

第五章 无机纤维

第一节 概述

无机纤维具有有机纤维所没有的优异性能，作为工业用纤维原料，已经在空间技术、电子元器件、新型发动机、新能源等领域中确立了重要的地位。近年来，随着高技术产业对材料性能要求的日益提高，各种具有高强、耐高温、轻质高性能无机纤维新材料不断涌现。特别是随着无机纤维/聚合物复合材料的快速发展，无机纤维更引起了人们的广泛关注。

由无机非金属材料加工得到的纤维，我们把它称为无机纤维。玻璃纤维是用量最大的无机纤维。1938年美国首先开发出了玻璃纤维，20世纪50年代后大量应用于复合材料增强材料。以玻璃纤维为增强体的复合材料在航空航天、化工设备、造船、汽车和电力等领域具有广泛的应用，现已形成一个独立的产业部门。陶瓷纤维具有高比强度、高比模量、低导热率和高耐热性，是航空、航天、国防军工领域使用的重要材料。本章主要介绍玻璃纤维和部分陶瓷纤维的制备、结构和性能。由于碳纤维是一种加工方法非常特殊的无机纤维，也是无机纤维中最重要的品种之一，本书将在其它章节作专门论述。

第二节 玻璃纤维

一、 玻璃纤维的发展历史

玻璃纤维是由熔融态玻璃制造的，分为：连续纤维和棉状纤维。古埃及人在石英沙和石灰石熔浆中快速拉出玻璃细丝，主要用于装饰陶瓷用品。1864年，G.Parry首次用吹喷法将高炉渣制成玻璃纤维，并用于隔热材料。1938年，美国欧文斯科宁公司首先发明了用铂坩锅连续拉制玻璃纤维和用蒸汽喷吹玻璃棉的工艺，标志着玻璃纤维工业的诞生。20世纪50年代，玻璃纤维进入高速发展时期。

二、 玻璃纤维的生产现状

在世界范围内玻璃纤维工业保持向上的发展趋势，玻璃纤维的产量分布见表5-1，美国和加拿大是最大的玻璃纤维生产国，欧洲是传统的玻璃纤维生产大国，这与美国、加拿大和欧洲航空航天工业和军工等产业的需求密切相关的。北美和欧洲不仅是玻璃纤维生产的大国，而且是玻璃纤维生产的强国，各种高性能玻璃纤维生产技术和专利都掌握在上述国家的几家大公司手中。亚洲是近年来玻璃纤维生产增长最快的地区，年增长率超过7%。美国2007年产量超过120万吨，预计中国大陆2010年的产量将达75万吨，中国台湾达到30万吨，我国已成为玻璃纤维第三生产大国。玻璃纤维的加工方法包括坩埚法和池窑法，池窑法的劳动生产率高，单位能耗低。国外普遍采用生产规模在1万到5万吨/年的池窑法生产工艺。国外厂家大量采用新技术、开发新产品，如：异形截面、卷曲、复合等

特种性能的新产品。我国在高附加值和高性能的玻璃纤维方面存在较大差距。

表 5-1 玻璃纤维产量分布

北美	欧洲	亚洲	其它
40%	20%	35%	5%

三、 玻璃纤维的结构性能

玻璃纤维是有硅酸盐的熔体制成，各种玻璃纤维的结构组成基本相同，都是由无规 SiO_2 组成。纯 SiO_2 ：共价键联结的晶体，熔点 1700°C 以上。加 CaCO_3 和 Na_2CO_3 可以降低熔融温度，所以玻璃纤维中含 Na_2O 和 CaO 等碱金属和碱土金属氧化物。 SiO_2 的构成了纤维骨架，其它氧化物位于骨架的空隙中，也有取代 SiO_2 位置。

2.3.1 外观和密度

玻璃纤维是个光滑的圆柱体，它的横截面几乎是完整的圆形。由于其表面光滑，故纤维间的抱合力小，也不利于与树脂的粘合，同时由于圆形截面，故一束纤维间填充就比较密实。玻璃纤维的单丝直径一般为 $3\text{--}10\ \mu\text{m}$ ，玻璃纤维增强塑料用的纤维多为 $13\ \mu\text{m}$ ，近来 $15\ \mu\text{m}$ ， $24\ \mu\text{m}$ 的单丝也在纤维缠绕、挤拉成型等方面应用。玻璃纤维密度为 $2.4\text{--}2.7\ \text{g/cm}^3$ ，比棉纤维($1.5\text{--}1.6\ \text{g/cm}^3$)、羊毛纤维($1.28\text{--}1.33\ \text{g/cm}^3$)、尼龙纤维($1.14\ \text{g/cm}^3$)等要大得多。

2.3.2 力学性能

(1) 拉伸强度

玻璃纤维力学性能的最大特点是拉伸强度高，直径 $3\text{--}9\ \mu\text{m}$ 的玻璃纤维其拉伸强度可高达 $1470\text{--}4800\ \text{MPa}$ ，远高于腈纶的 $490\text{--}680\ \text{MPa}$ 、人造纤维的 $340\text{--}440\ \text{MPa}$ ，与常规碳纤维的强度相当，但密度比碳纤维高。

(2) 弹性模量和延伸率

玻璃纤维的弹性模量约为 $7 \times 10^4\ \text{MPa}$ ($275.6\ \text{cN/dtex}$)，约与金属铝的弹性模量相当，只有普通钢弹性模量的三分之一。玻璃纤维的弹性模量与纤维直径大小无关，与表面磨损程度也无关，其主要取决于玻璃结构的本身，不同直径的玻璃纤维其弹性模量相同。玻璃纤维是一种弹性材料，应力-应变图基本上是一条直线，无明显的塑性变形阶段。由于玻璃纤维的分子结构中其硅氧键结合力较强，受力后不易引起错动，故其延伸率很低，一般只有 3% 左右；但与纤维的直径大小有关，如果当直径为 $9\text{--}10\ \mu\text{m}$ 时，其最大延伸率为 2% 左右，直径为 $5\ \mu\text{m}$ 时，其延伸率为 $3\%\text{--}3.5\%$ 左右，这较一般的天然纤维、合成纤维及金属材料的延伸率低得多，因而玻璃纤维仍表现出一定的脆性。

(3) 耐磨性和耐扭折性

玻璃纤维的耐磨和耐扭折性很差，摩擦和扭折很容易使纤维受伤断裂，这是玻璃纤维的一个很大缺点。表面吸附水分能加速纤维受摩擦和扭折时的微裂纹扩展，使耐磨性和耐扭折性降低。玻璃纤维的上述缺点给纤维加工带来了困难，为了提高耐磨和耐扭折性能，可以采用适当的表面处理方法。例如经 2% 阳离子活性剂水溶液处理后，玻璃纤维耐磨性比未处理的高 200 多倍。经 A-172 硅烷偶联剂适当处理，其耐扭折性能也可大幅度提高。

2.3.3 热性能

(1) 导热性

玻璃纤维的导热性非常小，在室温下，其热导率约为 $0.027 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。随着温度的提高，玻璃纤维的热导率也会有些变化，例如玻璃棉在 $200\text{--}300^\circ\text{C}$ 时，其热导率也不超过 $0.06\text{--}0.08 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。因此玻璃纤维是一种耐高温的隔热材料。

(2) 耐热性

玻璃纤维的耐热性较高，其线膨胀系数为 $4.8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ，比热容为 $0.795 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，软化温度为 $550\text{--}850^\circ\text{C}$ 。玻璃纤维的软化温度因玻璃成分而异，一般无碱玻璃的软化点约为 845°C ，中碱玻璃约为 764°C 。无碱纤维的使用温度可高达 $600\text{--}700^\circ\text{C}$ ，而有碱纤维则为 $500\text{--}550^\circ\text{C}$ ，当在无碱玻璃成分中加入 $10\%\text{--}15\%$ 的氧化锆、氧化钛或氧化铝后，可使该玻璃纤维的使用温度提高至 $700\text{--}800^\circ\text{C}$ 。在 30 s 内短期作用下，无碱玻璃纤维耐热性达 1000°C ，而石英和高硅氧纤维可高达 2000°C 。玻璃纤维是一种无机纤维，它本身不会引起燃烧。

玻璃纤维在较低的温度下受热，其性能虽变化不大，但会发生收缩现象，即使在 100°C 左右时也会有收缩倾向。因此在制造玻璃纤维增强塑料(玻璃钢)时，如果纤维与树脂粘结不良，就会由于加热和冷却的反复发生剥离现象，导致制品强度下降。

