 耐火纤维的特点	40
§3 耐火纤维的基本性能	42
§4 耐火纤维的测试	47
第四章 耐火纤维基础理论研究的情况	60
第五章 耐火纤维节能机理及其合理的选用	64
§1 工业炉热能利用的分析	64
§2 耐火纤维节能机理	66
§3 耐火纤维的合理选用	68
第六章 耐火纤维工业炉的炉衬结构	71
§1 耐火纤维工业炉的热工分析	71
§2 关于炉墙外表面温度的选择	74
§3 关于耐火纤维工业炉炉衬的组成	75
§4 耐火纤维工业炉炉衬结构的形式及施工方法	80

第七章	耐火纤维炉衬的粘贴技术	89
§1	概述	89
§2	应用耐火纤维粘贴技术的优点	90
§3	耐火纤维炉衬粘贴方式	92
§4	高温粘结剂	94
§5	采用耐火纤维毡粘贴技术改造井式渗碳炉	97
第八章	耐火纤维工业电阻炉的电加热器的固定方法	102
第九章	全耐火纤维炉衬结构的工业炉	109
§1	全耐火纤维炉衬结构的台车式箱形电阻加热炉	109
§2	全耐火纤维炉衬的罩式炉	113
第十章	耐火纤维复合炉衬的工业炉	119
§1	耐火纤维复合炉衬箱式电阻炉	119
§2	用耐火纤维毡夹层的锻造加热炉	126
§3	耐火纤维复合炉衬罩式炉	131
§4	耐火纤维复合炉衬电弧炉	133
§5	耐火纤维复合炉衬的环形加热炉	134
§6	耐火纤维复合炉衬的钢丝热处理铅浴炉	137
第十一章	耐火纤维工业炉的热工计算	141
§1	耐火纤维工业炉炉衬最佳厚度与最佳厚度范围	141
§2	最佳炉衬厚度的图解法	142
§3	耐火纤维工业炉的热工计算	144
第十二章	耐火纤维工业炉的设计	171
§1	耐火纤维工业炉总体设计应考虑的问题	171
§2	耐火纤维工业炉的钢结构设计	173
第十三章	耐火纤维在工业炉中的其他应用	177
§1	加热炉炉底水管的热损失计算	177
§2	炉底水管的复合层包扎结构	178

§3 炉底水冷管用耐火纤维毡包扎	179
第十四章 耐火纤维在工业炉应用中的几个问题	185
第十五章 耐火纤维工业炉使用的经济效果及 其分析	192
§1 耐火纤维工业炉的节能技术与节能技术经济 的关系	192
§2 评价耐火纤维工业炉节能技术经济效果的指标	193
§3 耐火纤维工业炉节能的经济分析的实例	196
§4 国内外耐火纤维工业炉使用的经济效果实例	202

第一章 国内外耐火纤维发展的情况

§1 国外耐火纤维发展的情况

耐火纤维是近十多年来才迅速发展起来的一种新型的节能耐火材料。它最早出现于1938年，是实验性的。在1941年美国的巴布考克·维尔考克斯公司用天然原料高岭土经电弧炉熔化后用压缩空气喷吹成棉，商品名称为 kaowool，含 Al_2O_3 48%，不久该公司又用湿法制成耐火纤维毡。

初期，由于生产耐火纤维的成本很高，使用只限于军事和尖端科学。1950年开始作为工业炉窑的膨胀缝填充材料。1960年以后，又以湿法试制成纤维毡、毯、纸、绳以及其他成型制品等二次制品，使用也逐步扩大到各个方面。它不仅作为隔热材料和填充材料，还可以作为高温衬垫材料、密封材料、过滤材料以及触媒载体等。特别是1965年以后，耐火纤维开始用于各种热处理炉、石油加热炉及管道部分、高温气体冷却型原子反应堆等的内衬材料，并取得了良好的经济效果。这种新型的耐火纤维很快在美国，随后在西欧、日本、苏联等工业发达的国家获得了广泛的应用。

