

MnBi/Sm₂Co₁₇ 复合磁粉制备、磁性能及微结构研究

单杰锋¹, 俞能君¹, 张素银¹, 金向阳², 吴琼¹, 张朋越¹, 葛洪良¹

(1. 中国计量大学, 浙江 杭州 310018)

(2. 浙江中元磁业股份有限公司, 浙江 金华 322100)

摘要: 采用化学辅助高能球磨工艺制备了 MnBi/Sm₂Co₁₇ 纳米晶复合磁粉, 研究了 MnBi 合金添加量对复合磁体磁性能和微结构的影响。随着 MnBi 合金添加量的增加, 复合磁粉的内禀矫顽力先稍上升, 后基本保持不变, 但均低于纯 MnBi 磁粉的 864 kA/m; 磁粉的饱和磁化强度和剩余磁化强度均逐渐下降。复合磁粉中没有发现明显的元素互扩散现象。采用 Henkel 曲线分析了复合磁体的交换耦合作用, 复合磁粉的 δM 在添加量为 15% (质量分数) 时达到极大值, 说明该复合磁体具有较强的交换耦合作用, 结合磁粉形貌分析了随着 MnBi 合金添加量的增加复合磁粉剩磁比的演变规律。

关键词: MnBi/Sm₂Co₁₇ 复合材料; 磁性能; 微结构; 交换耦合作用

中图分类号: TM272

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)04-1448-07

MnBi 基永磁材料因其较低的材料成本、一定温度范围内呈现正的矫顽力温度系数等而受到广泛关注。MnBi 基永磁材料的磁性主要来源于六方结构的 NiAs 型 MnBi 低温相 (LTP), 该相的内禀特性为: 磁晶各向异性 $K_1=11.6 \times 10^2 \text{ kJ/m}^3$ (298 K), 居里温度约为 633 K, 理论磁能积可达 144 kJ/m^3 , 较高的居里温度和正的矫顽力温度系数使其有望成为新一代高使用温度永磁材料, 但其较低的理论饱和磁化强度极大地阻碍了其最大磁能积的进一步提升^[1,2]。提高 MnBi 磁体的磁性能, 尤其是饱和磁化强度, 通常有提高 LTP 相含量和纳米软硬磁复合 2 种方法。Cui 等人通过热处理、磁选等工艺的优化, 成功将饱和磁化强度提升至 $78 \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, 以达到 MnBi 低温相饱和磁化强度理论值的 96%, 较已实用的 NdFeB 和 SmCo 基磁性材料仍有较大距离^[3-5]。

复合纳米晶磁性材料是近年来开发的一种新型双相永磁材料。它是由高磁晶各向异性的硬磁相和高饱和磁化强度的软磁相在纳米尺度上产生强烈的磁交换耦合作用, 使磁体呈现明显的剩磁增强效应, 从而大幅提升磁体的饱和磁化强度和剩余磁化强度。北京工业大学 Yue 等人^[6,7]利用放电等离子体烧结技术成功制备了 MnBi/NdFeB 复合磁体, 发现随着 MnBi 质量分数的增加, 磁体的内禀矫顽力迅速增大 (20% MnBi 的矫顽力为 790 kA/m, 80% MnBi 的矫顽力为 948 kA/m), 但剩磁与最大磁能积都下降 (剩磁由 0.598 T

下降到 0.369 T, 最大磁能积由 72.8 kJ/m^3 下降到 32.08 kJ/m^3)。423 K 时, 20% MnBi 的磁体最大磁能积 45.68 kJ/m^3 , 比同温下 NdFeB 的 29.36 kJ/m^3 要高, 并且在温度 293~389 K 范围内, MnBi/NdFeB 复合磁体的矫顽力正温度系数随 MnBi 质量分数的增加而逐渐升高, 表明双硬磁相 MnBi/NdFeB 磁体的热稳定性相对于单相 NdFeB 永磁体有了明显的提高。中国计量大学 Wu 等人^[8]采用化学辅助高能球磨技术制备了 MnBi/Fe₃B/Nd₂Fe₁₄B 复合磁体, 发现随着 MnBi 添加量的增加, 磁体的矫顽力呈现先增后减的趋势, 在 MnBi 质量分数为 40% 时, 复合磁体的矫顽力达到最大, 并且在 300~350 K 之间具备矫顽力正温度系数。此外, 杰克逊州立大学及北京大学物理学院的科研工作者研究了 MnBi/ α -FeCo、MnBi/Sm₂Fe₁₇X 等复合体系, 均对 MnBi 基磁性材料的磁性能起到了一定程度的优化^[9-12]。

