

丝材长度对 CoFeSiBCr 玻璃包覆丝复合膜 噪声抑制的影响

张俊峰, 陈 征, 张宏浩, 刘天成, 李德仁, 卢志超, 周少雄

(中国钢研科技集团公司 安泰科技股份有限公司 技术中心, 北京 100081)

摘 要: 通过动态样品磁强计测试 CoFeSiBCr 玻璃包覆非晶丝的静态磁滞回线, 发现其不具有轴向畴。制备了含玻璃包覆非晶丝的膜状噪声抑制材料, 采用微带线测试系统测试微波散射参数并计算出功率损耗比, 研究丝材长度对复合膜微波噪声抑制特性的影响。结果表明: 随着丝材长度的增大, 复合膜样品的 S_{21} 曲线在测试频率范围内出现吸收峰, 且峰值对应的频率逐渐减小。复合膜禁带带宽随着丝材长度的增大而增大。丝材长度为 20 mm 时, 复合膜的禁带带宽最大, 达 7.1 GHz, 1.8~8.5 GHz 时功率损耗比高于 75%, 在千兆赫兹频率范围内具有较好的噪声抑制效果。

关键词: 非晶; 玻璃包覆丝; 噪声抑制片; 传输衰减

中图分类号: TB333; TM25

文献标志码: A

Influence of wire length on noise suppression of composite films containing CoFeSiBCr glass-covered wires

ZHANG Jun-feng, CHEN Zheng, ZHANG Hong-hao, LIU Tian-cheng, LI De-ren, LU Zhi-chao, ZHOU Shao-xiong

(Advanced Technology and Materials Co., Ltd., Technology Center, China Iron and Steel Research Institute Group,
Beijing 100081, China)

Abstract: The static hysteresis loop of CoFeSiBCr glass-covered amorphous wires was measured by vibrating sample magnetometer. The wires have no axial domains. The noise suppression film materials containing Co-based glass-covered amorphous wires were prepared for the first time. The microwave parameters were measured by microstrip measurement system, and the power loss rate was figured out. The influence of wire length on microwave noise suppression effect of the composite films was investigated. The results show that absorption peaks appear in the measuring frequency range for the S_{21} curves of the composite films when the wire length increases, and the frequencies corresponding to the absorption peaks increase with the increase of wire length. The stopband of the composite films increases with the increase of wire length. For the sample with wire length of 20 mm, the power loss rate is above 75% between 1.8 GHz and 8.5 GHz. That is an excellent noise suppression effect in the range of gigabyte Hz.

Key words: amorphous; glass-covered wire; noise suppression sheet; transmission attenuation

近年来, 随着电子和信息技术的快速发展, 电子产品的工作频率越来越高, 而为便携和多功能化, 电子设计集成度也越来越高, 大量高频率器件排在狭小的设备空间中, 带来了严峻的电磁干扰问题。电磁噪声抑制片用于减小噪声路径之间的耦合、抑制噪声

电流和降低噪声辐射^[1], 可有效降低电磁干扰强度。目前, TDK、NEC-TOKIN 等^[2]多家电磁兼容元件公司已推出了商业化的噪声抑制片产品, 电磁噪声抑制片在电子产品中得到越来越广泛的应用。

噪声抑制材料通常要求有较高的电磁损耗和电阻

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50771034)

收稿日期: 2011-01-17; **修订日期:** 2011-06-12

通信作者: 陈 征, 高级工程师, 博士; 电话: 010-58742817; E-mail: chenzheng@atmcn.com

率^[3-4]。KIM 等^[5]通过有限元模拟分析指出, 噪声抑制片的电导率高于 58 S/m(相当于 1.7 Ω·cm)时, 其表面 对辐射噪声的反射较强, 辐射噪声较大, 而电导率低于 5.8 S/m(相当于 17.2 Ω·cm)时, 能得到较好的噪声抑制效果。常用的铁磁性金属粉末复合膜噪声抑制片, 为得到高磁导率和较大的磁损耗, 往往需要较大的金属粉末体积分数, 很容易超过逾渗阈值而降低电阻率, 使用时需要在噪声抑制片与噪声源之间加绝缘层。铁氧体具有较高的电阻率, 近年研究较多^[4, 6], 但存在高频磁导率低和温度稳定性差等问题。

