

高性能 MnBi 永磁合金研究进展

杨湘杰<sup>1,2</sup> 邹伟峰<sup>1,2</sup>

(1.南昌大学机电工程学院; 2.江西省高性能精确成形实验室)

**摘 要** MnBi 永磁合金是一种具有很大吸引力的材料,一是 MnBi 永磁合金有着不同寻常的铁磁性,还有不同与其他磁体的物理性能等特性,同时材料成本低,无稀土添加。MnBi 永磁合金具有高温下的磁晶各向异性与其他磁性材料不同的正矫顽力温度系数,有望成为高温应用下的高性能永磁材料而使得广泛研究者关注。但由于其相的转变过于复杂,制备高性能、高纯度 MnBi 永磁合金仍有一定的难度。针对 MnBi 永磁材料的制备工艺、元素的掺杂、复合的永磁材料的薄膜、粉末、块体材料的研究,阐述了高性能 MnBi 永磁合金的发展状况与最新研究进展,为制备高性能的 MnBi 永磁材料提供了基础,为实现现代化的生产创造了可能。

**关键词** MnBi 永磁合金;高性能;元素掺杂;复合磁铁

**中图分类号** TG132.2<sup>+</sup>7;G353.11

**文献标志码** A

**DOI**:10.15980/j.tzzz.2022.08.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Progress in High-performance MnBi Permanent Magnetic Alloys

Yang Xiangjie<sup>1,2</sup>, Zou Weifeng<sup>1,2</sup>

(1.School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang University;

2.Jiangxi Province High Performance Precision Forming Laboratory)

**Abstract:** MnBi permanent magnetic alloy is a kind of material with great attraction, which presents unusual ferro-magnetism and different physical properties from other magnets, and has low material cost without rare earth addition.MnBi permanent magnet alloy exhibits magnetocrystalline anisotropy at high temperature and a positive temperature coefficient of coercivity that is different from other magnetic materials, which is expected to become a high-performance permanent magnetic material under elevated temperature application.However, it is still difficult to prepare high-purity MnBi permanent magnetic alloys with high performance due to the overcomplicated phase transition. In view of research on the manufacture process, doping of elements of MnBi permanent magnetic materials, and the films, powders, and bulk materials of composite permanent magnetic materials, the development status and latest research progress of high-performance MnBi permanent magnetic alloys were expounded, which provides foundation for MnBi permanent magnetic materials,and creates the possibility for the realization of modern production.

**Key Words:** MnBi Permanent Magnetic Alloys, High Performance, Element Doping, Composite Magnet

随着科学技术发展,高性能稀土永磁材料成为良好的功能材料,也是电子芯片、微电机潜在的应用材料,同时还可以节省能源<sup>[1]</sup>。然而,稀土资源的减少导致价格大幅上涨,限制了其应用。因此,对高性能无稀土永磁体的研究具有重要的意义,也是我国稀土能否持续发展的关键之一<sup>[2]</sup>。

1 高性能 MnBi 永磁合金粉末

锰基合金具有较大的磁矩,可以作为新型的永磁合金,近年来,锰基合金的高性能被研究者关注。

SKOMSKI R 等<sup>[3]</sup>研究了磁各向异性与饱和磁化强度对矫顽力和磁能积的影响,引入磁硬度参数  $\kappa = \left(\frac{k_1}{u_0 M_s^2}\right)^{\frac{1}{2}}$ ,结果表明,当  $\kappa$  值大于 1 时(深色区域),该材料很有可能作为永磁材料,见图 1,其中 MnGa、MnAl、MnBi 等无稀土永磁材料都在这片区域,这为无稀土的永磁材料研究提供了基础。在锰基材料中,Mn-Bi 合金具有高磁晶各向异性场与正矫顽力系数,磁致伸缩效应等优异的性能<sup>[4~9]</sup>,这主要来源于其含有的低温相(LTP)和高温相(HTP)<sup>[10]</sup>。两相可以相互转换,

收稿日期:2022-01-03

第一作者简介:杨湘杰,男,1960 年出生,教授,南昌(330031),E-mail:yangxj@ncu.edu.cn

引用格式:杨湘杰,邹伟峰. 高性能 MnBi 永磁合金研究进展[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(8):925-929.  
YANG X J, ZOU W F. Progress in high-performance MnBi permanent magnetic alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42 (8):925-929.