2.3.4 介电性能

玻璃纤维同玻璃一样，在外电场作用下，由于纤维内的离子产生迁移而导电。玻璃纤维的介电性能与其化学组成、环境的湿度和温度有关，碱金属离子(K^+ 、 Na^+)最易迁移而导电，因此玻璃纤维成分中这种碱金属含量越高，其介电性能越差。玻璃纤维及其织物的导电性属表面导电，在潮湿环境中玻璃纤维表面会吸附一层很薄的水膜，从而降低其表面电阻率。

石英纤维及高硅氧纤维具有良好的介电性能，室温下其电阻率为 $10^{16}\text{--}10^{17} \Omega\cdot\text{cm}$ ，当温度达 700°C 时其介电性能无变化，这在高温电绝缘应用方面具有重要意义。若在玻璃纤维的化学组成中加入大量的氧化铁、氧化铅、氧化铋或氧化钒，则会使纤维具有半导体性能。在玻璃纤维表面上涂以金属或石墨，则能获得导电的玻璃纤维。

2.3.5 光学性能

玻璃是优良的透光材料，但制成玻璃纤维及其织物后，其透光性能远不如玻璃。在一般情况下，玻璃布的反射系数与织纹特点、密度及厚度有关，平均约为 $40\%\text{--}70\%$ 。玻璃布的透射因数与织物的厚度及密度有关。因为玻璃纤维具有优良的光学性能，故可制作透明玻璃钢用于屋面采光材料，并可用作制造光导纤维管，它是现代通讯中的重要材料。

2.3.6 化学稳定性

玻璃纤维的化学稳定性与玻璃一样，取决于其化学组成、介质性质、温度和压力等条件。但玻璃纤维的比表面积比玻璃要大得多，故玻璃纤维的耐腐蚀性远不如玻璃那样好。

(1) 玻璃纤维的化学组成对其化学稳定性的影响

各种玻璃纤维化学成分中的主要成分是 SiO_2 ，其次是碱金属氧化物。其化学稳定性视二者含量而定，一般说来二氧化硅含量多则化学稳定性高，而碱金属氧化物多则化学稳定性降低。在玻璃纤维成分中，增加 SiO_2 或 Al_2O_3 含量，或加入 ZrO_2 及 TiO_2 都可提高其耐酸性能。在玻璃纤维的成分中提高 SiO_2 含量，或加入 CaO ， ZrO_2 及 ZnO 则可提高其耐碱性能。在玻璃纤维成分中加入 Al_2O_3 ，

ZrO₂, TiO₂ 等氧化物, 则可大大提高其耐水性能。

有碱玻璃纤维的耐水性很差, 这是由于其成分中含碱硅酸盐容易发生水解的缘故。如前所述, 玻璃纤维中碱金属氧化物含量越多, 对水、水蒸气及碱溶液作用的化学稳定性也越低, 一般成分中控制 Na₂O 含量不超过 12%--13%。

石英、高硅氧玻璃纤维对水及高压蒸汽的化学稳定性较好, 对任何浓度的有机酸或无机酸 (除氢氟酸和磷酸以外) 甚至在高温下仍很稳定, 在常温下氢氟酸就会破坏纤维, 而磷酸则在高于 300℃ 时才会破坏纤维。在碱性介质中上述纤维的化学稳定性较差, 但其破坏速度远比这些典型纤维要慢。

铝、硼硅酸盐有碱玻璃纤维对无机酸不稳定, 因为酸对纤维作用后可使大部分的组分溶解在酸中, 而余下的约占总数 50% 的二氧化硅骨架。因此, 这种纤维受无机酸侵蚀后强度会显著下降。

钠、钙硅酸盐玻璃纤维对水及碱不稳定。这是由于在水的侵蚀下, 纤维中的碱金属氧化物 M₂O 可以溶解在水中, 同时使其容易具有碱性, 这就会导致纤维和碱液的进一步作用, 引起其中 SiO₂ 和其他组分的溶解, 扩展其表面微裂纹, 使玻璃纤维强度明显下降。

(2) 温度对玻璃纤维化学稳定性的影响

温度对玻璃纤维化学稳定性有明显的影响。在 100℃ 以下时, 温度每升高 10℃, 玻璃纤维在水介质侵蚀下的破坏速度将增加 50%--150%; 温度在 100℃ 以上时, 破坏作用将更剧烈。

四、 玻璃纤维的分类:

按化学组成分类, 玻璃纤维可分为: 无碱玻璃纤维 (alkaline-free glass, E-glass), 中碱玻璃纤维 (medium alkaline glass, C-glass), 高碱玻璃纤维 (High alkaline glass, A-glass), 特种玻璃纤维。上述各种玻璃纤维的组成:

(1) 无碱玻璃纤维 (电绝缘玻璃 E 玻璃): R₂O 含量小于 0.8% 的铝硼硅酸盐玻璃, 90% 以上产量。SiO₂-Al₂O₃-CaO 三元体系, 以 B₂O₃ 为熔剂, 熔制温度 1580℃

(2) 中碱玻璃 (耐化学侵蚀玻璃 C 玻璃): 含 8.5%Na₂O 和 5% 的 B₂O₃。国内 12%Na₂O, 不含 B₂O₃, 熔制温度 1530℃。

(3) 高碱玻璃纤维 (A 玻璃): 含 Na₂O 和 K₂O 14% 以上, 不耐水, 耐酸。

(4) 特种玻璃又可以分为四类:

(A) 高强度玻璃纤维 (high strength glass) 又称 S 纤维。组成 SiO₂-Al₂O₃-MgO, 单丝强度: 4000N/mm², 弹性模量: 85 N/mm²

(B) 高模量玻璃纤维 (high modulus glass) 又称 M 纤维)。体系同上, 模量 95 N/mm²

(C) 高硅氧玻璃纤维 (high silica glass), SiO₂ 含量大于 96%, 可以短期耐温 1100℃, 长期耐温 900℃。

(D)耐碱玻璃 (AR 玻璃), Na₂O-ZrO₂-SiO₂, 耐碱性能好, 作为水泥增强材料。

各种玻璃组成见下表 5-2, 随着社会的发展和进步, 人们不断开发出具有特种功能的玻璃纤维。

表 5-2 常用玻璃纤维组成

组成 \ 玻璃类型	A	C*	C	D	E	S	AR
SiO ₂	72.5	67.5	65.0	73.0	54.5	60.0	71.0
Al ₂ O ₃	1.5	6.5	4.0	1.0	14.9	25.0	1.0
Fe ₂ O ₃	0.5	0.5	0.5	—	0.5	0.3	—
B ₂ O ₃	—	—	5.0	22.5	8.5	—	—
CaO	9.0	9.5	14.0	0.5	16.6	9.0	—
MgO	3.5	4.2	3.0	0.2	4.6	5.0	—
BaO	—	—	1.0	—	—	—	—
ZrO ₂	—	—	—	—	—	—	16.0
TiO ₂	—	—	—	—	—	0.2	—
Li ₂ O	—	—	—	—	—	—	1.0
K ₂ O	—	—	—	1.5	0.5	0.1	—
Na ₂ O	13.5	12.0	8.5	1.3		0.4	11.0

五、 玻璃纤维的制备

玻璃纤维的加工方法主要有坩埚法和池窑法两种，表 3 为两种加工方法的主要指标。由表可知，池窑法的劳动生产率高，单位能耗低，单机产量高。

表 3 两种加工方法的主要指标

指标	国内大中型企业		国外玻纤企业
	坩埚法	池窑法	池窑法
生产规模（吨/年）	1000~4000	7500~8000	10000~50000
漏板孔数（孔）	200~400	800~2000	800~6000
单机产量（kg）	110~300	570~1200	650~2200
单位能耗（吨标煤/吨纱）	2.5~3.0	1.5	≤1.0
劳动生产率（吨/人·年）	3~5	15~40	≥100

就纺丝方法而言，玻璃纤维又可以分为直接纺和间接纺，其加工原理和涤纶的直接纺和切片纺相似。直接纺通常是池窑法拉丝，以其自身的生产特点，直接用生产玻璃球的配合料作为原料熔融纺丝，其生产流程见图 5-1。

