

# 表面活性剂 Span80 和促进剂对 $\text{TiO}_2$ / 硅油 电流变液性能的影响

Effect of Surfactant Span80 and Accelerant on Electrorheological Properties of  $\text{TiO}_2$ / Methylsilicone Oil

周衡志, 李子全, 王 玲, 杨玉岭, 李祖泽

(南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 南京 210016)

ZHOU Heng-zhi, LI Zi-quan, WANG Ling, YANG Yu-ling,

LI Zu-ze (College of Material Science and Technology, Nanjing

University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**摘要:** 用液相包覆法研究了非离子表面活性剂 Span80 在锐钛矿型微米和纳米  $\text{TiO}_2$  颗粒上的包覆工艺, 并在研制的电流变仪上测定了不同电流变液配方  $\text{TiO}_2$ / 硅油电流变体的静态剪切应力  $\tau$  与外加直流电场强度  $E$  的关系。结果表明: 颗粒完全被 Span80 包覆, 表面活性剂提高  $\text{TiO}_2$  分散性和悬浮性; 在直流电场作用下, 表面活性剂 Span80 在颗粒表面形成的胶层促进电流变体的极化; 加入适量促进剂提高了电流变性; 在微米  $\text{TiO}_2$ / 硅油体系中混入少量纳米  $\text{TiO}_2$  可提高电流变体的抗剪应力。

**关键词:** 电流变性; 液相包覆工艺; 非离子表面活性剂; 纳米  $\text{TiO}_2$ ; 分散性

中图分类号: TB381 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2006)04-0056-04

**Abstract:** Coating process that the micron and nano- $\text{TiO}_2$  particles with anatase structure were covered with non-ion surfactant Span80 was investigated by liquid-coating method. The relationship between the static shear stress of  $\text{TiO}_2$ / Methylsilicone oil system with different formulations  $\tau$  and external electric field  $E$  was determined experimentally. The results showed that the particles were covered completely by Span80. The surfactant improves the dispersion and suspension of coated  $\text{TiO}_2$ , that the Span80 layer on the particles promotes the polarization of the electrorheological (ER) fluid, that the addition of suitable accelerant enhances ER properties, and that mixture of small amount of nano- $\text{TiO}_2$  in micron  $\text{TiO}_2$ / silicone oil increases the shear-resistant stress of ER fluid.

**Key words:** electrorheological property; liquid-coating method; non-ion surfactant; nano- $\text{TiO}_2$ ; dispersion

电流变体的抗剪应力可随外加电场而变化, 且具有快速和可逆固-液转变、抗剪强度可连续受控变化的特性, 在智能与生物仿真技术、航空、汽车工业和声学等领域的应用前景十分广阔, 并具有巨大的潜在经济效益, 世界各国都给予了极大的关注<sup>[1-4]</sup>。相关研究在“Science”, “Nature”和“Scientific American”等美英著名科学杂志上均有报道。目前已成功开发出多种电流变体系<sup>[5]</sup>, 用无机的金属氧化物或金属盐类作为分散相的电流变液在性能上目前仍位居前列<sup>[6-9]</sup>, 其中特别发现高介电常数的  $\text{TiO}_2$  用微乳法在化学合成时通过粒子表面改性或与其他有机物共混后, 显著提高其在硅油电流变液的电流变性<sup>[8,9]</sup>。但由于两相的密度差较大, 长期使用分散相仍有沉淀团聚现象, 极大降低电流变性能, 且  $\text{TiO}_2$  粒子易对极板磨损, 采用有机

高分子中的官能团(如表面活性剂)在无机颗粒表面进行局部包覆使颗粒表面有机化, 即表面包覆有机物是一条有效途径<sup>[10]</sup>。此外随着  $\text{TiO}_2$  粉体技术的进展, 商品化的微米和纳米  $\text{TiO}_2$  已面市, 如何拓宽纳米  $\text{TiO}_2$  的应用领域和解决其在硅油中的悬浮性、分散性和提高其电流变性是一项非常有意义的工作。