转换温度点为 628 K<sup>[11]</sup>。高温相具有良好的顺磁性和磁光性,低温相(LTP)具有独特的 NiAs 型六方晶体结构。图 2 为 LTP-MnBi 合金的晶体结构示意图<sup>[12]</sup>。

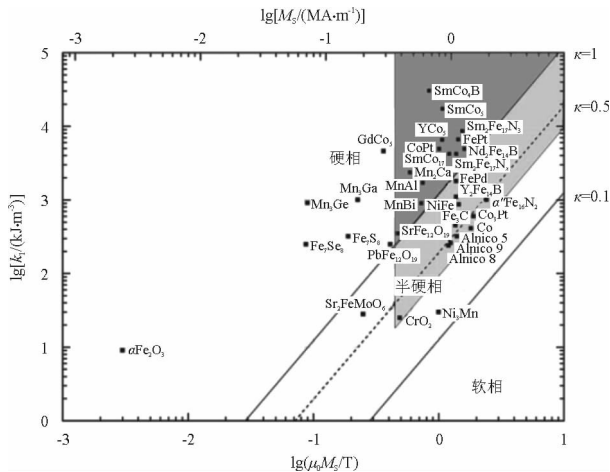


图 1 单轴磁各向异性常数与磁化强度的关系图<sup>[12]</sup>  
Fig.1 Schematic diagram of relationship between uniaxial magnetic anisotropy constant and magnetization<sup>[12]</sup>

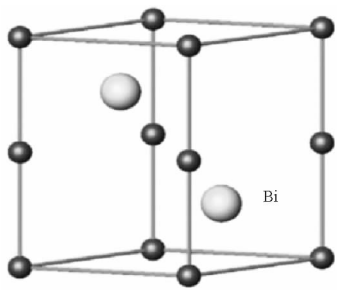


图 2 LTP-MnBi 晶体结构示意图  
Fig.2 Crystal structure of LTP-MnBi

### 1.1 低能球磨制备的高性能 MnBi 粉末

低能球磨是常规制备高性能 MnBi 粉末的方法。RAO N V R 等<sup>[13]</sup>发现,通过低能球磨制备 MnBi 合金粉末时,可以添加一定量的分散剂以获得高性能的 MnBi 粉末合金。CHINNASAMY C 等<sup>[14]</sup>采用低能球磨技术制备了纯度为 90% 的 LTP 的 MnBi,研究球磨时间对粉末磁性能的影响,发现在 7 h 时粉末的磁性能最好,矫顽力可以达到 11.7 kOe,最大磁能积为 9 MGOe。为以后制备高性能 MnBi 粉末奠定基础。

CUI J 等<sup>[15]</sup>使用电弧熔炼制备了 MnBi 永磁合金铸锭,并通过热处理制备了纯度高达 98% 的 LTP Mn-Bi,可以实现高纯度的 LTP MnBi 永磁合金的大量生产<sup>[16]</sup>。采用液氮低温(153 K)低能球磨工艺,将起始的 MnBi 粉末粒径从 20~75 μm 降低至 1~7 μm,有效降低了 MnBi 粉末的晶粒尺寸,增强了矫顽力,且无明显 LTP MnBi 含量的降低。涂元浩等<sup>[17]</sup>通过感应熔炼、熔体快淬、低温球磨等方法制备的 Mn<sub>55</sub>Bi<sub>45</sub>粉末显示出良好的磁性能,饱和磁化强度( $M_s$ )为 37.1 emu/g,矫顽

