

# 碳纳米材料空气动力学性能的实验研究

Experimental Studies on Aerodynamics Properties of Carbon Nanomaterials

宋仔标, 刘代志, 王红霞  
(第二炮兵工程学院, 西安 710025)

SONG Zǐbiao, LIU Dàizhi, WANG Hongxia  
(The Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025, China)

摘要: 测试八种碳纳米材料喷洒在烟幕箱内形成烟幕的质量浓度及对 1.06μm 激光的透过率, 根据不同时间的采样浓度计算得到烟幕的沉降速度。结果表明: 碳纳米材料烟幕具有良好的悬浮性能; 直径在 40nm 以上, 长度不大于 15μm 的纳米碳纤维材料形成的烟幕具有足够的质量浓度和良好的漂浮特性, 比较适合作为电磁波干扰材料; 纳米 SiO<sub>2</sub> 可有效改善发烟剂的流动性和分散性、延长烟幕的留空时间, 并能显著地降低烟幕粒子的沉降速度。

关键词: 纳米碳纤维; 碳纳米管; 空气动力学性能; 烟幕

中图分类号: TB383 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2009)08-0053-04

**Abstract:** The mass concentrations and transmissivity to 1.06μm laser emission of eight kinds of carbon nanomaterials smoke screens sprayed in the smoke box were measured, and the deposition velocities of smoke screens were computed according to the mass concentrations at different time. The results show that the carbon nanomaterials smoke screens have excellent suspending characteristics and the dispersing of carbon nanomaterials has a great effect on mass concentrations and deposition velocities of smoke screens. Considering mass concentration and deposition velocity, the carbon nanofibers with diameter over 40nm and length less than 15μm are more appropriate for electromagnetic wave passive interference materials. As dispersant, nano-SiO<sub>2</sub> can effectively increase the fluidity and dispersibility of carbon nanomaterials, and it can evidently prolong the suspending time and decrease the deposition velocities of smoke screens.

**Key words:** carbon nanofiber; carbon nanotube; aerodynamics property; smoke screen

随着现代电子战的日趋复杂和高新技术的不断应用, 雷达侦察技术与装备除了在各单项性能即毫米波、厘米波、红外上不断完善发展外, 根据现代高技术战争的特点重点发展了具有各单项侦察技术相互切换功能的综合光电侦察技术与装备, 同时导弹制导技术也从单一向复合制导方向发展。这种情况下, 传统无源干扰材料和技术在未来的高技术战争中已经无法与之相对抗。未来战场上的各种武器系统面临着严峻的威胁, 无源干扰技术作为提高武器系统生存能力和突防能力的有效手段, 普遍受到世界各军事大国的重视。因此, 从无源干扰的角度出发, 研制一种高效、实用、价廉的无源干扰材料, 用于对抗不断发展的各种探测手段和精确制导武器, 发展宽波段无源干扰技术, 提高国防武器装备水平, 已是势在必行<sup>[1]</sup>。

将纳米碳纤维、纳米碳管<sup>[2,3]</sup>作为发烟剂, 其形成烟幕的干扰效果不仅与材料的消光系数有关<sup>[4]</sup>, 还与

材料的空气动力学性能相关<sup>[5]</sup>。实验测量碳纳米材料烟幕在烟幕箱里的质量浓度和对电磁波的有效遮蔽时间, 可以直观地分析材料性能对所形成烟幕空气动力学性能的影响, 是理论分析和数值方法的基础<sup>[6-8]</sup>。本工作使用大型烟箱和激光双波长(1.06μm 和 10.6μm)烟雾透过率测试装置, 对各种碳纳米管、纳米碳纤维、纳米石墨、纳米碳粉作为烟幕干扰材料的空气动力学性能进行实验研究, 测试了烟幕质量浓度以及烟幕对 1.06μm 激光的透过率, 为进一步分析与计算烟幕遮蔽干扰性能提供必要实验基础。

