

# 纤维吸波剂研究进展

邱华<sup>1,2</sup>, 唐继海<sup>1,2</sup>, 杨骐<sup>1,2</sup>, 谭延江<sup>1,2</sup>

(1. 中国兵器工业第五九研究所, 重庆 400039;

2. 重庆市环境腐蚀与防护工程技术研究中心, 重庆 400039)

**[摘要]** 以雷达隐身技术为切入点,重点介绍了碳纤维、碳化硅纤维、多晶铁纤维的吸波机理、改性及制备研究,并对该类吸波剂的电磁参数和相关吸波材料的吸波性能进行了分析。对于纤维类轻质吸波剂的进一步研究和应用,具有一定的指导意义和参考价值。

**[关键词]** 纤维吸波剂; 碳纤维; 碳化硅纤维; 多晶铁纤维

**[中图分类号]** TB34

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1001-3660(2010)06-0066-05

## Research Development of Fiber Absorbent

QIU Hua<sup>1,2</sup>, TANG Ji-hai<sup>1,2</sup>, YANG Qi<sup>1,2</sup>, TAN Yan-jiang<sup>1,2</sup>

(1. NO. 59 Institute of China Ordnance Industry, Chongqing 400039, China;

2. Chongqing Engineering Research Center for Environmental Corrosion and Protection, Chongqing 400039, China)

**[Abstract]** Aiming at radar stealth technology, absorbing mechanism, modification and preparation of carbon fiber, silicon carbide fiber and polycrystalline iron fiber were introduced. Electromagnetic parameters of fiber absorbent and absorbing properties of related absorbing material were also analyzed. This has important guiding significance and reference value for further development and application of light fiber absorbent.

**[Key words]** fiber absorbent; carbon fiber; silicon carbide fiber; polycrystalline iron fiber

随着雷达侦察和制导技术飞跃地发展,隐身技术越来越受重视。吸波材料作为重要的隐身材料,“薄、轻、宽、强”是人们研究它的目标<sup>[1-2]</sup>。世界各国都在全力研发新型的轻质高效吸波剂<sup>[3-4]</sup>,寻求设计机理的创新。由于具有独特的电磁性能、密度小、添加量低,纤维吸波剂已成为当前研究的热点<sup>[5]</sup>。

## 1 纤维吸波剂吸波机理

### 1.1 碳纤维

碳纤维中碳的质量分数一般在 90% 以上,其导电性能良好,与金属接近,由于纤维间距和用量的不同,可用作雷达波的强反射体,也能做成电磁波的吸波体。碳纤维可通过趋肤效应损耗电磁能<sup>[6]</sup>,同时可对电磁波进行多次散射,使电磁波相互抵消,从而损耗部分电磁波能量,宏观上显现吸波效果。

短切碳纤维在电磁场可被视为谐振子<sup>[7]</sup>,不会产生连续传导电流。当基体中的短切碳纤维含量低、两两处于分散状态但十分靠近时,由于电子跃迁,产生隧

道效应,能提高材料介电常数的实部。短切碳纤维长度接近入射电磁波半波长时,将与外场产生强烈的谐振效应,起到损耗入射电磁波能量的作用。当基体中的短切碳纤维含量较高时,在电磁场中因纤维足够靠近而形成的电力线会相互排斥,各个微电场相互叠加,呈现强反射特性,不能损耗电磁波,不具有吸波效果。

螺旋碳纤维是典型的手征材料<sup>[8]</sup>,其晶粒尺寸分布范围较大,对电磁波的频散效果好;微小的螺旋结构,使螺旋碳纤维比表面大、表面原子活性高,容易吸收电磁波能量,达到激发状态,发生跃迁,损耗能量;并使入射电磁波产生交叉极化,提高介电损耗和对电磁波的损耗。

### 1.2 碳化硅纤维

碳化硅为混杂型半导体,有不同的晶形,其中, $\alpha$ -碳化硅单晶的电阻率为  $10^9 \sim 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ , $\beta$ -碳化硅单晶的电阻率  $> 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 。SiC 纤维由碳化硅经转化而成,一般 SiC 纤维的电阻率在  $10^0 \sim 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$  变化。可通过改变 SiC 纤维中元素种类及含量、高温和电子辐照等手段,调整 SiC 纤维电阻率在  $10^1 \sim 10^3 \Omega$