本工作的主要目的是研究非离子表面活性剂 Span80 在市售锐钛矿型微米和纳米  $\text{TiO}_2$  粉末上的包覆改性工艺, 解决由于微小粒子高比表面积和表面能而严重团聚的现象和在基础液中的分散性与悬浮性, 并在自行设计制造的一套电流变性能测试装置上和外加直流电场下, 研究在不同纳米和微米  $\text{TiO}_2$  粉末的体积分数和配比下其电流变性能, 且初步研究极性小分子促进剂对电流变效应的促进作用。

1 实验材料与方法

1.1 原料

二甲基硅油(  $\epsilon = 2.6 \sim 2.8$ , 相对密度  $\rho = 1.002 \text{ g/cm}^3$ ,  $\eta \approx 500 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  (  $25^\circ\text{C}$  ); 溶油性非离子表面活性剂 Span80( 失水山梨醇单油酸酯 ); 有机溶剂丙酮( 分析纯 ) 和环己烷( 分析纯 ); 极性小分子 A; 锐钛矿型纳米 TiO<sub>2</sub>( 粒径  $\leq 20 \text{ nm}$ ,  $\rho = 3.93 \text{ g/cm}^3$ ,  $\epsilon = 170$ , 纯度  $> 99.5\%$  ), 锐钛矿型微米 TiO<sub>2</sub>( 粒径为  $20 \sim 30 \mu\text{m}$ ,  $\rho = 5.06 \text{ g/cm}^3$ ,  $\epsilon = 170$ , 纯度  $> 98.0\%$  )。

1.2 包覆工艺

将 5mL 的 Span80 加入到丙酮+ 环己烷的均匀混合液中, 在 CSE-1A 型超声清洗仪中超声搅拌 15min, 使 Span80 完全溶解后再逐渐加入 TiO<sub>2</sub> 粉末, 继续超声搅拌 60~ 180 min, 最后在 DH-G-9140A 型电热恒温鼓风干燥箱中于  $55^\circ\text{C}$  加热干燥 4h, 且干燥时用 CL-3 型恒温加热磁力搅拌器搅拌, 制成表面包覆 Span80 的 TiO<sub>2</sub> 微粒。

1.3 电流变液的配制

在二甲基硅油中加入适量无水乙醇, 机械搅拌均匀后, 在搅拌状态逐渐加入包覆的或未包覆的 TiO<sub>2</sub>, 强烈搅拌 60min, 制成均匀乳液, 静置 30min 后, 取悬浮液为电流变液。

据报道<sup>[11]</sup>, 电流变液体的分散固体粒子体积分数被大致限制在 10% ~ 40% 之间。但实验中发现当体积分数大于 25% 后, 悬浮液的粘性急剧增加, 几乎成为膏状, 很难再加入固体颗粒; 同时, 当加入纯的纳米级 TiO<sub>2</sub> 时, 由于颗粒粒径很小, 液体比表面积增大, 液体间的静电引力增大, 使液体本身的粘度很大<sup>[12]</sup>, 这对电流变性能不利, 故将微米和纳米微粒混合。表 1 是不同体积分数的电流变液体配方, Span80 与 TiO<sub>2</sub> 质量比均取 1.25%; 均采用相同包覆工艺。表 2 是体积分数为 16.5% 的配方。

表 1 不同体积分数电流变液体配方

Table 1 ER fluid with different volume fractions

Formulation	Volume fraction of ER fluid/ %	Methylsilicone oil / mL	Micro TiO <sub>2</sub> / g	Span80 / g
1	5.0	150	40	0.5
2	9.1	150	75.9	1
3	16.5	150	150	1.7
4	20.0	150	189.7	2.4
5	25	150	253	3.2

表 2 体积分数为 16.5% 的电流变液体配方

Table 2 ER fluid with volume fraction 16.5%

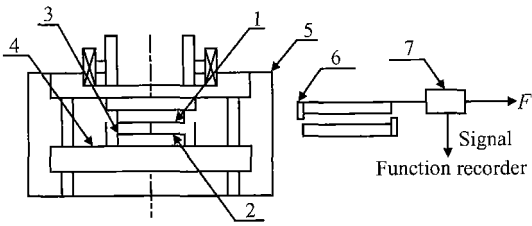
Formulation	Methylsilicone oil/mL	Micro TiO <sub>2</sub> / g	Nano-TiO <sub>2</sub> / g	Span80 / g	Accelerant A / mL
A	150	150	0	2	5
B	150	150	0	2	10
C	150	134	6.7	2	5
D	150	134	6.7	2	10
E	150	150	0	2	0