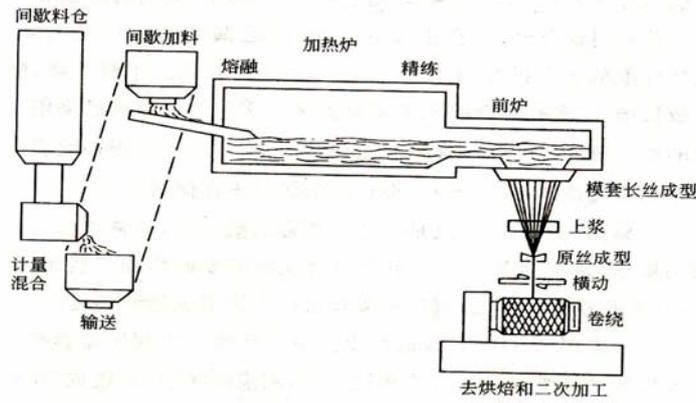


图 5-1 直接纺装置图

间接纺通常是坩埚法拉丝，即以坩埚法生产玻璃球，再以玻璃球为原料熔融纺丝，流程见图 5-2。

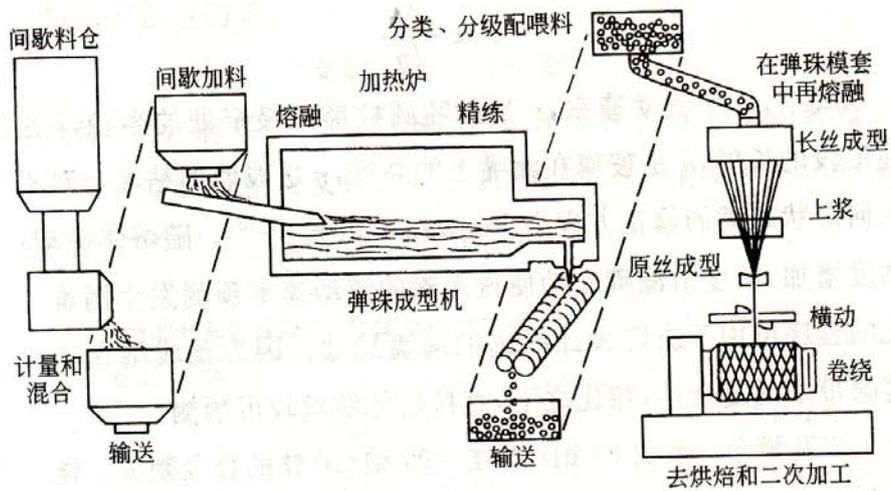


图 5-2 间接纺装置流程图

六、 玻璃纤维的主要应用

(1) 玻璃钢

以玻璃纤维为增强相的树脂基复合材料俗称玻璃钢。树脂基复合材料于 1932 年在美国出现。玻璃钢以其优良的耐腐蚀性、绝缘性、隔热性、减震性及简单的成型工艺而备受人们的青睐。迄今为止，玻璃纤维 70% 以上用于复合材料的增强体，玻璃钢产品 95% 以上使用玻璃纤维作为增强体。例如，玻璃钢比钢材质量轻、耐腐蚀，易成型、外表美观，适用于高速化的交通。日本渔船 80% 是玻璃钢制成的，通过对比，玻璃钢船比钢质船省油、易维修，还可增加 30% 的捕鱼量。另外，玻璃钢制品在建筑方面的应用也很广阔，包括水箱、冷却塔、卫生洁具和水处理设备，还有门窗框等。

(2) 纺织复合材料

以往的纺织复合材料的增强骨架多为纤维和机织物，近年来，由于针织工艺技术和设备的不断革新完善及新型纤维、纱线的不断涌现，使得针织物作为增强

材料的新工艺无论在性能上、质量上、还是成本上都显示出了很大的优势。鉴于纬编针织复合材料独特的性能，在许多领域均得到了广泛的应用。

在汽车工业领域，纬编针织物的成型性能和树脂传递模塑工艺(RTM)，特别适合汽车壳体的生产，不仅可以取代传统的金属材料，而且还具有良好的耐冲击性能。另外，该工艺亦能满足大批量生产的要求。在航天与航海领域，早在几十年前，就有学者研究用针织玻璃纤维/酚醛树脂复合材料取代金属制造亚音速或超音速火箭的前锥体。目前，飞行器的壳体，翼片和螺旋桨等均可采用纬编针织复合材料。形状复杂的产品与构件，利用全成型纬编针织技术，可以一次织造出无需裁剪与拼缝的三维增强结构，如 T 形三通、凸缘、管道、头盔和体育运动器材、汽车配件等。

(3) 电子级玻璃纤维制品

近几年来，由于集成电路的集成度迅速提高和组装技术的飞跃进步，给印制电路板从设计、材料、生产测试等带来了革命性的变化和进步。其技术核心是在密度上的大幅度提高，从而使印制电路板向精细导线技术、微小孔技术、薄型多层板和埋盲孔结构多样化等方向发展。玻璃纤维电子纱与电子布是电子工业的基础材料，而覆铜板是印制电路板的基础材料。覆铜板用电子级玻璃纤维所采用的玻璃成分均为铝硼硅酸盐类的 E-玻璃，即电绝缘玻璃。

介电常数是表示覆铜板电气特性的一项重要参数。目前传统的覆铜板用 E 玻璃纤维的介电常数为 5.8—6.3。国外为了提高印制电路板的信号传递速度，满足大型电子计算机的高速运算需要，研制成功多种低介电常数的玻璃纤维，其中 D 玻璃介电常数为 3.8—4.2，Q 玻璃的介电常数为 3.5—3.8，还有 S 及 T 玻璃，其介电常数为 4.5—5.2。另外还有一种高介电常数的 H 玻璃，其介电常数为 11.6，有利于制成小型化印制电路板。

覆铜板用电子级玻璃纤维布，其单纤维直径都是 9 微米，在池窑 800 孔滑板上双分拉，或在 1200 孔滑板上三分拉，采用插片加喷雾冷却、单丝涂油而制成。

总之，玻璃纤维是一种十分值得关注的新材料，具有良好的发展空间和市场前景，随着我国经济的发展和人民生活水平的提高和改善，我国玻璃纤维工业的发展前景是非常广阔的。

第三节 陶瓷纤维

一、陶瓷纤维概述

具有陶瓷化学组分的纤维称为陶瓷纤维。陶瓷纤维是先进复合材料高性能增强纤维的重要品种。陶瓷纤维是一种纤维状轻质耐火材料，具有重量轻、耐高温、热稳定性好、导热率低、比热小及耐机械震动等优点，因而在机械、冶金、化工、石油、交通运输、船舶、电子及轻工业部门都得到了广泛的应用，在航空航天及原子能等尖端科学技术部门的应用亦日益增多，发展前景十分看好。陶瓷纤维按组分分类可分为氧化物系和非氧化物系。氧化物系主要品种有氧化铝、氧化锆、氧化铍、氧化镁、氧化钛等纤维等；非氧化物系的主要品种有碳化硅、氮化硼、二硼化钛纤维、硼纤维及碳（石墨）纤维等。陶瓷纤维可广泛应用于增强金属、增韧陶瓷和强化树脂等。陶瓷纤维在我国起步较晚，但一直保持着持续发展的势头，我国已发展成为世界陶瓷纤维生产大国。

二、陶瓷纤维发展现状

1941年，美国巴布考克·维尔考克斯公司就利用天然高岭土经电弧炉熔融后喷吹成了陶瓷纤维。20世纪40年代后期，美国有两家公司生产硅酸铝系纤维，并第

一次将其用于航空工业。50年代，陶瓷纤维已正式投入工业化生产。60年代，已研制开发出多种陶瓷纤维制品，并开始用于工业窑炉的壁衬。1973年全球出现能源危机后，陶瓷纤维获得了迅速的发展，其中以硅酸铝系纤维发展最快，每年以10%--15%的速度增长。美国和加拿大是陶瓷纤维的生产大国，年产量达到了10万t左右，约占世界耐火纤维年总产量的1/3。欧洲的陶瓷纤维产量位于第三，年产量达到6万t左右。在年产30万t的陶瓷纤维中，各种制品的比例大致为:毯和纤维模块45%；真空成型板、毡及异形制品25%；散状纤维棉15%:纤维绳、布等织品6%；纤维不定形材料6%:纤维纸3%。

