

纳米 Fe_3O_4 与纳米 $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 填充丁腈橡胶复合材料的力学与磁学性能

Magnetic Properties and Mechanical Properties of NBR

Composites Filled with Nano- Fe_3O_4 or Nano- $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$

王其磊, 杨逢瑜, 杨 倩, 陈君辉, 关红艳

(兰州理工大学 磁性物理与磁技术研究所, 兰州 730050)

WANG Qi-lei, YANG Feng-yu, YANG Qian,

CHEN Jun-hui, GUAN Hong-yan

(Research Institute of Magnetic Physics and Magnetic Technology,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

摘要: 以 NBR、纳米 Fe_3O_4 和纳米 $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 为原料制备了 NBR/ Fe_3O_4 复合材料与 NBR/ $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 复合材料。研究了不同纳米粒子含量时, 两种复合材料中的物理机械性能变化、磁学性能以及复合材料中的纳米粒子分布。结果表明: 随着纳米粒子的不断加入, 复合材料的抗拉强度、300% 定伸应力与扯断伸长率不断下降, 但是硬度与门尼黏度不断提高。加入的纳米粒子在 NBR 基体中分布较为均匀。随着纳米 Fe_3O_4 粒子和纳米 $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量的加大, 复合材料的磁性能不断得到提高。两种复合材料均具有较好软磁性能, 为该类复合材料的进一步应用奠定了基础。

关键词: NBR/ $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 复合材料; NBR/ Fe_3O_4 复合材料; 力学性能; 磁学性能

中图分类号: TB34; TM271 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2011)07-0075-05

Abstract: The NBR/ Fe_3O_4 composites and NBR/ $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ composites were prepared with NBR, nano- Fe_3O_4 and nano- $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ as raw material. Magnetic properties and mechanical properties of the two composites were studied. The distribution of nano-particles were also analyzed. The results show that when adding different mass fraction of nano-particles, maximum elongation, 300% stress at definite elongation and tensile strength of the two composites are decreased. Whereas shore A hardness and mooney viscosity of the two composites are improved. Nano-particles are well distributed in the two composites. Magnetic properties of two composites are closely related with mass fraction of nano-particles. Also, both the two composites have good soft magnetism properties, which lay the foundation for further applications of this kind of composites.

Key words: NBR/ $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ composite; NBR/ Fe_3O_4 composite; mechanical property; magnetic property

磁性橡胶是将磁性材料通过混炼填充于橡胶中, 并硫化成型, 使得它既具有一定的磁性, 又保持了橡胶优良的耐油性、耐腐蚀性以及较好的弹性等优点。与常规的黏结永磁橡胶磁体相比, 它更具有优越的磁学性能。磁性橡胶通过其自身的特点, 逐渐取代了传统的金属磁性材料。利用磁性橡胶制作的密封条、橡塑磁磁铁、转子磁钢等部件都得到了广泛应用^[1-5]。

近年来, 随着纳米技术的不断发展, Fe_3O_4 与 $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 等铁氧体材料的性能得到极大提高^[6,7]。利用纳米材料制作的复合材料, 其纳米粒子与基体之间能够实现很好的结合, 且纳米粒子能够很

好地补强基体材料^[8,9]。当磁性橡胶应用于交变磁场条件下时, 表现出高饱和磁感应强度、低矫顽力、高磁导率以及低高频损耗等优异性能, 综合软磁性能显著提高。磁性填充物对于橡胶复合材料的力学性能, 磁学性能以及物理稳定性有着至关重要的影响^[9,10]。吴兰峰等人利用聚苯硫醚/四氧化三铁制作了复合材料, 发现较低的 Fe_3O_4 填充量时, 复合材料的拉伸性能与冲击性能有所改善, 但随着填充量的加大性能逐渐变差^[11]。Mohamed M. M. Milad 与 UROGIOVA E 等人利用共混的方法, 将钡铁氧体与锶铁氧体添加到天然橡胶中, 发现其具有较好的磁性能, 并且力学性能有所改善^[12,13]。K. A. Malini 与 M. A. Solomon 等人