力为 13.2 kOe。NGUYEN V V 等<sup>[18]</sup>发现,在低温下, MnBi 变得更脆,颗粒极易被碾磨来增加矫顽力,且不会产生明显的剩磁下降。在低能球磨 100 min 后, Mn-Bi 粉末的 LTP MnBi 含量仅下降 2.1% (从 97% 下降到 95%)。根据初始颗粒尺寸,最佳球磨时间在 90~150 min 范围内变化)。粉末的 LTP MnBi 含量保持在 90% 以上,与初始 MnBi 粉末的  $M_s$  值(65 emu/g)相比,  $M_s$  值降低至 58 emu/g。

### 1.2 掺杂合金元素制备的高性能 MnBi 粉末

MnBi 材料的最大磁能积的理论值比大多数的永磁材料材料低,较低的相转变点很大程度上限制了 MnBi 材料的性能。尽管如此,在高温下 MnBi 材料可以保持良好的磁性能,这引起了诸多研究者的兴趣。材料的结构与性能一般都是通过添加其他的元素来进行改善,也叫掺杂。元素掺杂可以改变 MnBi 合金的微观结构与磁性能,被认为是增强合金各项性能最有效且最常用的方法<sup>[19,20]</sup>。许多研究者通过添加一种和多种元素来提高材料的性能。但是,并非掺杂任意元素都能提高材料的性能,同时添加多种元素的机理尚未明朗<sup>[21,22]</sup>。GABAY A M 等<sup>[23]</sup>发现引入其他元素可以使 MnBi 材料的矫顽力提高,磁化强度与各向异性明显改善。在熔体旋转制备 MnBi 合金中加入少量 Sb 诱导的亚稳态,具有纳米晶磁硬  $\beta$  相的存在可以确保在退火后具有高纯多晶  $\alpha$  相,  $H_c$  为 9~13 kOe。当被压缩成一个完全致密的磁体时,材料的磁相和矫顽力都有望被保留。结果表明,通过筛选去掉高活性的粉末,可以将  $\alpha$ -MnBi 相的体积分数增加到约 98%,从而将最大磁能积(BH)增加到 11.5 MGOe。曹俊<sup>[24]</sup>研究了 Pr-Cu 掺杂对 Mn-Bi 快淬合金微结构和磁特性的影响,发现 Pr-Cu 掺杂 MnBi 退火快淬合金物相主要由 Bi 相、Bi<sub>4</sub>Cu<sub>0.38</sub>Mn<sub>3.41</sub>相、LTP MnBi 和 Mn 相组成。研究表明,Pr-Cu 掺杂可以起到细化晶粒作用,且 LTP MnBi 中这种细小的组织结构,有利于矫顽力的提高。饱和磁化强度下降是由于掺杂后合金中 LTP MnBi 的含量有所减少,且 Mn-Mn 原子间发生了反铁磁性耦合作用。ZHANG W 等<sup>[25]</sup>将 Sn 掺杂到 MnBi 永磁合金中,发现磁性的改善是由 Sn 在六方 NiAs 结构中的 2c 位的替代占用引起的。该取代物改变了化合物的电子结构,使其具有磁晶各向异性,提高了合金的矫顽力。在室温下合金最大磁能积能达到 14.3 MGOe,在 471 K 下达到 10.8 MGOe,该性能与 Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 相似,优于其他无稀土永磁体合金性能。HIRIAN R 等<sup>[26]</sup>通过添加 C 作为间隙掺杂剂,获得了更高的磁晶各向异性 MnBi 永磁合金。MAZHAR H 等<sup>[27]</sup>研究了 Fe 对 MnBi 永磁合金

的磁性能和结构的规律。发现 Fe 元素的加入,提高了 MnBi 永磁合金的矫顽力。综上所述,元素的掺杂可以提高 MnBi 永磁合金的磁性能与其他性能,但是元素掺杂的机理还有待深入研究。