## 1 实验仪器和实验材料

### 1.1 实验仪器和测试装置

烟幕箱: 容积为 20m<sup>3</sup> (6.1m × 2m × 1.8m), 光程为 6.1m, 内置搅拌风扇两个。烟幕箱俯视图如图 1 所示。

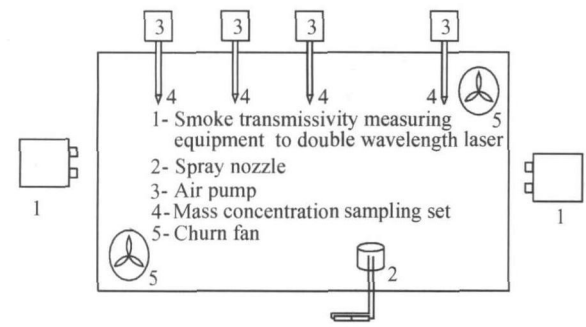


图 1 烟幕箱俯视图

Fig 1 Planform of the smoke box

探测器、信号采集与处理系统等组成, 输出波长为 1.06μm 和 10.6μm, 功率分别为 9mW 和 9W 左右, 采集系统每秒钟采集一个数据, 在计算机显示屏上直接显示激光透过率。

滤膜浓度采样系统: 为使质量采样浓度具有代表性, 在烟箱测试光路上设置了两个采样泵同时进行采样, 采样泵流量为 40L/min, 用滤膜称重法测量烟幕的质量浓度。

1.2 实验材料

实验材料包括八种不同尺寸的碳纳米管、纳米碳纤维及纳米石墨材料, 各种碳纳米材料的尺寸、性能参数和生产厂家如表 1 所示。

激光双波长烟雾透过率测试装置: 由激光发射器、

表 1 实验材料、尺寸参数及生产厂家

Table 1 Experimental materials, parameters and the manufacturer

No	Material	Parameter					Manufacturer
		Fiber diameter/ nm	Diameter/ nm	Length /μm	Helix diameter /μm	Specific surface area/ ( m <sup>2</sup> · g <sup>-1</sup> )	Density/ ( g · cm <sup>-3</sup> )
1	Short helical carbon nanofiber	80-100		< 1	0 ± 10	5-8	Shan dong university of science and technology
2	Carbon nanofiber	50-200		10-40			Shenyang gold nano
3		200-500		10-40			new material Co., Ltd.
4	Multiwalled carbon nanotube		10-30	± 2		40-300	Shenzhen nanotech port Co., Ltd.
5			40-60	± 2		40-300	
6			60-100	5-15		40-300	
7	Nanographite		20-100				Siping Gaosida nano material Co., Ltd., Jilin
8	Carbon nanopowder		10				Foreign carbon nanopowder

2 实验方法

2.1 测试方法

激光双波长烟雾透过率测试装置调试好后开启工作, 首先采集激光本底透过率, 然后用高压气流将纳米材料快速喷洒到烟幕箱中, 为了使材料在箱中分散均匀, 开动风扇搅拌 20s 后停止, 风扇搅拌停止 1min 后, 启动烟雾浓度采样装置开始浓度采样。为了保证烟幕质量浓度的代表性, 在烟幕箱的测试光路所在平面的不同位置上布设了 2 组质量浓度采样系统, 平均值为该试样的烟幕质量浓度。为了分析烟幕材料的留空性, 间隔 2min, 选取不同时间段测量 2-3 次, 每次采样时间为 1min, 采样流量为 40L/min。测试结束后, 打开烟箱门, 启动排烟装置, 将箱中烟幕排尽, 再进行下一次测量。

2.2 烟幕质量浓度和沉降速度

烟幕的质量浓度是表征烟幕遮蔽与干扰特征的物理量, 也是进一步定量计算烟幕遮蔽干扰性能的必要

数据。烟幕的质量浓度用滤膜称重法测定。在烟幕箱中抽取一定体积烟幕, 使其通过玻璃纤维滤膜, 烟幕粒子被阻留在滤纸上, 根据滤膜增加的质量与所采样烟幕的体积之比, 计算烟幕固态微粒质量浓度。

当材料吹入烟箱后 10~30s 开机采样, 并启动计时仪。当采样时间到达预定时间, 停止采样, 读取流量和时间。从采样器内取出滤膜称重。烟幕固体微粒质量浓度按式(1)计算:

C = (m1 - m2)/Q (1)