我国陶瓷纤维生产起步较晚，在20世纪70年代初期，才先后在北京耐火材料厂和上海耐火材料厂研制成功并投入批量生产。其后10余年主要以“电弧炉熔融、一次风喷吹成纤、湿法手工制毡”的工艺生产陶瓷纤维制品，工艺落后，产品单一。自1984年首钢公司耐火材料厂从美国CE公司引进电阻法甩丝成纤陶瓷纤维针刺毯生产线后；至1987年，又有河南陕县电器厂、广东高明硅酸铝纤维厂和贵阳耐火材料厂分别从美国BW公司和Ferro公司引进了3条不同规模、不同成纤方法的陶瓷纤维针刺毯生产线及真空成型技术，从此改变了我国陶瓷纤维生产工艺、生产设备落后和产品单一的面貌。自1986年开始，我国通过对引进的陶瓷纤维生产设备和工艺消化、吸收，并结合国情研制、设计建成了不同类型的电阻法甩丝(或喷吹)成纤干法针刺毯生产线82条，安装在45家企业内。年产量已达到10万t以上，成为世界最大的生产国。产品品种多样化：除批量生产低温型、标准型、高纯型、高铝型等多种陶瓷纤维针刺毯及超轻质树脂干法毡(板)外，还可生产14%--17%ZrO₂的纤维毯，其使用温度可达1300℃以上。20世纪80年代末期，日本直井机织公司及英特莱等机织品公司相继在北京投资建成了陶瓷纤维纺织品专业生产企业，并批量生产陶瓷纤维布、带、扭绳、套管、方盘根等陶瓷纤维纺织品，纤维织品生产所需的散状纤维棉及工艺装备均已实现了国产化。90年代初，北京、上海、辽宁鞍山、山东、河南三门峡等地先后从美国、法国、日本等国引进了陶瓷纤维的喷涂技术和设备;并在冶金、石化部门工业窑炉上应用了陶瓷纤维喷涂炉衬，节省了能耗，取得了良好的经济效益，现已得到了普遍推广，并在冶金、石化和机械等部门工业炉和加热装置中的应用取得了成功的经验。与陶瓷纤维喷涂技术同步发展的陶瓷纤维浇注料、可塑料、涂抹料等纤维不定形材料，不仅已建有国内生产企业，而且已在各类工业窑炉、加热装置和高温管道上推广应用。

三、陶瓷纤维的结构和性能

陶瓷是由两种或两种以上的元素组成，大部分陶瓷是金属和非金属化合物。原子间作用力是由纯离子键或全共价键或者离子键和共价键的共同组成。具体有什么价键取决于原子的电负性。虽然陶瓷材料的原子间作用力主要是来自原子，但晶体的结构取决于组分原子的电价；金属离子（或者阳离子）显正价，而非金属离子（阴离子）显负价。组分正负离子的电荷数和相对尺寸大小影响着晶体的结构。由于晶体要保持电中性，左右所有正离子的电荷数必须与所有负离子的电荷数相等。稳定的陶瓷晶体结构的配位数跟阳阴离子的半径比相关，表3为不同离子的半径。

表3 常见阴阳离子半径

阳离子	离子半径 (nm)	阴离子	离子半径 (nm)
Al ³⁺	0.053	Br ⁻	0.196
Ba ²⁺	0.136	Cl ⁻	0.181

Ca ²⁺	0.100	F ⁻	0.133
Cs ⁺	0.170	I ⁻	0.220
Fe ²⁺	0.077	O ²⁻	0.140
Fe ³⁺	0.069	S ²⁻	0.184
K ⁺	0.138		
Mg ²⁺	0.072		
Mn ²⁺	0.067		
Na ⁺	0.102		
Ni ²⁺	0.069		
Si ⁴⁺	0.040		
Ti ⁴⁺	0.061		

例如，当阳离子和阴离子的半径比为0.115-0.225之间时，阴阳离子的配位数为3。以石盐结构（NaCl）为例，阳阴离子半径比介于0.414和0.732之间，配位数为6，晶体结构是面心立方晶系，晶体结构相同的还有MgO，MnS，LiF和FeO。再比如萤石（CaF₂）型（见图5-3），阳阴离子半径比大约0.8，配位数为8，ZrO₂，UO₂，PuO₂和ThO₂具有相同的晶体结构。以上结构决定了其优异的性能：密度小（与金属相比），耐高温，热稳定性好，导热率低，比热容小，耐机械震动等。

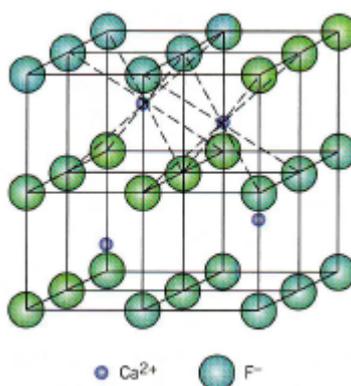


图5-3 配位数为8的萤石（CaF₂）结构

四、陶瓷纤维的制备

陶瓷纤维应用范围的扩大，促进了陶瓷纤维品种和陶瓷纤维制备工艺的发展。不同种类和性能的陶瓷纤维的制备方法也不尽相同，下面我们将介绍一些典型陶瓷纤维的制备方法。

（1）电弧法喷吹成纤工艺

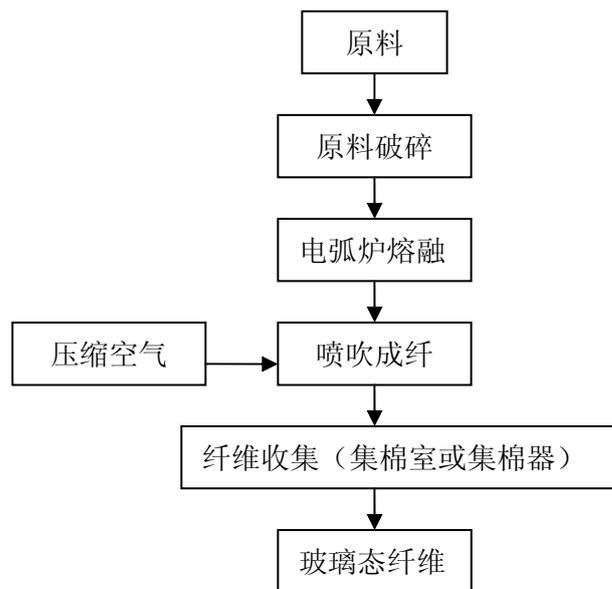


图5-4 电弧法喷吹成纤工艺

电弧法喷吹成纤工艺路线图见图5-4，电弧法喷吹成纤工艺仅能生产单一的普通硅酸铝非晶质纤维棉，硬质粘土熟料为其唯一的原料。

(2) 电阻法

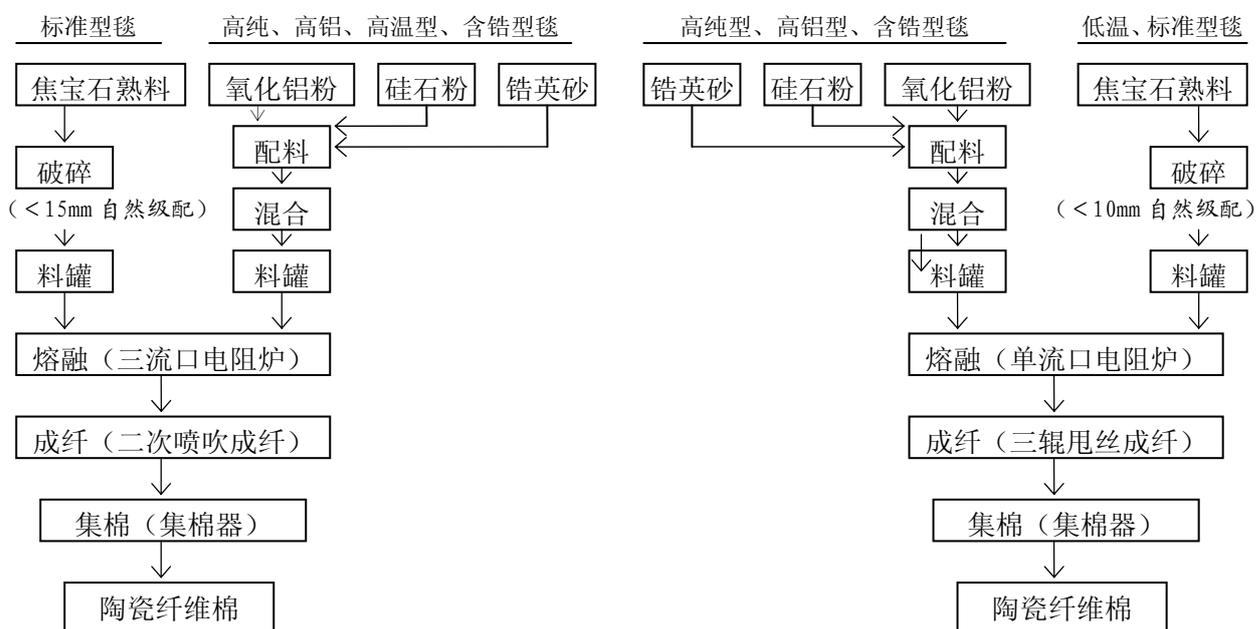


图5-5 电阻法喷吹和甩丝成纤工艺

电阻法喷吹和甩丝成纤工艺见图5，电阻法喷吹和甩丝成纤工艺不仅可以以天然硬质黏土熟料为原料制备低档标准型硅酸铝纤维，又能以工业氧化铝粉，硅石粉，锆英砂等粉料组成的合成料制备低档高纯硅酸铝纤维，中档高铝型，含锆型硅酸铝纤维。