MnBi/Sm₂Co₁₇ 复合体系至今还未有报道, 本研究首次采用化学辅助高能球磨技术制备 MnBi/Sm₂Co₁₇ 复合磁体, 研究 MnBi 合金添加量对复合磁体磁性能和微结构的影响, 采用 Henkel 曲线分析复合磁体的交换耦合作用^[13-15]。

1 实验

采用电弧熔炼法制备 Mn₅₅Bi₄₅ 和 Sm₂Co₁₇ 型合金

收稿日期: 2020-04-05

基金项目: 国家青年基金 (51801196); 国家重点研发计划 (2019YFF0217203); 国家自然科学基金 (51871205)

作者简介: 单杰锋, 男, 1995 年生, 硕士生, 中国计量大学材料与化学学院, 浙江 杭州 310018, E-mail: 839690738@qq.com

锭, 实验所用 Mn、Bi、Sm、Co 金属纯度均在 99.5% 以上。随后对 MnBi 合金进行 240 °C/24 h 的退火处理, 对 Sm₂Co₁₇ 合金进行 1170 °C/4 h 的均一化退火。后将上述 2 种合金锭破碎、研磨、过筛, 得到粒径小于 150 μm 的粉体, 再将 2 种粉体在氩气保护下混合, 以正庚烷为球磨介质, 油酸为表面活性剂, 采用 SPEX 8000M 高能球磨机进行化学辅助高能球磨处理, 球磨时间为 1 h^[16,17]。

采用振动样品磁强计 (VSM, Lakershore-7407) 测试复合磁体磁性能和回复曲线, 利用 X 射线衍射仪 (XRD, 日本理学 Smartlab, Cu Kα 靶 λ=0.154 056 nm) 表征磁体相组成及晶体结构, 利用扫描电子显微镜 (SEM, ΣIGMA 300 配备德国布鲁克能谱仪 (EDS), 型号为 5010) 对复合磁粉形貌、粒径及元素分布等进行观察。

2 结果与讨论

2.1 磁性能

图 1 为不同 MnBi 合金添加量 MnBi/Sm₂Co₁₇ 复合磁粉的磁滞回线。从图中可以看出, 未添加 MnBi 合金的磁粉具有最高饱和磁化强度, 随着 MnBi 合金含量的增加, 饱和磁化强度和剩余磁化强度均逐渐下降, 饱和磁化强度从 0%MnBi 时的 105 A·m²·kg⁻¹ 下降至 50%MnBi 时的 45 A·m²·kg⁻¹, 剩余磁化强度从 0%MnBi 时的 75 A·m²·kg⁻¹ 下降至 50%MnBi 时的 30 A·m²·kg⁻¹。

未添加 MnBi 合金的磁粉的内禀矫顽力 H_{cj} 为 600 kA/m, 随着 MnBi 合金的添加, 矫顽力缓慢上升后, 保持在 640 kA/m 左右, 但均低于纯 MnBi 磁粉的 864 kA/m, 如图 2a 所示。根据图 1 计算了复合磁粉的剩磁比, 如图 2d 所示。磁粉的剩磁比总体随着 MnBi 添加量增加而下降, 但在 MnBi 含量为 15% 时, 出现一个明显的异常上升。

2.2 相结构

为从相组成、微结构方面探究样品磁性能变化机

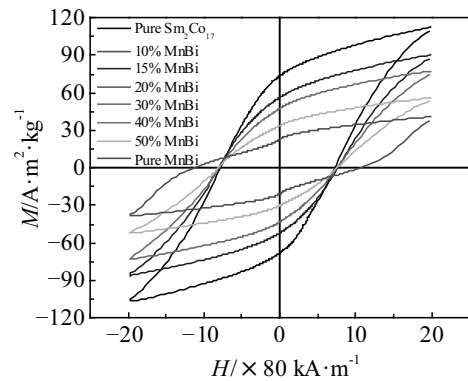


图 1 不同 MnBi 合金添加量 MnBi/Sm₂Co₁₇ 复合磁粉的磁滞回线

Fig.1 Hysteresis loops of MnBi/Sm₂Co₁₇ composite magnetic powder with different amounts of MnBi alloy added