分别在橡胶中填充镍锌铁氧体与钡铁氧体,研究了其不同填充量时的磁学性能以及加工性能,但是未对力学性能进行分析^[14, 15]。目前关于磁性橡胶的研究多局限于微米级,且对应用广泛的丁腈橡胶加入磁性粒子后的性能变化未见报道。因此本工作分别选用性能优良的纳米 Fe_3O_4 粒子与 $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 粒子与丁腈橡胶(NBR)进行共混,制备了纳米 NBR/ Fe_3O_4 复合材料与纳米 NBR/ $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 复合材料。

1 材料制备与测试

1.1 材料

纳米 Fe_3O_4 粒子与纳米 $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 粒子为马鞍山磁粉厂产品,平均粒径为 200~300nm。丁腈橡胶(N41)为兰州合成橡胶厂产品。半补强炭黑(N762)为青岛橡胶厂产品。其他配料均为市售产品。

1.2 制备

为了不影响 NBR 的力学性能,在兰州合成橡胶厂原有配方的基础上添加纳米粒子,制备了 NBR 复合材料。混炼工艺在开炼机(XK-150)上进行,NBR 胶料在开炼机上按照常规顺序加入配合剂。基本配方为: NBR420g、氧化锌 20g、硫磺 6g、促进剂 DM 4g、半补强炭黑 160g、硬脂酸 4g,对比用料按 5% (质量分数,下同),10%,15%,20%,25%,30% 加入纳米 Fe_3O_4 粒子与纳米 $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 粒子。下片后的混炼胶放置在平整、洁净的金属板上,放置 6h 后进行硫化。用硫化

机(Y33-50A)打压预热 1min 后开始硫化计时,硫化温度 $145.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$,硫化时间为 45min,制备出 NBR/ Fe_3O_4 复合材料与 NBR/ $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 复合材料。

1.3 性能测试

测试环境温度为 $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$,相对湿度为 30%~50%。NBR/ Fe_3O_4 复合材料与 NBR/ $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 复合材料的拉伸强度、扯断伸长率按 GB/T528—1998 标准在 PDI-1000N 电子拉力试验机上测定,试样尺寸为: $6\text{mm} \times 2\text{mm}$ 。绍尔 A 硬度按 GB/T531—1999 标准用 MC010-TH200 型橡胶硬度计测定,试样尺寸为: $\phi 24.5\text{mm} \times 8\text{mm}$ 。门尼黏度按 DIN 53235 标准用门尼黏度计测量,试样尺寸为: $\phi 18\text{mm} \times 25\text{mm}$ 。采用 JSM-5600LV 低真空扫描电子显微镜(SEM)观察表面微观形貌。采用 X 射线能量色散谱仪测定纳米粒子的基本分布情况。充磁设备选用 U5-10 型充磁机,充磁时磁感应强度大于 $1.2\text{Wb}/\text{m}^2$,充磁时间 20min。

2 实验结果与讨论

2.1 表面微观结构

图 1 中分别给出了 Fe_3O_4 与 $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量为 15% 的复合材料的表面微观结构图。从图 1 中可以清晰地看出 Fe_3O_4 均匀地分布在 NBR 基体中,无明显的团聚现象,如图 1(a) 所示。而纳米 $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 粒子则由于较强的磁性吸附在一起^[6],出现了局部团聚现象,如图 1(b) 所示。

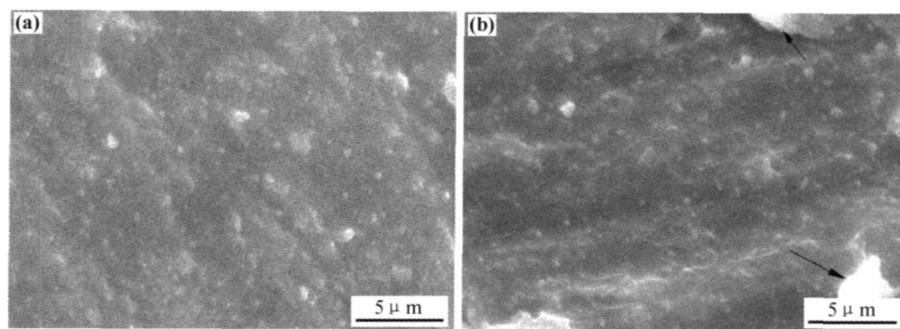


图 1 纳米粒子含量为 15% 时两种复合材料的表面微观结构 SEM 图 (a) NBR/ Fe_3O_4 ; (b) NBR/ $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$

