

钛酸钾晶须在复合材料中的应用

冯 新 吕家桢 陆小华 暴宁钟 陈栋梁

(南京化工大学 化工系, 南京 210009)

摘 要 钛酸钾晶须 ($K_2O \cdot nTiO_2$) 是一种高性能、多用途的合成纤维。本文中综述了其特性、制备及应用。着重介绍了在复合材料中的应用现状、尚需研究之处以及发展前景。钛酸钾晶须的低成本制造、高性能化表面处理和低损伤加工工艺是今后研究的重点。

关键词 钛酸钾, 晶须, 复合材料

中图分类号 TB 332

在已合成的近百种晶须中, 投入工业化生产的仅 SiC、Si₃N₄、TN、Al₂O₃、钛酸钾、莫来石等少数几种^[1,2]。其重要原因是晶须昂贵的价格限制了其规模化应用。近年来钛酸钾晶须在制造成本上取得了较大突破, 加之其性能十分优异而愈来愈受到关注^[3-5], 例如, 日本 1992 年晶须总产量为 3500 吨, 其中钛酸钾晶须占了 2700 吨, 约四分之三强^[6]。目前, 钛酸钾晶须的应用已覆盖复合材料增强剂、摩擦材料、高温隔热材料、绝缘材料、触媒载体等众多领域。

1 钛酸钾晶须的性质特点

钛酸钾晶须最初作为航天用高温隔热材料由美国杜邦公司于 1958 年开发出来^[5]。通常用 $K_2O \cdot nTiO_2$ 表示其组成, $n=1, 2, 4, 6, 8$, 它们在结构和性能上差异显著^[3]。其中以 $n=4, 6$, 即四钛酸钾和六钛酸钾晶须的实用价值最大, 四钛酸钾具有很好的化学活性; 六钛酸钾具有优良的力学和物理性能, 稳定的化学性质, 优异的耐腐蚀性, 耐热隔热性, 耐磨性, 润滑性, 高的电气绝缘性, 还具有红外反射率高, 高温下导热系数极低, 硬度低的特点, 其特性见表 1、表 2。

表 1 钛酸钾晶须的特性^[7]

Table 1 The characteristics and properties of potassium titanate whiskers

化学组成	$K_2O \cdot 6TiO_2$	莫氏硬度	4
颜色形状	白色针状	介电常数	$\epsilon = 3.5 \sim 3.7 \quad \tan \delta = 0.06 \sim 0.09$
pH (水中分散)	7~9	电阻率/cm·Ω	$3.3 \times 10^{15} (25^\circ C)$
真密度/g·cm ⁻³	3.28~5.53	耐碱性	30% 碱中沸点下稳定
松密度/g·cm ⁻³	0.1~0.3	耐酸性	10% 酸中室温下稳定
尺寸/μm	直径: 0.8~1.2 长度: 30~50	亲和性(水)	良好
比表面积/m ² ·g ⁻¹ ^[8]	11	亲和性(苯)	一般
热膨胀系数/· ⁻¹ ^[3]	6.8×10^{-6}	径口毒性(rat, mg·kg ⁻¹)	LD ₅₀ : 5000
比热/kJ·(kg·°C) ⁻¹	0.92	红外线透射率 ^[9]	8.4% (厚度 0.25mm)
热传导率/	$5.34 \times 10^{-3} (25^\circ C)$	(波长 0.9~2.4μm, 使用	5.3% (厚度 0.45mm)
kJ·(m·s·°C) ⁻¹ ^[8]	$1.74 \times 10^{-3} (760^\circ C)$	钛酸钾纤维纸)	3.4% (厚度 1.73mm)

表 2 还列出了一些常用复合材料增强纤维的性能和参考价格。不难看出, 钛酸钾晶须的强度远超出常用的玻璃纤维、碳纤维、凯夫拉纤维等。与一些高级增强纤维相比, 其性能稍逊色, 但价格仅为它们的 1/10~ 1/100。

表 2 钛酸钾晶须与其它晶须性能及价格的比较^[6, 10]