噪声抑制材料的电磁损耗包括磁损耗和电损耗, 其中磁损耗的作用更大^[2, 5]。大长径比可以提高退磁场强度, 使噪声抑制片具有较好的高频噪声抑制效果^[7]。NAM 等^[8]通过理论分析和模拟研究了以长轴位于面内的铁磁性纳米丝为吸波剂的噪声抑制材料, 研究表明在一定的长径比范围内, 铁磁共振频率随着丝材长度的增大而增大。噪声抑制片含有几种不同长度的丝材时, 具有较宽的噪声抑制频率范围, 厚度为 200 μm 的样品在 5 GHz 以上功率损耗比在 50%以上, 厚度为 2 000 μm 的样品在 5GHz 以上功率损耗比在 70%以上, 在 10 GHz 的功率损耗比达到 80%。因此, 以铁磁性丝材为吸波剂的噪声抑制材料有很好的研究价值。

玻璃包覆非晶丝是由金属内芯和玻璃包覆层构成的复合材料, 金属内芯通常是具有良好软磁性能的铁磁性材料, 而玻璃包覆层则有很好的绝缘性。玻璃包覆非晶丝与电介质的复合材料根据丝材排布方式不同, 在千兆赫兹频率范围内的复介电常数表现出等离子体型特征或天线散射特征^[9], 复介电常数虚部出现极大值, 对电磁波具有较强的吸收特性, 现已引起越来越多的关注。此外, 含玻璃包覆丝的复合材料在微波范围内还具有自然铁磁共振特性^[10-12]。较高的电磁损耗特性及较高的绝缘性使玻璃包覆丝适于制备噪声抑制材料。

长度对玻璃包覆丝磁性能有较大影响^[13-14], 对其微波特性也有一定影响^[13, 15]。本文作者制备含不同长度玻璃包覆非晶丝的复合膜, 采用微带线测试系统测试了放置复合膜后微带线的 S 参数, 并计算出功率损耗比, 研究丝材长度对复合膜微波噪声抑制特性的影响。

1 实验

采用玻璃包覆纺丝法^[15]制备了 CoFeSiBCr 玻璃包

覆非晶丝, 丝材的金属内芯直径约为 20 μm, 玻璃外层外径约为 32 μm, 如图 1 所示。将玻璃包覆非晶丝剪切成一定长度的短切丝材, 均匀散布在塑料基体膜上, 散布时使丝材随机取向, 最后在散布玻璃包覆非晶丝丝材的基体膜上再粘覆一层基体膜, 制成复合膜, 如图 2 所示。样品尺寸为 110 mm×100 mm×0.2 mm。丝材含量以单位面积的复合膜中所含的短切丝材质量表示。制备了含不同长度丝材的一系列复合膜样品, 样品所含丝材长度和含量如表 1 所列。

将 10 根 8 mm 长玻璃包覆丝平行排列成一组, 用 Lakeshore 7410 振动样品磁强计测量丝材组的轴向静态磁滞回线。采用微带线测试系统测试复合膜样品的 S 参数(S_{11} , S_{12} , S_{21} , S_{22}), 测试系统如图 3 所示。复合膜放置在微带线上, 微带线两端口分别与 Agilent

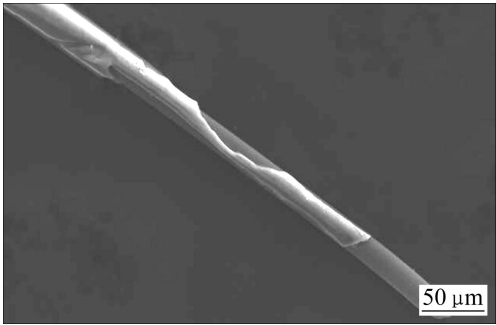


图 1 玻璃包覆非晶丝的 SEM 像
Fig. 1 SEM image of glass-covered amorphous wire

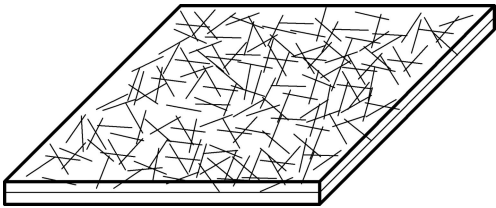


图 2 含玻璃包覆非晶丝复合膜的示意图
Fig. 2 Schematic diagram of composite film containing glass-covered amorphous wires