1.4 电流变性的测试

在自制的电流变仪上通过改变直流电场的强度, 测定电流变体的静态剪切强度。在加载盘中缓慢加入配重物直到极板产生相对运动, 测出加载的总质量, 由公式  $\tau = (F - f) / S$  计算一定电场下电流变体的静态剪切屈服应力, 式中  $F$  为加载物和加载盘的总质量,  $f$  为系统的摩擦力,  $S$  为极板的面积。此外还可测定剪切速率  $\dot{\gamma}$  ( $\dot{\gamma} = \tau / t$ ),  $t$  为极板移动小距离的时间, 由光电管检测, 数字式示波器读数完成, 此时的  $\tau$  由牛顿测力计读出, 加热与保温装置使系统能够测定温度对电流变效应的影响。

2 装置设计

系统示意图如图 1 所示。其中主要包括电极板系统、滑动系统、检测系统、加载系统、间隙调整系统、电源系统以及加热保温系统等。



1-upper pole; 2-lower pole; 3-storing fluid case; 4-water heating case; 5-bracket; 6-shear board; 7-strain gauge

图 1 电流变测试装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ER property testing device

上下平行铝电极板的面积为  $60 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ , 相对最小间距为  $2 \text{ mm}$ , 且沿剪切力方向上下极板的相对端面上装有高于板面  $0.5 \text{ mm}$  的不锈钢剪切板, 其主要作用是当平行电极板相对运动时, 能真正剪切极板间的电流变体, 而不仅是反映电流变体与极板间的摩擦力。上极板装有滚动轴承以减小极板相对运动时的阻力, 并提高系统对载荷变化的灵敏度。在测定静态屈服应力时, 采用逐渐增加配重物质量的方法测定不

同电场强度下的静态屈服应力; 在测定动态剪切速率时, 用有级调速直流电机在某一恒定转速下通过缠绕在其轴上的高强度并与测力计相连接的软线拖动上极板运动, 用高速摄像机记录弹簧测力计最大剪切力, 用两光电管测定上下极板相对移动 10mm 的时间, 并近似计算不同电场下的剪切速率。可方便地改变极板间的间隙, 从而改变极板间的电场强度。测定时, 通过载物盘加载拉动上极板对电流变液作剪切运动, 由力的平衡条件, 求出一定电场下电流变液的静态剪切屈服应力。

该装置的特点是电极板间隙、电场强度、剪切速率和温度可调控, 并采用光电传感器和摄像读取数据, 在静态和动态下均可测量电流变液体的电流变效应。

### 3 结果与分析

#### 3.1 Span80 在 $\text{TiO}_2$ 的包覆工艺

图 2 为微米  $\text{TiO}_2$  的 SEM 照片。可以观察到微米  $\text{TiO}_2$  表面形貌和分散状况, 包覆前后颗粒均呈分散状, 包覆后粒径变大。图 3 是两种包覆 Span80 的  $\text{TiO}_2$  俄歇电子能谱, 图 3a 是微米  $\text{TiO}_2$  俄歇电子能谱, 直到 900s 只出现碳峰而无钛峰和氧峰, 表明 Span80 已完全包覆在  $\text{TiO}_2$  表面, 且包覆层较厚; 图 3b 是纳米  $\text{TiO}_2$  俄歇电子能谱, 刻蚀前只有碳峰明显, 而钛峰和氧峰几乎不出现; 但刻蚀 90s 后 3 个峰都很明显, 表明 Span80 已包覆在  $\text{TiO}_2$  表面, 但未完全包覆且包层很薄, 从包覆层的厚度与 Span80 分子的长度相比较, 很可能是单分子包覆。在 Micromeritics ASA T2010 型比表面积分析仪上用 BET 多层气体吸附法得到未包覆和已包覆的纳米  $\text{TiO}_2$  比表面积  $S_w$  分别为  $47.6\text{ m}^2/\text{g}$  和  $46.8\text{ m}^2/\text{g}$ , 根据公式  $d = 6/\rho S_w$ , 算得比表面积直径  $d$  分别为  $32.1\text{ nm}$  和  $32.6\text{ nm}$ , 从结果上看也很可能是单分子包覆。