Table 2 Comparison of properties and prices of potassium titanate whiskers with other whiskers

几种典型增强纤维	熔点或软化点/	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	抗张强度/GPa	弹性模量/GPa	价格/万美元·吨 ⁻¹
氧化铝($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)	2040	3.95	21	434	
氧化铍(BeO)	2570	2.85	13	350	
碳化硼(B_4C)	2450	2.52	14	490	10~ 100
碳化硅(SiC)	2690	3.18	21	490	
氮化硅(Si_3N_4)	1900	3.18	14	385	
凯夫拉 ^[3]	500	1.45	4	59~ 134	2.5~ 4
碳纤维 ^[3]	450	1.74	3.1	230	2~ 4
玻璃纤维 ^[3]	750	2.60	2.7	70	0.1~ 0.2
钛酸钾	1300	3.30	7	280	1~ 1.5

2 钛酸钾晶须的合成方法

钛酸钾晶须常用的合成方法有烧结法、熔融法、水热法、助熔剂法和慢冷烧结法等, 专家认为慢冷烧结法更适用于工业化生产^[3, 11]。表 3 为各种方法的对比。

表 3 各种钛酸钾晶须合成方法之对比

Table 3 Comparison of synthesis methods of potassium titanate whiskers

方法	原料	反应条件/	生产工艺中的特点	优点	缺点	采用的公司
烧结法	K_2CO_3 + TlO_2	600~ 1200	为提高收率可加少量 KCl	收率高, 适合规模化生产	结晶性不好, 纤维短(几微米)	
KDC 法(改造烧结法)	K_2CO_3 + TlO_2	1000~ 1100	用水将 K_2CO_3 和 TlO_2 混合成浆, 干燥后烧结	适合工业规模化生产, 结晶性比烧结法好		九州耐火砖公司
熔融法	K_2CO_3 + TlO_2	1200~ 1500	熔融骤冷得二钛酸钾再以此制取四钛酸钾及六钛酸钾	得到与反应物组成相同的单晶体	工业收率低, 反应温度高	久保田铁工公司
水热法	KOH + TlO_2	400~ 800 2000~ 4000/ atm		长(最长 20mm)的结晶纤维	危险性大, 价格昂贵	
助熔剂法	K_2CO_3 + TlO_2 + KMnO_4		KMnO_4 或 K_2WO_4 等作助熔剂	收率高, 可得到单晶纤维, 结晶性好	助熔剂价格高, 循环费用价格高	大塚化学药品公司
慢冷烧结法	K_2CO_3 + TlO_2	1000~ 1200	一边慢冷, 一边生成纤维	制造成本低, 长纤维		日本无机材料研究所

尽管钛酸钾晶须比其它晶须便宜, 但其价格离真正大规模应用还有一定距离, 日本当初开发它时, 价格定位在 1000 日元/kg, 由于主原料钛白粉(TlO_2)价格上涨, 使其价格目前已达 2000 日元/kg^[12]。因此有必要开发新的工艺路线, 使产品的成本大幅度下降, 日本^[13]等国均在尝试用天然金红石矿和钛铁矿直接生产钛酸钾晶须, 值得进一步研究。需要特别指出的是, 在新工艺工业化过程中, 必须注意解决以下两个问题才能使成本进一步降低^[12]:

(1) 由于钛酸钾晶须在烧结过程中不断有碱(K_2O)熔出, 对反应容器有极其严重的腐蚀性, 目前已实用的有白金容器, 但成本较高。

(2) 烧结物是一聚结极为紧密的块状物, 如何使晶须尽可能多地从块状物上剥离下来而又不被折断, 直接关系到产品的收率和质量, 收率的高低又决定着产品成本的高低。

3 国内外应用现状

80 年代以前, 钛酸钾晶须的研究集中于其合成方法和物化性能等^[11], 日本大塚化学药品公司(Otsuka Chemical Co. Ltd.) 率先于 70 年代末建立钛酸钾晶须的低成本制造方法, 并以 TISMO 为商品名投入规模生产^[14]。80 年代中期开始, 研究重点转向其应用^[8]而研究成果的 90% 以上以专利形式发表。从 90 年代开始, 日本对钛酸钾晶须的生产及应用研究的垄断地位逐渐被打破, 现在中国^[15~19]、韩国^[20]等的研究者已经涉足这一领域。