Fig. 1 SEM micrograph of two composites when mass fraction of nano-particles is 15% (a) NBR/ Fe_3O_4 ; (b) NBR/ $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$

NBR 基体中的纳米粒子和 NBR 两相界面模糊,这说明 Fe_3O_4 粒子与 $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 粒子和 NBR 基体具有较好的亲和力。这是由于纳米粒子比表面积较大,处于表面上的原子比例较大。且纳米 Fe_3O_4 粒子与纳米 $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 粒子都属于高能表面物质,而 NBR 为低能表面物质,将两种材料进行共混时,NBR 的低能表面倾向于强烈地吸附在纳米粒子的高能表面

上。这种吸附可以使高能表面上的不平衡力场得到某种程度的补偿^[6, 10],纳米粒子很好地填补了 NBR 的内部缺陷。同时,NBR 基体与 Fe_3O_4 粒子之间,NBR 基体与 $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 粒子之间可能存在的双偶极作用等也是造成两相界面结合紧密的原因^[7, 11]。通过图 1 可以看出,NBR/ Fe_3O_4 复合材料的表面微观形貌优于 NBR/ $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 复合材料。可以预期,均匀分散的

刚性 Fe₃O₄ 粒子与纳米 SrO · 6Fe₂O₃ 粒子有利于复合材料综合性能的提高。

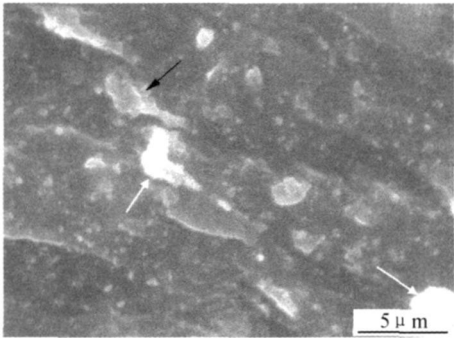


图2 纳米粒子含量为 30% 时 NBR/ Fe₃O₄ 复合材料的表面微观SEM 图

Fig. 2 SEM micrograph of NBR/ Fe₃O₄composites when mass fraction of nano-particles is 30%

2.2 粒子分布

利用 X 射线能量色散谱仪测定了 50μm 范围内 Fe 元素的含量,如表 1 所示。通过表 1 可以看出,材料中 Fe 元素的质量分数、原子分数与纳米粒子的添加量基本相符。可以看出虽然存在局部的不均匀现象,但就整体添加量而言,混炼基本均匀。

表 1 两种复合材料的 Fe 元素含量分布
Table 1 The distributed of Fe-element mass fraction of two composites

Nano-particle filler	Fe element content			
	NBR/ Fe ₃ O ₄		NBR/ SrO · 6Fe ₂ O ₃	
	Mass fraction/ %	Atom fraction/ %	Mass fraction/ %	Atom fraction/ %
5%	5. 21	2. 12	6. 32	3. 21
10%	10. 23	6. 87	11. 34	7. 46
15%	14. 71	10. 89	15. 23	11. 96
20%	20. 14	16. 78	19. 17	16. 11
25%	24. 56	19. 87	25. 25	20. 12
30%	30. 25	24. 86	32. 02	25. 21

2.3 力学性能

图 3 与图 4 给出了不同纳米粒子填充量的 NBR/ Fe₃O₄ 和 NBR/ SrO · 6Fe₂O₃ 的抗拉强度、300% 定伸应力与扯断伸长率的变化曲线。

从图 3 与图 4 可以看出随着纳米粒子的加入, NBR/ Fe₃O₄ 复合材料和 NBR/ SrO · 6Fe₂O₃ 复合材料的抗拉强度和扯断伸长率逐渐减小。这是因为对于聚合物填充体系, 要想获得较好的强度, 一个关键因素是粒子分散的均匀性, 另一个是分散于基体中的刚性粒子表面形成的界面层结构^[12, 13]。复合体系中随