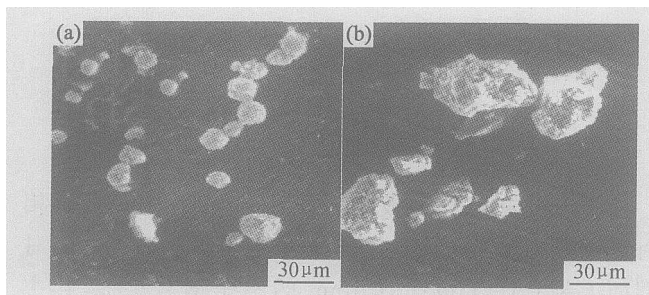


图 2 微米  $\text{TiO}_2$  的 SEM 照片 (a) 包覆前; (b) 包覆后

Fig. 2 SEM images of the micro  $\text{TiO}_2$  particles

(a) uncoated; (b) coated

#### 3.2 分散性和悬浮性

图 4 是 Span80 包覆的微米  $\text{TiO}_2$  在硅油中的分

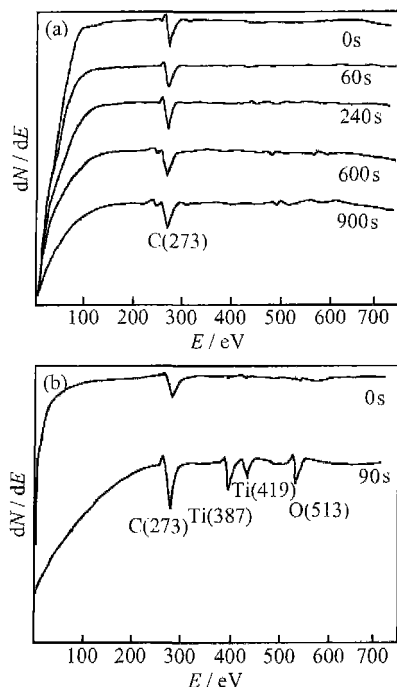


图 3 包覆 Span80 的  $\text{TiO}_2$  俄歇电子能谱

(a) 微米  $\text{TiO}_2$ ; (b) 纳米  $\text{TiO}_2$

Fig. 3 AES results of  $\text{TiO}_2$  particles coated by Span80

(a) micro  $\text{TiO}_2$ ; (b) nano  $\text{TiO}_2$

散状况。可以看出, 其较均匀地分散在硅油中, 形成悬浮乳液。这可能是由于带同性电荷的  $\text{TiO}_2$  颗粒相互接近时, 包覆产生的一层粘稠高分子膜的空间位阻效应使颗粒间的引力大为降低, 起到分散作用。

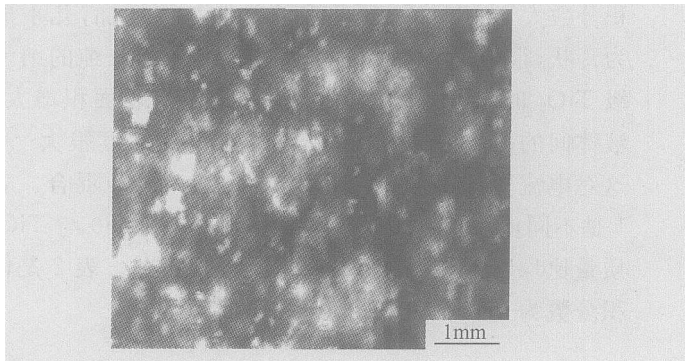


图 4 Span80 包覆的微米  $\text{TiO}_2$  在硅油中的分散照片

Fig. 4 The dispersion photo of the micro  $\text{TiO}_2$  particles coated by Span80 in methyldisilicone oil

将搅拌后的悬浮液倒入量筒中, 静置 24h 后观察其沉淀情况, 发现除没有对颗粒进行表面包覆的配方沉淀较明显外, 其他几组都没有明显的沉淀。而且纳米  $\text{TiO}_2$  在溶液中的悬浮性优于微米  $\text{TiO}_2$ , 这可能与包覆在纳米  $\text{TiO}_2$  的层厚薄和包覆颗粒的密度更低有关。实验结果表明除了配制电流变液的各组分的配比较好外, 对颗粒进行表面包覆起了很重要的作用。双电层的形成, 使相邻两颗粒表面产生同种电荷, 并产生