目前, 钛酸钾晶须的应用主要表现在以下几方面^[8]:

- (1) 作为增强材料(用作纤维增强树脂、水泥、金属、陶瓷中的增强纤维);
- (2) 作为摩擦材料(用作代用纤维和复合纤维型摩擦材料的基材);
- (3) 作为隔热耐热材料(用作隔热块、耐高温隔热复合树脂涂料、陶瓷涂料);
- (4) 其它用途(用作耐碱材料、滤膜、催化剂载体、传感器材料等)。

3.1 晶须增强塑料

玻璃纤维是使用最广泛的塑料增强纤维但由于其纤维粗大, 从而在复杂模具中难以分布均匀, 产生机械强度差的贫纤维区。另外, 存在制品的表面光洁度差, 加工时对模具磨损严重等缺点^[21]。

如上所述, 钛酸钾晶须具有很多优异的特性, 加上尺寸细微, 在树脂中分散性极好^[6](参见表 4), 使之克服了玻纤的诸多缺点。在作为塑料增强材料时, 具有不增加熔体粘度、易与塑料复合、易成型形状复杂、细小、精度好、表面光洁度高的制品, 对成型设备和模具损伤小的优点^[5,21], 可制成精密齿轮、轴承、垫片、阀门等。表 5 给出了钛酸钾晶须增强工程塑料的应用实例。在国外, 这些制品已被广泛应用于飞机、舰船、汽车、机器人、仪表、计算机等领域。

表 4 PBT(比重 1.31) 中含 30% 钛酸钾晶须
与含 30% 玻璃纤维的比较^[6]

Table 4 Comparison of PBT containing
potassium titanate whisker (30%) with
containing glass fabric (30%)

项目	钛酸钾晶须	玻璃纤维
形状	棱柱体	球体
纤维尺寸	直径 0.6 μm 长 20 μm	直径 13 μm 长 1 mm
真比重	3.3~3.5	2.5
体积百分比	14.5 vol%	18.3 vol%
单位纤维的体积	$7.2 \times 10^{-12} \text{cm}^3$	$1.3 \times 10^{-7} \text{cm}^3$
1 mm ³ 复合材料 中纤维的个数	2.0×10^7 个	1.4×10^3 个

表 5 钛酸钾晶须增强塑料的主要应用^[10]

Table 5 Application of potassium titanate
whiskers reinforced plastics

基体树脂	用途示例
POM	手表齿轮, 照相机齿轮, 微型马达齿轮, 磁带录音机部件
酚醛树脂	汽车刹车片, 摩擦材料
PBT	开关, 连接器, 马达部件, 继电器, 凸轮, 插头
尼龙 66	汽车离合器分离轴承衬套, 凸轮, 齿轮, 线圈绕线管, 滑轮
尼龙 6	工业用拉锁, 绕线管, 按钮, 轴承, 齿轮
特殊尼龙	滑动部件, 消音齿轮, 超薄部件, 机械部件, 体育运动用品
改性 PPE	复印机部件, 打印机部件, 薄型部件
PPS	复印机部件, FDD 部件, 滑动部件, 汽车部件
ABS	复印机部件, 电镀部件, 钟表部件, 按钮
PVC	装饰带, 包覆
PP	音响部件, 真空成型部件, 汽车部件

对钛酸钾晶须来说,目前用的较多的偶联剂是各种硅烷偶联剂(见表 6)^[6]。

在钛酸钾晶须增强塑料的研究中,有几个值得注意的问题:

(1) 表面改性问题: 界面问题一直是复合材料中最被关注的问题之一。晶须与基体界面结合状态良好与否直接关系到复合材料整个性能,由表 2 可知,钛酸钾晶须的力学性能远高于玻璃纤维,由此推论钛酸钾晶须增强塑料的性能应该比玻纤的高得多,但事实并非如此。这是一个典型的界面问题。

由于对钛酸钾晶须的表面物化性能的理解不够深入,对钛酸钾晶须的偶联改性,一直沿用研究成熟的玻璃纤维偶联技术。实际使用表明,简单的模仿达不到预期效果。例如,对玻纤效果很好的钛酸脂类偶联剂对钛酸钾晶须作用并不大。这说明,钛酸钾晶须的表面与玻纤的表面有着明显的不同。事实确实如此,钛酸钾晶须表面很光滑,性质极其稳定,其表面无论在物理还是化学上的反应性远不如玻纤。

因此,钛酸钾晶须在各种树脂中的表面改性将是今后的研究重点。综合考虑表面的物理附着、缩水反应和配位反应,采用各种相应的偶联剂进行复配处理可能是明智的。从表面物理作用角度考虑,可选择与无机物质表面有强烈附着作用的物质作为偶联剂;从表面配位化学作用角度考虑,可选择易与钛酸钾晶须表面的 Ti 原子进行配位反应的化合物。

经验还表明,表面处理剂适宜用量为 1 wt%^[5]。

(2) 缺口冲击强度问题: 从已有的研究结果可以得出这样的印象: 钛酸钾晶须对改善缺口冲击强度远不如改善抗拉强度、弯曲强度及弯曲模量那样明显^[5, 16, 17],这与表面改性技术不成熟有关,界面问题一解决,该问题将迎刃而解。

(3) 无损加工问题: 钛酸钾晶须由于细小,在表面处理和成型加工过程中极易折断。而晶须只有保持一定的长径比才能使其增强复合材料体现出理想的性能。因此如何使晶须少受或免受损伤是一非常重要的问题。有研究显示: 双螺杆挤出造粒时,晶须进料位置由喂料口改为第一或第二排气口,则能明显减少晶须的损伤,提高增强塑料的机械强度^[17]。但实际生产中,这种方法很不实用。这方面的研究除涉及复合材料加工工艺、设备等方面外,晶须的表面处理也是关键所在。

(4) 含量问题: 钛酸钾晶须加入树脂的含量以 25% ~ 35% 为最佳^[5, 17]。

3.2 摩擦材料

汽车制动器、离合器传统上主要用石棉作为摩擦材料。石棉摩擦材料一方面存在致癌因素而被许多国家禁用,另一方面,石棉制品在持续或高频工作时温度上升至 200 即发生热衰退现象,严重影响了车辆的安全性能^[5]。

典型的无石棉新型摩擦材料有以美国、德国为代表的半金属型摩擦材料;以英国、前苏联为代表的金属陶瓷型、粉末冶金型摩擦材料;以日本、法国为代表的代用纤维增强型摩擦材料^[22]。

前二种无石棉摩擦材料制造工艺复杂,能耗大,成本高,同时存在磨损对偶材料、粘结强度差、制动噪音大等问题。而代用纤维增强型摩擦材料的制造工艺与石棉制品差别不大,生产成本低,综合性能好。

表 6 不同树脂中钛酸钾晶须的表面偶联剂
Table 6 The coupling agents of potassium titanate whiskers in different resins

偶联剂	各种树脂
氨基硅烷	PA, PP, PVC, PPE, POM
环氧硅烷	PBT, PS, ABS, POM
甲基丙烯氧基硅烷	PP, PE, PS, ABS
巯基(-SH)硅烷	PPS
乙烯基硅烷	PE, PP, PS

例如,日本久保田铁工公司以钛酸钾晶须代替石棉制成的薄型汽车刹车摩擦片^[22]经实践证明,在温度达到 350 时未出现衰退现象。其摩擦力比石棉制品提高 50%, 磨损减少 30%, 同时也降低了摩擦噪音和环境污染^[8], 由于钛酸钾晶须较软, 不损伤对偶材料。表 7 是几种钛酸钾晶须基摩擦片与石棉基摩擦片在配方、性能等方面的比较。