• cm 范围内,使其具备良好的吸波效果<sup>[9-10]</sup>。

### 1.3 多晶铁纤维

多晶铁纤维具有磁各向异性,其轴向磁导率大于径向磁导率,轴向介电常数大于径向介电常数,轴向有效磁导率可以很高;它能以涡流损耗、磁滞损耗和介电损耗等多种机制衰减电磁波能量。可在基体中含量较低的情况下获得较高的等效磁导率,易实现减重、展宽频带<sup>[11-12]</sup>,显示出较好的吸波效果。

## 2 纤维吸波剂制备及改性研究

### 2.1 碳纤维

#### 2.1.1 表面改性

在碳纤维表面沉积金属、无机非金属陶瓷以及高分子等涂层,均可改善纤维的电磁参数。沈曾民等<sup>[13]</sup>采用化学镀工艺在中空纳米碳纤维(碳纳米管)表面镀镍,制成厚度为 0.97 mm 的吸波涂层,在 8~18 GHz,反射率最优为 -11.85 dB,小于 -10 dB 的频宽为 2.23 GHz,小于 -5 dB 的频宽为 4.6 GHz。较相同厚度的碳纳米管吸波涂层,镀镍后吸波峰值减小,但有展宽趋势,对提高吸波性能十分有利。邱华<sup>[14]</sup>采用镍、铁微粉对碳纤维进行混杂改性,制备厚度为 0.8 mm 左右的吸波涂层在 26.5~40 GHz 的雷达波反射率小于 -10 dB。采用化学镀工艺对碳纤维表面镀镍和磷<sup>[15]</sup>,能提高碳纤维对雷达波的损耗能力。Murakami R I 用微波水热法在碳纤维上涂覆铁氧化物涂层,涂层以碳纤维的介电损耗和铁氧化物的磁损耗来衰减电磁波<sup>[16]</sup>。

#### 2.1.2 先驱体法

在碳纤维制备过程中,将原材料与其它成分混合,并经特殊工艺得到一种新型碳纤维,开辟了碳纤维电磁改性的新途径。国外有报道<sup>[17-18]</sup>,将粒径约为 0.5~10  $\mu\text{m}$  铁系金属粉末混入聚丙烯腈或木质系碳纤维等有机纤维原料中,经 350~800  $^{\circ}\text{C}$  加热碳化,制得具有较高电导率和磁导率的高强度碳纤维,是一种较理想的吸波剂。

#### 2.1.3 异型截面

异型截面碳纤维的截面是呈三角形和四方形等,具有优异的吸波性能和力学性能。异型截面碳纤维制成的三维织物吸波原理类似尖劈吸波材料,吸波性能较好。美国、法国已将异型截面碳纤维用于隐身飞机。含圆环形短切中空多孔碳纤维的 2 mm 厚的吸波材料,在 2~18 GHz 频带内最低反射率达到 -21.36 dB,其中反射率小于 -10 dB 的带宽为 2.88 GHz,小于 -5 dB 的带宽为 5.17 GHz<sup>[19]</sup>。

### 2.1.4 螺旋碳纤维

国内近年来对螺旋碳纤维的研究取得了较大进展。青岛海洋大学<sup>[20]</sup>研制的螺旋碳纤维类吸波材料,在 26.5~40 GHz 频带内,雷达波反射率小于 -10 dB;采用化学镀方法在纳米螺旋碳纤维表面沉积 Ni-Co-B 涂层,磁性明显改善,饱和磁化强度则达到了 19.1 A $\cdot$ m/kg。中科院理化所摒弃了传统由异臭有毒的噻吩催化剂制备螺旋碳纤维的方法<sup>[21]</sup>,研制出新型催化剂并设计出中试生产窑炉,该院用螺旋碳纤维制备的吸波材料在 5~18 GHz,雷达波反射率小于 -5 dB。刘登友等<sup>[22]</sup>采用 CVD 法在石墨碳层上直接合成微螺旋碳纤维,直径约为 800 nm,单纤维直径约为 400 nm。Motojima S 等<sup>[23]</sup>合成的微单螺旋碳纤维,螺旋外径为 1~3  $\mu\text{m}$ ,单纤维直径为 0.5  $\mu\text{m}$ ,螺距为 1~3  $\mu\text{m}$ ,螺旋长度为 1 mm,同时含有相同数量的左旋和右旋,与通常合成的微双螺旋相比螺距较大。对螺旋碳纤维用于吸波材料研究表明,螺旋碳纤维的长度和含量是影响吸波性能的决定性因素。Bi H 等<sup>[24]</sup>对碳螺旋微卷进行了化学镀镍改性。