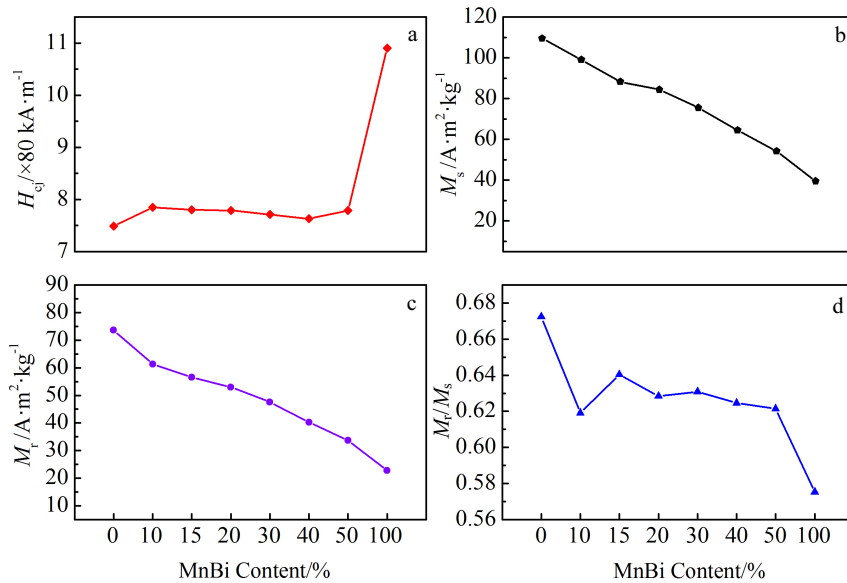


图 2 不同 MnBi 合金添加量 MnBi/Sm₂Co₁₇ 复合磁粉的磁性能及剩磁比

Fig.2 Coercivity (a), saturation magnetization (b), remanent magnetization (c) and remanence ratio (d) of MnBi/Sm₂Co₁₇ composite magnetic powder with different amounts of MnBi alloy added

理, 对合金粉末进行 X 射线衍射分析。图 3 为不同 MnBi 合金添加量 MnBi/Sm₂Co₁₇ 复合磁粉的 X 射线衍射图谱, 对各组样品特征峰进行定性分析, 未添加 MnBi 合金的 Sm₂Co₁₇ 磁粉由 Sm₂Co₁₇ 相组成, 不存在其余杂相; 对纯 MnBi 磁粉进行定性分析, 除 MnBi 低温相外, 还存在少量 Bi 的单质相。随着 MnBi 相对添加量的增加, 合金粉末衍射峰的相对强度发生明显变化, MnBi 低温相及 Bi 相的衍射峰强度明显逐渐增强, Sm₂Co₁₇ 相衍射峰强度则相对减弱。尽管各相的衍射峰强度发生了较大变化, 但衍射峰角度并未发生偏移, 表明高能球磨工艺不会使 Sm₂Co₁₇ 与 MnBi 磁粉的晶体结构发生变化, 复合后未产生新相结构。对各相衍射峰拟合, 利用 Scherrer 公式计算各相晶粒大小在 15.8~202.3 nm 之间, 表明混合磁体粉末在经过 1 h 的高能球磨处理后, 晶粒已全部成为纳米晶状态。

2.3 粉末形貌

从 XRD 衍射分析结果来看, 可确定复合磁粉的相结构未发生变化, 但无法确定复合粉末两相之间是否发生元素扩散等情况。为此, 采用 SEM 及 EDS 来观测样品的微观形貌和元素分布。图 4 为不同 MnBi 添加量 MnBi/Sm₂Co₁₇ 复合磁粉的 SEM 照片。如图 4 所示, 未添加 MnBi 合金的 Sm₂Co₁₇ 磁粉表面较为光滑并呈现片状分布, 具有较大的长径比, 这与本组前期研究结果相符, 而纯 MnBi 磁粉表面较为粗糙, 有大量微粒附着, 整体呈现不规则形状。MnBi/Sm₂Co₁₇

复合磁粉则表现出较严重的团聚状态, 从图 4 中可以看出, 随着 MnBi 合金添加量的增加, 当添加量为 15% 时, Sm₂Co₁₇ 磁粉表面较粗糙并出现较细磁粉的包裹现象, 通过 EDS 结果 (图 5) 可以看出, 该部分较细的粉末为 MnBi 磁粉。当添加量为 50% 时, 磁粉的团聚更加严重, 对图 4 中粉末粒径进行统计, 大量小颗粒团聚后形成粒径在 5~20 μm 的粉末颗粒, 其中, 小颗粒粒径为 1~2 μm。