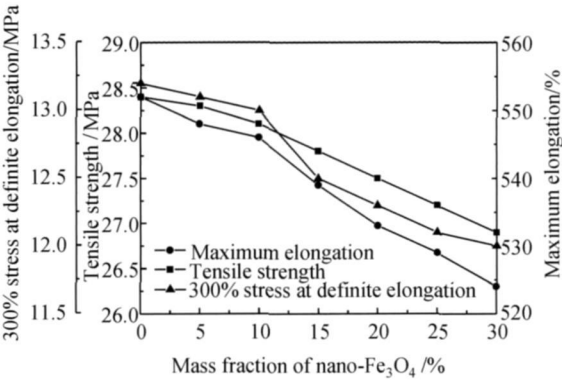


图 3 NBR/Fe₃O₄ 的抗拉强度、扯断伸长率与 300% 定伸应力的变化曲线
Fig. 3 Change curve of tensile-strength, elongation at break and modulus at 300% elongation of NBR/Fe₃O₄ composites

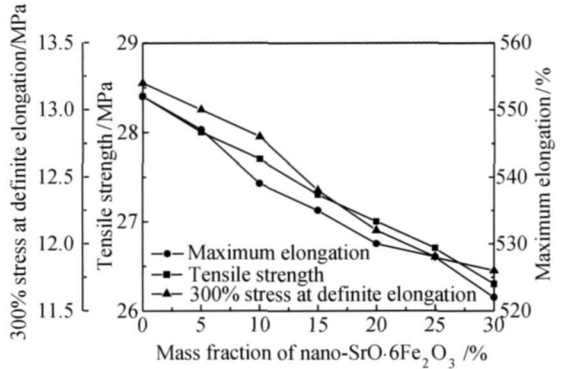


图 4 NBR/SrO · 6Fe₂O₃ 的抗拉强度、扯断伸长率与 300% 定伸应力的变化曲线
Fig. 4 Change curve of tensile-strength, elongation at break and modulus at 300% elongation of NBR/SrO · 6Fe₂O₃ composites

着纳米粒子体积分数的增加, 粒子与粒子间间距的减少使得界面层厚度变小。此时, NBR 基体对纳米粒子包覆程度减弱, 两相界面黏结强度变差, 不良应力集中点的产生导致体系强度反而下降。并且随着纳米粒子体积分数的增加, 纳米粒子的均匀程度逐渐下降, 团聚现象增多(如图 2 所示), 与橡胶基体存在大面积的相界面。并且可以发现由于纳米 Fe₃O₄ 粒子分散的更为均匀, 与 NBR 的结合的更加紧密^[2, 4], 使得 NBR/ Fe₃O₄ 的拉伸强度与扯断伸长率明显高于 NBR/ SrO · 6Fe₂O₃。

图 5 给出了不同纳米粒子填充量的 NBR/ Fe₃O₄ 和 NBR/ SrO · 6Fe₂O₃ 的邵尔 A 硬度的变化曲线。由图 5 可见填充纳米粒子后橡胶复合材料的硬度明显大于普通 NBR。普通 NBR 的邵尔 A 硬度为 63 度, 而复合材料的硬度则随着纳米粒子填充量的不断加大逐渐得到提高。纳米粒子填充量达到 30% 时, NBR/ SrO ·

6Fe₂O₃ 复合材料的硬度达到 73 度,而 NBR/Fe₃O₄ 复合材料的硬度则达到了 74 度。硬度的增加一方面是由于 Fe₃O₄ 粒子与 SrO · 6Fe₂O₃ 粒子本身的硬度大于 NBR 的硬度,在 NBR 中加入纳米 Fe₃O₄ 粒子与 SrO · 6Fe₂O₃ 粒子有效的填补了 NBR 的空穴,必然会使硬度进一步提高;另一方面,均匀分散的刚性粒子周围的具有良好界面结合和一定厚度的界面层,可以使材料在经受破坏时引发银纹^[11],从而消耗大量冲击能并能较好地传递所承受的外应力,达到增韧的目的。