斥力,能有效地防止颗粒的沉淀。

### 3.3 电流变性

图 5 是不同体积分数电流变液体配方 1 至 5 的  $\tau$ - $E$  关系。由图 5 可明显看出,当体积分数较小时,体系基本没有电流变性。在一定范围内,电流变液的静态剪切应力随体积分数的增加而增加。当电场强度小于  $600\text{V/mm}$  时,体系几乎无电流变效应是由于分散相颗粒的无规则热运动较激烈,所加电场使颗粒获得的极化力还不足以阻止其作无规则运动而链化,体系对外表现出较低的电流变效应。随电场强度的增加,剪切应力  $\tau$  大致呈线性增加。

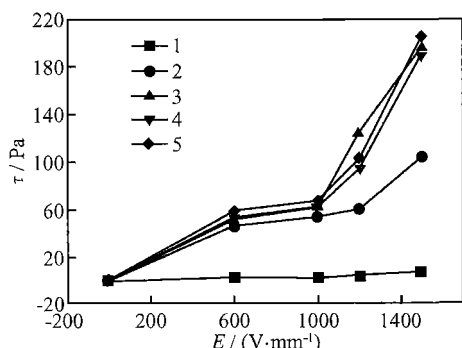


图 5 配方 1 至 5 的  $\tau$ - $E$  关系

Fig. 5 The relationship between  $\tau$  and  $E$  of formulation 1-5

图 6 是体积分数为 16.5% 的配方 A 至 E 的  $\tau$ - $E$  关系。 $\text{TiO}_2$  被非离子表面活性剂包覆后,在相同电场下,其屈服剪切应力得到提高,特别是纳米  $\text{TiO}_2$  的电流变效应比微米  $\text{TiO}_2$  的高。一方面, $\text{TiO}_2$  被 Span80 包覆后改变了表面状态,特别是电流变体的极化发生变化且导电性得到改善;另一方面,颗粒的粒径小,在相同电场作用下更易被极化;再者,非离子表面活性剂愈薄,颗粒间距愈小,颗粒的极化效果愈好。因为在电流变液中存在固体颗粒和液体两相,由于介电常数的差异,因此电场分布是不均匀的,且电场强度在成链的相邻颗粒之间最大,并随介电失配的增加而增加<sup>[8]</sup>。由表 2 和图 6 可知,加入极性小分子,电流变效果明显。

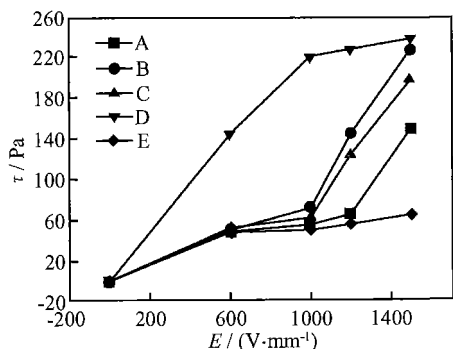


图 6 配方 A 至 E 的  $\tau$ - $E$  关系

Fig. 6 The relationship between  $\tau$  and  $E$  of formulation A-E

由图 5, 6 可知,电流变液体的  $\tau$  与  $E$  呈平方关系,与理论计算符合得较好<sup>[11]</sup>。由于在本实验中采用的 FH-1910 型高压直流电源最大电压为  $3\text{kV}$ ,无法继续做高压部分,但在相同电场强度下的  $\tau$  值均已超过或相当于相关报道中的  $\tau$  值。今后需改进实验装置和设备,以提高电场强度。

## 4 结论

(1) 涂覆工艺使非离子表面活性剂有效包覆在颗粒表面形成胶体微团,在包覆后干燥过程中和随后分散在硅油中起到分散作用,提高悬浮体系稳定性。

(2) 电场作用下,表面活性剂 Span80 在颗粒表面形成的胶团促进电流变体的极化,极化效果取决于包覆状况和层的厚度,且减小分散体的粒径能提高电流变体的剪切应力。