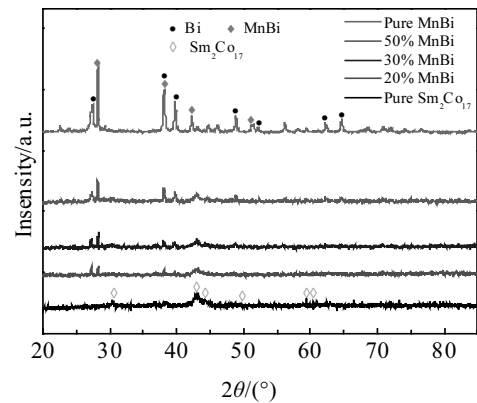


图 3 不同 MnBi 合金添加量 MnBi/Sm₂Co₁₇ 复合磁粉的 XRD 图谱

Fig.3 XRD patterns of MnBi/Sm₂Co₁₇ composite magnetic powder with different MnBi alloy contents

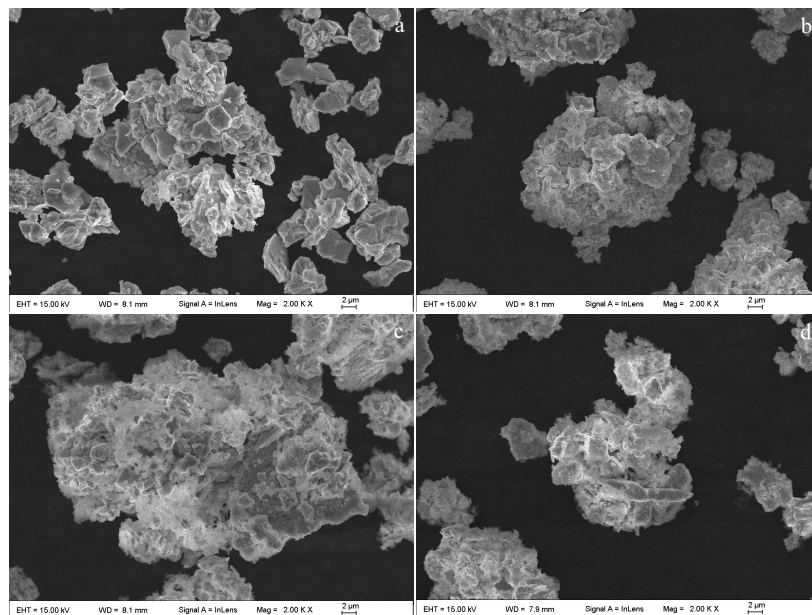


图 4 不同 MnBi 添加量 MnBi/Sm₂Co₁₇ 复合磁粉的 SEM 照片

Fig.4 SEM images of MnBi/Sm₂Co₁₇ composite magnetic powder with different amounts of MnBi added:

(a) 0%, (b) 15%, (c) 50%, and (d) 100%

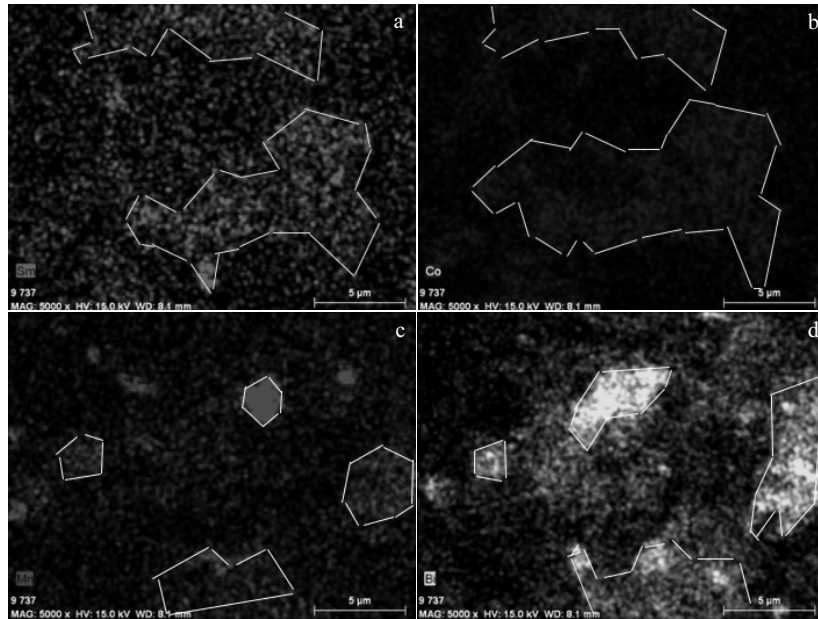


图5 50% MnBi 添加量的 MnBi/Sm₂Co₁₇ 复合磁粉的元素分布图

Fig.5 Element distribution of MnBi/Sm₂Co₁₇ composite magnetic powder with 50% MnBi content:

(a) Sm, (b) Co, (c) Mn, and (d) Bi

为了研究 MnBi/Sm₂Co₁₇ 复合磁粉在高速球磨过程中的元素扩散情况,对添加量为 50% 的复合磁粉进行 EDS 面扫描,如图 5 所示。从图 5 中可以看出 Sm 元素分布区域与 Co 元素的分布区域重合度很高,而 Sm 和 Co 元素分布较集中的区域, Mn 和 Bi 元素明显减少;相对应的, Mn 和 Bi 元素分布较集中的区域, Sm 和 Co 元素含量明显减少,说明复合磁粉中的 MnBi 相和 Sm₂Co₁₇ 相并没有发生明显的元素扩散,因此排除了由于元素互扩散导致的磁性能差异。进一步观察图 5,发现 Mn 和 Bi 元素分布较集中的区域, Bi 元素的分布区域略大于 Mn 元素的分布区域,结合图 3 复合磁粉的 XRD 结果,认为这是由于 MnBi 合金中存在少量的纯 Bi 相导致的。

2.4 晶间交换耦合作用

为了进一步研究 MnBi/Sm₂Co₁₇ 复合磁粉交换耦合作用及其与磁性能的关系,采用 VSM 测试了复合磁粉的回复曲线(Recoil-loops),计算获得 δM 曲线图。 δM 曲线是由 Henkel plot 公式而得到的, $\delta M(H) = [M_d(H) - M_r(H) + 2M_r(H)] / M_r(H)$, $M_r(H)$ 表示从退磁状态出发,沿正向施加逐渐增强的磁化场 H ,除去磁场后测量得到的剩余磁化强度,而正向饱和磁化后的剩余磁化强度记作 $M_r(\infty)$, $M_d(H)$ 则是将样品在反方向饱和磁化,除去磁场后测量其剩余磁化强度 $M_d(0)$,然后沿正方向依次施加、去掉逐渐增强的磁化场,并测量对

应的剩余磁化强度 $M_d(H)$ 。在该理论下,若 $\delta M(H) > 0$,表示晶粒相互作用支持磁化状态,以交换耦合作用为主;若 $\delta M(H) < 0$,表示晶粒相互作用促进退磁化作用,以静磁相互作用为主^[18-21]。

图 6 为不同 MnBi 添加量 MnBi/Sm₂Co₁₇ 复合磁粉的 δM 曲线。从图 6 中可以看出 3 组复合的 δM 值均呈现随外场逐渐增加直至达到峰值,后逐渐降低的一个过程。对比 δM 的极大值发现, MnBi 合金添加后,复合磁粉的 δM 极大值明显高于 0% MnBi 合金添加的 Sm₂Co₁₇ 磁粉,表明 MnBi 合金添加后,复合磁粉中晶粒间的交换耦合作用明显增强。此外, 15% MnBi 添加的复合磁粉的 δM 极大值也明显大于 50% MnBi 添加的复合磁粉晶粒间的交换耦合作用更强,这也是 MnBi 添加量为 15% 时,磁粉退磁曲线具有较高的剩磁比的原因。另一方面,可以发现 0% MnBi 合金添加的 Sm₂Co₁₇ 磁粉的剩磁比明显优于 15% MnBi 添加的复合磁粉,但其 δM 曲线的极大值却明显小于 15% MnBi 添加的复合磁粉。从图 4 中可以发现, 0% MnBi 合金添加的 Sm₂Co₁₇ 磁粉经高速球磨后,磁体呈现片状分布,其厚度仅有数十纳米,而长度为 2~5 μm ,形成了较大的长径比,有助于磁粉在磁场作用下自发形成沿着磁场方向排列,形成局域各向异性的效果,提高了磁粉退磁曲线的剩磁比。因此, 0% MnBi 合金添加的

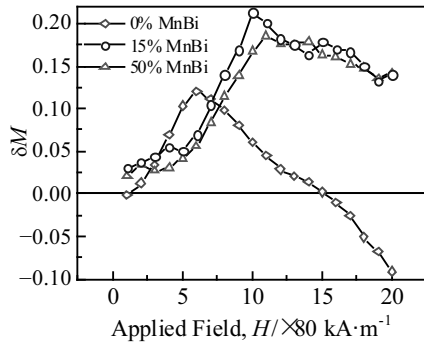


图 6 不同 MnBi 添加量 MnBi/Sm₂Co₁₇ 复合磁粉的 δM 曲线

Fig.6 δM plots of MnBi/Sm₂Co₁₇ composite magnetic powder with different amounts of MnBi added