(3) 胶体法

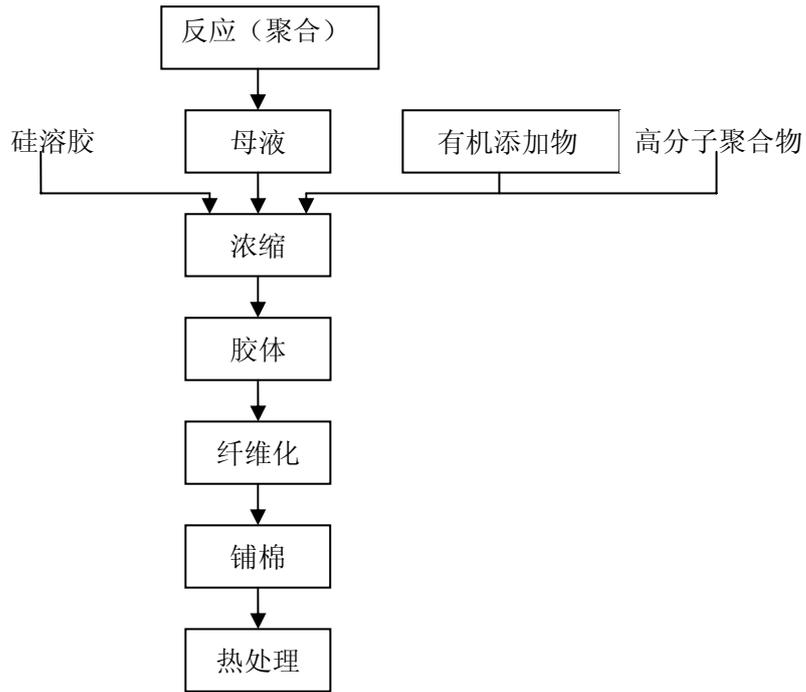


图5-6 胶体法制备工艺

胶体法亦称挤压法，其工艺流程见图5-6。美国3M公司开发的一种方法。在含有 HCOO^- 、 CH_2COO^- 等离子氧化铝凝胶中混入适量的硅溶胶和硼酸，浓缩成纺丝溶液，直接挤出成纤维，在 1000°C 以上于张力下烧成连续氧化铝纤维。

(4) 模板法

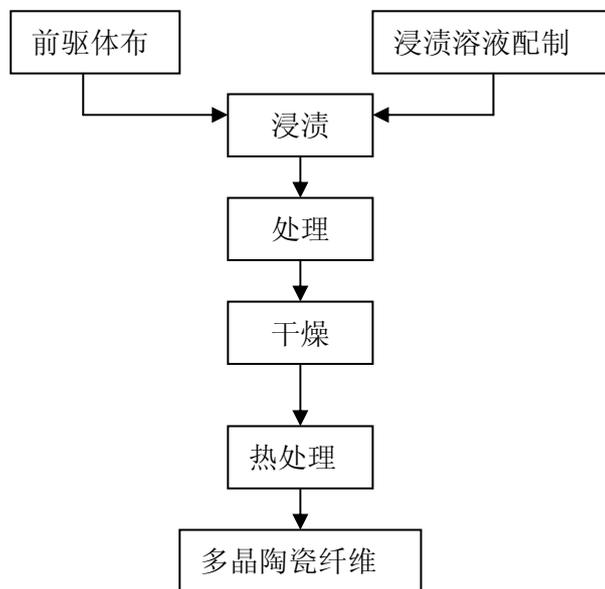


图5-7 浸渍法制备陶瓷纤维工艺

模板法（又称浸渍法，图5-7）制备陶瓷纤维工艺是一种非常有效的制备金属氧化物陶瓷纤维的制备方法。以有机纤维为模板，通过浸渍将金属离子浸入高分子的非晶区，经过热处理，将有机高分子除去，将金属离子烧结为金属氧化物陶瓷。该方法工艺简单，成型温度低。东华大学利用上述方法，制备了一系列氧化

物陶瓷纤维。所制备的氧化锆纤维布用作大功率镍氢电池隔膜，氧化钛布作为光催化材料，高纯氧化铝布作为隔热材料等。图5-8为所制氧化锆布，图5-9氧化锆布的SEM图。



图 5-8 模板法所制备的氧化锆布

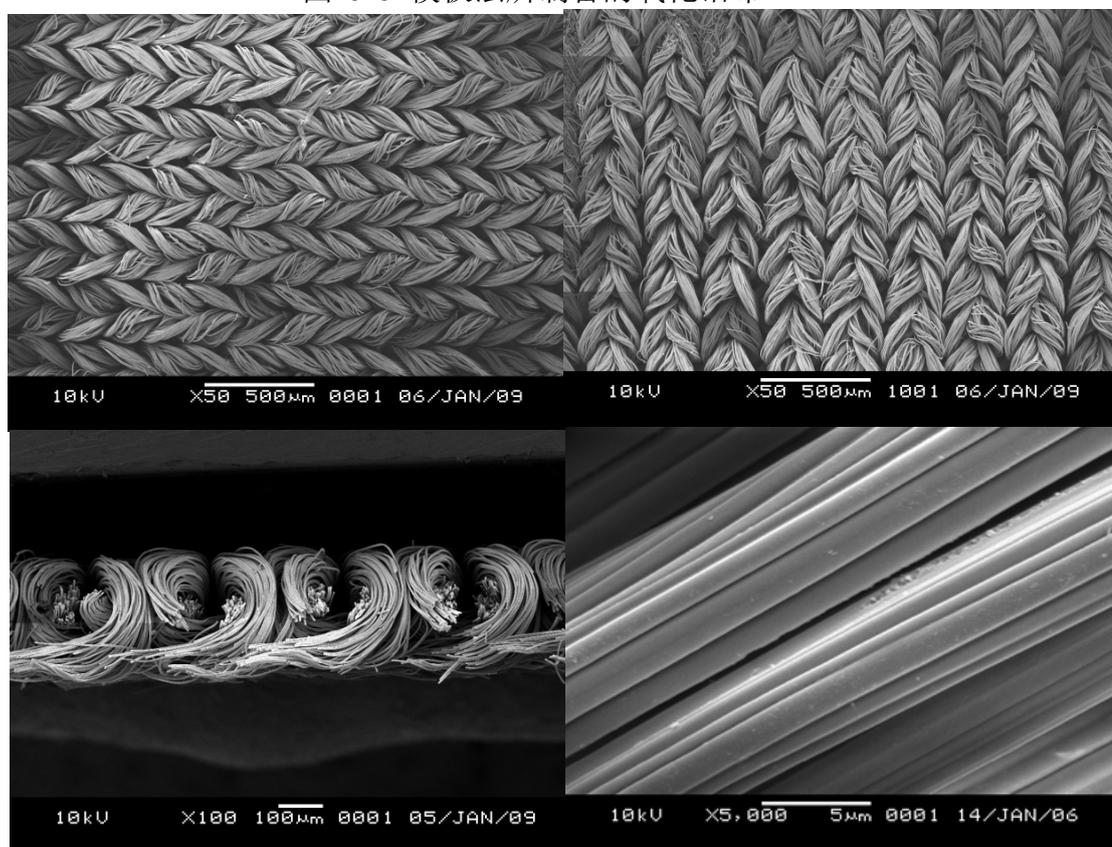


图 5-9 氧化锆布的 SEM 图。

五、典型的陶瓷纤维

1. 氧化铝纤维

氧化铝纤维是 Al_2O_3 多晶连续纤维。 Al_2O_3 纤维的种类有 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 连续纤维以及短纤维。除优异的力学性能，稳定的化学性质外，还有优越的热性能。多用于高温结构材料和高温绝缘滤波器材料。其应用前景广阔，尤其在航天航空领域，作为增强金属、陶瓷是最有希望的纤维品种之一。氧化铝纤维的主要成分为 Al_2O_3 ，有的还含有 SiO_2 和 B_2O_3 等成分，使用温度在 $1500\sim 1600^\circ\text{C}$ ，是新型超轻质高温耐火纤维材料，具有优异的高温力学性能、良好的抗化学侵蚀能力；与碳纤维和金属纤维相比，可以在更高温度下保持很好的拉伸强