### 2.2 碳化硅纤维

#### 2.2.1 表面改性

表面改性,目前以沉积导电层碳、铁、镍、钴等方法为主。Mouchon 等研究表明<sup>[25]</sup>,SiC 纤维与玻璃陶瓷基体热压复合时,易在表面形成富碳界面层,有效降低纤维表面电阻率,提高吸波性能。短切 SiC 纤维表面镀镍,是调节 SiC 纤维复介电常数的有效手段<sup>[26]</sup>;在短切 SiC 纤维表面镀不同含量的钴、铁元素,可调节电磁参数,如降低 Fe 含量, $\epsilon'$ , $\epsilon''$ , $\mu'$  增大,当 Fe/(Fe+Co) 约为 0.41 时  $\mu'$  达到最大值。采用化学气相沉积法在 SiC 纤维表面沉积一层 B<sub>4</sub>C 涂层,获得的 SiC 纤维在 X 波段的介电常数实部和虚部随频率升高而降低,具有很好的频散效应,对展宽材料的吸波频带十分有利;其介电损耗均大于 1,是一种介电损耗较大的材料。在 SiC 纤维上涂覆钡铁氧化物涂层<sup>[27]</sup>,可很好地改变 SiC 纤维的电磁性能,得到了比饱和磁化强度为 1 A $\cdot$ m/kg 的电磁改性 SiC 纤维。

#### 2.2.2 先驱体法

在 SiC 纤维的先驱体中加入良导电物、磁性材料或有机金属化合物,在烧成过程中形成的金属微粒或金属碳化物,均可改善 SiC 纤维的电、磁参数,提高其吸波性能。国防科技大学是我国最早开展先驱体法制备 SiC 纤维和含钛 SiC 纤维的单位,目前已建成了年产量为 500 kg 的中试生产线。王军等<sup>[28]</sup>在聚碳硅烷中分别加入 Fe,Co,Ni,制备的 SiC 纤维的电阻率急剧下降,其介电常数实部、磁导率实部和介电损耗正切

值、磁损耗正切值均增大,用这些 SiC 纤维制备的吸波材料频带在 8~18 GHz,最优雷达波反射率小于-10 dB。厦门大学通过电子束辐射和热化学交联的方式,实现了 SiC 原丝纤维的非氧气氛交联,最后制得低氧含量的高耐温 SiC 纤维,其性能接近日本同类产品水平<sup>[29]</sup>。陈志彦等<sup>[30]</sup>用聚铁碳硅烷制得的 Si-Fe-C-O 纤维,电阻率最低为  $10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ ,直径为 12~14  $\mu\text{m}$ ,在具有较大介电损耗的同时还具有一定的磁损耗,在 8~18 GHz 频段内,小于-10 dB 的带宽为 4.0 GHz,最优反射率达到-15.4 dB。

### 2.2.3 高温处理

用先驱体转化法合成的 Nicalon SiC 陶瓷纤维的烧成温度一般为 1 250  $^{\circ}\text{C}$ ,它是由直径约为 2 nm 的  $\beta$ -SiC 微晶和少量均匀分布的游离碳组成。当热处理温度不低于 1 400  $^{\circ}\text{C}$  时<sup>[31]</sup>,网络中将析出更多的游离碳,会大大降低 SiC 纤维的电阻率,介电损耗得以提高,对电磁波的损耗增强,但高温处理会使 SiC 纤维的力学性能下降。

### 2.2.4 异型截面 SiC 纤维

目前研制取得较大进展的是三叶形截面 SiC 纤维,它具有良好的吸波性能。当烧结温度在 1 000  $^{\circ}\text{C}$  或 1 250  $^{\circ}\text{C}$  时制备的三叶形 SiC 纤维的  $\epsilon''$  值明显增大,可达到圆形 SiC 纤维的 60 倍左右,其介电损耗特性优异,最大正切值可达 1.9。在 11.6~18.0 GHz,雷达波反射率均小于-10 dB,在 13.9~18.0 GHz,最小雷达波反射率为-20 dB。三叶形截面 SiC 纤维因存在表面缺陷和断面缺陷,力学性能会有一定下降<sup>[32]</sup>。采用电子束间歇辐照聚碳硅烷先驱丝<sup>[33]</sup>,通过一定的工艺可制备出管壁厚度可调的圆形截面 SiC 纤维管。