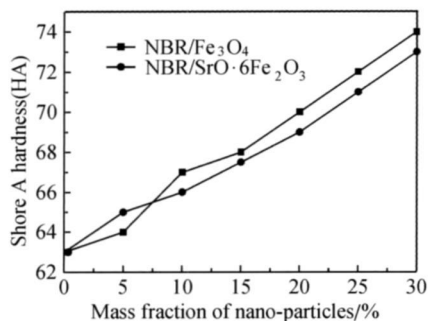


图 5 两种复合材料的绍尔 A 硬度的变化曲线

Fig. 5 Change curve of Shore A hardness of two composites

图 6 给出了不同纳米粒子填充量的 NBR/Fe₃O₄ 和 NBR/SrO · 6Fe₂O₃ 复合材料的门尼黏度变化曲线。门尼黏度反应橡胶加工性能的好坏和分子量的高低及分布范围宽窄^[6]。门尼黏度高胶料不易混炼均匀及挤出加工,其分子量高、分布范围宽。门尼黏度低胶料易粘辊,其分子量低、分布范围窄。门尼黏度过低则硫化后制品抗拉强度低。从图 6 可以看出 NBR/Fe₃O₄ 和 NBR/SrO · 6Fe₂O₃ 的复合材料的门尼黏度随着纳米粒子添加量不断提高,NBR 的门尼黏度略有升高,但对 NBR 的加工基本没有影响。

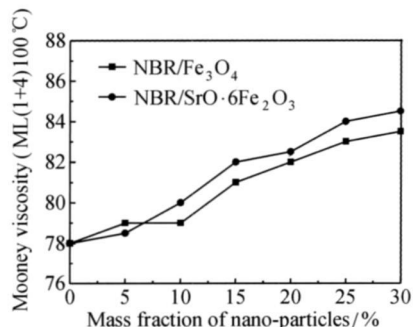


图 6 两种复合材料的门尼黏度变化曲线

Fig. 6 Change curve of Mooney viscosity of two composites

2.4 磁学性能分析

图 7 和图 8 给出了 NBR/Fe₃O₄ 和 NBR/SrO ·

6Fe₂O₃ 复合材料的磁滞回线。由图 7 与图 8 可见 NBR/SrO · 6Fe₂O₃ 的磁性能明显优于 NBR/Fe₃O₄ 复合材料。可以看出随着纳米粒子含量的增多,复合材料的磁性能单调增加,表现出典型的顺磁性特征。体系的磁饱和强度不断增大,充磁过程所需磁场相对较大。这是由于橡胶材料内部缺陷较多,降低了畴壁能,影响充磁效果^[14, 15]。随着外磁场强度的加大,NBR/Fe₃O₄ 复合材料和 NBR/SrO · 6Fe₂O₃ 复合材料的磁化强度也变大。当外磁场强度增大到 800000 A · m⁻¹ 时,复合材料的磁化强度趋于定值。