式中: C 为烟幕固体微粒质量浓度, g/m<sup>3</sup>; m1 为采样后滤膜的质量, g; m2 为采样前滤膜的质量, g; Q 为采样流量, m<sup>3</sup>/s。

沉降速度反映了发烟剂所形成烟幕的留空时间。在烟幕箱内使用搅动沉降模型得到烟幕瞬时质量浓度 C 的数学表达式<sup>[5]</sup>:

C = C0e<sup>-vD/H</sup> (2)

式中: t 为时间; C0 为烟幕初始浓度; H 为烟幕箱高度; vD 为沉降速率。用在时间间隔 t1~t1+τ 及 t2~t2

+  $\tau$  内测得的两滤纸浓度  $C(t_1)$  和  $C(t_2)$  可计算出  $v_D$ :

$$v_D = \frac{H}{t_2 - t_1} \ln \frac{C(t_1)}{C(t_2)} \tag{3}$$

式中:  $C(t_1)$  为  $t_1$  时的平均烟幕质量浓度;  $C(t_2)$  为  $t_2$  时的平均烟幕质量浓度;  $H$  为烟幕箱高度。

3 结果及分析

3.1 实验结果

本工作共进行了 9 次实验, 其中 1 号材料称取

20g, 不添加分散剂, 另外对 8 种材料称取 20g, 分别添加 1g 的纳米  $\text{SiO}_2$ <sup>[9]</sup> 作为分散剂, 用高压气流喷洒入烟箱中。测量烟幕对 1. 06 $\mu\text{m}$  激光的透过率, 同时进行浓度采样。不同时刻测得的烟幕质量浓度和由式 (3) 计算的沉降速度结果如表 2 所示。表 2 中 No. 1 (1) 为未添加分散剂的 1 号材料形成的烟幕, 其他均是添加分散剂的材料形成的烟幕。 $C_1, C_2, C_3$  分别为三个时间点测量的烟幕质量浓度;  $V_1$  为第一个时间段的沉降速度;  $V_2$  为第二个时间段的沉降速度;  $V_D$  为平均沉降速度。

表 2 烟幕浓度质量及沉降速度  
Table 2 Mass concentrations and deposition velocities

No	Mass concentration/( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )			Deposition velocity/( $10^{-3} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )		Average deposition velocity/( $10^{-3} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$V_1$	$V_2$	$V_D$
1(1)	0.623	0.509		2.021		2.021
1	0.870	0.812		0.6899		0.6899
2	0.384	0.225	0.152	5.3454	3.9222	4.6338
3	0.417	0.266	0.201	4.4959	2.8019	3.6489
4	0.454	0.307	0.215	3.9125	3.5621	3.7373
5	0.501	0.208	0.128	8.7807	4.8551	6.8179
6	0.372	0.232	0.154	4.7216	4.0978	4.4097
7	0.767	0.677	0.506	1.2482	2.9113	2.0797
8	0.587	0.563	0.430	0.4175	2.6949	1.5562

8 种材料(添加过分散剂)所形成烟幕对 1. 06 $\mu\text{m}$  激光的透过率如图 2 所示。

3.2 分析与讨论

3.2.1 原材料对烟幕动力学性能的影响

作为烟幕干扰材料必须具有好的滞空性, 这样形成的烟幕才能在较长时间内形成有效的干扰。如果烟幕粒子沉降过快, 则影响有效干扰时间。从图 2 可以看出, 1, 2, 4 号和 5 号材料的有效干扰时间在 10min 以上, 6 号材料的有效干扰时间在 15min 以上, 3, 7 号和 8 号材料的有效干扰时间均在 20min 以上。另外, 从透过率随时间的变化趋势可以看出, 除 2 号和 5 号材料外, 其余六种材料对激光的透过率随时间变化缓慢, 说明这些材料空气动力学性能稳定。从表 2 的平均沉降速度可以看出, 8 种材料中, 除 5 号外, 其余七种材料形成烟幕的沉降速度在  $(1 \sim 5) \times 10^{-3} \text{m/s}$  之间, 说明这几种材料形成烟幕的沉降速度小, 能在空中长时间悬浮。