由于制造工艺和应用技术紧密相联，相互促进，世界耐火纤维的总产量和销售量也反应了这两个方面的发展。世界耐火纤维的产量1969年为10000吨左右，而到了1979年则达到了45000吨。如果考虑到耐火纤维的容重仅为致密耐火制

品的5%，那么从体积这个角度来看，这就十分可观了。欧洲的耐火纤维的应用，1979年为12000~15000吨，而西德就购买了20~25%。1979年的总销售额为1.0~1.2亿马克。从耐火纤维本身的构成来看，使用温度为中温的硅酸铝耐火纤维约占总数的70%，用于1100~1160℃的中高温耐火纤维约占30%。从发展方向来看，高温耐火纤维有急剧增长的趋势。美国在1971年耐火纤维销售额只有800万美元，到了1976年达到了5000万美元，1980年则达到了1亿美元左右，而且约有5000座的工业炉全部以耐火纤维取代传统的耐火材料炉衬。日本在1971年产量只有2000吨，近几年来每年增长50%左右。根据预测，到1985年，全世界每年平均增长率将为15%，美国的产量将为2.5~3万吨，英国为6000~8000吨，日本为8000吨，苏联为4000~6000吨。

由于硅酸铝耐火纤维是非晶体玻璃态组织，若把它加热到900℃以上，就会析出莫来石晶体，再继续加热到1200℃以上，会析出方石英晶体。当析出晶体时，它的体积就会发生变化，特别是析出方石英晶体时，其影响最大。正是由于这个原因，它的长期使用温度一般只能在1000℃以下。如果要满足长期使用温度在1000℃以上时，就必须相应地研制新型的耐火纤维。目前，国外研制新型的耐火纤维的主要途径有如下两种：

1. 提高晶体析出的温度或者减少纤维中的玻璃态组织。
2. 研制新型的晶体态耐火纤维，不要使纤维产生组织变化。所以，在普通的硅酸铝耐火纤维的基础上，英国在七十年代就研究成功了含95% Al_2O_3 和5% SiO_2 的硅化铝耐火纤维，使用温度达1600℃，是目前最高级的民用硅酸铝系耐火

纤维，商品名称为Saffil。它是由氧化铝及醋酸铝盐为原料，先用胶体法制成粘胶纤维，然后在温度为 1100°C 的条件下锻烧，铝盐分解，形成多晶态氧化铝纤维。为了抑制在高温时氧化铝晶体发生长大而损坏纤维，在配料中加入了5%的 SiO_2 ，故又称为稳定化硅酸铝耐火纤维。这种耐火纤维在加热到 1200°C 时无变化，温度再升高，结晶开始长大，纤维制品的体积开始收缩，至 1600°C 时的结晶已使纤维严重变脆，纤维制品的收缩率已达4%，故这种耐火纤维的最高使用温度为 1600°C ，短时间使用还可以高一些。美国、日本、联邦德国先后从英国引进了这种高温耐火纤维。日本东芝莫诺弗来克斯公司从英国引进了生产耐火纤维技术，现在也可以生产多种硅酸铝系耐火纤维及其二次制品，有相当可观的产量规模。现在日本的耐火纤维生产也获得了较快的发展，最近已研制成功了使用温度为 1650°C 的结晶态耐火纤维。联邦德国研制成功了使用温度为 $1260\sim 1500^{\circ}\text{C}$ 的耐火纤维，并研制成功了各种纤维的高温粘结剂，使用温度达 $800\sim 1500^{\circ}\text{C}$ 。苏联最近研制成功了含 ZrO_2 98.4%的二氧化锆耐火纤维，使用温度达 1700°C 。这些耐火纤维的研制成功基本上满足了工业炉的需要。此外，为了适应各种工业炉的不同安装方法和不断地提高烧嘴的喷出速度，国外又研制出了一些新的制品，如针刺加强毯，Z型折毯预制块以及真空成型预制品等。

