

Fe - Si 磁性颗粒/环氧树脂复合材料的 冲击和磁学性能

田建伟^{1, 2}, 肖红梅¹, 刘 玉¹, 李峻青², 付绍云^{*1}

(1. 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190; 2. 哈尔滨工程大学材料科学与化学工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 采用双酚 A 型 WSR-615 和缩水甘油胺型 AG-80 环氧树脂为基体, 以 Fe - Si 磁性颗粒为填料, 通过热压成型方法制备了高含量磁性 Fe - Si 颗粒/环氧树脂复合材料。研究了环氧树脂基体的玻璃化温度和冲击强度及 Fe - Si 磁性颗粒含量对 Fe - Si/环氧树脂复合材料的冲击强度和磁化强度的影响及温度敏感性。研究表明: 随着磁性颗粒含量的增加, Fe - Si/环氧树脂复合材料的冲击强度和磁性能增加。当磁性颗粒体积分数由 54 vol% 增加到 66 vol% 时, Fe - Si/环氧树脂的冲击强度和饱和磁化强度分别由 4.03 kJ/m² 和 162.07 emu/g 增加到 7.16 kJ/m² 和 175.04 emu/g。Fe - Si/环氧复合材料在 -60 °C ~ 140 °C 范围内的温度敏感性低, 符合实际应用对复合材料稳定性的要求。

关键词: 复合材料; 热压法; 软磁性能; 力学性能; 磁学性能

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A

Impact and magnetic properties of magnetic Fe - Si/epoxy composites

TIAN Jianwei^{1, 2}, XIAO Hongmei¹, LIU Yu¹, LI Junqing², FU Shaoyun^{*1}

(1. Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. College of Material Science and Chemistry Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The magnetic composites were prepared by mixing bisphenols A WSR-615 and glycidyl amine AG-80 epoxy resins and a high content of Fe - Si magnetic particles using hot - pressing process. The glass transition temperature and impact property of the epoxy resins and the impact strength and magnetization of the composites were investigated as a function of Fe - Si content and temperature. It is shown that the impact strength and the magnetization of Fe - Si/epoxy composites increase with increasing the Fe - Si content and are enhanced from 4.03 kJ/m² and 162.07 emu/g to 7.16 kJ/m² and 175.04 emu/g at 54 vol% to 66 vol% Fe - Si particles. The impact strength and magnetization of the composites are very lightly sensitive to the temperature change from -60 °C to 140 °C, which is desired for practical applications requiring that the mechanical and magnetic properties are stable as the temperature changes.

Keywords: composites; hot - press process; soft - magnetic property; mechanical properties; magnetic properties

磁性复合材料主要分为永磁和软磁复合材料两大类^[1]。聚合物基磁性复合材料作为一种新型功能性材料, 广泛用于电子电气、仪表、通讯、玩具、文具、体育用品及日常生活中的诸多领域^[2-5]。其中软磁材料由于其固有的软磁特性, 应用于生活中的诸多方面, 但是由于使用环境温度的变化, 要求软磁复合材料的性能具有较好的温度稳定性^[6]。

目前国内外关于软磁复合材料的研究取得了一

些进展。Shokrollahi 和 Janghorban^[7]用环氧树脂和铁粉制备了复合材料, 研究了其磁学性能; Dobrzański 等^[8]采用硅树脂和金属带制备了软磁复合材料, 研究了不同工艺对复合材料磁性能和力学性能的影响; Taghvaei 等^[9]采用酚醛树脂和铁粉制备了软磁性复合材料, 并研究了工艺条件对复合材料磁导率的影响。Fe - Si 磁性颗粒具有高磁导率、高饱和磁感应强度、低磁致伸缩和低铁损等优异的

软磁性能^[10],能够广泛应用于发电机、变压器及各种电机和电器等^[11]。然而,对于 Fe-Si 填充的树脂基复合材料尚未有研究报道。另外,实际应用中磁性材料制备成器件时,不仅要具有较好的磁学和冲击性能,还需要满足磁性材料性能对宽温区温度稳定性的要求^[6]。

本文以温度稳定性好的环氧树脂为基体,以 Fe-Si 磁粉为填料,制备了 Fe-Si/环氧树脂磁性复合材料。研究了磁粉含量对软磁复合材料的冲击性能和磁学性能的影响,并检验了复合材料冲击强度和饱和磁化强度对应用要求的温度范围(-60~140℃)的温度敏感性。

1 实验材料及方法

1.1 原料

Fe-Si 磁粉(0.1 μm ~ 50 μm, 平均粒径为 20 μm),横店集团东磁股份有限公司;双酚 A 型环氧树脂 WSR-615(环氧值为 0.51~0.54),结构式如图 1(a)所示,蓝星化工无锡树脂厂精细化工研究所;缩水甘油胺型环氧树脂 AG-80(环氧值为 0.70~0.80),结构式如图 1(b)所示,上海合成树脂研究所;甲基六氢邻苯二甲酸酐(MeHHPA)、N,N-二甲基苄胺,上海理亿发展有限公司;硅烷偶联剂 γ-(2,3-环氧丙氧)丙基三甲氧基硅烷(KH-560),上海耀华化工厂;消泡剂 Deform 6800,德谦(上海)化学有限公司;丙酮、无水乙醇,北京化工厂。原料均为分析纯。