## 2 高性能 MnBi 薄膜

制备高性能 MnBi 永磁合金,不仅可以通过制备粉末还可以制备薄膜,粉末在空气中容易被氧化,但是薄膜可以更好地保存,MnBi 合金薄膜的磁能积最大值为 16.3 MGOe。目前制备 MnBi 薄膜的方法主要有电化学沉积与磁控溅射等,其中磁控溅射是最常用的方法<sup>[28]</sup>。

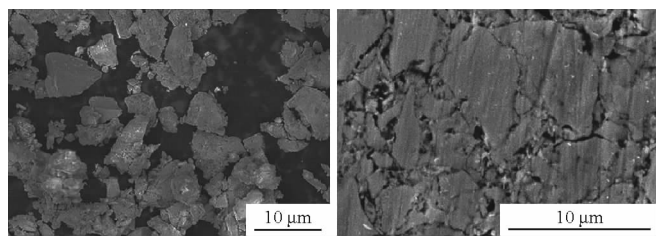
方瑞宜等<sup>[29]</sup>发现 Nd 加入到 MnBi 薄膜中,进行一段时间的热处理之后会形成一种新的 MnBiNd 合金,可能的原因是当 MnBi 的晶格中掺入的 Nd 含量较少时,在每个晶粒中同时有 MnBi 和 MnBiNd 的弥散结构,可能抑制 MnBi 高温相的出现,从而得到高性能的 MnBi 合金。刘何燕等<sup>[30]</sup>利用磁控溅射制备了 MnBiAl 薄膜,研究其相的结构,以及磁光效应,发现无相转变发生,为后续研究提供参考。张银峰等<sup>[31]</sup>采用脉冲激光沉积法制备了 MnBi 薄膜,获得了良好 MnBi 相结构,但有 Bi 的单质存在。睢彩云<sup>[32]</sup>采用化学沉积与磁控溅射制备了 MnBi 薄膜,系统的研究了不同 Mn, Bi 比例的 MnBi 薄膜,保温时间与温度影响 LTP MnBi 的形成的机理。研究的结果发现,制备的  $Mn_xBi$  薄膜当  $x < 1$ , 形成 Mn 均匀分布而 Bi 团簇镶嵌其中的枣糕形貌,当  $x \geq 1$  形成 Mn 和 Bi 均匀分布的光滑薄膜,在一定范围内 Mn 含量越高,薄膜颗粒越细小。VILLANUEVA M 等<sup>[33]</sup>通过磁控溅射制备了 MnBi 薄膜,研究了温度对 MnBi 薄膜的形貌与微观结构的影响。常温下的矫顽力达到 16.2 kOe, 500 K 时达到 29 kOe,这是目前发现 MnBi 薄膜能达到的最高矫顽力。

## 3 高性能 MnBi 合金块状磁体

目前,制备高性能 MnBi 块状磁体还存在一系列问题,例如在粉末烧结过程中往往会存在一些磁性相的分解,晶粒取向等<sup>[34]</sup>。对于 MnBi 材料实用性的研究较少,室温最大磁能积高于 10 MGOe 才可以用作商业化。MnBi 合金薄膜的磁能积最高实际值是 16.3 MGOe,但是,薄膜的磁能积最大值不代表存储的磁能,薄膜磁性能较差。磁性取向各向异性的 MnBi 粉末具有大体积分数的  $\alpha$  相,显示出“名义”磁能积高达 13~15 MGOe,然而,当细单晶被压实时,无论是结晶结构的程度还是  $\alpha$ -MnBi 相都无法完全保留<sup>[35]</sup>。用筛选出的磁

