

崔之开
编著

陶瓷纤维



化学工业出版社

陶 瓷 纤 维

崔之开 编著

化学工业出版社

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

陶瓷纤维 / 崔之开编著. — 北京: 化学工业出版社,
2003. 11
ISBN 7-5025-4939-0

I. 陶… II. 崔… III. 陶瓷纤维 IV. TQ343

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 102804 号

陶 瓷 纤 维

崔之开 编著

责任编辑: 夏叶清 王 斌

责任校对: 洪雅姝

封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市昌平振南印刷厂印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 850 毫米×1168 毫米 1/32 印张 13 3/4 字数 374 千字

2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4939-0/TQ · 1869

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

陶瓷纤维作为一种新型纤维状轻质耐火材料,在我国虽然起步稍晚,但始终保持持续发展的势头。我国陶瓷纤维年生产能力已超过 10 万吨以上,并实现了产品系列化。

陶瓷纤维工业的发展,迅速推动了工业窑炉节能改造。各类型工业窑炉应用陶瓷纤维的实践表明,不仅具有显著节能效果,并推进了工业窑炉结构和施工方法的创新,使工业窑炉向高效、节能、轻型化发展。

在耐火材料体系中,由于陶瓷纤维尚属一种新材料、新工艺,并处于不断完善、发展阶段。有关陶瓷纤维专业的基础理论、工艺原理、生产和应用技术等方面的图书资料更是缺少。作者自 20 世纪 70 年代接触陶瓷纤维实践,几乎经历了我国陶瓷纤维工业发展的各主要阶段。包括陶瓷纤维湿法卷毯连续生产线的设计、施工、生产;国外引进陶瓷纤维针刺毯生产线的消化、翻版设计、施工、生产;陶瓷纤维应用技术及应用配套材料的开发及在冶金行业各生产环节工业窑炉推广应用。尤其是自 20 世纪 90 年代初以来,参加了山东鲁阳公司多项陶瓷纤维新工艺、新产品及陶瓷纤维在工业窑炉的应用技术等方面课题的开发和实施,进一步提高了对陶瓷纤维生产、应用技术及相关基础理论的认识。为此,本书也是作者对近 25 年来从事陶瓷纤维科研、工程设计、生产及应用等方面实践的总结。

本书共分 10 章。其中第一章、第二章为陶瓷纤维的分类、现状和发展趋势;第三章为陶瓷纤维的性质,包括化学矿物组成、结构、热学、力学及使用等方面的性质;第四章为陶瓷纤维受热结晶现象及其性能变化;第五章为陶瓷纤维制品,包括陶瓷纤维棉、毯、毡、板、纸、纺织品、不定形材料及晶质纤维等制品;第六章

为陶瓷纤维生产技术、工艺装备及加工方法；第七章和第八章为陶瓷纤维应用技术，高温绝热壁衬结构的设计、施工；第九章为陶瓷纤维在不同类型工业窑炉应用实例；第十章为陶瓷纤维产品的试验方法。

本书资料的积累得益于作者 20 余年的陶瓷纤维科研、设计、生产及应用实践，并在系统地收集、整理和借鉴了国内外已有成果的基础上，结合作者的实际工作完成了本书的编著。在内容上力求系统、完整和具有实用性，以对业内人员有实际参考和借鉴的价值。并从理论上分析、阐明了陶瓷纤维生产技术和应用技术的原理。

在本书撰写过程中，得到许多同志的帮助，书中引用了许多作者的文献，在此表示衷心的感谢。特别感谢山东鲁阳公司鹿成滨总经理为本书撰写提供了热忱、细致的帮助和支持。

由于作者水平所限，疏漏、谬误之处在所难免，欢迎批评指正。

编著者

2003 年 9 月

内 容 提 要

陶瓷纤维是一种集传统绝热材料、耐火材料优良性能于一体的纤维状轻质耐火材料。其产品涉及各领域，广泛应用于各工业部门，是提高工业窑炉、加热装置等热设备热工性能，实现结构轻型化和节能的基础材料。本书系统介绍了陶瓷纤维的基础知识、组成与性能、生产技术及装备、加工方法、制品及其应用技术、高温绝热壁衬结构的设计和施工、产品检验等诸多方面内容，并介绍了陶瓷纤维在各行业的绝热工程中的应用实例。