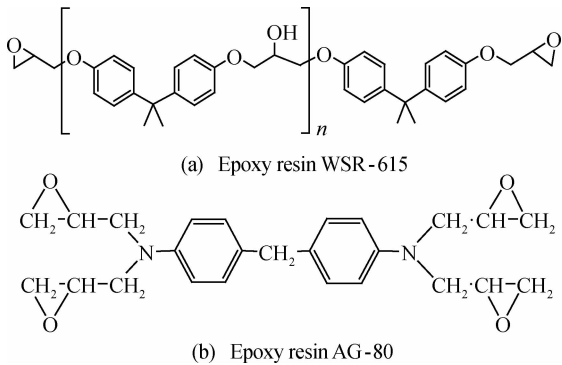


图 1 环氧树脂化学结构图

Fig. 1 Chemical structures of epoxy resins

1.2 实验过程

为了使磁粉与环氧树脂具有较好的界面结合,将适量硅烷偶联剂 KH-560 溶解于乙醇中,然后把按一定质量的磁粉缓慢加入硅烷稀释液中,加热充分搅拌。反应 4~5 h 后,将磁性颗粒分离,用无水

乙醇对软磁性颗粒进行洗涤,在 55℃ 下 72 h 烘干,取出后研磨。

将环氧树脂 AG-80、环氧树脂 WSR-615、固化剂 MeHHPA 和 N,N-二甲基苄胺混合均匀,再将上述用偶联剂处理过的定量 Fe-Si 磁性粒子加入到环氧树脂体系中。将制得的混合浆料混合均匀,抽真空 0.5 h,然后将混合均匀的物料缓慢浇注到预热并涂有脱模剂的不锈钢模具中,将模具超声处理,然后用热压机在 80℃/2 h+140℃/4 h 的固化条件下 10 MPa 的压力下模压,随后自然冷却至室温,得到复合材料。促进剂 N,N-二甲基苄胺的加入可有效促进环氧树脂与固化剂的反应,达到完全固化。

利用 RG-30 冲击试验机测试环氧树脂基体及复合材料冲击强度。冲击试样按 GB/T 2571-1995 标准^[12]制备,实验中采用简支梁无缺口冲击测试,选用最大冲击能为 7.35 J 冲击摆锤,每组测试至少 5 个试样。采用 HITACHI S-4800 型扫描电子显微镜(SEM)对样品的冲击断口表面形貌进行表征。利用 Nicolet-DXCFTIR 测试仪对样品进行红外结构表征。利用 STA 409 PC/PG(DSC/TG)测试样品玻璃化温度(T_g)和热重(TGA),保护气氛为 N_2 ,升温速率为 10℃/min,升温范围分别为 20~200℃和 20~700℃。磁性能采用 Lake-Shore7307 型振动样品磁强计(VSM,美国 LDJ 公司)进行测试,测试温度范围在 85~400 K,测试条件:从高温到低温降温测试。

2 结果与讨论

2.1 环氧树脂配方

将不同的环氧树脂按照不同的配比进行混合,并与相应的固化剂混合,在温度为 140℃和压力为 10 MPa 条件下,制备环氧树脂基体试样。不同的环氧树脂配比及其相应的性能测定结果如表 1 所示。可以看出,纯环氧树脂 WSR-615 与固化剂 MeHHPA 固化得到的树脂基体,其 $T_g=117.68℃$ 。随着 AG-80 的加入,环氧树脂基体的 T_g 逐渐升高,当加入 AG-80 的含量为 50%时(6# 试样), T_g 达到 159.29℃,提高了约 50%,这主要是由于环氧树脂 AG-80 本身的玻璃化温度高的缘故^[13]。环氧树脂 AG-80 具有比 WSR-615 更多的环氧环和更多的交联点,AG-80 的加入可以提高环氧树脂体系的交联密度,其 T_g 也相应升高。

表 1 环氧树脂 AG-80 与 WSR-615 质量比对基体样品玻璃化温度和冲击强度的影响

Table 1 Effects of the AG-80 to WSR-615 mass ratio on the glass transition temperature and the impact strength

Sample No.	Mass/g				$T_g/^\circ\text{C}$	Impact strength/($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$)
	WSR-615	AG-80	MeHHPA	Accelerating agent		
1 [#]	100	0	92.14	0.4	117.68	26.85 ± 1.82
2 [#]	90	10	97.10	0.4	122.18	22.21 ± 1.16
3 [#]	80	20	102.07	0.4	132.23	19.87 ± 1.38
4 [#]	70	30	107.03	0.4	145.76	16.92 ± 1.08
5 [#]	60	40	111.99	0.4	156.40	15.81 ± 1.02
6 [#]	50	50	116.95	0.4	159.29	13.15 ± 1.64