度；热伸缩系数低，易制作尺寸稳定的产品；其表面活性好，易与金属和陶瓷基体复合；另外还具有热导率小，抗热震等优点。由于 Al_2O_3 的熔点高(约 2100°C)，且熔化后的粘度很低，用传统的熔融纺丝法无法制备氧化铝纤维。其生产工艺有淤浆法、溶胶-凝胶法、预聚合法、卜内门法、基体纤维浸渍溶液法等。1979年，美国DuPont公司利用淤浆法最早生产出含 Al_2O_3 99.9%、直径为 $20\mu\text{m}$ 、商品牌号为FP的氧化铝纤维。由于该纤维的断裂伸长率仅为0.29%，限制了其应用，最终退出了生产。目前已经商品化生产的连续氧化铝纤维有日本Mitsui Mining公司的Almax，日本Sumitomo公司的Altex和美国3M公司生产的Nextel系列产品。表5-4是美国3M公司利用溶胶-凝胶法生产的 Al_2O_3 基Nextel系列纤维的基本性能。

表5-4 氧化铝纤维的基本性能

性能	Nextel-312	Nextel-440	Nextel-550	Nextel-610	Nextel-720
化学组成%	62.5A 24.5B 13C	70A 28.5B 1.5C	73A 27B	>99A	85A 15B
熔点/ $^\circ\text{C}$	1800	1800	1800	2000	1800
单丝直径/ μm	10~12	10~12	10~12	10~12	10~12
密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	2.70	3.05	3.03	3.90	3.40
折射率	1.568	1.614	1.602	1.74	1.67
拉伸强度/GPa	1.7	2.0	2.0	3.1	2.1
拉伸模量/GPa	150	190	193	380	260
膨胀系数 $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}^{-1}$ (100~1100 $^\circ\text{C}$)	3.0	5.3	5.3	8.0	6.0
使用温度/ $^\circ\text{C}$	1200~1300	1430	1000	1000	1150

注：A. Al_2O_3 B. SiO_2 C. B_2O_3

1.1 氧化铝纤维的制备

(1) 熔融纺丝法。先将氧化铝在电弧炉或电阻炉中熔融，用压缩空气或高压水蒸气等喷吹熔融液流，使之呈长短、粗细不均的短纤维。后来发展成了TYCO法，即在氧化铝的熔融体中，放入钼制管，由于毛细现象，熔融 Al_2O_3 液恰好在毛细管尖端形成弯曲面，在尖端处放上 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的晶核，可连续拉伸得到单晶纤维；

(2) 淤浆法。杜邦公司开发的一种方法。该法是以氧化铝粉末为主要原料，同时加入分散剂、流变助剂、烧结助剂，分散于水中，制成可纺浆料，经挤出成纤，干燥、烧结得到直径在 $200\mu\text{m}$ 左右的氧化铝纤维。杜邦公司用此法生产FP氧化铝纤维，氧化铝含量为99.9%；日本Mitsui Mining公司也采用淤浆法制得了 Al_2O_3 ，含量在95%以上的连续氧化铝纤维。该法因浆料中所含水分及其它挥发物较多，在干燥和烧结过程中，易引起体积收缩过快而导致纤维破裂及晶粒生长太大而降低纤维强度。

(3) 无机盐法。将碱式乙酸铝等缔合的铝盐与聚氧化乙烯等水溶性高分子以及聚硅氧烷混合，配成适当稠度的胶体，再纺成纤维，在 1000°C 以上高温逐步烧结而成氧化铝纤维。

(4) 预烧结体法。日本住友化学公司开发的一种方法。先将烷基铝加水聚合成聚铝氧烷无机聚合物，溶解在甲苯中，再加入硅酸酯或有机硅化合物，混合成纺

丝液，用干法纺丝，再在600℃空气中裂解成氧化铝和氧化硅组成的无机纤维，而后在1000℃以上烧结成 γ -氧化铝连续纤维。

(5) 溶胶-凝胶法。一般以铝的醇盐或无机盐为原料，同时加入其它有机酸催化剂，溶于醇/水中，得到混合均匀的溶液，经醇解/水解和聚合反应得到溶胶，浓缩的溶胶达到一定粘度后进行纺丝，得到凝胶纤维，随后进行热处理得到氧化铝纤维。美国3M公司通过溶胶-凝胶法生产了Nextel系列的氧化铝陶瓷纤维。该法制备氧化铝纤维的均匀度高，可设计性强，产品多样化，但生产成本高。

I (6) 内门法。该法与溶胶-凝胶法不同之处是先驱体不形成均匀溶胶，而是通过加入水溶性有机高分子来控制纺丝粘度以得到氧化铝纤维。英国ICI公司采用卜内门法制备了Saffil氧化铝短纤维。由于先驱体分子本身并不形成类线性聚合物，难以得到连续的氧化铝长纤维，故其产品一般是短纤维的形式

有关氧化铝纤维的制造方法还有一些。已经开发出的氧化铝纤维不论是由单晶的 α - Al_2O_3 组成，还是多晶结构的 α 型或过渡形态的氧化铝纤维，它们的物理性能与制备方法有关。

1.2 氧化铝陶瓷纤维制品的应用

由于氧化铝纤维本身具有的高强度、高模量、耐高温、抗氧化性、耐腐蚀性和电绝缘性等多功能特性，使得其在一般工业领域与高科技领域得到了越来越广泛的应用，也使得其市场容量巨大。2005年多晶氧化铝纤维市场产销量在1.8万吨左右，其中耐火材料用多晶氧化铝纤维约0.8万吨左右，陶瓷制品用多晶氧化铝纤维约1.0万吨左右。据权威机构预测，市场对氧化铝纤维的需求量将平均每年按10%~15%的速度递增。

(1) 工业高温领域的应用

氧化铝短纤维具有突出的耐高温性能，主要用作绝热耐火材料，在冶金炉、陶瓷烧结炉或其它高温炉中作护身衬里的隔热材料。氧化铝纤维在高温炉中使用节能效果比一般的耐火砖或高温涂料好，节能量远大于散热损失量，其原因不仅是因为减少了散热损失，更主要的是强化了炉气对炉壁的对流传热，使炉壁能得到更多的热量，再通过辐射传给物料，从而提高了物料的加热速度和生产能力。并由于其密度小、绝热性好、热容量小，不仅可以减轻炉体质量，而且可以提高控温精度，节能效果显著。多晶氧化铝纤维在高档耐火材料领域及烘干烘烤等行业的市场潜力巨大，这主要是利用它超高的使用温度、优良的隔热保温性能、可明显提高燃烧效率及节约能源等特性。在这些领域，多晶氧化铝纤维的附加值相当高。

(2) 增强复合材料领域应用

由于氧化铝纤维与金属基体的浸润性良好，界面反应较小，其复合材料的力学性能、耐磨性、硬度均有提高，线胀系数降低。氧化铝纤维增强的金属基复合材料已在汽车活塞槽部件和旋转气体压缩机叶片中得到应用。又由于氧化铝纤维与树脂基体结合良好，比玻璃纤维的弹性大，比碳纤维的压缩强度高，所以氧化铝树脂复合材料正逐步在一些领域取代玻璃纤维和碳纤维。特别是在文体用品方面，可制成各种颜色的高强度钓鱼杆、高尔夫球、滑雪板、网球拍等。氧化铝长纤维增强金属基复合材料主要应用于高负荷的机械零件和高温高速旋转零件以及有轻量化要求的高功能构件，例如汽车连杆、传动杆、刹车片等零件及直升飞机的传动装置等。多晶氧化铝纤维在增强复合材料应用领域的典型例子是，将其用在汽车领域的活塞中。利用氧化铝纤维增强的铝基复合材料活塞具有高强

度和耐磨、耐热冲击能力及低的热膨胀系数等优良性能，有利于改善汽车发动机性能，提高发动机使用效率，减少废气排放量。我国汽车产业正处在高速增长期。中国汽车工业协会的统计数字显示，2005年，我国汽车产销量达到了540多万辆，据业内人士分析，中国汽车需求可保持20年、甚至更长时间的持续快速增长。如果只按目前汽车的产销量计算，每台汽车的所有活塞上只使用200元的纤维，则全年纤维在汽车活塞上的产值可达10亿元，这还不包括旧车维修及出口。