表 1 复合膜样品所含丝材长度及含量

Table 1 Wires length and content in composite film samples		
Sample No.	Wire length/mm	Amount of wire/(mg·cm ⁻²)
1	4	1
2	8	1
3	12	1
4	20	1
5	8	0.5
	20	0.5

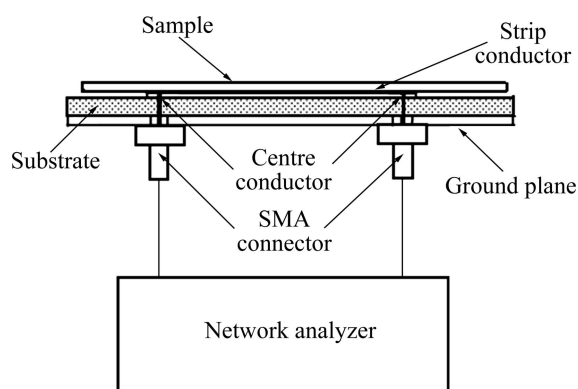


图3 微带线测试系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of microstrip measurement system

E5071B 矢量网络分析仪的两端口连接。微带线的各项参数参照 IEC 62333—2^[1]标准选取,特征阻抗为 50 Ω 。测试在室温下进行,频率范围为 10 MHz~8.5 GHz。测试时在样品上加 0.5 kg 重物使样品平整,重物与样品之间加 15 mm 厚的苯乙烯泡沫板隔离。通过测得的正向反射系数 S_{11} 和正向传输参数 S_{21} 值,由式(1)计算出传输噪声的功率损耗比^[6]。

$$P_{\text{loss}} / P_{\text{in}} = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (1)$$

式中: P_{loss} 为损耗功率; P_{in} 为输入功率。

2 结果与讨论

图4所示为 CoFeSiBCr 玻璃包覆非晶丝的轴向静态磁滞回线。该磁滞回线近似于一条斜率不变的线段,磁滞回线包围的面积很小,说明磁化过程主要是通过磁畴转动实现的,畴壁移动对磁化的贡献很小。CHIRIAC 和 OVARI^[16]认为,正磁致伸缩系数的 Fe 基玻璃包覆丝由内芯沿轴向的单畴和外壳沿径向的多畴构成;负磁致伸缩系数的 Co 基玻璃包覆丝为“竹节”畴结构,内芯为径向磁畴,外壳层为环向磁畴。本研究所制备的 CoFeSiBCr 玻璃包覆非晶丝具有近零磁致伸缩系数,根据静态磁滞回线看,丝材内芯没有轴向磁畴,则其磁畴结构属于 Co 基玻璃包覆非晶丝的“竹节”畴。

不同复合膜样品的 S_{11} 曲线如图5所示。由图5可见,在较低频率范围内(10 MHz~2.5 GHz),各样品 S_{11} 曲线的峰值随着丝材长度的增大而增大, S_{11} 曲线的变化周期随着丝材长度的增大而减小。样品1的 S_{11} 曲线峰值明显低于其余样品的,周期明显大于其余样

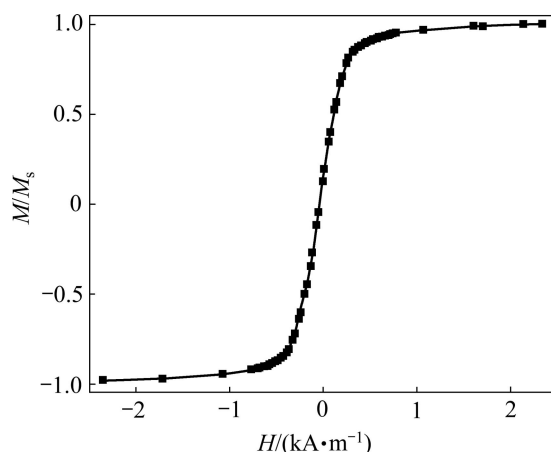
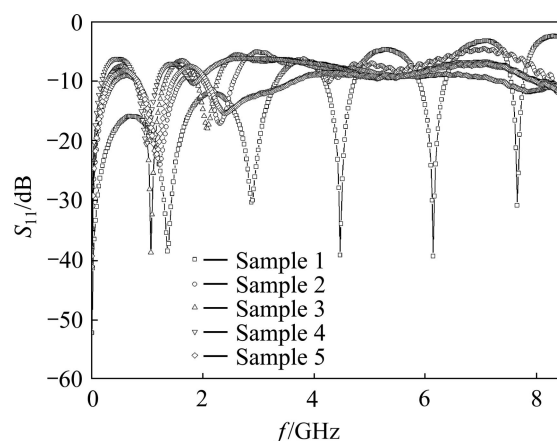