树脂的冲击强度为 26.85 kJ/m^2 , 随着 AG-80 的加入, 其冲击强度逐渐降低; 当 AG-80 的含量为 50% 时(6[#] 试样), 冲击强度降低了约 50%, 降至 13.15 kJ/m^2 。这主要是由于环氧树脂 WSR-615 属于长链结构, 只有首尾有两个环氧基团, 易于旋转, 当受到外力作用时, 柔性固化网络结构能很好地抵抗体系的开裂, 使体系呈现较高的冲击韧性^[14]。而环氧树脂 AG-80 是短链结构, 首尾共有四个环氧基团, 固化后不容易旋转, 属于刚性链段^[15]。随着刚性链段在环氧体系中含量的增加, 体系抗冲击开裂的能力逐渐降低^[14-19]。由于电子产品的使用温度要求至少保证能在 125°C 条件下使用^[20], 而冲击强度也是保证产品质量的重要指标(避免使用过程中产品的碰撞和掉落而损坏), 因此, 综合考虑到 T_g (要高于 125°C) 和冲击强度的要求, 最终选择 $T_g = 146^\circ\text{C}$ 的优选环氧树脂体系: WSR-615 : AG-80 为 7 : 3(4[#] 试样)。

图 2 为优选的 WSR-615 : AG-80 为 7 : 3 的环氧树脂基体的冲击强度随温度的变化关系。可以看出, 环氧树脂体系的冲击强度在 $-60 \sim 140^\circ\text{C}$ 区间内整体随着温度的升高变化较小, 说明环氧树脂的

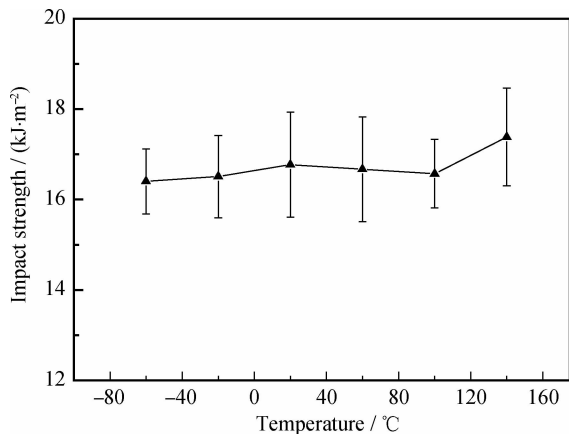


图 2 不同温度条件下优选环氧树脂体系基体的冲击强度

Fig. 2 Dependence of the impact strength of the optimized epoxy system on the temperature

冲击强度对温度敏感性较小。图 3 给出了环氧树脂基体冲击后断口形貌的扫描电镜照片。由图 3 不同

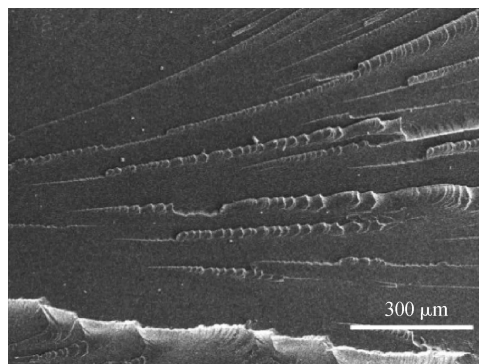
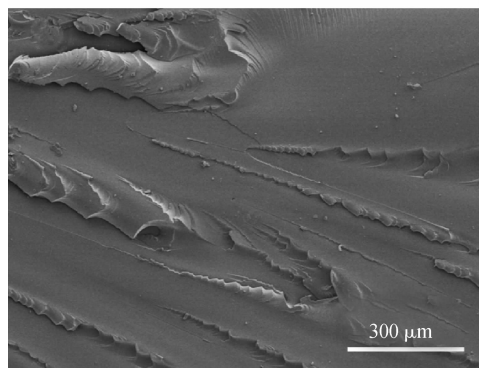
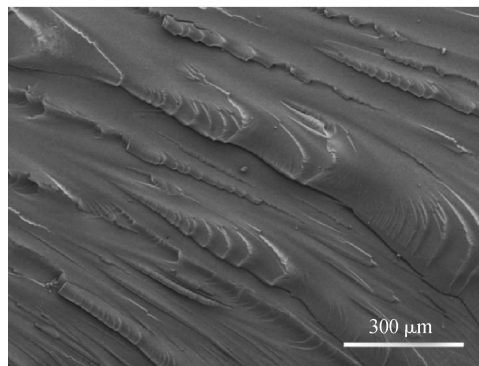
(a) $T = -60^\circ\text{C}$ (b) $T = 20^\circ\text{C}$ (c) $T = 140^\circ\text{C}$

图 3 环氧树脂基体冲击后断口形貌的扫描电镜照片

Fig. 3 SEM photographs of the fracture surface of epoxy resins after impacting

温度的冲击断裂表面形貌可以看出：环氧树脂体系冲击试样在温度 $T = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的断口形貌都比较平整，说明该优选的环氧树脂体系的冲击强度对温度的敏感性较小，与图 2 的结果基本一致。