### 2.2.5 SiC—C 纤维

SiC—C 纤维是以  $\beta$ -SiC 微晶与自由状态的 C, N, Fe, Ni, Co, Ti, Zr 中的一种或多种成混晶状态,它对电磁波的损耗包括介电损耗和磁损耗。文献<sup>[34]</sup>通过聚碳硅烷与沥青共混纺丝,然后将其硫化成为热不熔化物,在  $\text{N}_2$  气流下以 200~250  $^{\circ}\text{C}/\text{h}$  的升温速度加热至 1 000~1 200  $^{\circ}\text{C}$ ,烧结一定时间转化为 SiC—C 纤维,它与环氧树脂复合制成的吸波材料,对 8~12 GHz 的电磁波反射率小于-10 dB,最优反射率小于-29 dB。

## 2.3 多晶铁纤维

制备多晶铁纤维有化学和物理两类方法,物理方法制备直径 4  $\mu\text{m}$  以上金属纤维的技术较为成熟,化学方法则能制备出直径更小的金属纤维。

### 2.3.1 磁场引导羰基热分解法

磁性金属羰基化合物可经加热并在磁场引导下生

成纤维<sup>[35]</sup>。磁场引导羰基热分解法制备效率高、可操作性强,能连续大批量制备长径比可控的磁性金属纤维,很好地解决了高质量磁性金属纤维的制备问题<sup>[36]</sup>。国外在这一方面已经申请了多项专利,其中美国 3M 公司和欧洲 GAMMA 公司的铁纤维已经商品化。与生产羰基粉末相比,制备磁性金属纤维采用了磁场引导的装置,磁场可以通过电磁线圈来产生,也可以采用永磁铁来产生磁场<sup>[37]</sup>。国内研究者大都采用电磁线圈来产生磁场。李享成<sup>[38]</sup>等研究了羰基化合物气化速率、保护气氛流量、热解温度 and 外加磁场强度等因素的调控,制备出的铁的质量分数在 90%~98% 范围内可调、直径在亚微米到微米及长径比可调的羰基铁纤维。调节热解温度可控制多晶铁纤维晶粒直径和碳含量,并能获得电磁性能优良的多晶铁纤维<sup>[39]</sup>。涂国荣等<sup>[40]</sup>研制出在 2~18 GHz 具有较高介电常数和磁导率的多晶铁纤维,制备量可达到 90 g/h。磁场引导羰基热分解法对设备及工艺要求高,原料和中间产物有毒易燃易爆,工程中获得高强度的外加磁场也很难,但仍然是有潜力批量制备纳米级磁性金属纤维的方法之一。

### 2.3.2 液相沉积法

液相沉积法是由铁盐制备针状氧化物,然后经过洗涤、抽滤、干燥、研磨和氢气还原等过程,得到最终产物纤维。唐超等<sup>[41]</sup>采用液相沉积法以  $\text{FeSO}_4$  和 NaOH 为原料制备了  $\alpha$ -Fe 纤维。Yu. A. Fedutik<sup>[42]</sup>用此法制备了 Ni-Fe 和 Ni-Co 合金纤维,其中反应速度和纤维的直径控制,是反应过程中两个重要的环节<sup>[43-44]</sup>。液相沉积法所用原料成本低,反应条件温和,易于控制纤维的长度和直径,但后续过程中纤维的结构和化学成分易发生变化,产生断裂和孔穴等缺陷,需优化后续工艺方可批量制备。

### 2.3.3 模板法

模板法是当前国内外研究的热点<sup>[45]</sup>,是制备有序纳米材料的重要方法,包括选择样模、注入材料以及后续工艺等过程。目前常用的模板主要有 2 种,一种是有序孔洞阳极氧化铝(AAO)模板,另一种是含有孔洞无序分布的高分子模板。AAO 模板因微孔直径可足够小且易于控制分布、耐高温和绝缘性好等优异性能备受关注。但由于结构限制,目前模板法难以实现批量生产。

### 2.3.4 凝胶前驱体纤维热分解还原法

邓橙<sup>[46]</sup>以金属盐和络合物为原料,通过络合反应制备具有可纺性的溶胶,经过干法纺丝、凝胶化、高温热解还原制得了 4 种磁性金属纤维。其中,镍纤维和 Ni-Co 合金纤维频散特性较好,可成为一种性能优异