本书可供从事陶瓷纤维生产、应用和研究的科技人员、能源工程技术人员以及大专院校有关专业师生参考。

目 录

第一章 陶瓷纤维概述及分类	1
一、陶瓷纤维概述.....	1
二、陶瓷纤维的分类.....	1
第二章 陶瓷纤维的发展现状及发展趋势	6
一、国外陶瓷纤维发展现状.....	6
二、我国陶瓷纤维发展现状.....	9
三、陶瓷纤维发展趋势	15
第三章 陶瓷纤维的性质	28
一、陶瓷纤维的化学矿物组成	28
二、陶瓷纤维的结构性质	35
三、陶瓷纤维的热学性质	37
四、陶瓷纤维的力学性质	58
五、陶瓷纤维的使用性质	61
第四章 玻璃质陶瓷纤维的受热结晶现象及性能变化	70
一、玻璃质陶瓷纤维的受热结晶现象	70
二、硅酸铝纤维析晶后的结构与性能变化	75
第五章 陶瓷纤维制品	83
一、陶瓷纤维棉	83
二、陶瓷纤维毯	87
三、陶瓷纤维毡.....	102
四、陶瓷纤维板.....	105
五、陶瓷纤维模块.....	109
六、陶瓷纤维纸.....	123
七、陶瓷纤维纺织品.....	127
八、陶瓷纤维浇注料.....	134

第六章 陶瓷纤维生产工艺和装备	137
第一节 陶瓷纤维棉、毯生产工艺和装备	137
一、电弧法喷吹成纤工艺和装备.....	137
二、电阻法喷吹（或甩丝）成纤、干法针刺制毯工艺和 装备.....	141
第二节 陶瓷纤维湿法制品生产工艺和装备	183
一、湿法真空成型工艺和装备.....	183
二、湿法模压成型工艺和装备.....	193
三、湿法卷毯机械化生产线工艺和装备.....	196
四、陶瓷纤维湿毡（毯）生产工艺和装备.....	199
第三节 陶瓷纤维纸生产工艺和装备	199
一、陶瓷纤维纸生产工艺流程.....	200
二、陶瓷纤维纸生产工艺和装备.....	200
第四节 陶瓷纤维干法树脂毡生产工艺和装备	219
一、陶瓷纤维干法树脂毡生产工艺流程.....	220
二、陶瓷纤维干法树脂毡生产工艺.....	220
三、陶瓷纤维干法树脂毡生产工艺装备.....	229
第五节 陶瓷纤维纺织品生产工艺和装备	230
一、陶瓷纤维纺织工艺特性.....	230
二、陶瓷纤维纺织制品工艺流程.....	234
三、陶瓷纤维纺织品生产工艺和装备.....	234
第六节 陶瓷纤维不定形材料生产工艺和装备	244
一、陶瓷纤维浇注料生产工艺和装备.....	244
二、陶瓷纤维涂抹料.....	263
三、陶瓷纤维喷涂料.....	264
第七节 多晶纤维生产工艺和装备	264
一、多晶氧化铝纤维生产工艺.....	266
二、多晶莫来石纤维生产工艺.....	271
三、多晶晶体纤维工艺装备.....	273
四、晶质氧化铝连续纤维生产工艺.....	278