2.2 Fe-Si/环氧树脂磁性复合材料冲击强度

图 4 为 Fe-Si 磁性颗粒 X 射线衍射分析 (XRD) 表征。样品特征衍射峰与文献报道铁硅合金粉的相一致^[21]。出现在 45.6° 、 66.4° 和 82.8° 的特征衍射峰对应于 Fe 峰，而 46.2° 和 83.1° 与 58.3° 处的峰分别对应于 Fe_3Si 峰和 Si 峰。

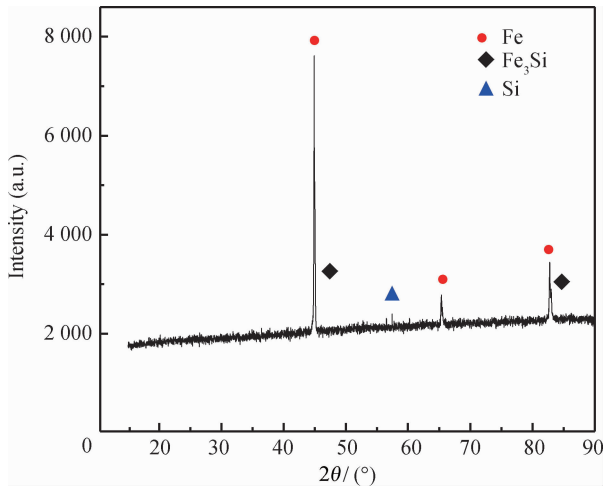


图 4 Fe-Si 磁粉 XRD 图

Fig. 4 XRD of the Fe-Si magnetic particles

图 5 为未经处理的 Fe-Si 磁粉和经过硅烷偶联剂 KH-560 处理的 Fe-Si 磁粉的红外谱图对比。由图中可以看出，经过 KH-560 处理的 Fe-Si 磁粉在 2925 cm^{-1} 为 $-\text{CH}_2-$ 的非对称伸缩振动， 2867 cm^{-1} 为 $-\text{CH}_2-$ 对称伸缩振动； 1255 cm^{-1} 、 910 cm^{-1} 和 821 cm^{-1} 附近的 3 个峰为环氧基团伸缩振动的 3 个特征吸收峰^[22]，表明 KH-560 确实吸附到了 Fe-Si 磁性颗粒表面；在 1088 cm^{-1} 两个峰为 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 变形振动吸收分裂的双峰，说明 KH-560 与 Fe-Si 表面发生了反应， 1194 cm^{-1} 为 $\text{Si}-\text{OMe}$ (Me 代表甲基) 的吸收峰，说明表面还有反应不完全的硅烷偶联剂。

图 6 为对经过 KH-560 处理的磁粉的热重分析。可以看出，在 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 最大的失重率为 0.1% ，说明磁粉经过处理后，经过大量的溶剂充分洗涤，已经将没有反应的 KH-560 除去，因此在红外光谱上的吸收峰应该主要是由接枝在磁粉表面的 KH-560

引起的。另外，与纯的磁粉对比，KH-560 改性的磁粉峰强比较明显的原因可能与无机物的红外吸收峰比较弱有关。

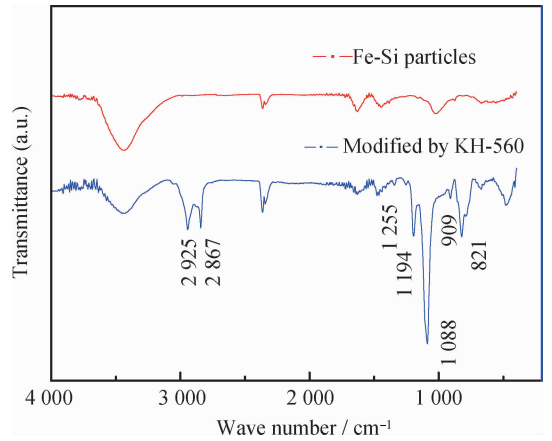


图 5 未经处理和经 KH-560 处理的 Fe-Si 磁粉红外光谱

Fig. 5 FTIR curves of untreated and treated Fe-Si particles by KH-560 coupling agent