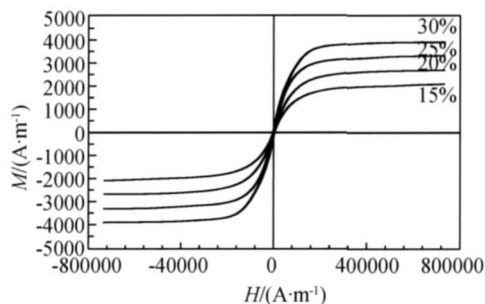


图 7 NBR/Fe₃O₄ 复合材料的磁滞回线

Fig. 7 Magnetic hysteresis loops of NBR/Fe₃O₄ composites

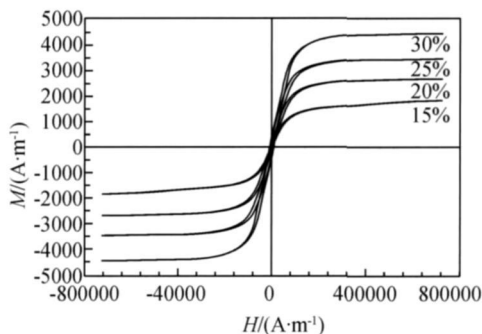


图 8 NBR/SrO · 6Fe₂O₃ 复合材料的磁滞回线

Fig. 8 Magnetic hysteresis loops of NBR/SrO · 6Fe₂O₃ composites

图 9 与图 10 给出了不同纳米粒子含量的 NBR/Fe₃O₄ 与 NBR/SrO · 6Fe₂O₃ 复合材料的矫顽力,剩磁强度与磁饱和强度的变化曲线。从图中可以看出 NBR/Fe₃O₄ 复合材料的矫顽力较低。而 NBR/SrO · 6Fe₂O₃ 复合材料的矫顽力相对 NBR/Fe₃O₄ 有较大幅度的提高。随着纳米 Fe₃O₄ 粒子与纳米 SrO · 6Fe₂O₃ 粒子填充量的不断加大,两种复合材料矫顽力均有较小幅度的增长。这说明材料内部的结构缺陷有了增长,内部空隙有小幅度的增加^[8, 9]。图中随着纳米粒子添加量不断加大,饱和磁化强度和剩磁感应强度不断提高,并且纳米 Fe₃O₄ 粒子与纳米 SrO · 6Fe₂O₃ 粒子分别属于亚铁磁体与铁磁体,具有典型

的高频特性,在高频下磁滞损耗较小^[6,16]。经过分析可得知两种复合材料具有典型的软磁特性,为进一步研究奠定了基础。与力学性能强烈依赖纳米粒子的分散均匀性和界面黏结不同,材料的磁性并不依赖于纳米粒子的分散方式,也不依赖于粒子和基体或粒子和粒子间的物理作用强弱,仅依赖于纳米粒子的含量。

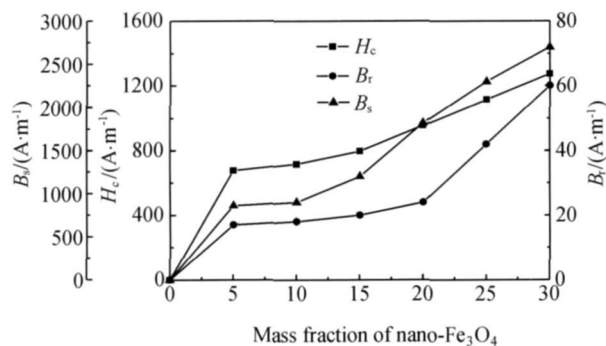


图9 不同纳米 Fe_3O_4 粒子填充量时的矫顽力, 剩磁强度与磁饱和强度变化曲线

Fig. 9 Changing curve of saturation magnetization strength(B_s), residual magnetic flux density(B_r) and coercive force(H_c) with different mass fraction of nano- Fe_3O_4

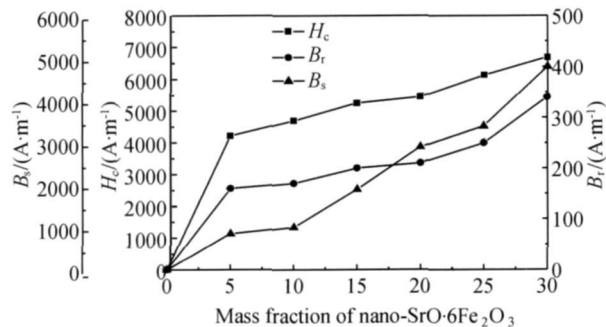


图10 不同纳米 $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 粒子填充量时的矫顽力, 剩磁强度与磁饱和强度变化曲线

Fig. 10 Changing curve of saturation magnetization strength(B_s), residual magnetic flux density(B_r) and coercive force(H_c) with different mass fraction of nano- $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$

3 结论

(1) 纳米 Fe_3O_4 粒子和 $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 粒子在 NBR 基体中分布的较为均匀。纳米 Fe_3O_4 和 $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 粒子的填入,虽然从一定程度上使得 NBR 的拉伸强度与扯断伸长率有所下降,但是 NBR 的硬度得到明显改善。

(2) 复合体系的磁性能取决于 Fe_3O_4 粒子和 SrO .