图4 CoFeSiBCr 玻璃包覆非晶丝的轴向磁滞曲线

Fig. 4 Axial hysteresis loop of CoFeSiBCr glass-covered amorphous wire

图5 不同复合膜样品的 S_{11} 曲线Fig. 5 S_{11} curves of composite film samples

品。而在较高频率范围内(5 GHz~8.5 GHz),样品1的 S_{11} 曲线的峰值则高于其余样品。而且样品1的 S_{11} 曲线还呈现较好的周期性。可见,丝材长度对复合膜的反射有较大影响,而且这种影响不是线性变化的,丝材较短时,丝材长度变化对复合膜反射的影响更显著。

图6所示为不同复合膜样品的 S_{21} 曲线。由图可见,样品1的 S_{21} 曲线在测试频率范围内没有出现明显的吸收峰,其 S_{21} 曲线的波动与微带线本身有关;样品2、样品3、样品4及样品5的 S_{21} 曲线出现两个较明显的吸收峰,对应的频率及峰值如表2所列。可见,随着丝材长度的增大,复合膜样品的 S_{21} 曲线在测试频率范围内出现吸收峰,且峰值对应的频率逐渐减小。

MAKHNOVSKIY 等^[17]和 PANINA 等^[18]认为,在含有有限长导电丝材的复合材料中,丝材相当于电偶

极散射子, 在交变电场的作用下产生电偶极矩, 影响复合材料的有效介电常数。对于每一根丝材, 在满足条件 $\lambda_{\text{res},n} = 2l\sqrt{\epsilon}/(2n-1)$ 时产生天线谐振, 从而使复合材料的有效介电常数表现出共振或弛豫特性, 对电磁波的吸收产生峰值。当导电丝材同时具有铁磁性时, 天线谐振条件为^[18]

$$\lambda_{\text{res},n} = \frac{2l}{2n-1} \sqrt{\epsilon\mu} \operatorname{Re} \left(1 + \frac{jc\zeta_{zz}}{\omega a \ln(l/a)} \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中: $\lambda_{\text{res},n}$ 为谐振波长; l 为丝材长度; μ 为基体磁导率; c 为真空中的光速; a 为丝材半径; ϵ 为基体介电常数; ζ_{zz} 为丝材表面阻抗张量的对角分量; ω 为电磁波圆频率; $n=1, 2, 3 \cdots$ 。

由式 2 可以看出, 丝材长度越大, 满足天线谐振条件的频率就越小, 即吸收峰值对应的频率随丝材长度的增大而减小。

图 7 所示为不同复合膜样品的功率损耗比。其中样品 6 是某电磁兼容公司的一款商业化噪声抑制片。以功率损耗比大于 50% 的频率范围为禁带, 样品 1~6

在测试频率范围内的带宽如表 2 所列。除样品 1 以外, 其余复合膜样品在高频的功率损耗比始终都大于 50%, 禁带带宽取决于低频噪声抑制特性。由表 2 可以看出, 复合膜样品 S_{21} 曲线的吸收峰频率低, 对应的低频噪声抑制特性就好, 禁带带宽相应也大。由于吸收峰频率随着丝材长度的增大而减小, 所以复合膜禁带带宽随着丝材长度的增大而增大。

样品 5 含 8 mm 和 20 mm 两种长度的丝材各 50%(质量分数)。由图 5 可见, 其 S_{11} 曲线的峰值和变化周期介于含 8 mm 丝材的样品 2 和含 20 mm 的样品 4 之间。由图 6 可见, 样品 5 的 S_{21} 曲线出现两个较为平缓的吸收峰, 对应的频率分别为 4.6 GHz 和 6.7 GHz, 峰值为 -27 dB 和 -38 dB。其 S_{21} 值总体上介于样品 2 和样品 4 之间。从功率损耗比看, 样品 5 也介于样品 2 和样品 4 之间。这表明含两种丝材的复合膜样品, 其噪声抑制特性在很大程度上是含单一丝材样品性能的叠加。虽然样品 5 在 GHz 范围的禁带带宽比样品 4 的小, 但其优点是能在禁带范围内较稳定地保持高功率损耗比。