(3) 其它相关领域的应用

氧化铝纤维由于其良好的耐化学腐蚀性能，可用于环保和再循环技术领域。如焚烧电子废料的设备，历经多年运转，氧化铝纤维仍显示出其优良的抗腐蚀性能，也可用于汽车废气设备上作陶瓷整体衬，其特点是结构稳定。Saffil氧化铝纤维可用于铝合金活塞，它的优点是当温度上升时膨胀较小，比纯合金减少约25%，使活塞和汽缸之间吻合好，可节省燃料。莫来石纤维是氧化铝基纤维的主要品种，在结构上主要是以莫来石微晶相的形式存在。与一般氧化铝基纤维相比，莫来石纤维具有更好的耐高温性，使用温度在1500—1600℃，特别是高温抗蠕变性和抗热震性均有很大提高，是当今国内外最新型的超轻质高温耐热纤维。莫来石短纤维作为耐热材料，在航天工业上已得到重要应用。美国航天飞机已采用硼硅酸铝纤维来制造隔热瓦和柔性隔热材料。美国哥伦比亚号航天飞机隔热板衬垫用的是Saffil氧化铝纤维，当航天飞机由太空返回大气层时，由于Saffil氧化铝纤维能经受1600℃的高温，这种衬垫会防止热通过隔热板之间的间隙进入防热罩内。莫来石纤维与陶瓷基体界面热膨胀率和导热率非常接近，莫来石纤维的加入可以提高陶瓷基体的韧性、增加冲击强度，在耐热复合材料的开发中发展很快。采用连续莫来石纤维增强的金属基与陶瓷基复合材料，可用于超音速飞机，也可制造液体火箭发动机的喷管和垫圈，能在2200℃以上使用。

2. 碳化硅纤维

碳化硅纤维是典型的陶瓷纤维，在形态上有晶须和连续纤维两种。60年代中期，General Technologies公司首先制成了钨芯碳化硅连续纤维。1972年美国AVCO公司制备出大直径碳单丝后，又开发出性能更好、成本更低的碳芯碳化硅连续纤维。1975年日本东北大学矢岛圣用有机硅聚合物——聚碳硅烷作为先驱体，将它纺成纤维后经低温交联处理，再经高温裂解制得高性能β碳化硅纤维。日本碳公司于1983年底完成连续碳化硅纤维批量生产，是目前烧结法碳化硅纤维的重要生产厂家。1984年，日本宇部兴产公司在矢岛圣的基础上，以低分子硅烷化合物与钛系化合物为原料合成的有机金属聚合物作为先驱体，经纺丝和先驱体烧结，制成性能非常优越的含钛碳化硅纤维“Tyranno”。

2.1 碳化硅纤维的制备方法：

(1) 化学气相沉积法

生产原理：通过甲基氯硅烷（如：甲基三氯硅烷）类化合物气体与氢气混合，在一定温度下发生化学反应，生成的SiC微晶沉积在细钨丝或碳纤维等基体上，再经过热处理从而获得含有芯材的复合SiC纤维。

反应机理：化学气相沉积是使化合物以气态形式同被处理的部件接触，在一定条件下，气相中的化合物发生热解或彼此间发生化学反应，反应物以固态形式沉积在被涂件表面上成为涂层。

最基本的化学气相沉积装置包括2个加热区域：

第一个区域温度较低，维持涂层材料源蒸发并保持其蒸汽压不变；

第二个区域是高温区，使气体中的化合物发生分解和反应，载流气体携带材料源蒸汽从蒸发区进入反应区。

基体是指沉积物附着的固体，其材料要求能在耐沉积温度，不和气态物反应，沉积物厚度较小时能附在基体上，作为基体的涂层，这时要求沉积物和基体有着良好的附着力，而当沉积物厚度较大时，作为独立的部分能从基体剥离，这时可以选择比沉积物的膨胀系数大的材料作基体。

(2)有机合成物烧结法

先驱体转化法是以有机聚合物(一般为有机金属聚合物)为先驱体，利用其可溶可熔等特性成型后，经高温热分解处理，使之从有机化合物转变为无机陶瓷材料的方法。典型的工艺路线见图5-10。

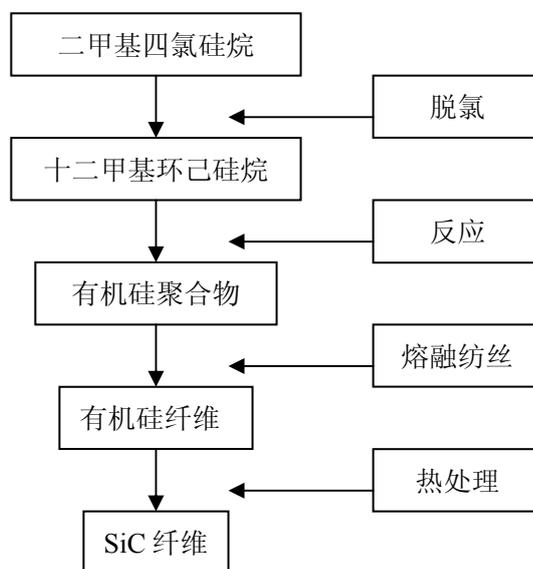


图5-10 SiC纤维制备工艺图

由于先驱体法制备的连续SiC纤维比CVD法的制备成本低、生产效率高，更适用于工业化生产，因此先驱体法制得的SiC纤维正逐渐成为研究与应用的主流。先驱体聚合物的性质对纤维的性能有着重要的影响。好的先驱体应具有以下一些特点：流变性好，具有一定的活性基团，裂解后基本无杂质，陶瓷产率和密度较高，具有裂解产物微观结构的可控性和可选择性。

(3)活性炭纤维转化法

利用气态的二氧化硅与多孔活性炭纤维反应便转化生成了SiC纤维。

2.2 碳化硅纤维的性能

由于碳化硅纤维是由均匀分散的微晶组成，内聚力极大，应力能沿着致密的粒子界面消散，因此纤维的抗拉强度和拉伸模量大，用先驱体法制得的纤维抗张强度2.5GPa，模量200GPa，而用CVD法纤维的，抗张强度3.4GPa，模量400GPa。目前，Nippon carbon公司生产的Nicalon碳化硅纤维主要有3个品种(表5)，其主要区别在于Nicalon NL-200在不融化处理中采用空气热氧化产生Si—O—Si交联，纤维中含有较多的氧，在1300℃的高温下，纤维中的氧易与游离的碳发生反应形成一氧化碳而脱离，致使纤维结构产生缺陷而导致高温下的性能下降。Hi-Nicalon纤维在不融化处理中采用氦气为保护气，使用10~15MGy的电子束照射，从而

使其耐热温度由NicalonNL-200的1 200℃提高到1 500℃。该纤维由SiC微晶和无定形碳组成，氧含量仅为0.5%，具有比Nicalon NL-200更高的拉伸模量、抗蠕变能力和热稳定性。Hi-Nicalon Type S高晶化SiC纤维采用氢气处理经电子束照射的碳化硅不熔纤维，使纤维中过剩的碳与氢反应而除去，使得纤维中C / Si的原子比接近1，在纤维强度下降不大的前提下，大大提高了纤维的密度和拉伸模量，同时纤维的抗氧化和抗蠕变能力亦大大增强。由于该纤维的表面有一碳层，所以其电阻率比其它两种要低得多。

表5-5 SiC纤维的性能

性能	Nicalon NL-200	Hi-Nicalon	Hi-Nicalon type S
单丝直径/ μm	14	14	12
单丝根数（每股纱）	500	500	500
线密度（1000m）/g	210	200	180
拉伸强度/GPa	3.0	2.8	2.6
拉伸模量/GPa	220	270	420
断裂伸长率%	1.4	1.0	0.6
密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	2.55	2.74	3.10
比电阻/ $\Omega\cdot\text{cm}$	$10^3\sim 10^4$	1.4	0.1
化学组成%			
Si	56.6	62.4	68.9
C	31.7	31.7	30.9
O	11.7	0.5	0.2
C/Si(原子比)	1.31	1.39	1.05

2.3 SiC 纤维的应用

SiC由于其优异的性能，在耐热材料和复合材料方面有重要的应用。一般SiC纤维可以在1000℃下长期使用，1200℃下短期使用，优异的耐热性，使得SiC纤维成为航空航天等领域的关键耐热材料（如表5-6）。

表5-6 SiC纤维在耐热方面的应用

分类	用途		使用形态
	应用领域	具体用途	
耐热材料	● 连续热处理炉	网状带	布
	● 输送高温物质用	传送带	布
	● 金属的精炼、压延铸型、焊接作业	耐热帘、金属溶液过滤器、隔热材料	布、绳、网
	● 环境保护（排烟中的脱尘、脱硫、脱NO ₂ 装置）	衬垫、过滤器、袋式除尘器	毡、布
	● 化学工业、原子能	过滤器	毡、布
	● 汽车工业（排气处理）	催化剂载体	毡、布
	● 燃烧器械	喷灯嘴	毡、布
	● 宇航	航天飞机柔性防热材料	毡、布
	● 检测元件	红外敏感元件	毡、布

美国宇航局(NASA)将Nicalon纤维的织布用作航天飞机外壁隔热瓦的耐热密封材料。采用这种材料替代别的耐热材料,有效地解决了航天飞机再入大气层时受热膨胀使隔热瓦剥离的问题,达到了预期的目的。