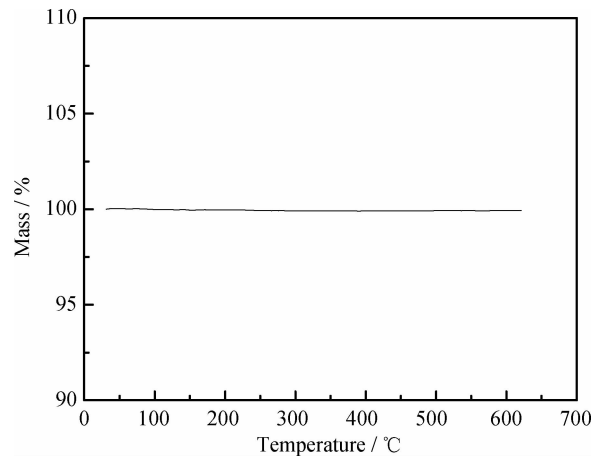


图 6 经 KH-560 处理的 Fe-Si 磁粉热重分析

Fig. 6 TG curve of KH-560 treated Fe-Si particles

表 2 为 Fe-Si/环氧树脂磁性复合材料配方。促进剂的加入是为了降低固化温度和缩短反应时间；消泡剂 Deform 6800 的加入是为了消除环氧树脂基软磁性复合材料制备过程中产生的气泡；体积分数根据环氧树脂体系的密度和 Fe-Si 磁性颗粒密度计算得出。理论上复合材料的磁性能随着磁粉含量的增加而增加，配方中的磁性粒子含量 $66\text{ vol}\%$ 为技术操作中的最高含量。固化剂含量为按照环氧当量比值确定的含量。

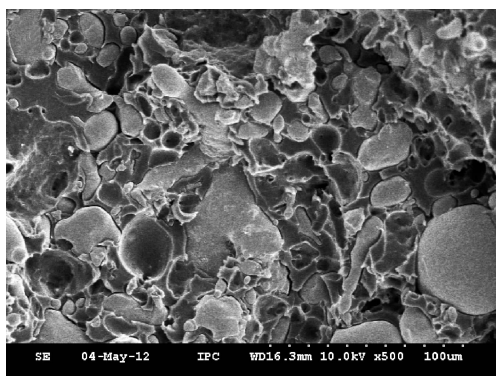
图 7 给出了未经处理和经偶联剂 KH-560 处理的 Fe-Si 磁性颗粒制备的 Fe-Si ($66\text{ vol}\%$)/环氧树脂复合材料断裂面 SEM 图。可以看出，没有经过偶联剂处理的 Fe-Si 磁性颗粒制备的 Fe-Si/环

表 2 Fe-Si/环氧树脂磁性复合材料配方

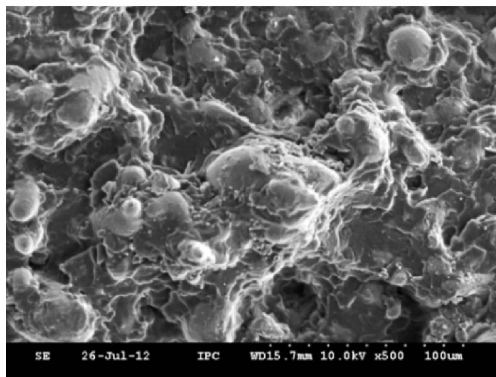
Table 2 Formulations of magnetic Fe-Si/epoxy composites

Sample code	Fe-Si content vol %	Mass/g					
		Fe-Si particles	WSR-615	AG-80	MeHHPA	Deform 6800	Accelerating agent
A	0	0	14	6	21.40	0.06	0.4
B	66	278.30	14	6	21.40	0.06	0.4
C	60	215.04	14	6	21.40	0.06	0.4
D	54	168.30	14	6	21.40	0.06	0.4

氧树脂复合材料在断裂时在磁性粒子表面和基体之间出现明显的裂纹,如图 7(a)所示;但经过 KH-560 处理的 Fe-Si 磁性颗粒制备的 Fe-Si/环氧树脂复合材料中磁性颗粒与树脂基体结合较好,断裂后也未出现磁性颗粒和树脂剥离的状态,如图 7(b)所示。偶联剂的加入可以改善磁性 Fe-Si 磁性颗粒与环氧树脂基体的界面性能,使材料在受力过程中,应力可以良好地传递,有利于提高复合材料的力学性能^[23]。



(a) Fe-Si untreated by KH-560



(b) Fe-Si treated by KH-560

图 7 未经和经过 KH-560 处理的磁粉制备的 Fe-Si/环氧树脂断面 SEM 图

Fig. 7 SEM images of the fracture surfaces of Fe-Si/epoxy composites made from untreated and treated Fe-Si by KH-560

图 8 为不同含量的磁性粒子的 Fe-Si/环氧树脂复合材料冲击强度随着含量的变化关系。可以看

出,随着磁性粒子含量的升高,复合材料的冲击强度增大。原因是由于复合材料中的磁性粒子与环氧基体界面结合好,随着磁性颗粒含量的增加,界面总面积增加,界面的脱粘等将对冲击强度的贡献增加,良好的界面结合在材料受力时能有效地传导应力^[23],因此冲击强度随磁性颗粒含量的增加而增加。