Sm₂Co₁₇ 磁粉较高的剩磁比主要来源于其较大的长径比。而 15% MnBi 添加的复合磁粉中，由于 MnBi 磁粉脆性较强，在 高能球磨时提前细化，并包裹在较大的 Sm₂Co₁₇ 磁粉表面，阻碍了 Sm₂Co₁₇ 磁粉的薄片化过程，无法获得较大的长径比。因此，其剩磁比的异常上升主要来源于复合磁粉中较强的交换耦合作用。

MnBi 合金添加量对复合磁粉晶间交换耦合作用的影响可以通过样品外场作用下的 $M_d(H)$ 与 $M(H)$ 曲线体现出来。图 7 为外场作用下不同 MnBi 合金添加量磁粉的 $M_d(H)$ 与 $M(H)$ 曲线。根据 Kneller 和 Hawig 模型，在无交换耦合的单相磁体中， H_r 与 H_c 的比值为 1.09，其中 H_c 为内禀矫顽力。计算图 7 中的 H_r 与 H_c 的比值发现，未添加 MnBi 合金的 Sm₂Co₁₇ 磁粉的

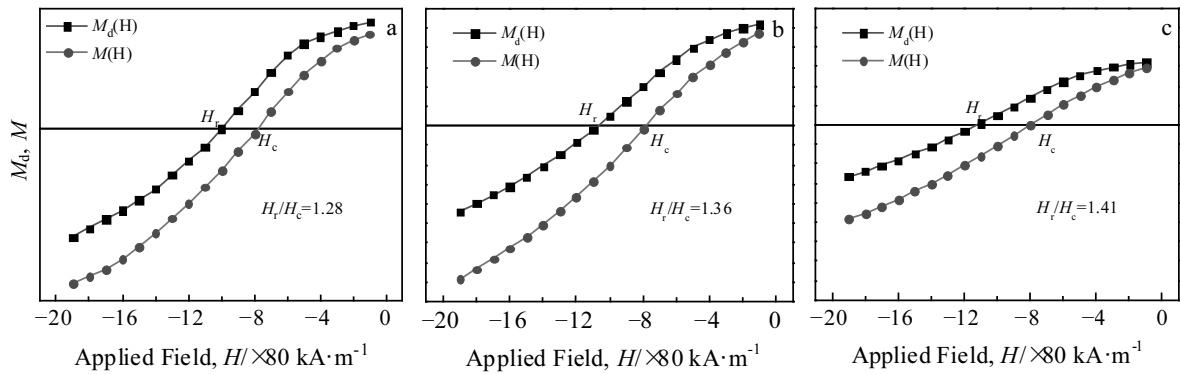


图 7 外场作用下不同 MnBi 添加量磁粉的 $M_d(H)$ 与 $M(H)$ 曲线

Fig.7 $M_d(H)$ and $M(H)$ curves of magnetic powders with different amounts of MnBi alloy added under external field: (a) 0%, (b) 15%, and (c) 50%

$H_r/H_c=1.28$ ，偏离了单相无交换耦合作用时的 1.09，说明磁粉中存在一定的交换耦合作用，原因之一为磁粉的粒度不一致，造成对外磁场的响应不一致，原因之二为 Sm₂Co₁₇ 磁粉中添加了 Cu/Zr/Fe 等元素分布不均匀，导致磁粉中形成了相对软硬的 2 种颗粒，使磁粉中存在一定的交换耦合作用。当 MnBi 添加量为 15% 和 50% 时， H_r/H_c 值分别为 1.36 和 1.41，说明添加 MnBi 合金后，磁粉中的交换耦合作用得到了增强。但由图 6 中看出，MnBi 添加量为 50% 的磁粉的 δM 极大值却小于添加量为 15% 的磁粉，可能是由于 MnBi 合金添加量较多，导致磁粉中 Bi 相的含量增加，导致杂散场增强。此外，从 SEM 图中也可以看出 MnBi 添加量为 50% 的磁粉存在较严重的团聚现象，造成高能球磨时的破碎效率明显降低，致使颗粒较粗大，导致其 δM 极大值降低。

为了研究 MnBi 添加量对复合磁粉矫顽力机制的影响，图 8 给出了不同 MnBi 合金添加量复合磁粉的

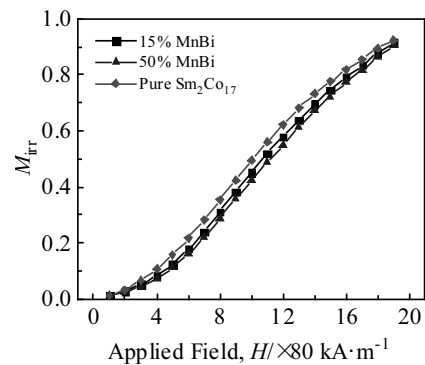


图 8 不同 MnBi 添加量复合磁粉的不可逆磁化部分 M_{irr} 与外磁场 H 的关系曲线

Fig.8 Irreversible magnetization M_{irr} curves of magnetic powders with different amounts of MnBi added under external field H