除上面所介绍的以外，下面还介绍一下有关生产耐火纤维的工艺情况。

从综合的情况来看，国外用熔融法生产的中档耐火纤维占总产量的主要比重。这种生产方法的技术经济指标还是比

较先进的，如普通的耐火纤维的成纤率达80%，成毡率达50～60%，电耗为1.8～3.3度/公斤制品（电阻炉只有0.8度/公斤制品）；高铝耐火纤维成纤率达60%，成毡率达37%电耗为11.3度/公斤制品。

在生产工艺改进方面，近年来国外采用熔融法生产耐火纤维的主要发展为：

1.普遍采用连续电阻炉来代替原来的带有前室的电弧炉。电阻炉的电极直接浸入到熔融液中，依靠熔融液的电阻发热，使原料熔融。电极材料采用钨和钼，并备有水冷装置，可用三相供电，也可以采用三个单相供电。电阻炉只有一个熔池，没有副池，熔液流口用钨和钼质的材料做成，它安装在炉子的底部，采用这种电阻炉也能实现连续熔融和连续成纤。它还具有电耗约比电弧炉低50%、连续作业时间长达45天（这主要取决于钼或钨的寿命）、流股稳定以及噪音低等优点。

2.成纤方法除喷吹法外，还发展了甩丝法。其优点是制得的纤维较长，平均为200毫米左右，比喷吹法约长50%。用这种纤维制成的针刺毡强度大、产量高。缺点是设备维护较喷吹法复杂。

3.二次制品加工工艺的发展，一方面采用针刺制毡，其优点是易于全连续化，毡的强度大，抗风速性强，还节省了用水和干燥用的能源。另一方面采用湿法真空成型工艺。其原因是这种生产工艺能适应多种用途的各种异型制品，如烧嘴砖、浇铸帽口等，也能适应发展高温工业炉用的多种晶态耐火纤维板和混纺耐火制品。

近年来，国外在耐火纤维方面，着重发展混纺纤维，即

用结晶态耐火纤维和玻璃态耐火纤维混纺，形成新的高温耐火纤维品种系列，并且已在1300~1600℃的高温工业炉上推广应用。作为混纺纤维原料的纤维有高纯硅酸铝耐火纤维、高铝耐火纤维(Al_2O_3 为55~60%)、氧化铝耐火纤维(Al_2O_3 为95%)等。由于两种不同类型的纤维以不同比例配合，所制成的混纺耐火纤维的耐热性也不同，可以根据不同温度要求的工业炉，配制成 Al_2O_3 含量不同的混纺耐火纤维。为什么国外的混纺耐火纤维能得到较快的发展呢？其一是由于经济原因。这是因为胶体法生产的结晶态氧化铝耐火纤维价格很贵，比熔融法制成的玻璃态耐火纤维高几倍，而用混纺法就可以降低生产成本。其二是由于技术原因。含有过剩的 SiO_2 的硅酸铝耐火纤维或高铝耐火纤维里的 SiO_2 ，迁移到氧化铝硅含量不足的氧化铝耐火纤维，结果产生莫来石的结合，并且促进形成一种类似砖的良好抗气体腐蚀的特性。

过去在工业炉热面用耐火纤维制品几乎都是毡或毯。近年来实践表明，在1300℃以上的高温工业炉采用混纺纤维板或氧化铝纤维板，节能的效果好，因此国外耐火纤维二次加工制品的新发展是高温耐火纤维板。把氧化铝和硅酸铝耐火纤维（还可以加入一定数量的耐火骨料细粉），用真空成型制成的混纺纤维板，具有加热收缩小、强度大、抗气体冲刷性能好，且比较经济等优点，现已逐渐在1300℃以上的高温工业炉上推广应用。

与此同时，国外还相应地发展了板-毯系统的施工方法，即在工业炉热面使用氧化铝纤维板或混纺纤维板，而在板至炉壳之间用耐热性稍差的低密度耐火纤维毯。采取这种综合性筑炉，不仅可以保证炉子的使用效果，而且更为经济，是