第七章 陶瓷纤维高温绝热材料与节能	282
一、工业窑炉热工特性.....	282
二、节能与筑炉材料的更新.....	283
三、陶瓷纤维炉壁传热计算.....	286
第八章 陶瓷纤维高温绝热结构	299
一、陶瓷纤维炉壁结构设计内容.....	299
二、陶瓷纤维炉壁结构设计原始资料.....	299
三、工业窑炉壁衬材质选用原则.....	300
四、工业窑炉炉壁结构设计原则.....	305
五、陶瓷纤维高温绝热壁衬结构.....	307
第九章 陶瓷纤维在工业窑炉中的应用实例	348
一、陶瓷纤维在石化乙烯裂解炉中的应用.....	349
二、陶瓷纤维在冶金工业薄板坯连铸连轧辊底式均热炉中 的应用.....	355
三、陶瓷纤维在冶金工业带钢连续热镀锌退火炉中的 应用.....	362
四、陶瓷纤维在冶金、机械工业罩式炉中的应用.....	369
五、陶瓷纤维在冶金工业高炉热风炉系统中的应用.....	375
六、陶瓷纤维在冶金工业炼焦炉中的应用.....	378
七、陶瓷纤维在大型燃气全纤维热处理炉中的应用.....	382
八、陶瓷纤维在燃煤粉全纤维热处理炉中的应用.....	389
九、陶瓷纤维在冶金工业轧钢均热炉中的应用.....	394
第十章 耐火陶瓷纤维制品试验方法	398
第一节 耐火陶瓷纤维棉、毡、毡、编织物、板、纸、预制 成型制品试验方法.....	398
一、GB/T 17911.1—1999 耐火陶瓷纤维制品试样制备 方法.....	399
二、GB/T 17911.2—1999 耐火陶瓷纤维制品厚度试验 方法.....	400
三、GB/T 17911.3—1999 耐火陶瓷纤维制品体积密度	

试验方法	402
四、GB/T 17911.4—1999 耐火陶瓷纤维制品加热永久线 变化试验方法	403
五、GB/T 17911.5—1999 耐火陶瓷纤维制品抗拉强度 试验方法	406
六、GB/T 17911.6—1999 耐火陶瓷纤维制品渣球含量 试验方法	407
七、GB/T 17911.7—1999 耐火陶瓷纤维制品回弹性试验 方法	410
八、GB/T 17911.8—1999 耐火陶瓷纤维制品热导率试验 方法	412
第二节 陶瓷纤维不定形材料及板等制品力学性质试验方法	418
第三节 陶瓷纤维不定形材料线变化率试验方法	423
参考文献	428

第一章 陶瓷纤维概述及分类

一、陶瓷纤维概述

陶瓷纤维是一种纤维状轻质耐火材料，它具有重量轻、耐高温、热稳定性好、导热率低、比热容小及耐机械震动等优点。目前陶瓷纤维材料已在冶金、机械、石油、化工、电子、船舶、交通运输及轻工等工业部门得到广泛的应用，并用于宇航及原子能等尖端科学技术。世界主要工业发达国家都竞相发展陶瓷纤维工业，目前世界陶瓷纤维年总产量已突破 30 万吨。

陶瓷纤维，按其矿物组成为玻璃态纤维和多晶纤维两大类。

玻璃态纤维的生产采用“电阻法喷吹（或甩丝）成纤、干法针刺制毡”工艺。

多晶纤维的生产采用“胶体法喷吹（或甩丝）成纤、高温热处理”工艺。

与此同时，湿法真空成型技术、纤维织造技术、纤维喷涂技术及纤维不定形材料生产技术等的发展，使陶瓷纤维和陶瓷纤维二次制品的生产工艺和装备日益完善。并使纤维状轻质耐火材料产品构成了完整的系列，进一步扩大了陶瓷纤维的应用范围。陶瓷纤维的使用范围已由 1200℃ 以下开始扩大到 1200~1600℃ 的高温工业窑炉、加热装置及高温管道，并成为上述应用领域行之有效的节能材料。

二、陶瓷纤维的分类

陶瓷纤维的发展非常迅速，品种繁多，可以从不同的角度进行分类。

最常用的一种分类方法是根据其微观结构形态分为非晶质（玻璃态）纤维和结晶质纤维两大类。非晶质（玻璃态）物质，是物质由熔融的液态在骤冷条件下形成的一种无定形固态，具有以下特性。