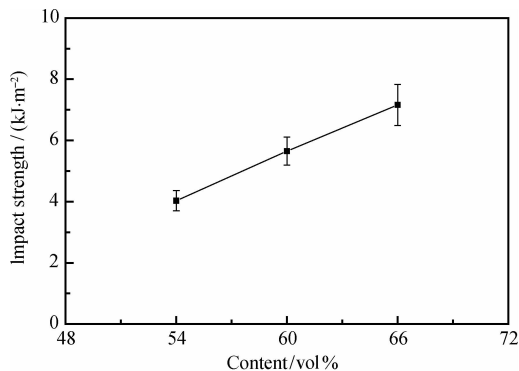


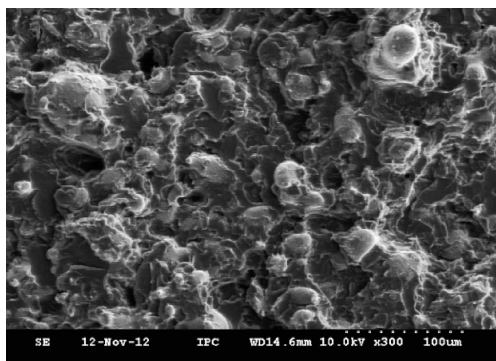
图 8 20 °C 时不同含量磁性粒子的 Fe-Si/环氧树脂复合材料的冲击强度

Fig. 8 Impact strength of Fe-Si/epoxy composites with different contents of magnetic particles at 20 °C

图 9 为不同含量的 Fe-Si 磁性颗粒增强环氧树脂基复合材料冲击断面形貌图,图 9(a)、图 9(b)和图 9(c)中 Fe-Si 磁性颗粒含量分别为 66 vol%、60 vol%和 54 vol%。可以看出,Fe-Si 磁性颗粒与环氧基体结合紧密,界面结合良好,因此随着磁性粒子含量的增加,复合材料冲击强度升高。颗粒复合材料界面性能一般使用经验公式确定^[24]。确定颗粒复合材料界面粘接强度工作量很大^[23],因此这里只作定性讨论。这三个含量的复合材料中,含有 66 vol% Fe-Si 磁粉的复合材料(见图 9(a))的冲击性能最好。

图 10 为含有 66 vol% 的磁性粒子的 Fe-Si/环氧树脂复合材料的冲击强度随着温度的变化关系。可以看出,复合材料在温度区域 -60~140 °C 范围内,冲击强度在 7.01 kJ/m² 到 7.59 kJ/m² 的范围

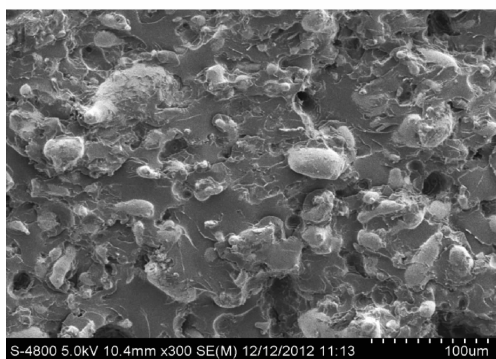
之内,材料的冲击性能对温度敏感性较小,可满足实际应用对磁性材料冲击性能温度稳定性的要求。



(a) 66 vol% Fe-Si particles



(b) 60 vol% Fe-Si particles



(c) 54 vol% Fe-Si particles

图9 Fe-Si磁性颗粒增强环氧树脂复合材料冲击断口形貌的扫描电镜照片

Fig. 9 SEM photographs of the fracture surfaces after impacting of Fe-Si/epoxy composites

2.3 Fe-Si/环氧树脂复合材料的磁学性能

图11给出了含有不同含量磁性粒子的Fe-Si/环氧树脂复合材料的室温磁滞回线。可以看出,环氧树脂体系不含磁性颗粒,因而表现无磁性(见图11中的(A))。同时从图中也可以看出,添加Fe-Si磁性颗粒的复合材料为典型的软磁性材料。在Fe-Si含量为66 vol%,磁饱和强度高达175.16 emu/g,

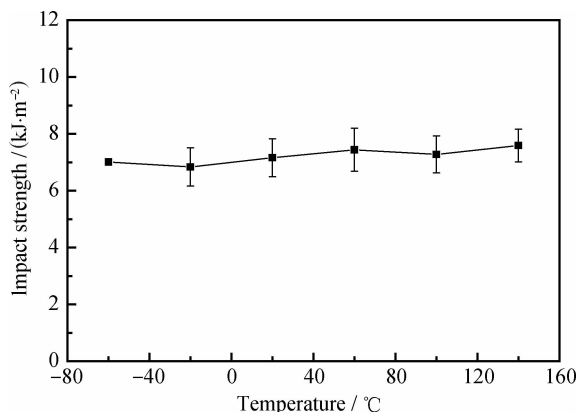


图10 不同温度条件下磁性复合材料的冲击强度

Fig. 10 The dependence of the impact strength of the composites on the temperature

矫顽力只有6.76 Oe。图11中,试样B的饱和磁化强度为175.16 emu/g, C的饱和磁化强度为134.8 emu/g, D的饱和磁化强度为106.78 emu/g。从图11(A)~(D)中可以看出,随着磁性颗粒含量的增加,复合材料的磁饱和强度增加,并且增加的幅度与磁性颗粒质量成正比。因此,作为磁性复合材料,含有66 vol% Fe-Si磁粉为本研究的最佳含量的Fe-Si/环氧树脂磁性复合材料。磁性颗粒含量更高时,高质量磁性复合材料的制备存在工艺上的困难。