表 7 钛酸钾晶须基摩擦片与石棉基摩擦片的比较^[23]

Table 7 Comparison of friction materials containing potassium titanate whiskers with asbestos

比较项目	石棉基对照例	钛酸钾基例 1	钛酸钾基例 2	钛酸钾基例 3	钛酸钾基例 4
配方主要成分	石棉纤维 酚醛树脂 硫酸钡	钛酸钾晶须 酚醛树脂 硫酸钡	钛酸钾晶须 酚醛树脂 二硫化钼	钛酸钾晶须 酚醛树脂 碳纤维 硫酸钡	钛酸钾晶须 酚醛树脂 海泡石纤维 二硫化钼
磨损率 $/\times 10^{-7} \text{cm}^3 \cdot (\text{kg} \cdot \text{m})^{-1}$	1.2 (100)	0.8 (100)	1.2 (100)	1.0 (100)	0.7 (100)
	1.3 (200)	0.9 (200)	1.1 (200)	1.1 (200)	0.7 (200)
	3.5 (300)	1.6 (300)	2.4 (300)	1.9 (300)	1.2 (300)
摩擦系数	0.34 (100)	0.47 (100)	0.34 (100)	0.43 (100)	0.51 (100)
	0.36 (200)	0.46 (200)	0.40 (200)	0.42 (200)	0.50 (200)
	0.19 (300)	0.48 (300)	0.42 (300)	0.45 (300)	0.50 (300)

3.3 作为隔热耐热材料

钛酸钾晶须能耐 1200 高温, 其红外反射率高, 热传导率极低(见表 1), 作为隔热材料, 性能十分优异。表 8 是钛酸钾晶须制耐火材料与传统耐火砖的比较。钛酸钾晶须制的耐火块在高达 1200 的温度下, 连续加热, 循环加热, 使用一年无异常现象发生。

利用钛酸钾晶须的隔热性能, 已开发出与硅树脂复合的涂层^[2]。这类产品被广泛用作耐蚀涂料、润滑剂和绝热材料, 具有优异的耐腐蚀、耐热、隔热、耐候性能, 使用场合包括防溅射材料、船舶蒸汽配管的涂层等。日本大塚化学药品公司已开发出以硅酸盐为主要粘合剂, 在室温下固化的双液体系陶瓷涂料, 被用于建材、机械等的涂层^[5, 14]。

3.4 用于滤膜、隔膜

有机膜由于机械强度不高、耐热性能差等缺点, 在操作压差大、操作温度高的使用场合往往表现不理想。日本用经表面改性的钛酸钾晶须增强的高分子材料制成了薄而致密, 渗透压低, 和溶液亲和性强的滤膜^[14]。这类膜在保持了有机膜原有优异性能的同时提高了膜的亲水性、机械强度和耐热性, 被用于医疗卫生、食品等行业中需要经常进行高温蒸汽消毒的场合。

另外, 由于钛酸钾晶须有优异的耐碱性, 被用来作为纯碱电解用隔膜, 燃料电池分隔膜和电池分隔层。它还能与其它化合物及树脂等复合, 制成具有更优异性能, 适合于各种不同用途的隔膜^[5, 14]。

表 8 钛酸钾晶须隔热材料与传统耐火砖的比较^[9]

Table 8 Comparative test showing potassium titanate whiskers effective as a furnace insulation

	标准马弗炉 (1400 用耐火砖)	特殊马弗炉 (钛酸钾晶须耐火块)
隔热材料的厚度/cm	7.6	2.4
隔热材料的密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	0.77	0.28
炉体重量/kg	30	8
炉内体积/L	3.81	3.6
炉全体积/L	521	19
加热所需时间/min (21 ~ 1000)	150	25
保持 1000 所需的功率/W	1150	580
外壁温度/ (内部 1050)	150	127