$6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 粒子的含量,而不依赖于纳米粒子的分散方式。随着粒子添加量的不断加大,磁性能得到不断提高。

(3) 复合材料具有较低的矫顽力与剩磁强度, NBR/ Fe_3O_4 与 NBR/ $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 复合材料均具有较好的软磁性能。

参考文献

- [1] 何世权,安晓英,刘潇,等. Fe_3O_4 复合丁腈橡胶的力学和摩擦学性能[J]. 兰州大学学报, 2008, 44(2): 132-136.
- [2] 王珍,陈祥宝,王景鹤,等. 氢化丁腈橡胶/聚甲基丙烯酸酯互穿聚合物网络研究[J]. 材料工程, 2004, (12): 1-5.
- [3] 严密,彭晓领. 磁学基础与磁性材料[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
- [4] MAKLED M H, MATSUI T, TSUDA H, et al. Magnetic and dynamic mechanical properties of barium ferrite - natural rubber composites[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 160(2): 229-233.
- [5] 吕丽,白书欣,张虹,等. 玻璃纤维增强铅网/橡胶阻尼复合材料研究[J]. 材料科学与工艺, 2008, 16(6): 748-750.
- [6] 傅政. 橡胶材料性能与设计应用[M]. 北京: 化学工业出版社材料科学与工程出版中心, 2003.
- [7] KUNIO SHIMADA. Magnetic rubber having magnetic clusters composed of metal particles[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2005, 16(1): 15-20.
- [8] ISMAIL H, SAM S T, MOHD NOOR A F. Properties of ferrite-filled natural rubber composites[J]. Polymer-plastics technology and engineering, 2007, 46(4-6): 641-650.
- [9] PREMA K H, PHILIP K, JOY P A, et al. Physicomechanical and magnetic properties of neoprene based rubber ferrite composites[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2008, 47(2): 137-146.
- [10] WEI S S, ZHU Y F, ZHANG Y, et al. Preparation and characterization of hyperbranched aromatic polyamides/ Fe_3O_4 magnetic nanocomposite[R]. React Funct Polymer, 2006, 66(11): 1272-1277.
- [11] 吴兰峰,吴德峰,张明. 聚苯硫醚/四氧化三铁复合材料的力学和磁性能[J]. 化工学报, 2008, 59(11): 2941-2945.
- [12] MILAD MOHAMED M M, AHMAD SAHRIM H J, YAHYA S Y, et al. Mechanical and magnetic properties of thermoplastic natural rubber nanocomposites filled with barium ferrite[J]. AIP Conference Proceedings, 2009, 1136(1): 46-50.
- [13] ÜRÇİÖVA E, HUDEC I, BELLUSOVA D. Magnetic and mechanical properties of strontium ferrite-rubber composites[J]. KGK Kautschuk, Gummi, Kunststoffe, 2006, 59(5): 224-228.
- [14] MALINI K A, MOHAMMED M, SINDHU S, et al. Magnetic and processability studies on rubber ferrite composites based on natural rubber and mixed ferrite[J]. Journal of Materials Science, 2001, 36(23): 5551-5557.

(下转第 84 页)

实现的是接触式反射法; 对于定量精度、检测效率要求不高的开放式或空腔式拐角, 推荐使用喷水式反射法, 同时兼顾考虑开放式拐角的检测; 对于深度方向缺陷检测盲区要求高, 定量精度、检测效率要求不高的开放拐角检测, 可以使用喷水式穿透法检测; 对于同规格大批量开放式拐角检测, 采用阵列探头超声检测, 通过高投入实现高效检测; 兼顾考虑开放式和空腔式拐角的检测, 同时对缺陷在拐角分布的信息要求准确的情况, 可以通过高投入用几种规格相控阵探头, 实现覆盖一定尺寸范围的拐角检测。

4 结束语

研究复合材料拐角部位的检测技术, 对保障复合材料制件的质量, 保证飞机安全具有重要意义。拐角部位由于其特殊的结构特性, 采用常规手工超声检测方法存在灵敏度不稳定、人为因素影响大、检测效率低等问题, 超声探头阵列检测拐角部位存在探头组件复杂、尺寸大, 探头调整困难, 不适合对空腔结构拐角的检测等缺点。采用相控阵检测技术对复合材料制件拐角结构进行检测, 具有灵敏度稳定, 适用性强, 成像直观, 人为因素影响小, 检测效率高等优点, 具有很好的应用前景。