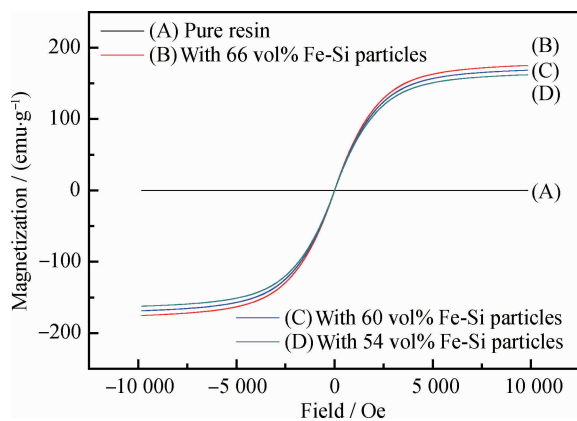


图11 不同含量磁性粒子的Fe-Si/环氧树脂复合材料的室温磁滞回线

Fig. 11 Hysteresis loops for Fe-Si/epoxy composites with different contents of magnetic particles

图12给出了含有66 vol%磁性粒子的Fe-Si/环氧树脂复合材料的磁热曲线。可以看出,含有66 vol%含量的复合材料在场强为200 Oe的条件下,温度从-60 °C到127 °C的范围内,磁化强度在11.13 emu/g到11.31 emu/g之间变化,磁化强度

随着温度变化很小, 保持了良好的温度稳定性。

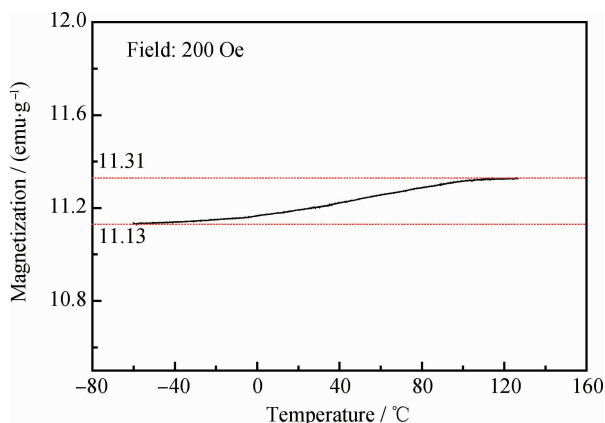


图 12 含 66 vol% Fe-Si 磁性颗粒的 Fe-Si/环氧树脂复合材料的磁热曲线

Fig12 Magnetic-temperature curve of Fe-Si/epoxy composite with 66 vol% Fe-Si magnetic particles

3 结论

采用以温度敏感性小的环氧树脂为基体, 优化环氧树脂配方, 并以软磁 Fe-Si 合金粉体为填充材料, 利用热压法制备了高含量磁性 Fe-Si/环氧树脂复合材料。

(1) 随着 AG-80 加入含量的增加, 环氧树脂体系的 T_g 逐渐升高, 但冲击强度逐渐降低。综合考虑 T_g 和冲击强度, 选择 $T_g = 146^\circ\text{C}$ 的环氧树脂体系为优选基体材料, 其配比为: WSR-615: AG-80 为 7:3。

(2) 随着 Fe-Si 磁性颗粒含量的增加, 磁性 Fe-Si/环氧树脂复合材料的冲击强度和磁性能不断增加。当磁性颗粒为 66 vol% 时, 冲击强度和饱和磁化强度分别由 54 vol% 的 4.03 kJ/m^2 和 162.07 emu/g 增加到 7.16 kJ/m^2 和 175.04 emu/g 。

(3) 磁性 Fe-Si/环氧树脂复合材料(66 vol%) 在温度为 $-60\sim 140^\circ\text{C}$ 范围内的冲击强度和磁性能变化较小, 显示该磁性复合材料性能在该温度范围内具有良好的温度稳定性, 满足实际应用对磁性材料性能温度敏感性的要求。

参考文献:

[1] 郝元恺, 肖加余. 高性能复合材料学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 13-64.

Hao Yuankai, Xiao Jiayu. High performance composite materials [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 13-64.

[2] Dobrzański L A, Drak M. Structure and properties of composite materials with polymer matrix reinforced Nd-Fe-B hard magnetic nanostructured particles [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 157-158: 650-657.

[3] McHenry M E, Willard M A, Laughlin D E. Amorphous and nanocrystalline materials for applications as soft magnets[J]. Progress in Materials Science, 1999, 44(4): 291-433.

[4] 刘献明, 付绍云, 肖红梅, 等. 聚合-热解法制备 $\text{Co}_{0.2}\text{Zn}_{0.2}\text{Mn}_{0.6}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 纳米颗粒及其表征[J]. 金属学报, 2006, 42(5): 497-499.