从以上各种纳米材料的质量浓度测试结果可以看出, 1, 5, 7, 8 号材料吹入烟幕箱中形成的最初烟幕质量浓度值较高, 在  $0.5 \text{g/m}^3$  以上, 说明这些材料的成烟性较好。因此纳米石墨由于分散性好于纳米碳纤维, 在烟箱中的飘浮性能好, 形成的质量浓度较高。纳

米碳纤维材料虽然对微波、毫米波、红外有很好的衰减性能<sup>[3]</sup>, 但用于烟幕干扰材料, 还必须进一步解决分散性问题。

短切的螺旋纳米碳纤维由于分散性好, 在烟箱中形成的烟幕浓度相对最大, 其干扰效果明显好于其他纳米碳纤维。相对而言, 直径越小、长度越长的纳米碳纤维、碳纳米管越容易团聚, 分散性越不好, 团聚成较大颗粒, 容易沉降。添加一定的分散剂, 虽然能有效抑制纳米材料的软结团现象, 提高分散性, 但还不能消除硬结团现象。所以, 要使干扰材料在空中具有足够的质量浓度和良好的飘浮特性, 应选择直径在 40nm 以上, 长度不大于 15 $\mu\text{m}$  的纳米碳纤维作为电磁波干扰材料。由于尺寸不同, 吸波频段不同, 故可以将各种不同直径的纳米碳纤维材料相组合实现从红外、毫米波至微波的宽频段无源干扰。

3.2.2 分散剂对烟幕动力学性能的影响

对于一定的烟幕干扰材料, 烟幕质量浓度越高, 说明单位体积内粒子的质量和数量越多, 衰减效果越好。所以, 提高烟幕的质量浓度可提高烟幕的消光效果。由于纳米材料都不可避免的存在团聚现象, 影响成烟率, 因此必须减少这种团聚现象。纳米  $\text{SiO}_2$  具有很好的分散性, 从 1 号材料的质量浓度测试结果可以看出,