应用于高温工业炉隔热很有发展前途的一种施工方法。

国外在耐火纤维应用方面，除了在1300℃以下的工业炉继续采用中档耐火纤维以外，近年来主要在大型高温工业炉采用高档耐火纤维制品，取得了良好的节能经济效益，节能一般为20~30%，还本期一般为半年左右，较长的为一年左右，寿命一般在三年以上，有的最长使用寿命可达十几年。

§2 国内耐火纤维发展的情况

我国从七十年代初开始由北京和上海耐火材料厂研制硅酸铝耐火纤维。其方法主要也是采用焦宝石为原料，用电弧炉熔融后，再由压缩空气喷吹成棉，再采用湿法加粘结剂制成二次制品。刚开始生产时，由于人们对这种新型的节能耐火材料的认识不足，不相信它用在工业炉上能达到节能的目的，所以没有引起人们的足够注意，没有得到推广，直到近几年来才逐步得到推广应用，最近四五年来了得到了较快的发展。现在全国有近百家大小工厂生产这种耐火纤维，这就越来越显示了它的优越性。现在全国的一般硅酸铝耐火纤维制品的产量有了较大的提高，并取得了显著的经济效果。

目前我国生产耐火纤维的品种还是比较单一，大多数工厂还只停留在相当于国外的早期产品的水平，如美国的Babcock-Wilcox公司的 kaowool 及英国的 Triton kaowool，这些品种称之为天然料硅酸铝耐火纤维。它们使用的温度一般在1000℃以下，最好在周期性的工业炉温为950℃以下的温度条件下使用，节能效果一般为20~30%，也有的甚至可

达50%。在连续性操作的工业炉，节能为15%左右。我国部分工业炉使用一般耐火纤维以后的节能效果如表1-1所示。

表1-1 我国部分加热炉采用一般的耐火纤维的节能效果

炉 型	工作温度, ℃	节能率, %
上海某厂热处理炉	600~1100	22~33(燃油)
洛阳某厂罩式退火炉	800	20(燃煤气)
上海某厂45千瓦箱式电阻炉	850	54(电热)
上海某研究所大型真空热处理炉	850	30(电热)
上海某研所75千瓦箱式电阻炉	980	30(电热)
洛阳某厂320千瓦连续式电阻炉	600	15.8(电热)

我国有些工厂，如上海耐火材料厂、北京耐火材料厂、浙江莫干山第二耐火纤维厂、江苏海安耐火材料厂、江苏东台特种耐火器材厂等，还成功地制成了高铝耐火纤维、含铬耐火纤维以及高铝耐火纤维等中档产品，而且在各个生产环节积累了各种完整的生产技术数据，所以质量稳定，并且还在不断地提高。有的厂还生产了混纺耐火纤维。这些中档产品在1100~1250℃的工业炉使用时，其节能效果达到了30%以上，如表1-2所示。

表1-2 高纯含铬耐火纤维和高铝耐火纤维使用的节能效果

耐火纤维种类	炉 型	工作温度, ℃	节能率, %
高纯硅酸铝耐火纤维毡	洛阳某厂贯通式煤气加热炉	1100	50
高铝耐火纤维毡	上海某厂钢板封头加热炉	1200	36~38 (燃煤气)
含铬耐火纤维毡	上海某研究所50千瓦箱式电阻炉	1200	30

除此以外，我国有关单位还用胶体法研制了高档耐火纤维，如莫来石耐火纤维、氧化铝耐火纤维。浙江德清某耐火纤维厂研制成功了 Al_2O_3 - SiO_2 系多晶态耐火纤维，试产品在 1350°C 高温箱式电阻炉上使用，节能效果达27.5%，该厂正积极准备筹建多晶态高温耐火纤维车间，以满足用户的需要。