Liu Xianming, Fu Shaoyun, Xiao Hongmei, et al. Preparation of $\text{Co}_{0.2}\text{Zn}_{0.2}\text{Mn}_{0.6}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparticles by a polymer-pyrolysis route and its characterization [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42(5): 497-499.

[5] Morimoto K, Niizuma E, Igarashi K. Preparation of fully dense Nd-Fe-B magnets using semi-processed HDDR powders [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Material, 2003, 265(3): 345-351.

[6] 洪向东, 许启明. 宽温度、大功率微波铁氧体材料研究[J]. 材料开发与应用, 2008, 23(2): 24-26.

Hong Xiangdong, Xu Qiming. Wide temperature coefficient and high power microwave ferrite [J]. Development and Application of Materials, 2008, 23(2): 24-26.

[7] Shokrollahi H, Janghorban K. Soft magnetic composite materials (SMCs) [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 189(1-3): 1-12.

[8] Dobrzański L A, Nowosielski R, Przybyl A, et al. Soft magnetic nanocomposite with powdered metallic ribbon based on cobalt and polymer matrix [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 162: 327-330.

[9] Taghvaei A H, Shokrollahi H, Ghaffari M, et al. Influence of particle size and compaction pressure on the magnetic properties of iron-phenolic soft magnetic composites [J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2010, 71(1): 7-11.

[10] 田民波. 磁性材料[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 1-21. Tian Minbo. Magnetic materials [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001: 1-21.

[11] Takada Y, Abe M, Masuda S, et al. Commercial scale production of Fe-6.5wt.% Si sheet and its magnetic properties [J]. Journal of Applied Physics, 1988, 64(10): 5367-5369.

[12] 全国纤维增强塑料标准化技术委员会. GB/T 2571-1995 中华人民共和国国家标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995. The National Fiber Plastic Standardization Technical Committee. GB/T 2571-1995 The international standard of the People's Republic of China [S]. Beijing: China Standards Press, 1995.

[13] John N A S, George G A. Diglycidyl amine-epoxy resin networks: kinetics and mechanisms of cure [J]. Progress in

- Polymer Science, 1994, 19(5): 755-795.
- [14] 蔡宏洋, 李刚, 刘海洋. 柔性胺 T403 对环氧树脂体系力学性能及交联密度的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009(1): 38-41.
- Cai Hongyang, Li Gang, Liu Haiyang. Effects of flexible amine T403 on the mechanic properties and crosslinking density in epoxy systems [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2009(1): 38-41.
- [15] 冯青平, 杨娇平, 刘玉, 等. 聚丙烯酸酯改性环氧树脂的力学性能[J]. 复合材料学报, 2012, 29(3): 9-15.
- Feng Qingping, Yang Jiaoping, Liu Yu, et al. Mechanical properties of epoxy systems modified by polyacrylates [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(3): 9-15.
- [16] 何曼君. 高分子物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2007. 13-17.
- He Manjun. Polymer physics [M]. Shanghai: Fudan University Press, 2007: 13-17.
- [17] He X Q, Zhang D S, Li H R. Shape and size effects of ceria nanoparticles on the impact strength of ceria/epoxy resin composites [J]. Particuology, 2011, 9(1): 80-85.
- [18] Yang G, Fu S Y, Yang J P. Preparation and mechanical properties of modified epoxy resins with flexible diamines [J]. Polymer, 2007, 48(1): 302-310.
- [19] 杨果, 潘勤彦, 潘皖江, 等. 柔性胺改性剂对环氧树脂力学性能的影响[J]. 材料工程, 2006(5): 16-20.
- Yang Guo, Pan Qinyan, Pan Wanjiang, et al. Influence of flexible amine modifier on mechanical properties of epoxy resins [J]. Journal of Materials Engineering, 2006(5): 16-20.
- [20] Society of Automotive Engineers. SAE J1711 - MAR1999. Recommended practice for measuring the exhaust emissions and fuel economy of hybrid-electric vehicles[S]. Washington, D C: SAE International, 1999.
- [21] 胡长征. 粉末冶金方法制备高硅铁硅合金的探索性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2004: 26-46.
- Hu Changzheng. Study on fabrication of high Si - content Fe - Si alloy by power metallurgy [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2004: 26-46.
- [22] 李世荣, 官仕龙, 吴莉. 丙烯酸改性 F-44 环氧树脂及其光固化性能研究[J]. 热固性树脂, 2001, 16(1): 1-4.
- Li Shirong, Guan Shilong, Wu Li. Production and property of F - 44 epoxy resin modified with acrylic acid [J]. Thermosetting Resin, 2001, 16(1): 1-4.
- [23] Fu S Y, Feng X Q, Lauke B, et al. Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate - polymer composites [J]. Composites Part B - Engineering, 2008, 39(6): 933-961.
- [24] Liang J Z. Quantitative description of interfacial strength in polypropylene/inorganic particle composites [J]. Polymer Composites, 2011, 32(5): 821-828.