(3) 适量极性小分子促进剂的加入,易电离出电荷,使悬浮液中自由离子浓度增加,使离子在外场下更容易运动而增加了离子极化,从而提高电流变活性。

(4) 测定了电流变液体静态剪切应力  $\tau$  与  $E$  的关系。在不同的电场作用下电流变液表现出不同的应力结果,剪切应力  $\tau$  随电场增加而大致呈线性增加。

## 参考文献

- [1] 朱克勤,陶荣甲. 电流变液和电流变效应[J]. 力学进展, 1994, 24 (2): 154-162.
- [2] HALSEY T C. Electrorheological fluids[J]. Science, 1992, 258: 761-776.
- [3] NAKAMURA TARO, NORIHIKO SAGA, MASARU NAKAZAWA. Variable viscous control of a homogeneous ER fluid device considering its dynamic characteristic[J]. Mechatronics, 2004, 14(1): 55-68.
- [4] HALSEY T C, MARTIN J E. Electrorheological fluids[J]. Scientific American, 1993, (10): 58-64.
- [5] FILIPSKO F E, RADZIŁOWSKI L H. An intrinsic mechanism for the activity of falamine-silicate based ER fluids[J]. Journal of Rheol, 1990, (34): 539-550.
- [6] 罗春荣,李焱,赵晓鹏,等. 复合颗粒电流变液的制备及其性能[J]. 材料工程, 1999, (5): 36-38.
- [7] 赵晓鹏,尹剑波,向礼琴. 包覆表面活性剂的  $\text{TiO}_2$  电流变液[J]. 材料研究学报, 2001, 15(3): 308-312.
- [8] 赵晓鹏,段旭. CMS/ $\text{TiO}_2$  杂化材料电流变液的制备及其性能[J]. 材料研究学报, 2001, 15(3): 54-58.
- [9] 尹剑波,赵晓鹏. 稀土改性二氧化钛电流变液的剪切强度随温度变化的关系[J]. 复合材料学报, 2002, 19(1): 64-68.
- [10] 吴文,段晓东,周铁英,等. 电流变液添加剂的研究[J]. 功能材料, 1998, 29(1): 64-67.
- [11] 魏宸官. 电流变技术——机理材料工程应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2000.