① 玻璃态物质是各向同性的。结晶态物质除立方晶体外，为各向异性。

② 在热力学方面，玻璃态物质与结晶态物质比较，在化学组成相同时，前者具有较大内能，处于介稳态，可自发放热转变为晶体，以保持最低能量状态。

③ 在动力学方面，任何种类的玻璃态物质，在低于熔点的温度下保持足够长的时间都能形成晶体。只有在熔点以下迅速冷却，并具有较大黏度的过冷液态方能形成玻璃态物质。由于液态转变为固态的过程是连续的、可逆的，故称之为介稳态，并在一定条件下自发放热，从介稳态的高能玻璃态物质变为稳定的低能状态晶体。

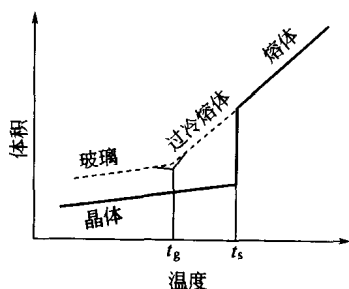


图 1.1 的实线表示热力学的平衡状态。如果温度达到 t_s ，不出现结晶，熔体体积沿着虚线表示平衡曲线收缩。在过冷熔体区仍处于热力学平衡状态，不过是介稳状态。

介稳状态的平衡曲线达到一定的温度时就出现弯曲，从这里起几乎与结晶的曲线平行。弯曲的原因是由于冷却时熔体黏度增大，黏度增大到一定值时，熔体冷凝成固体，此黏度相对应的温度称为转变温度 (t_g)。为此，从物理化学的意义上说，玻璃是凝固的过冷液体。

室温下纤维状玻璃态物质是极稳定的，并具有一定强度和弹性。但在受热时，由于黏度降低产生质点再排列过程，即玻璃态物质生成晶体的结晶过程。随着纤维析晶量增大、晶粒生长及由纤维接触处的“烧结”，造成纤维性能劣化，直至失去纤维结构。玻璃态纤维结晶过程中的晶粒生长速率，是决定纤维耐热性的关键。

一般以熔融法生产的纤维均属于非晶质（玻璃态）纤维，它们包括：

① 标准型硅酸铝纤维，使用温度 1000°C ；

- ② 高纯型硅酸铝纤维，使用温度 1100℃；
- ③ 高铝型硅酸铝纤维，使用温度 1200℃；
- ④ 含铬型硅酸铝纤维，使用温度 1200℃；
- ⑤ 含锆型硅酸铝纤维，使用温度 1300~1350℃。

非晶质（玻璃态）纤维最高使用温度小于 1300℃。这类纤维大多用于炉温小于 1250℃ 的工业窑炉壁衬材料。

玻璃态纤维受热条件下会自发析晶，向稳态晶体转化。由于结晶、晶粒长大，造成纤维性能劣化，从而使玻璃态纤维使用温度受到限制，一般不超过 1300℃。在此基础上发展了采用胶体法生产的晶体纤维，其微观结构为多晶的结晶形态，在 1000℃ 以上的长期受热过程中，收缩小，并仍能保持纤维结构稳定和优良的抗化学侵蚀性能。晶质纤维按其化学组成和主晶相不同，可以分为不同类型的晶质纤维。