目前，我国生产耐火纤维还需要解决几个主要问题：一是质量问题，就是有些厂生产的耐火纤维质量低，且不稳定，耐火纤维的成纤率只有40~50%（国外达到80%以上）；二是耗电量高，每生产1公斤耐火纤维棉耗电为7~8度（而国外为1.8~3.3度电，电阻炉只有0.8度电）；三是成本高，价格贵。现在有关部门正在做各方面的努力，研究连续生产工艺和设备，如连熔、连吹、二次制品的连续加工，发展针刺加强毡，以及采用先进的胶体法生产工艺。

总之，耐火纤维是一种有重大经济价值的节能新材料。工业炉采用耐火纤维制品是今后的一个发展方向。它的广泛应用和推广，必将导致工业炉结构改革的一场重大的技术革命。

第二章 耐火纤维的分类、生产方法及生产工艺

§1 耐火纤维的种类

一、按耐火纤维的形状来分类

1. **散状耐火纤维** 它可以做工业炉内衬背面的绝热保温材料，砖壁膨胀的填充材料以及二次加工制品的原料。

2. **成型制品** 在耐火纤维中加入各种粘结剂，可以制成各种成型制品。根据用途的不同，可以制成筒状、圆锥状以及各种形状的制品。

把耐火纤维叠在一起可以制成毡、毯以及板等，有不含有机粘结剂和含有有机粘结剂的两种制品。它主要做高温密封、过滤、绝热及炉衬材料用。

根据用途还可以制成耐火纤维纸、绳以及网状衬垫等不同规格的材料。

二、耐火纤维按耐火度和化学成分来分类

1. **普通型耐火纤维**（有的人把它称为低温型耐火纤维）它为白色棉状物，其化学成分中 Al_2O_3 与 SiO_2 的重量比一般多0.75~0.78，通常采用喷吹法生产，使用温度一般在1000℃以下（最好把使用温度控制在950℃以下）。这种耐火纤维使用于中、低温工业炉的内衬以及高温工业炉的绝热层。

在普通的耐火纤维中,把化学成分 Al_2O_3 与 SiO_2 的重量比控制在0.89~1.13的范围内,并降低耐火纤维中的 Fe_2O_3 、 Na_2O 、 TiO_2 等杂质的含量。如果耐火纤维工作温度为1200~1300℃,我们把这类耐火纤维称为标准耐火纤维。

2.含 ZrO_2 、 Cr_2O_3 的耐火纤维 ZrO_2 耐火纤维的化学成分与普通型的标准耐火纤维基本相同。加进 ZrO_2 的主要是为了增加纤维的长度。在离心旋转法制造耐火纤维时它作添加剂用,加入量一般控制在5%左右,这时,其中的 SiO_2 的含量也应提高。这种纤维由于其纤维长度较长,大部分用于耐火织物制品,如作针刺加强毯。

Cr_2O_3 耐火纤维,外观呈绿颜色,化学成分也和标准型耐火纤维基本上相同。它的不同之处只是加入了3~5%的 Cr_2O_3 。加入的方式有三种:一种是共同熔化,二是在成纤时加入,三是在成毡时加入。三种方法的效果没有大的区别,特别是成毡时加入,极为简单。这样作的原理是 Cr_2O_3 和 SiO_2 以及 Al_2O_3 都不生成化合物或连续固溶体,不论怎样,都是物理混合。加入 Cr_2O_3 后能够抑制耐火纤维中结晶的析出,使再结晶温度提高约100℃左右,也就是使使用温度提高约100℃左右。它的不足之处是长时间加热造成收缩增加、 Cr_2O_3 挥发以及在还原气氛中使用寿命缩短,因此尚有改进的必要。

3.高温型耐火纤维 它为白色棉状物,其中 Al_2O_3 的含量较高(大于60%)。纤维中的 Al_2O_3 的含量越高,其耐热性也就越高。英国卜内门公司1974年生产的氧化铝耐火纤维,含 Al_2O_3 达95%, SiO_2 为5%,是目前世界上耐温最高的民用硅酸铝耐火纤维。这种材料用氧化铝及醋酸铝等铝盐