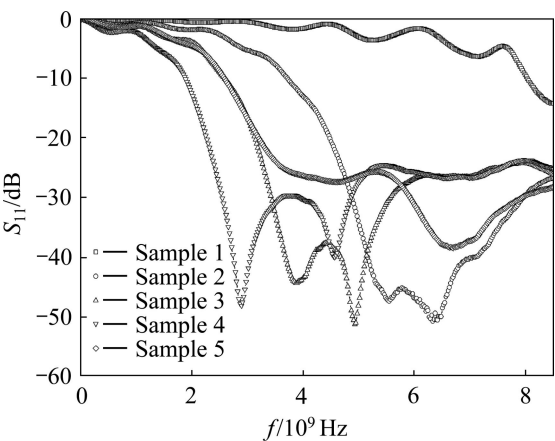


图 6 不同复合膜样品的 S_{21} 曲线
Fig. 6 S_{21} curves of all composite film samples

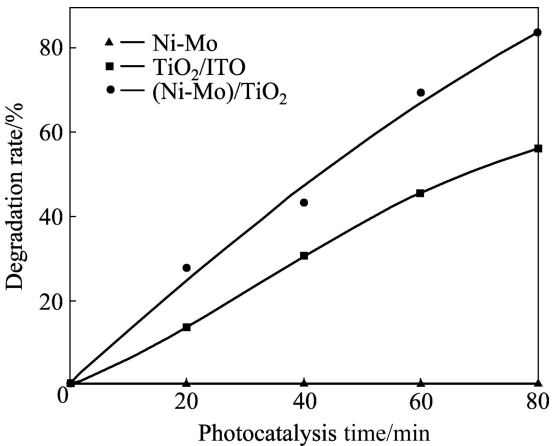


图 7 不同复合膜样品的功率损耗比
Fig. 7 $P_{\text{loss}}/P_{\text{in}}$ of all composite film samples

表 2 各复合膜样品的吸收特征及带宽

Table 2 Absorption characteristic and band width of composite film samples

Sample No.	First absorption peak		Second absorption peak		Band width/ GHz
	Frequency/GHz	Intensity/dB	Frequency/GHz	Intensity/dB	
1	No peak	No peak	No peak	No peak	0.4
2	5.5	-47	6.4	-50	5.3
3	3.9	-44	4.9	-51	6.6
4	2.9	-48	4.6	-40	7.1
5	4.6	-27	6.7	-38	6.5
6	—	—	—	—	6.9

样品4在1.8 GHz~8.5 GHz频率范围内的功率损耗比均高于75%，比商业化噪声抑制片样品6禁带带宽大，而且总体功率损耗比更高。其噪声抑制特性也明显优于NAM等模拟计算的同样厚度的噪声抑制片。

3 结论

1) 测试 CoFeSiBCr 玻璃包覆非晶丝的轴向静态磁滞回线，由于磁滞回线包围的面积很小，认为其不具有轴向磁畴。

2) 制备了含玻璃包覆非晶丝的噪声抑制材料，丝材长度为20 mm时，复合膜的禁带带宽达7.1 GHz，功率损耗比在1.8 GHz至8.5 GHz范围内高于75%，在千兆赫兹频率范围内具有较好的噪声抑制效果。

3) 研究了丝材长度对噪声抑制特性的影响，发现丝材较短时，丝材长度变化对反射存在较为显著的影响。随着丝材长度的增大，复合膜样品 S_{21} 曲线的在测试频率范围内出现吸收峰，且峰值对应的频率逐渐减小。复合膜禁带带宽相应地随着丝材长度的增大而增大。