性粉末制备块状磁体时,块状磁体的磁能积最大值总是低于粉末的磁体。目前制备块体磁体还是通过粉末来制备<sup>[36]</sup>。

CUI J 等<sup>[15]</sup>通过将已经制备好的 MnBi 粉末进行烧结,形成高致密度的磁体,发现磁体在常温下的最大磁能积为 7.8 MGOe,热稳定性比粉末磁体好。CHEN Y C 等<sup>[37]</sup>采用电火花等离子体烧结法制备了高性能的 MnBi 各向同性磁体,实现了致密化程度高、晶粒长大小的块体磁体。烧结磁体在高温下表现出较高的饱和磁化强度。CHEN Y C 等<sup>[28]</sup>使用真空熔炼和 2 h 低能球磨和磁分离、热压实等方法得到了块状的 MnBi 合金。QIAN H D 等<sup>[38]</sup>研究了添加 NaCl 和 C 的 MnBi 块状磁体的磁性。图 3 为 LEBM MnBi 粉末及块体的 SEM 形貌。图 3a 中,LEBM MnBi 粉末尺寸为 1~7  $\mu\text{m}$ ,图 3b 由于是高压环境,MnBi 的粒度增加到 10  $\mu\text{m}$ 。



(a) LEBM MnBi 粉末

(b) MnBi 块体

图 3 LEBM MnBi 粉末和 MnBi 块体的 SEM 图像<sup>[38]</sup>

Fig.3 SEM images of LEBM MnBi powders and MnBi block<sup>[38]</sup>

SAMOILOVAYAN O V 等<sup>[39]</sup>研究了 Cu 在 MnBi 基体中的影响,以及 Cu 与 Bi 的沉淀。HUANG J H 等<sup>[40]</sup>用 Gd 掺杂 MnBi 基体,研究了其结构与磁性能。发现随着元素的掺杂含量增加,试样的居里温度、磁性转变温度、热滞、饱和磁化强度和矫顽力均有明显变化。在 300~500 K 范围内存在正矫顽力温度系数  $\beta$ ,这项工作有助于 MnBi-Gd 成为高温磁性材料应用的候选材料。NGUYEN H T 等<sup>[41]</sup>通过 DFT 计算验证了 Sb 对 MnBi 磁体有着调节作用。

在块状磁体的制备过程中,用粉末制备的块状磁体的磁性能都比粉末的低,这是因为粉末在被压实制备成块状磁体时,由于压力造成 Bi 从 MnBi 中析出,使得其中的 LTP MnBi 减少,块状磁体的最大磁能积降低。未来,制备块状磁体磁性能下降的问题需要解决<sup>[42]</sup>。

## 4 MnBi 复合材料

当磁体中都是高纯度的 LTP MnBi 相时,MnBi 永磁材料的磁性能较好。但是通常情况下,MnBi 材料的磁性能还是远低于 NdFeB 基础材料,无法完全取代 NdFeB 材料应用到各领域,而 MnBi 合金在高温下的应用具有很好的应用前景,因此对 MnBi 复合体进行研

究对在高温条件下的应用具有积极意义。

LI Y Q 等<sup>[43]</sup>研究了 MnBi/Co 和 MnBi/Fe<sub>65</sub>Co<sub>35</sub> 纳米复合永磁体的磁性能。图 4 为具有不同软相含量的各向异性 MnBi/Fe<sub>65</sub>Co<sub>35</sub> 纳米复合磁体 V(FeCo) 的去磁化曲线和磁性能曲线。所有去磁化曲线均表现出单个硬相退磁行为和良好的磁性能。随着 V(FeCo) 的增加,去磁化曲线的磁性能逐渐降低。图 4b 中显示最大磁能积峰值为 28.4 MGOe,这是因为在磁铁中存在较高含量的软相,大幅提高磁铁的剩磁,从而提高磁铁的磁能积。软磁相的离散分布和磁晶各向异性有利于纳米复合磁体的矫顽力增强,因此具有较高磁晶各向异性的软磁相是首选。