的新型吸波剂材料。该法具有低成本、反应过程温和等特点,但热分解还原过程中,晶形结构和化学成分容易产生较大变化,且纤维直径较大,不能达到纳米级。

### 2.3.5 玻璃包覆熔融纺丝法

玻璃包覆熔融纺丝法是将金属熔体拉成丝材,制成一种直径在  $1\sim 20\ \mu\text{m}$ ,外面覆盖一层玻璃的金属或合金半导体微丝的一种技术,该微丝通过热处理后可具有软磁性或硬磁性。玻璃包覆熔融纺丝法获得的纤维密度低,耐氧化,易分散,但该法还不能满足制备更小直径磁性金属纤维以及批量生产的要求。

## 3 结语

1) 经某些特殊技术或工艺制备的纤维吸波剂,电、磁特性优异,可用于毫米波、厘米波等吸波材料,是实现隐身材料“薄、轻、宽、强”的有效途径,具有广阔的应用前景。

2) 纤维吸波剂具有明显的各向异性,轴向和径向的介电常数及磁导率差别较大。在化学成分及结构一定的情况下,长径比是影响纤维吸波剂电磁参数的决定性因素。

3) 我国对纤维吸波剂的研究起步较晚,取得了初步应用,但在电磁机理、微观创新设计和工程应用等方面还有很大的研究空间。

### [参 考 文 献]

- [1] Vladimir B B. Advantages of Ferromagnetic Nanoparticle Composites in Microwave Absorbers[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(3): 1679-1684.
- [2] 刘振玉,刘祥莹,王焯军. 雷达吸收剂的现状与发展[J]. 湖北航天科技, 2004(3): 1-4.
- [3] 李金镭,陈康华,范令强,等. 雷达吸波材料的研究进展[J]. 功能材料, 2005, 36(8): 1151-1155.
- [4] Petrov V M, Gagulin V V. Microwave Absorbing Materials[J]. Inorganic Materials, 2001, 37(2): 93-98.
- [5] Wu M Z, He H H, ZHAO Z S, et al. Electromagnetic Anisotropy of Magnetic Iron Fibres at Microwave Frequencies[J]. Phys D: Appl phys, 2001, 34: 1069-1074.
- [6] 刘顺华,刘军民,董星龙,等. 电磁波屏蔽及吸波材料[M]. 北京:化学工业出版社, 2007.
- [7] 邢丽英,刘俊能. 短碳纤维电磁特性及其在吸波材料中应用研究[J]. 材料工程, 1998(1): 19-21.
- [8] 陈丽娟,李文军. 螺旋碳纤维—雷达隐身的关键吸波材料[J]. 高技术纵览, 2005(9): 56-57.
- [9] 罗发,周万城,焦桓,等. 高温吸波材料研究现状[J]. 宇航材料工艺, 2002(1): 9.
- [10] Yamamura T, Toshikawa T, Shibuya M. Electromagnetic Waveabsorbing Material; USP, 5094907[P]. 1992-02-15.
- [11] 谢炜,程海峰,楚增勇,等. 磁性金属纤维吸收剂制备研究进展[J]. 材料工程, 2008(3): 73.
- [12] 李亨成,龚荣洲,赵振声. 羰基铁镍纤维的磁场诱导制备及结构特性研究[J]. 华中科技大学学报, 2006, 34(1): 93-95.
- [13] 沈曾民,赵东林. 镀镍碳纳米管的微波吸收性能研究[J]. 新型炭材料, 2001, 16(1): 14.
- [14] 邱华. TH04-80 吸波涂料研究[D]. 重庆:重庆大学, 2006.
- [15] 张积桥,杨玉国,朱红. 碱性条件下碳纤维镀镍[J]. 表面技术, 2008, 37(4): 37-39.
- [16] Murakami R I, Yamamoto H, Kim C K, et al. Electromagneticwave Shielding Effectiveness of Carbon Fiber sheet Coated Ferritefilm by Microwave-hydrothermal Process[J]. Int J Mod Phys B, 2003, 17: 8-9.
- [17] 石敏先,黄志雄. 新型吸波材料的研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(3): 36.
- [18] Toshihiro Ishikawa. Advances in Inorganic Fibers[J]. Adv Polym Sci, 2005, 178: 109-144.
- [19] 谢炜,程海峰,等. 短切中空多孔碳纤维复合材料的吸波性能[J]. 无机材料学报, 2008, 23(3): 483.
- [20] 矫海霞,谢广文,崔作林. 纳米螺旋碳纤维表面化学镀 Ni-Co-B 涂层研究[J]. 材料工程, 2007(4): 47-52.
- [21] 陈丽娟,李文军. 螺旋碳纤维——雷达隐身的关键吸波材料[J]. 高科技与产业化, 2005(9): 57.
- [22] Liu Deng-you, Luo Qi-mei. Direct Synthesis of Microcoiled Carbon Fibers on Graphite Substrate Using Co-electrodeposition of Nickel and Sulfur as Catalysts[J]. Mater Design, 2009, 30(3): 649.
- [23] Yang Shao-ming, Chen Xiu-qin, Motojima S. Tactile Sensing Properties of Protein-like Single Helix Carbon Microcoils[J]. Carbon, 2006, 44: 3346.
- [24] Bi H, Kou K C. Low-phosphorous Nickel-coated Carbon Microcoils: Controlling Microstructure Through an Electroless Plating Process[J]. Appl Surf Sci, 2009, 255(15): 1.
- [25] Mouchon E, Colombari P. Microwave Absorbent: Preparation, Mechanical Properties and r. F-microwave Conductivity of SiC (and/or mullite) Fiber Reinforced Nasicon Matrix composites[J]. J Mater Sci, 1996, 31(2): 323-334.
- [26] 程海峰,陈朝辉. 短切碳化硅纤维微波电磁参数改性研究[J]. 宇航材料工艺, 1999, 29(4): 41-44.
- [27] 黄小忠,申小海,冯春祥. 磁性涂层碳化硅纤维的电磁特性研究[J]. 复合材料学报, 2007, 38(4): 44.
- [28] 王军,陈革,宋永才,等. 含镍碳化硅纤维的制备及其电磁性能 II 含镍碳化硅纤维的电磁性能[J]. 功能材料, 2001,