3.5 晶须增强陶瓷及晶须增强金属

钛酸钾晶须与 Al_2O_3 、熔融石英 SiO_2 制成的蜂窝陶瓷可作为汽车尾气、石油燃烧气净化用触媒的载体, 具有尺寸精密、耐高温等突出优点^[24, 25]。

钛酸钾晶须与铝合金的复合是晶须增强金属研究的热点^[19, 26], 经钛酸钾晶须增强的铝合金无论是强度、弹性模量还是硬度均有明显提高, 而延伸率下降, 与氧化铝、氮化硅晶须增强铝合金相比有非常低的磨耗率, 常被用于轴承滑动部件、活塞泵、发动机汽缸管的隔热内衬等^[27, 28]。钛酸钾晶须比起其它陶瓷晶须要便宜的多, 而且晶须表面经处理后其分散性得到改善, 用其增强的铝基复合材料具有优良的切削加工性^[15, 19]。因此, 该复合材料受到了越来越多的关注。

另外, 钛酸钾晶须作为传感器材料的开发也正在进行。例如, 日本通产省大阪工业技术试验所开发出了玻璃和晶须复合烧结体的新型湿度传感器^[14]。

4 应用前景与存在的问题

随着科学技术的发展和汽车轻量化、舒适化及节能化的需要, 各种复合材料正在越来越广泛地被用以汽车制造, 性能优异的钛酸钾晶须也将毫无例外; 汽车摩擦材料是易耗品, 平均每年需更换一次刹车片, 因此钛酸钾晶须在汽车摩擦材料上的应用前景十分广阔。

在条件十分苛刻的军事和化工行业, 要求材料既有耐强酸、强碱、耐高低温性能, 又有高强度、低磨耗率, 而钛酸钾晶须增强材料恰恰能满足这些要求。

钛酸钾晶须与其它高级纤维混杂使用时, 既起到了纤维的协同效应, 又可降低成本, 是一个值得注意的研究方向。

钛酸钾晶须更多更新的应用正在被不断开发出来。但要使钛酸钾晶须真正成为通用的增强纤维, 其生产成本必须进一步降低。这也正是当今国际材料界研究的热点之一。以汽车工业为例, 据专家分析, 纤维增强材料的价格须降到 1.11 万美元/吨以下, 才有可能为汽车工业大规模使用^[29]。目前, 日本的钛酸钾晶须价格约为 1.5 万美元/吨, 中国的约为 1 万美元/吨, 已接近或低于临界价格, 但视中国的国情而言, 此价格还是难以为广大用户所接收。我国具有丰富的钛矿资源和大量的钛白粉生产厂家。如何充分利用这些条件, 开发出新颖的设备投资少、生产能耗低、产品性能好的钛酸钾晶须生产工艺, 已成为当务之急。

在新工艺开发过程中, 原料的杂质、钾钛比、烧结时间和温度、第一次烧结物的水处理过程对晶须质量的影响以及杂质对复合材料性能的影响将成为新一轮的应用基础研究课题。

由于对偶联剂与钛氧键之间的作用了解不深, 导致钛酸钾晶须的优异力学性能在复合材料中没有得到应有的体现, 必须对钛酸钾晶须与偶联剂的表面作用进行深入的基础性研究, 使相关的表面技术迅速成熟起来。

5 结 论

钛酸钾晶须增强复合材料具有优异的耐磨、耐热、耐腐蚀性, 外观质量好, 机械强度高, 在制造形状非常复杂, 光洁度、精度要求高的制品时, 有着独特的优越性。钛酸钾晶须的低成本制造、高性能化表面处理和低损伤加工工艺是今后研究的重点。