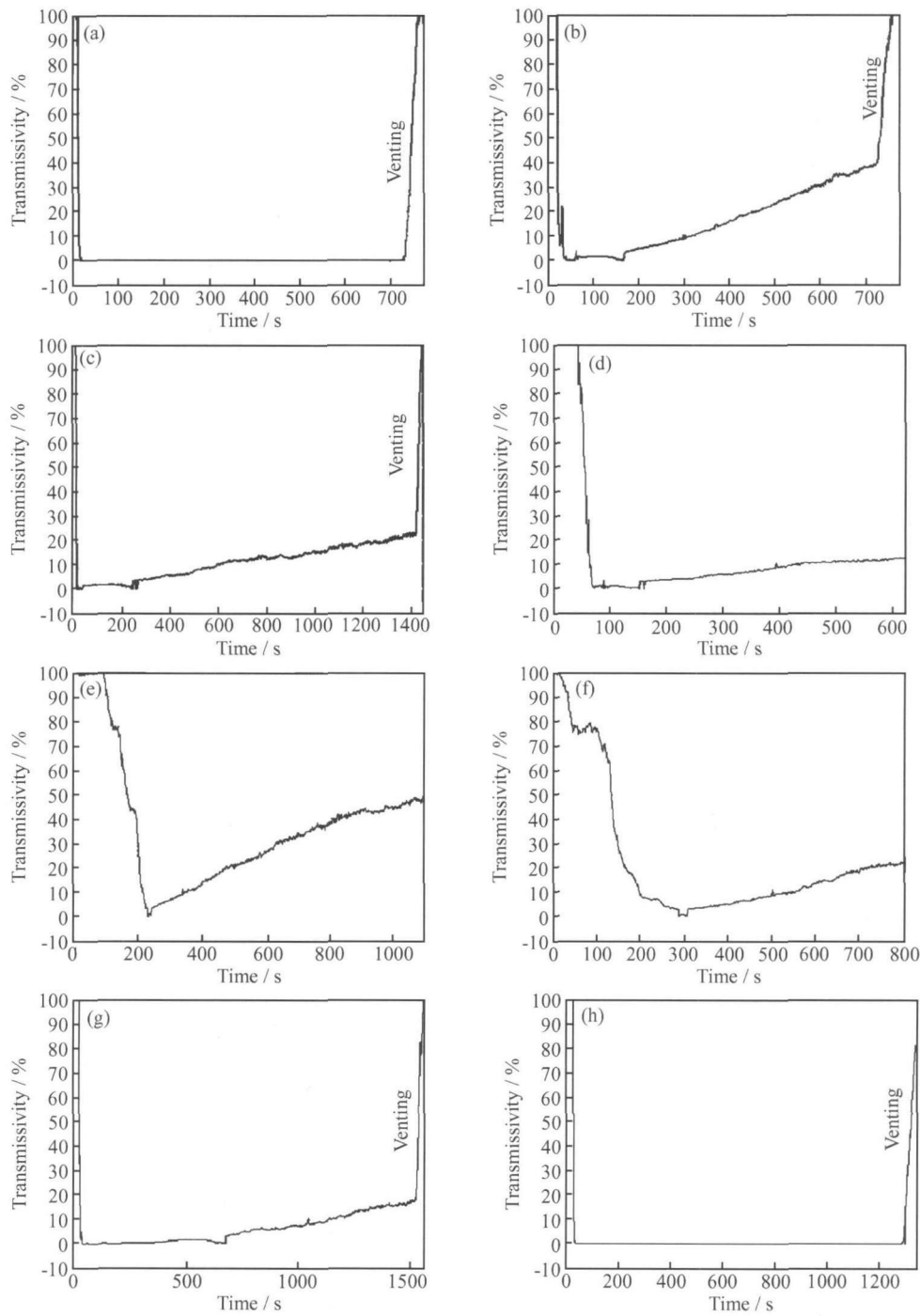


图 2 8 种材料所形成烟幕对 1.06μm 激光的透射率

(a) 1 号短切螺旋纳米碳纤维; (b) 2 号纳米碳纤维; (c) 3 号纳米碳纤维; (d) 4 号纳米碳管;  
(e) 5 号纳米碳管; (f) 6 号纳米碳管; (g) 7 号纳米石墨; (h) 8 号国外纳米碳粉

Fig 2 Transmissivity of eight kinds of carbon nanomaterials smoke screens to 1.06μm laser emission

(a) No 1 short helical carbon nanofiber; (b) No 2 carbon nanofiber; (c) No 3 carbon nanofiber;  
(d) No 4 multi walled carbon nanotube; (e) No 5 multi walled carbon nanotube;  
(f) No 6 multi walled carbon nanotube; (g) No 7 nanographite; (h) No 8 carbon nanopowder

添加 1g 的纳米 SiO<sub>2</sub> 分散剂后, 两次采样测得的质量浓度分别增加了 39.6% 和 59.5%, 沉降速度从 2.021 × 10<sup>-3</sup> m/s 降到 0.6899 × 10<sup>-3</sup> m/s。说明纳米 SiO<sub>2</sub> 能够很好地抑制碳纳米材料的团聚现象。

4 结论

(1) 碳纳米材料形成的烟幕质量浓度高、空气动力  
(下转第 62 页)

导致钢板表面与心部温差很大, 该温差受冷却水对钢板表面的冲击速度、喷嘴的尺寸、冷却水温度、板厚及钢板本身导热能力等因素的影响。

(3) 钢板厚度方向不同位置的组织和性能的差别主要是由于冷却过程中各位置冷却速度不同造成的。

#### 参考文献

- [1] FILIPOVIC J, VISKANTA R, INCROPERA F P, et al. Thermal behaviour of a moving steel strip cooled by an array of planar water jets [J]. *Steel Research*, 1992, 63(10): 438–446.
- [2] SHA X C, LI D Z, LAN Y J, et al. Modelling the temperature distribution along the length of strip during hot rolling process [J]. *Steel Research International*, 2004, 75(5): 330–338.
- [3] LAN Y J, LI D Z, SHA X C, et al. Prediction of microstructure and mechanical properties of hot rolled strip steel: Part I. models description [J]. *Steel Research International*, 2004, 75(7): 458–463.
- [4] ZHANG Y T, MO C L, LI D Z, et al. Modelling of phase transformation of plain carbon steels during continuous cooling [J]. *Journal of Material Science and Technology*, 2003, 19(3): 262–264.
- [5] SIKDAR S, MUKHOPADHYAY A. Numerical determination of heat transfer coefficient for boiling phenomenon at runout table of hot strip mill [J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2004, 31(6): 495–502.