32(1):37—39.

- [29] 陈建军,彭志勤,董文钧,等. 先驱体制备 SiC 纤维发展  
历程与研究进展[J]. 高科技纤维与应用,2010,35(1):40
- [30] 陈志彦,王军,等. 连续含铁碳化硅纤维及其结构吸波材  
料的研制[J]. 复合材料学报,2007,24(5):72.
- [31] 李轶,徐劲峰,徐政. 吸波纤维研究进展[J]. 现代技术陶  
瓷,2005,14(1):26.
- [32] 王应德,刘旭光,薛金根,等. 三叶形截面 SiC 纤维缺陷及  
其断裂镜面分析[J]. 武汉科技学院学报,2008,21(8):7—  
10.
- [33] 黎阳,许云书. 圆环形截面碳化硅纤维管的辐射化学法合  
成[J]. 辐射研究与辐射工艺学报,2010,28(1):15—18.
- [34] 欧阳国恩. 碳化硅—碳功能纤维[J]. 功能材料,1994,25  
(4):300—305.
- [35] 聂彦,赵振声,何华辉. 羰基热分解磁场引导制备多晶铁  
纤维原理分析[J]. 信息记录材料,2005,6(4):49—52.
- [36] Lee G H, Huh S H, PARK J W, et al. Arrays of Ferro-  
magnetic Iron and Cobalt Nanocluster Wires[J]. J Phys  
Chem B,2002,106:2123—2126.
- [37] Lee G H, Huh S H, Jeong J W, et al. Processing of Ferro-  
magnetic Iron Nanowire Arrays[J]. Scripta Materialia,

2003,49:1151—1155.