4) 根据丝材长度对吸收峰频率及禁带带宽的影响规律，可以通过改变玻璃包覆非晶丝长度的方法来控制复合膜的噪声抑制特性，满足高频电子仪器中不同工作频率下的应用要求。

REFERENCES

- [1] IEC 62333—2: 2006(E), Noise suppression sheet for digital devices and equipment (part 2): Measuring methods[S]. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2006.
- [2] 王添文, 李子森. 电磁干扰噪声抑制片应用介绍[J]. 装备环境工程, 2008, 5(1): 92–94.
WANG Tian-wen, LI Zi-sen. Application of electromagnetic noise suppression sheet[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(1): 92–94.
- [3] ONO H, ITO T, YOSHIDA S, TAKASE Y, HASHIMOTO O, SHIMADA Y. Noble magnetic films for effective electromagnetic noise absorption in the gigahertz frequency range[J]. IEEE Trans Magn, 2004, 40(4): 2853–2587.
- [4] KIM S T, RYU G B, AND KIM S S. Conduction noise attenuation by Fe_3O_4 thin films attached on microstrip line[J]. J Appl Phys, 2006, 99: 08M919-1–08M919-3.
- [5] KIM S W, LEE J H, KIM Y B, LEE K S. Attenuation characteristics of near-field electromagnetic noise through microstrip line for magnetic absorbers with different levels of conductivity[J]. J Appl Phys, 2008, 103: 07E733-1–07E733-3.
- [6] SUBRAMANI A K, KONDO K, TADA M, ABE M, YOSHIMURA M, MATSUSHITA N. High resistive ferrite films by a solution process for electromagnetic compatible (EMC) devices[J]. J Magn Magn Mater, 2009, 321: 3979–3983.
- [7] KUANG B K, MARSON R, MISHRA S R, KUANG A V, CAMLEY R E, CELINSKI Z J. Gigahertz frequency tunable noise suppressor using nickel nanorod arrays and Permalloy films[J]. J Appl Phys, 2009, 105: 07A520-1–07A520-3.
- [8] NAM B, CHOA Y H, OH S T, LEE S K, KIM K H. Broadband RF noise suppression by magnetic nanowire-filled composite films[J]. IEEE Trans Magn, 2009, 45(6): 2777–2780.
- [9] 邱永江, 江建军, 别少伟, 杜刚, 何华辉. 玻璃包覆磁性合金微丝复合媒质的微波介电性能[J]. 功能材料, 2007, 38(S): 2981–2983.
DI Yong-jiang, JIANG Jian-jun, BIE Shao-wei, DU Gang, HE Hua-hui. Microwave dielectric properties of glass-coated magnetic alloy microwires composites[J]. J Func Mater, 2007, 38(S): 2981–2983.
- [10] DI Yong-jiang, JIANG Jian-jun, DU Gang, TIAN Bin, BIE Shao-wei, HE Hua-hui. Magnetic and microwave properties of glass-coated amorphous ferromagnetic microwires[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17: 1352–1357.
- [11] 何璞祯, 王自东, 王护利, 张鸿, 李向明, 王宪军, 侯志坚. 玻璃包覆铁基微丝的微波电磁特性[J]. 纳米技术与精密工程, 2009, 7(2): 114–118.
HE Pu-zhen, WANG Zi-dong, WANG Hu-li, ZHANG Hong, LI Xiang-ming, WANG Xian-jun, HOU Zhi-jian. Microwave electromagnetic properties of glass-Coated Fe-Based microwires[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2009, 7(2): 114–118.
- [12] STAROSTENKO S N, ROZANOV K N, OSIPOV A V. Microwave properties of composites with glass coated amorphous magnetic microwires[J]. J Magn Magn Mater, 2006, 298: 56–64.
- [13] ZHUKOVA V, USOV N A, ZHUKOV A, GONZALEZ J. Length effect in a Co-rich amorphous wire[J]. Phys Rev B, 2002, 65(13): 134407-1–134407-7.
- [14] DI Yong-jiang, JIANG Jian-jun, BIE Shao-wei, YUAN Lin, DAVIES H A, HE Hua-hui. Collective length effect on the magnetostatic properties of arrays of glass-coated amorphous alloy microwires[J]. J Magn Magn Mater, 2008, 320: 534–539.
- [15] TAYLOR G F. A method of drawing metallic filaments and a discussion of their properties and uses[J]. Phys Rev, 1924, 23: 655–660.
- [16] CHIRIAC H, OVARI T A. Amorphous glass-covered magnetic wires: preparation, properties, applications[J]. Prog Mater Sci, 1996, 40: 333–407.
- [17] MAKHNOVSKIY D P, PANINA L V. Field dependent permittivity of composite materials containing ferromagnetic wires[J]. J Appl Phys, 2003, 93(7): 4120–4129.
- [18] PANINA L V, SANDACCI S I, MAKHNOVSKIY D P. Stress effect on magnetoimpedance in amorphous wires at gigahertz frequencies and application to stress-tunable microwave composite materials[J]. J Appl Phys, 2005, 97: 013701-1–013701-6.

(编辑 李艳红)