- [6] EVANS J F, ROEBUCK L D, WATKINS H R. Numerical modeling of hot strip mill runout table cooling [J]. *Iron and Steel Engineer*, 1993, 70(1): 50–55.
- [7] SEREDYNSKI F. Prediction of plate cooling during rolling mill operation [J]. *Journal of the Iron and Steel Institute*, 1973, 211(3): 197–203.
- [8] 支颖, 刘相华, 王国栋. 热轧带钢层流冷却中的温度演变及返红规律[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2006, 27(4): 410–413.
- [9] GEBHART B. Heat transfer [M]. New York: McGraw-Hill, 1961.
- [10] JACOBI H, KAESTLE G, WÜNNENBERG K. Heat transfer in cyclic secondary cooling during solidification of steel [J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 1984, 11(3): 132–145.
- [11] BERENSON P J. Film boiling heat transfer from a horizontal surface [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1961, 83(3): 351–358.
- [12] DEVA A, MOHAPATRA S K, DATTA R. Production of thick plate on the hot strip mill at the rourkela steel plant [J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2004, 31(4): 305–311.

收稿日期: 2008-12-23; 修订日期: 2009-04-15

作者简介: 魏世同(1981—), 男, 博士研究生, 现从事材料加工专业, 联系地址: 辽宁省沈阳市沈河区文化路 72 号中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家联合实验室材料加工模拟研究部(110016), E-mail: stwei@imr.ac.cn

(上接第 56 页)

学性能稳定、沉降速度小。要使干扰材料在空中具有足够的质量浓度和良好的悬浮特性, 直径在 40nm 以上, 长度不大于 15 $\mu$ m 的纳米碳纤维作为电磁波干扰材料比较合适。

(2) 材料的分散性对其形成烟幕的空气动力学性能有很大影响。短切的螺旋纳米碳纤维由于分散性好, 在烟箱中形成的烟幕浓度相对最大, 其干扰效果明显好于其他纳米碳纤维材料。

(3) 在复合碳粉发烟剂中添加纳米 SiO<sub>2</sub> 可有效改善发烟剂的流动性和分散性, 延长了烟幕的留空时间, 降低了烟幕粒子的沉降速度, 从而大大提高烟幕的有效遮蔽时间。

#### 参考文献

- [1] 乔小晶, 王长福, 任慧. 新概念无源干扰技术[J]. *火工品*, 2001, (1): 47–49.
- [2] IIJIMA S. Helical microtubules of graphitic carbon [J]. *Nature*, 1991, 354: 56–58.
- [3] 成会明. 纳米碳管制备、结构、物性及应用[M]. 北京: 化学工业

出版社, 2002. 456–466.

- [4] 王红霞, 刘代志, 宋仔标. 纳米石墨烟幕对红外激光的消光特性研究[J]. *激光与红外*, 2007, 37(3): 262–265.
- [5] 潘功配, 杨硕. 烟火学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1997. 275–276.
- [6] SUN Zai, HUANG Zhen, WANG Jir song. Experimental and modeling studies on number and size spectrum evolutions of aerosol particles within a chamber [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(10): 1302–1306.
- [7] ZHANG Z, CHEN Q. Experimental measurements and numerical simulations of particle transport and distribution in ventilated rooms [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40: 3396–3408.
- [8] 刘峰, 宋黎, 崔海龙. 烟幕扩散的实验研究与数学模型方法[J]. *防化学报*, 2006, 96(6): 39–43.
- [9] 刘丰, 郑秋红, 李小红, 等. 可分散性纳米二氧化硅增强硅橡胶 [J]. *复合材料学报*, 2006, 23(6): 57–63.

收稿日期: 2008-12-02; 修订日期: 2009-04-15

作者简介: 宋仔标(1980—), 博士研究生, 主要从事烟幕无源干扰等方面的研究, 联系地址: 陕西省西安市洪庆镇第二炮兵工程学院研究生 4 队(710025), E-mail: songzibiao@163.com