- tite coatings on carbon/ carbon composites[ J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 176( 2): 188- 192.
- [ 43] SUI J L, LI M S, LU Y P, et al. The effect of plasma spraying power on the structure and mechanical properties of hydroxyapatite deposited onto carbon/ carbon composites[ J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 190( 2- 3): 287- 292.
- [ 44] 隋金玲, 李木森, 吕宇鹏, 等. 粉末粒度对碳/ 碳基体上羟基磷灰石涂层的影响[ J]. 机械工程材料, 2005, 29( 2): 21- 26.
- [ 45] 曹宁, 隋金玲, 李木森, 等. C/C 复合材料表面表面等离子喷涂 HA 涂层在 SBF 中的试验[ J]. 生物骨科材料与临床研究, 2005, 2( 1): 5- 11.
- [ 46] MORRANCHO R, GHOMMIDH J, CONSTANT G, et al. New hydroxyapatite coatings obtained by chemical spray process and their biological behavior[ J]. Materials Science Monographs, 1983, 17: 97- 105.
- [ 47] 曾燮榕, 杨峥, 张郁. 表面活性碳/ 碳复合材料人工骨的研究[ A]. 第四届全国材料研讨会会议论文集[ C]. 北京: 化学工业出版社, 1994. 25- 26.
- [ 48] STOCH A, BROZKE A, BLAZEWCZ S, et al. FTIR study of electrochemically deposited hydroxyapatite coatings on carbon materials[ J]. Journal of Molecular Structure, 2003, 651- 653: 389- 396.
- [ 49] 熊信柏. 声电化学法制备碳/ 碳复合材料磷酸钙生物活性涂层研究[ D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
- [ 50] 张秀莲, 熊信柏, 黄剑锋, 等. 碳/ 碳复合材料表面生物活性钙磷涂层 XRD 和 Raman 光谱研究[ J]. 新型碳材料, 2003, 18( 2): 123- 127.
- [ 51] 熊信柏, 李贺军, 李克智, 等. 电流密度对声电沉积生物活性透钙磷石涂层结构和形貌的影响[ J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 32( 11): 923- 926.
- [ 52] 熊信柏, 李贺军, 黄剑锋, 等. 声作用功率对碳/ 碳复合材料表面磷酸钙生物活性陶瓷涂层的影响[ J]. 新型碳材料, 2004, 19( 1): 33- 37.
- [ 53] 马楚凡, 熊信柏, 李贺军, 等. CVC/C 复合材料及其表面 HA 涂层成骨细胞体外响应行为对比研究[ J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33( 12): 1275- 1277.
- [ 54] KOJIMA A, OTANI S, IWATA T, et al. Preparation and properties of carbon dental implant with fine rahmen surface layer[ J]. Carbon, 1984, 22( 1): 47- 52.
- [ 55] LOUIS J P. Fibrous carbon implants for the maintenance of bone volume after tooth avulsion: first clinical results[ J]. Biomaterials, 1990, 11( 9): 525- 528.
- [ 56] PESAKOVA V, KLEZL Z, BALIK K, et al. Biomechanical and biological properties of the implant material carbon-carbon composite covered with pyrolytic carbon[ J]. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 2000, 11( 12): 793- 798.
- [ 57] LEWANDOWSKA-SZU MIEL M, KOMENDER J, GORECKI A, et al. Fixation of carbon fibre-reinforced carbon composite implanted into bone[ J]. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 1997, 8( 8): 485- 488.
- [ 58] DEVLIN D, COWIE J, CANOLL D, et al. Proceeding of the 1995 ASME international mechanical engineering congress and exposition [ C]. New York, USA: ASME, 1995. 31- 32.
- [ 59] 杨国华. 碳素材料[ M]. 北京: 中国物资出版社, 1999. 79- 87.
- [ 60] 顾汉卿, 徐国风. 生物医学材料学[ M]. 天津: 天津翻译出版公司, 1993. 395- 464.
- [ 61] SANTAVIRT A S. Biocompatibility of silicon carbide in colony formation test *in vitro*[ J]. Clinical and Experimental Forum, 1998, 118: 89- 93.
- [ 62] CHRISTEL P, MEUNIER A, LECLERCQ S, et al. Development of a carbon-carbon hip prosthesis[ J]. Journal of Biomedical Materials Research, 1987, 21( A2 suppl): 191- 218.
- [ 63] STOCH A, JASTRZEBSKI W, BROZBEK A, et al. FTIR monitoring of the growth of the carbonate containing apatite layers from simulated and natural body fluids[ J]. Journal of Molecular Structure, 1999, 511- 512: 287- 294.
- [ 64] LUCIE B, VLADIMIR S, OLGA K, et al. Polishing and coating carbon fiber-reinforced carbon composites with a carbon-titanium layer enhances adhesion and growth of osteoblast-like MG63 cells and vascular smooth muscle cells *in vitro*[ J]. Journal of Biomedical Materials Research, 2001, 54( 4): 567- 578.
- [ 65] PESAKOVA V, SMETANA K, SOCHOR M, et al. Biological properties of the intervertebral cages made of titanium containing a carbon-carbon composite covered with different polymers[ J]. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 2005, 16( 2): 143- 148.
- [ 66] PESAKOVA V, SMETANA K, BALIK K, et al. Biological and biochemical properties of the carbon composite and polyethylene implant materials[ J]. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 2003, 14( 6): 531- 537.
- [ 67] 姜开宇, 王敏杰, 宋满仓, 等. 碳/ 碳复合材料人工骨骼 RPM-CVI 复合成形技术的初步研究进展[ J]. 中国临床康复, 2002, 6( 22): 3378- 3379.

---

基金项目: 国家自然科学基金资助项目( 50572091)

收稿日期: 2005-08-08; 修订日期: 2005-11-14

作者简介: 翟言强( 1963- ), 男, 博士, 副教授, 主要从事碳/ 碳生物医用材料的研究, 联系地址: 西北工业大学材料学院 541 信箱( 710072)。

---

( 上接第 59 页)

[ 12] 张立德, 牟季美. 纳米材料和纳米结构[ M]. 北京: 科学出版社, 2001.

---

收稿日期: 2005-08-16; 修订日期: 2005-12-21

作者简介: 周衡志( 1979- ), 男, 博士研究生, 从事先进复合材料及功能材料方面研究, 联系地址: 江苏省南京市御道街 29 号南京航空航天大学 349# ( 210016)。