晶质纤维与非晶质纤维均属 Al_2O_3 - SiO_2 系纤维，二者除微观结构不同外，还表现在化学组成中 Al_2O_3 含量的变化。图 1.2 表

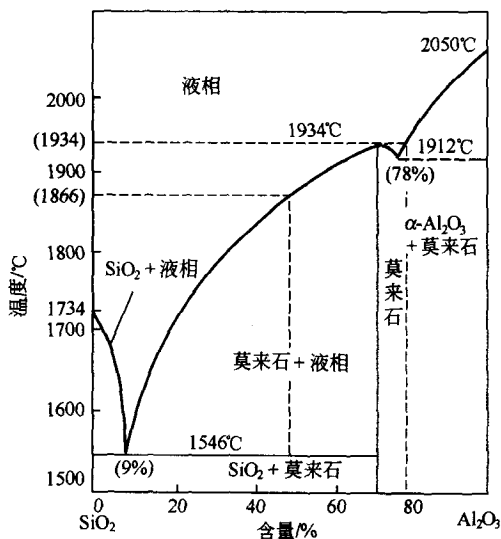


图 1.2 硅酸铝耐火纤维的 Al_2O_3 - SiO_2 相图

明，硅酸铝纤维的耐热性可以通过 Al_2O_3 含量的增加得到提高。随着 Al_2O_3 含量增加，液相线上升，但在 Al_2O_3 达 72% 以前，即使增加 Al_2O_3 含量，固相线始终水平，固相保持在 1546℃ 下，液相、固相区别不断扩大。当 Al_2O_3 含量超过 72% 时，固相线突然由 1546℃ 上升到 1912℃。由此表明， Al_2O_3 含量为 72% 及 72% 以上的纤维由固相变为液相的温度大大提高，从而使晶质纤维的使用温度较非晶质纤维使用温度提高 200℃ 以上。从图 1.2 中的两条虚线可以看出，当 Al_2O_3 含量由 50% 增加到 80% 时，由固-液相共存完全转变成液相时的温度仅提高 68℃，而完全转变成固相的温度却提高了 366℃，这也说明固液共存的温度范围大为缩小。可以认为， Al_2O_3 含量超过 72% 以后，纤维熔点提高比较大，而这正是晶体的一个特征。因此将 Al_2O_3 含量高达 72% 以上的氧化物纤维列入晶质纤维范畴。而这种氧化物纤维又是一种多晶氧化物纤维，它有别于单晶纤维及玻璃态纤维，它的晶粒小，在高温下晶相存在一系列复杂的转变。晶质纤维分类见表 1.1。

表 1.1 晶质纤维分类

品 名	分类温度 /℃	使用温度 /℃	Al_2O_3 含量 /%	主 晶 相	生产方法
多晶莫来石纤维	1600	≤1400	72~74	莫来石	胶体制制 胶、喷吹(纺 丝或甩丝) 成纤、高温 煅烧生成晶 质纤维
80% Al_2O_3 多晶 氧化铝纤维	1600	≤1500	80	莫来石, 少量 $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$	
95% Al_2O_3 多晶 氧化铝纤维	1600	≤1500	95	$\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、 少量 $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	
多晶氧化锆纤维	1600	1600	98 ($\text{ZrO}_2 +$ Y_2O_3)	六方晶体、 四方晶体	

如果按照使用温度来分类，陶瓷纤维分为 3 种：

- ① 低档陶瓷纤维，使用温度 800~1100℃；
- ② 中档陶瓷纤维，使用温度 1200~1300℃；

③ 高档陶瓷纤维，使用温度 1300~1500℃。

陶瓷纤维亦可根据材料的形态按表 1.2 分类。

表 1.2 陶瓷纤维按形态分类

类 别	特 征	举 例
散状陶瓷纤维	多孔、富有弹性、松散状隔热填充料	各类散状陶瓷纤维棉
定形陶瓷纤维	由散状纤维加工而成的多孔定形陶瓷纤维二次制品	陶瓷纤维毡、毡、板、纸、模块、异形制品、纺织制品
不定形陶瓷纤维	以散状纤维为骨料与黏结剂、添加剂配制成的多孔不定形陶瓷纤维制品	陶瓷纤维可塑料、浇注料、捣打料、喷涂料及涂抹料
混配(纺)陶瓷纤维	由晶质纤维与非晶质纤维按一定比例配制成的多孔定形陶瓷纤维制品	各种混配(纺)纤维制品

第二章 陶瓷纤维的发展现状及发展趋势

一、国外陶瓷纤维发展现状

陶瓷纤维最早出现于 1941 年, 美国巴布考克·维尔考克斯公司用天然高岭土经电弧炉熔融后喷吹成纤维。20 世纪 40 年代后期, 美国两家公司生产硅酸铝系纤维, 并首次将其用于航空工业。20 世纪 50 年代陶瓷纤维投入工业化生产, 60 年代研制出多种制品, 并用作工业窑炉壁衬。