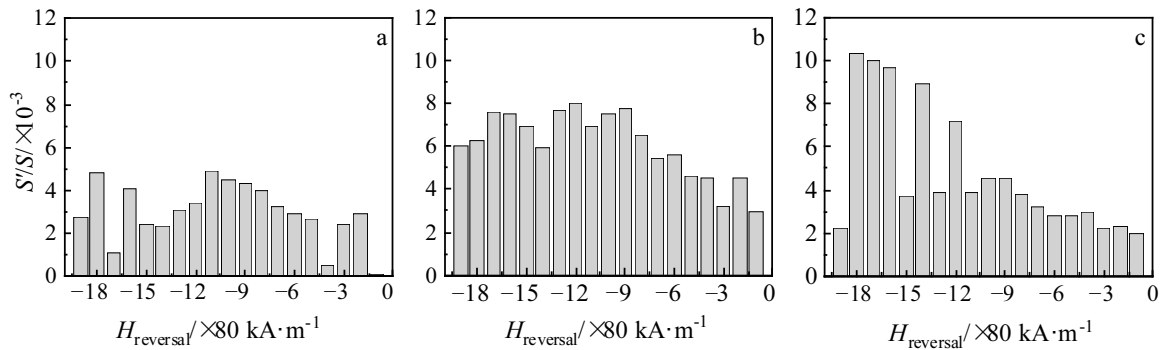


图9 不同 MnBi 添加量复合磁粉在反磁化场作用下的单个回复曲线与整个磁滞回线的面积比

Fig.9 Area ratio of a single recovery curve to the entire hysteresis loop for magnetic powders with different amounts of MnBi added under the demagnetization field: (a) 0%, (b) 15%, and (c) 50%

不可逆磁化部分 M_{irr} 与外磁场 H 的关系曲线。从图中可以看出, 与典型的形核矫顽力机制的当外磁场大于一定数值后磁体的 M_{irr} 迅速增加不同, 所有复合磁粉的 M_{irr} 均呈现缓慢增加的趋势, 说明复合磁粉的矫顽力并非完全由形核机制控制, 同时也说明, MnBi 合金的添加对复合磁粉的矫顽力机制影响很小。

为了研究 MnBi 合金添加量对复合磁粉在反磁化场作用下的磁损耗情况, 选取单个回复曲线与整个磁滞回线的面积比 (S'/S) 作为比较参量, 如图 9 所示。从图 9a 中可以看出, 未添加 MnBi 合金的磁粉单个回复曲线的面积占比最低, 约为 4×10^{-3} 。MnBi 添加量为 50% 的磁粉在低反转场时回复曲线的占比也较低, 约为 3×10^{-3} , 而在高反转场时回复曲线面积占比急剧上升, 但此时磁粉已基本被完全反磁化, 并无借鉴意义。通过对比图 9 发现, 随着 MnBi 合金添加量的增加, 磁粉单个回复曲线占磁滞回线的面积的比值先上升后下降, 在添加量为 15% 时达到极大值, 说明该磁粉在反磁化场作用下的磁损较严重, 会对磁粉的应用造成不利影响。而 50% MnBi 合金添加的磁粉虽然磁损较低, 但其剩余磁化强度也较低。因此, 如何在确保磁性能的同时, 进一步优化复合磁粉在反磁化场作用下的磁损是制备新型 Sm₂Co₁₇/MnBi 复合磁粉的关键。

3 结 论

1) 随着 MnBi 合金添加量的增加, 复合磁粉的饱和磁化强度和剩余磁化强度均下降, 内禀矫顽力先缓慢上升后保持在 640 kA/m, 但均低于纯 MnBi 磁粉的 864 kA/m。

2) MnBi 合金添加量为 15% 时的复合磁粉的 δM 明显高于 0% 和 50% 的 δM , 说明该磁粉中的交换耦合强度较高。

3) MnBi 合金添加量为 15% 时, 复合磁粉的剩磁比出现反常增长, 但低于未添加 MnBi 的 Sm₂Co₁₇ 磁粉; 综合磁粉形貌和 δM 分析, 认为未添加 MnBi 的 Sm₂Co₁₇ 磁粉具有较高的长径比而形成的局域磁粉一致排布所形成的各向异性是其剩磁比较高的主要原因; 而 15% MnBi 合金添加的复合磁粉的较高交换耦合作用强度是其剩磁比较高的主要原因。