SiC纤维由于优异的力学特性及与聚合物基体、金属基体、陶瓷基体的良好相容性,作为高性能增强纤维在复合材料中有重要的应用。各发达国家均进行了大量的研究,有许多研究结果发表。Nicalon纤维增强金属迄今都将重点放在增强铝上,其理由是Nicalon纤维与Al的比重最接近,能较容易地制造稳定的复合材料,对Mg、Cu、Pb、Ti等金属也在进行研究,在制造方法上,使SiC纤维通过熔融铝液由液相浸渍法首先制得SiC / Al预制丝(复合丝),再用预制丝铺层热压而得到复合材料板材,日本碳公司、中国国防科大均由此法制得了SiC纤维增强Al复合材料。Nicalon增强铝基复合材料的特性如表6-7所示。研究表明,即使纤维体积含量为30%的Al基复合材料,其弯曲强度仍为超硬铝的1.8倍,拉伸强度为超硬铝的1.3倍。作为结构材料用至少减重40%,而且在400℃以下材料的强度降低幅度不大,而特超硬铝随温度升高,强度明显下降,在200℃时是常温强度的1/5以下。实际上Nicalon / Al—Ni合金复合材料直到400℃其抗拉强度仍未下降。由热压铸造的方法制得的铝基复合材料可以制作飞机、小汽车部件、普通机械零件及体育用品等。例如用浇铸的方法已制得铝基复合材料汽车连杆。Nicalon纤维增强Al基复合材料很有希望用作飞机结构材料。目前用钛制作的某些构件可以用纤维增强铝复合材料构件来代替,使机体轻量化,降低燃料消耗。当马赫数为2.5,发动机、机翼以及起落架机体表面温度升高达210℃时,无法应用铝合金必须采用钛合金,增加了重量(Ti的比重是4.5,超硬铝是2.7),因此在100~300℃使用钛合金的部位改用Nicalon / Al复合材料,除减重外,还可耐热。

法国的研究者用Nicalon SiC纤维及其编织物增强Nasicon[Na_{1+x}Zr₂SiP_{2-x}(0<x<3)]作微波吸收材料,该材料轻质高强,耐热性好,是一种很有前途的吸波材料。英国航天工业局(AEA)将40vol%的连续SiC纤维增强陶瓷基复合材料用于新型航天飞行器获得成功,该材料用热压或热等静压成型,既轻又坚固,能承受强大的空气动力压力,还能经受航天器重返大气层时的极高温度,能满足航天器的严格要求,且成本低廉,使用方便,是钛合金和镍基耐热合金的理想替代物。美国德克斯特朗特种材料公司生产的SiC/Si₃N₄陶瓷材料在1370℃时抗拉强度超过276MPa,用于火箭发动机航天飞机等的隔热瓦等。法国“幻影”2000战斗机的M53发动机鱼鳞板内侧也采用了SiC/Si₃N₄陶瓷基复合材料。

SiC纤维增强聚合物复合材料的研究也取得了较大进展。Nicalon单向增强环氧树脂复合材料特性见表5-7。与碳纤维FRP(纤维增强聚合物)相比Nicalon FRP具有较高的压缩强度、较高的冲击强度和优异的耐磨损性。

表5-7 SiC/Al单向增强复合材料的特性

拉伸模量(0°方向)	100~110GPa
拉伸强度(0°方向)	800~900MPa
拉伸强度(90°方向)	70~80MPa
弯曲强度(三点弯曲)	1000~1100MPa

弯曲疲劳强度 (10 ⁷ 循环)	400MPa
热膨胀系数 (0°方向)	3.2×10 ⁻⁶ /°C
热膨胀系数 (90°方向)	25×10 ⁻⁶ /°C
密度	2.6g/cm ³
泊松比	0.18

注: V=35%

表5-8 SiC/环氧树脂复合词材料特性

	Nicalon	碳纤维CaoBlon2
抗拉强度, MPa	1810	1670
拉伸模量, GPa	127	142
弯曲强度, MPa	2060	1760
弯曲模量, GPa	103	124
压缩强度, MPa	1760	1180
ILLSS, MPa	98	98
缺口冲击强度, J/cm ²	26	14
热膨胀系数, ×10 ⁻⁶ /°C	2.6	0.5
密度, kg/m ³	2000	1600

4. 结束语

无机纤维是高技术纤维中的重要品种, 在国际上已取得长足进步, 形成了包括玻璃纤维、氧化铝纤维等对国民经济起重要作用的产业。以 SiC、ZrO₂ 等纤维为代表的高性能纤维在民用、军用方面的开发应用前景非常广阔。

主要参考文献:

- [1] 孙晋良, 吕伟元, 纤维新材料, 上海大学出版社, 2007。
- [2] 张耀明, 李巨白, 姜启中, 玻璃纤维与矿物棉全书, 化学工业出版社, 2001。
- [3] 姜肇中, 关于我国玻纤工业发展的讨论, 玻璃纤维, 2003(5), 10-14。
- [4] 杨景富, 税永红, 玻璃纤维及其应用, 四川纺织科技, 1996(2), 9-16。
- [5] 毕鸿章, 高硅氧玻璃纤维及其应用, 高科技纤维与应用, 2003, 28(4), 36-39。
- [6] 吴建玲, 国产 S 玻璃纤及其应用前景, 高科技纤维与应用, 2003, 28(3), 28-31。
- [7] 王善元, 张汝光, 纤维增强复合材料, 中国纺织大学出版社, 1998。
- [8] 冯春祥, 范小林, 21 世纪高性能纤维的发展前景及其挑战: I 硅化物陶瓷纤维, 高科技纤维与应用, 1999, 24, (4), 1-8。
- [9] 冯春祥, 范小林, 21 世纪高性能纤维的发展前景及其挑战: II 含铝氧化物陶瓷纤维, 高科技纤维与应用, 1999, 24(6), 17-21。
- [10] 阳永显, 浅谈陶瓷纤维及其应用, 纺织导报, 2000(2), 10-12。
- [11] 赵家祥, 碳化硅纤维及其复合材料, 高科技纤维与应用, 2002, 27(4), 1-6,

34。

- [12] 薛金根等, 碳化硅纤维制备技术研究进展, 合成纤维工业, 2001, 24(3), 41-44。
- [13] 冯春祥, 薛金根等, SiC 纤维研究进展, 高科技纤维与应用, 2003, 28(1), 15-19。
- [14] 永良, 金属纤维的性能特点及其产品开发, 棉纺织技术, 2003, 31(5), 28-31。
- [15] 贾成厂, 陶瓷基复合材料导, 冶金工业出版社, 2002。
- [16] 李湘洲, 陶瓷纤维的发展现状与趋势, 佛山陶瓷, 2005, 7, 1-4。
- [17] 张定金, 高耐热性能氧化锆纤维及其在航天工业中的应用, 工业陶瓷, 1992, 1, 2-8。
- [18] 崔之开, 陶瓷纤维, 化学工业出版社, 2004。
- [19] 王涛平, 刘涛, 氧化物陶瓷纤维的制备及应用, 矿冶工程, 2004, 24, 72-76。
- [20] 李泉, 宋慎泰, 氧化铝基连续陶瓷纤维的制备过程, 科学技术与工程, 2005, 5(16), 1137-1139。
- [21] Wislon D M, Statistical tensile strength of Nextel 610 and Nextel 720 fibres, Journal of Materials Science (Anglais), 1997, 32, 2535-2542。
- [22] 王玲, 超高温绝热氧化锆纤维毡的烧成控制, 现代技术陶瓷, 1996(2), 38-41。
- [23] Hamling B H, Metal Oxide Fabrics, US Patent 3663182, 1972。
- [24] 胡利明, 陈虹, 马峻峰, 吴建峰, 氧化锆纤维布的研究, 硅酸盐通报, 2002, 1, 21-24。
- [25] 刘久荣, 溶胶-凝胶法制备高强度 ZrO_2 连续纤维的探索与研究, 山东大学硕士学位论文, 2001。
- [26] 陈小军, 模板法制备陶瓷织物及其结构性能研究, 东华大学博士学位论文, 2009。
- [27] 李广战, 周峰, 王强, 孟春玲, 氧化铝质陶瓷纤维的制备方法与应用, 现代技术陶瓷, 2007, 2, 32-35。
- [28] 汪多仁, 碳化硅纤维的开发与应用进展, 高科技纤维与应用, 2004, 29, 43-45。
- [29] 冯春祥, 王应德, 邹治春, 宋永才, 连续SiC纤维应用概况, 材料导报, 1997, 11, 64-66, 59。