参 考 文 献

- 1 袁建君,方琪,刘智恩 晶须的研究进展 材料科学与工程,1996,14(4):1~7
- 2 潘金生,陈永华 晶须及其应用 复合材料学报,1995,12(4):1~7
- 3 [日]内田 盛野编,石 行,等译 高物性新型复合材料 北京:航空工业出版社,1992
- 4 天津化工研究院等编 无机盐工业手册(第二版)(上册). 北京:化工出版社,1996
- 5 [日]植村益次等编,贾丽霞等译 高性能复合材料最新技术 北京:中国建筑出版社,1989
- 6 馆义仁 补强材——チタン酸カリウム造粒品 塑料时代(日),1993,(11),127~133
- 7 千千和,史郎 チタン酸カリウム纤维 塑料(日),1980,31(8):106
- 8 藤木良规,三桥武文 チタン酸カリウム纤维の特性と应用 陶瓷(日),1984,19(3):200~208
- 9 H. C. Gullledge Fibrous Potassium Titanate *I&EC*. 1960, 52(2): 117~118
- 10 竹中稔 チタン酸カリウムウイスカ. 塑料(日),1988,39(8):77~83
- 11 清水纪夫 チタン酸カリウム纤维 化学工业(日),1980,(5):87~92;(7):104~108
- 12 西内纪八郎 纤维状チタン酸カリウム. 工业材料(日),1992,40(8):107~111
- 13 藤木良规,三桥武文 日本マラミックス协会学术论文集 1988,96(11):1109~115
- 14 日本大塚化学药品公司 TISMO 产品说明书
- 15 朱文化,柯家骏 新型无机晶须——钛酸钾晶须 化学通报,1994,(4):5~10
- 16 隗学礼,赵宽放,朱启安,等 钛酸钾晶须的研制及其在工程塑料中的应用 见:94秋中国材料研讨会论文 北京:1994 125~130
- 17 吕建通,隗学礼,赵宽放,等 钛酸钾晶须增强PA6的研究 工程塑料应用,1995,23(6):5~8
- 18 谢凯,盘毅,王秀华,等 钛酸钾短纤维的制备工艺研究 无机盐工业,1997,(1):16~17
- 19 沈保罗,李伟,钟毓茂,等 金属学报,1994,30(9):B427~431
- 20 Jong-Kook Lee, Kwang-Ho Lee, Hwan Kim. *J Mater Sci*, 1996, 31(20): 5493~5498
- 21 姜作义,张和善,编 纤维树脂复合材料技术与应用 北京:中国标准出版社,1990
- 22 贺奉嘉,黄伯云 汽车制动摩擦材料的发展 粉末冶金技术 1993,11(3):213~217
- 23 牧戸勲,中山智 摩擦材 日本公开特许公报,JP61-191599 1986-8-26
- 24 Kouji Banno, Masahiro Sugira, Yoko Kumai Eur. Pat. Apple, EP722,767,1996-7-20
- 25 Hironao Numamoto, Atsushi Nishino, et al 日本公开特许公报,JP 90, 233, 551 1990-9-7
- 26 Hidefumi Harada, Yukitsugu Kudoh, et al *Journal of Japan Institute of Metals*, 1994, 58(1): 69~77
- 27 Hidefumi Harada, Yukitsugu 日本公开特许公报,JP91, 82, 725 1991-08-08
- 28 Junichi Fujira, Yutaka Tomono, Seiichi Kotake 日本公开特许公报,JP96, 03, 661 1996-1-09
- 29 赵稼祥 第四十届国际尖端材料学会年会与展览简介 工程塑料应用 1995, 23(6):1~4

APPLICATIONS OF POTASSIUM TITANATE WHISKERS IN COMPOSITE MATERIALS

Feng Xin L Üjiazhen Lu Xiaohua Bao Ningzhong Chen Dongliang
(Dept. of Chemical Engineering, Nanjing University of Chemical Technology, Nanjing 210009)

Abstract The cost-effective potassium titanate whiskers are artificial fibers with high performance. In this paper, their characteristics and properties, state of the art and method of preparation were reviewed, and their applications in composite materials were introduced in details. Also pointed out were some problems to be solved and the researching trend to follow. Studies of reducing the cost of whiskers, treating surface of whiskers and composing technology between whiskers and matrix are the most important topics in the near future.

Key words potassium titanate, whiskers, composite materials