参考文献 References

- [1] Lu V, Wu X, Smillie L *et al.* *Journal of Alloys & Compounds* [J], 2014, 615: S285
- [2] Rama Rao N V, Hadjipanayis G C. *Journal of Alloys & Compounds*[J], 2014, 616: 319
- [3] Cui J, Choi J P, Polikarpov E *et al.* *Acta Materialia*[J], 2014, 79: 374
- [4] Xie W, Polikarpov E, Choi J P *et al.* *Journal of Alloys & Compounds*[J], 2016, 680: 1
- [5] Nguyen V V, Poudyal N, Liu X *et al.* *IEEE Transactions on Magnetics*[J], 2014, 50(12): 1
- [6] Zhang D T, Wang P F, Yue M *et al.* *Rare Metals*[J], 2016, 35: 471
- [7] Ma Y L, Liu X B. *Journal of Magnetism & Magnetic Materials* [J], 2016, 411: 116
- [8] Yang Y, Wu Q, Hu Y C *et al.* *Journal of Magnetism*[J], 2016, 21(2): 235
- [9] Yang Y B, Wei J Z, Peng X L *et al.* *Journal of Applied Physics* [J], 2014, 115: 17A721
- [10] Dai Q, Warsi M A, Xiao J Q *et al.* *Nano Research*[J], 2016, 9(11): 1
- [11] Zhang D T, Geng W T, Yue M *et al.* *Journal of Applied Physics*[J], 2014, 115: 17A746.1

- [12] Rama Rao N V, Gabay A M, Hadjipanayis G C. *IEEE Transactions on Magnetics*[J], 2013, 49(7): 3255
- [13] Yu N J, Zhu M G, Fang Y K *et al. Scripta Materialia*[J], 2017, 132: 44
- [14] Yu N J, Zhu M G. *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*[J], 2018, 452: 272
- [15] Yu N J, Wu Y G, Pan M X *et al. Journal of Alloys & Compounds*[J], 2020, 818: 152 908
- [16] Lu Q, Zhou C, Yue M. *IEEE Transactions on Magnetics*[J], 2015, 51(11): 1
- [17] Wang D, Poudyal N, Rong C *et al. Journal of Magnetism & Magnetic Materials*[J], 2012, 324(18): 9
- [18] Panagiotopoulos I, Withanawasam L, Hadjipanayis G C. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*[J], 1996, 152(3): 353
- [19] Folks L, Street R. *Journal of Applied Physics*[J], 1994, 75(10): 6271
- [20] O'Grady K, El-Hilo M. *IEEE Transactions on Magnetics*[J], 1993, 29(6): 2608
- [21] Kelly P E, O'Grady K. *IEEE Transactions on Magnetics*[J], 1989, 25(5): 3881
- [17] Wang D, Poudyal N, Rong C *et al. Journal of Magnetism &*

Preparation, Magnetic Properties and Microstructure of MnBi/Sm₂Co₁₇ Composite Magnetic Powder

Shan Jiefeng¹, Yu Nengjun¹, Zhang Suyin¹, Jin Xiangyang², Wu Qiong¹, Zhang Pengyue¹, Ge Hongliang¹

(1. China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

(2. Zhejiang Zhongyuan Magnetic Industry Co., Ltd, Jinhua 322100, China)

Abstract: The MnBi/Sm₂Co₁₇ magnetic composite powder was prepared by chemically assisted high-energy ball milling process, and the effect of the content of MnBi alloy on the magnetic properties and microstructure of the composite powder was studied. As the content of MnBi alloy increases, the coercivity of the composite powder first increases slightly, and then keeps stable at about 640 kA/m, while the coercivity of all the composite powder is lower than 864 kA/m of pure MnBi milled powder; the saturation magnetization and remanent magnetization of the composite powder gradually decrease. No obvious elements interdiffusion is found in the composite magnetic powder. The exchange coupling effect of the composite powder was analyzed by the Henkel curve. The δM of the composite magnetic powder reaches the maximum value when the MnBi addition amount is 15wt%, indicating that the composite powder has a strong exchange coupling effect. The evolution of the remanence ratio of the composite magnetic powder with the increase of MnBi alloy content has been analyzed depending on the morphology and the exchange coupling effect of the composite magnetic powder.

Key words: MnBi/Sm₂Co₁₇ composite material; magnetic properties; microstructure; exchange coupling

Corresponding author: Yu Nengjun, Ph. D., College of Materials and Chemistry, China Jiliang University, Hangzhou 310018, P. R. China, Tel: 0086-571-87676292, E-mail: nengjunyu@126.com