参考文献

- [1] ROACH D, WALKINGTON P. Use of focused pulse-echo ultrasonic for nondestructive inspection of thick carbon-carbon structures[J]. *Insight-Non Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2006, 48(12): 743-750.
- [2] GRIPPS, MARTY P, UNGERER D. Advances in industrial testing machines for the automated inspection of aerospace components[A]. 2nd International Symposium on NDT in Aerospace 2010[C/OL]. [2011-1-30]. <http://www.ndt-aerospace.com>.
- [3] FORSYTH D, GEHLEN M, GUTHRIE J. The air force nondestructive inspection improvement program[A]. 2010 ATA NDT

Forum[C/OL]. [2011-1-28]. <http://www.airlines.org/SafetyOps/EM/Documents/2010%20NDT%208%20Air%20Force%20NDT%20Inspection%20Improvement.pdf>.

- [4] IGCAR E, ACOUSTORAPHY K. Acousto-Optical (AO) ultrasonics & its applications[A]. International Workshop on Imaging NDE[C/OL]. [2010-12-30]. <http://www.igcar.ernet.in/events/inde2007/INDE%20presentations/Dr.D.S.Dulay-Acoustography.pdf>.
- [5] 美国无损检测学会. 美国无损检测手册 超声卷(上册)[M]. 美国无损检测手册译审委员会译. 上海: 世界图书出版公司, 1996.
- [6] RAU E, GRAUVOGL E, MANZKE H. Ultrasonic phased array testing of complex aircraft structures[A]. ECNDT (2006) [C/OL]. [2010-12-20]. <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Tu.1.1.2.pdf>.
- [7] LAMARRE A, DUBEN. Feasibility study of ultrasonic inspection of turbine blade root using phased array probes[J]. *Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2000, 42(9): 586-589.
- [8] KRAMB A. Use of phased array ultrasonics for automated aerospace testing applications[J]. *Materials Evaluation*, 2007, 65(26): 67-73.
- [9] HUANG J, QUE W, JIN J. A parametric study of beam steering for ultrasonic linear phased array transducer[J]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2004, 40(4): 254-259.
- [10] ITHURRALDE G, EADS C. Advanced Functions of PAUT (Phased Arrays for Ultrasound Testing) in Aeronautics[A]. ECNDT (2006) [C/OL]. [2010-12-20]. <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Tu.1.1.3.pdf>.
- [11] HABEMEHL J, LAMARRE A. Ultrasonic phased array tools for composite inspection during maintenance and manufacturing [A]. 17th World Conference on Nondestructive Testing [C/OL]. [2010-1-30]. <http://www.ndt.net/article/wcndt2008/papers/116.pdf>.

收稿日期: 2011-01-05; 修订日期: 2011-05-05

作者简介: 何方成(1971—), 男, 高级工程师, 从事航空材料及制件的无损检测研究工作, 联系地址: 北京 81 信箱 6 分箱(100095), E-mail: fangcheng.he@biam.ac.cn

(上接第 79 页)

- [15] SOLOMON M A, PHILIP K, JOY P A, et al. Processability and magnetic properties of rubber ferrite composites containing barium ferrite[J]. *International Journal of Polymeric Materials*, 2004, 53(7): 565-575.
- [16] WANG YL, HU Y, CHEN L, et al. Effects of rubber/magnetic particle interactions on the performance of magnetorheological elastomers[J]. *Polymer Testing*, 2006, 25(2): 262-267.

基金项目: 温州科技交流项目(H20070021), 甘肃省自然科学基金项目(3ZS05-A25-031)

收稿日期: 2010-03-15; 修订日期: 2010-09-28

作者简介: 王其磊(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事密机械电子及密封材料的研究, 联系地址: 兰州理工大学能源与动力工程学院 024 信箱(730050), E-mail: yangfy126@126.com