- [38] 李享成,龚荣洲. 铁镍纤维的磁场诱导制备及电磁性能研  
究[J]. 功能材料,2006,37(1):27—28.
- [39] 童国秀,官建国,樊希安,等. 热解温度对多晶铁纤维的静  
磁和微波电磁性能的影响[J]. 金属学报,2008,44(7):867  
—870.
- [40] 涂国荣,杜光旭,周晓华,等. 超细多晶铁纤维的制备与性  
能[J]. 中国粉体工业,2009(4):15—16.
- [41] 唐超,官建国,林东,等. 液相沉淀法制备铁纤维的研究  
[J]. 国外建材科技,2005,26(4):48—51.
- [42] Fedutik Y A, Shevchenko G P, Kurilo V S, et al. Ferro-  
magnetic Alloy Nanowires Forming in Applied Magnetic  
Field[J]. Surface Science,2004,566/568:297—302.
- [43] 赵振声,吴明忠,何华辉. 磁场引导水溶还原法制备磁性  
金属纤维[J]. 华中理工大学学报,1998,26(7):74—76.
- [44] 梁芳,郭林. 钴及其化合物一维纳米材料的制备研究进展  
[J]. 世界科技研究与发展,2006,28(4):37—41.
- [45] 谢炜,程海峰,楚增勇,等. 磁性金属纤维吸收剂制备研究  
进展[J]. 材料工程,2008(30):74.
- [46] 邓橙. 凝胶先驱体纤维热分解还原制备磁性金属纤维  
[D]. 长沙:国防科技大学,2005.

(上接第 28 页)

凹凸不平的表面,凹凸度可达 0.1~0.75 mm。有学  
者研究指出,电弧喷涂时,基体表面粗糙度越大,涂层  
与基体的结合强度也越大<sup>[9]</sup>。电拉毛后,涂层与基材  
结合的面积显著增加,表面形成了很多“抛锚效应”点,  
电弧喷涂时,飞向基材的熔融粒子撞击到经粗化处理  
的基材表面时,铺展成扁平状的液态薄片,覆盖并紧贴  
基材表面的凹凸点上,在冷凝时收缩咬住凸点(或称抛  
锚点),形成机械结合<sup>[10]</sup>。

2<sup>#</sup> 基体材料表面只进行了喷砂粗化处理,其表面  
粗糙度没有 3<sup>#</sup> 基体材料大,又没有 1<sup>#</sup> 基体材料那样  
的微冶金结合存在,所以结合强度较低。

### 3 结论

1) 电弧喷涂 4Cr13 涂层呈波浪形层状结构,由氧  
化物、孔隙、扁平颗粒、未变形粗大颗粒组成,氧化物的  
主要成分为 Fe、Cr 和 O。扁平颗粒呈波浪状相连,孔  
隙和氧化物分布于其中。涂层与基体的结合方式主要  
为机械结合。

2) 4Cr13 涂层的显微硬度值较高,具有较好的耐  
磨性。

3) 不同的表面预处理工艺对 4Cr13 涂层的结合  
强度影响很大,喷砂粗化并喷涂打底涂层、喷砂粗化并  
进行电拉毛均能显著提高涂层的结合强度,使其达到

27 MPa 左右。在喷涂电压为 37 V,喷涂电流为 180  
A,雾化空气压力为 0.55 MPa,喷涂距离为 200 mm  
时,基体表面最优的预处理工艺为喷砂粗化并喷涂打  
底涂层。

### [参 考 文 献]

- [1] 王海军. 热喷涂实用技术[M]. 北京:国防工业出版社,  
2006:126—127.
- [2] 武建军,曹晓明,温鸣. 现代金属热喷涂技术[M]. 北京:  
化学工业出版社,2006:210—212.
- [3] 张秀会,索双富,齐春影,等. 电弧喷涂技术的发展与应用  
[J]. 新技术新工艺,2003(12):42—44.
- [4] 王艳燕. 电弧喷涂马氏体不锈钢涂层的组织与性能研究  
[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2009:43—46.
- [5] 梁秀兵,陈永雄,许一,等. 高速电弧喷涂耐磨涂层性能研  
究[J]. 装甲兵工程学院学报,2007,21(1):77—80.
- [6] 吴子健,吴朝军,曾克里,等. 热喷涂技术与应用[M]. 北  
京:机械工业出版社,2005:289—298.
- [7] 董立先,王勇,孙建波,等. 电弧喷涂工艺参数对 3Cr13 涂层  
性能稳定性的影响[J]. 管道技术与设备,2005(1):33—35.
- [8] 邹慧,王志平,纪朝晖. Ni-Cr-Al 合金电弧喷涂工艺对涂  
层结合强度的影响[J]. 金属热处理,2010,35(2):51—54.
- [9] 杨晖,潘少明. 基体表面粗糙度对涂层结合强度的影响  
[J]. 热加工工艺,2008,37(15):118—121.
- [10] 徐维普,徐滨士,张伟. 高速电弧喷涂涂层的结合强度与  
结合方式研究[J]. 热加工工艺,2007,36(7):62—64.