1973 年, 出现能源危机后, 陶瓷纤维在世界范围内获得了迅速发展。其中尤以硅酸铝系纤维 ($45\% \sim 55\% \text{Al}_2\text{O}_3$) 发展最快, 每年以 $10\% \sim 15\%$ 的速度增长。北美 (美国和加拿大) 产量最高, 陶瓷纤维年产量 10 万吨左右, 占世界耐火纤维年总产量 $1/3$ 。欧洲次之, 年产陶瓷纤维 6 万吨左右。

在 30 万吨左右的年产量中, 各种陶瓷纤维制品的比例大致为:

散状纤维棉	15%	纤维绳、布等织品	6%
毡和纤维模块	45%	纤维纸	3%
真空成型板、毡及 异形制品	25%	纤维不定形材料	6%

各种陶瓷纤维制品平均价格 (折合德国马克计) 如表 2.1 所示。

表 2.1 各种陶瓷纤维制品平均价格 (马克/kg)

品种 制品 分类温度/℃	散状 纤维棉	纤维毡	纤维模块	真空成型 制品 (含 异型制品)	纤维 纺织品 (绳、布)	纤维纸
1260	5	9	11	15~30	30~40	20
1400	10	16	16	20~35	—	25
1600	100	120	125	—	400~600 (1500 型)	130

陶瓷纤维制品的应用范围主要是加工工业和热处理工业（工业窑炉、热处理设备及其他热工设备）。加工工业和热处理工业的陶瓷纤维消耗量占陶瓷纤维制品产量的 40%，其次是钢铁工业，其陶瓷纤维消耗量占陶瓷纤维制品产量的 25%。

国外在提高陶瓷纤维产量的同时，近年来更注意开发陶瓷纤维新品种。除 1000 型、1260 型、1400 型、1600 型及混配纤维等典型陶瓷纤维制品外，近年来在熔体的化学组分中引入 ZrO_2 、 Cr_2O_3 等成分，从而使陶瓷纤维制品的最高使用温度提高到 $1300^{\circ}C$ 。另外，还引入 CaO 、 MgO 等成分，开发、生产了多种新产品。

（1）可溶性纤维

这是以 SiO_2 、 MgO 、 CaO 为主要成分的碱土硅酸盐纤维。由于它在人体体液中具有一定的溶解性，减少了对人体健康的损害，故称之为可溶性纤维。由于 MgO 、 CaO 等成分的引入，有利于扩大成纤的黏度范围，改善成纤条件，提高了成纤率和纤维的柔软性。但由于 MgO 、 CaO 等成分的引入，生成 $CaO \cdot SiO_2$ 、 $CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$ 等低熔点化合物，造成纤维耐热性的降低。故一般可溶性纤维属于低档陶瓷纤维，其产品多用作工业窑炉背衬材料。为提高可溶性纤维的耐热性能，采用了引入 ZrO_2 成分的方法，以提高玻璃相黏度，抑制纤维受热结晶后晶粒生长速率，实现可溶性纤维耐热性能的提高。目前美国、英国、法国等国家都相继开发了此种产品，并作为商品投放市场。可溶性纤维的品种有散状纤维、针刺毯、湿法真空成型制品等。

（2）62%~75% Al_2O_3 高强纤维

这是一种 Al_2O_3 - SiO_2 - MgO 系玻璃态纤维。它突破了 Al_2O_3 含量大于 55% 的纤维不能用熔融法生产的禁区。其方法是在以 Al_2O_3 、 SiO_2 为主要成分的熔体中引入一定比例的 MgO 成分，实现提高熔融液黏度，降低熔融液表面张力，使之适合成纤要求。并且生产的纤维强度大，单丝纤维的抗拉强度平均达到 $2500MPa$ 以上。为 $1400^{\circ}C$ 级以上的高强度针刺毯、纤维纺织品生产提供优质高强度纤维。