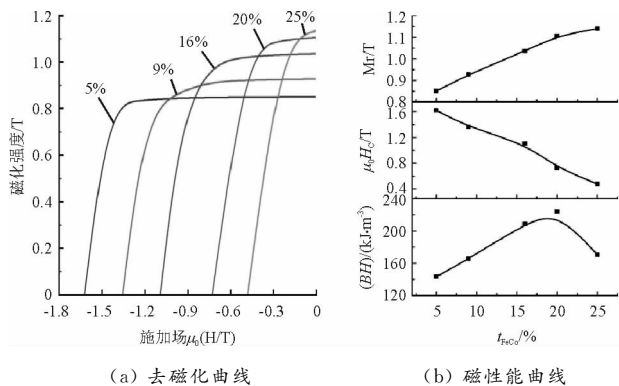


图 4 各向异性 MnBi/Fe<sub>65</sub>Co<sub>35</sub> 纳米复合永磁体的去磁化曲线和磁性能曲线<sup>[43]</sup>

Fig.4 Demagnetization curves and magnetic energy curves of anisotropic MnBi/Fe<sub>65</sub>Co<sub>35</sub> nanocomposite permanent magnets<sup>[43]</sup>

XU X 等<sup>[44]</sup>通过磁控溅射制备了 MnBi/FeCo 复合材料的薄膜,发现薄膜的厚度为 4 nm 时,磁性能最好。YAN Y 等<sup>[45]</sup>采用自主方法制备出 MnBi/FeCo 复合材料的薄膜,发现薄膜具有核壳结构,当 FeCo 含量一定时,发现复合磁体中的两种相可以相互转化,使得磁性能得到很好的优化。YANG Y 等<sup>[46]</sup>研究了 Mn-Bi/Fe<sub>3</sub>B/Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 纳米复合合金的显微组织和磁化行为。结果表明,随着 MnBi 合金加入,饱和磁化强度逐渐下降,矫顽力出现了先增加然后减少的趋势。加入 40% 的 MnBi 粉末使矫顽力从 24.1 kOe 提高到 38.9 kOe。NGUYEN T X 等<sup>[47]</sup>通过 MnBi/Co 纳米复合材料磁体的模拟,发现较 MnBi 材料的磁性能增加。ZHANG D T 等<sup>[48]</sup>制备出 MnBi/NdFeB 晶粒各项异性的粘结磁体,室温下的磁测量表明,随着 MnBi 含量增加,MnBi/NdFeB 杂化粘结磁体的磁性能均逐渐下降,而杂化磁体的密度几乎呈线性增长。当前稀土资源匮乏,价格昂贵,因此对 MnBi 复合磁体的探索可以为研究新型 MnBi 永磁合金提供借鉴。

## 5 结 语

对 MnBi 永磁合金的研究主要在于 MnBi 合金的制备工艺以及 Mn、Bi 相的转变。在当前的 MnBi 永磁合金的研究中还存在一些亟待解决的问题:①采用微量合金元素掺杂可以细化晶粒和得到稳定的结构,但是该方法很难控制添加量,各种元素掺杂的机理尚未清晰,目前还属于起步阶段,可以作为未来研究方向;②获得高纯度的 LTP MnBi 缺少完整的制备工艺和良好的热处理方法,无法实现大量的工业化生产;③MnBi 复合体的研究较少,制备方法尚未确定,研究机理尚无定论,且复合的磁体大多数是软磁相,因此未来复合磁体的研究是重要的方向。

## 参 考 文 献

- [1] 刘荣明. 纳米永磁材料的制备、结构及磁性能研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2012.
- [2] 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.
- [3] SKOMSKI R, COEY J M D. Magnetic anisotropy-how much is enough for a permanent magnet[J]. Scripta Materialia, 2016, 112: 3-8.
- [4] MELEK V, ELENA H S, JULIO C, et al. Effective control of the magnetic anisotropy in ferromagnetic MnBi micro-islands[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 25(852): 156 731.
- [5] HE Y K, GAYLES J, YAO M Y, et al. Large linear non-saturating magnetoresistance and high mobility in ferromagnetic MnBi[J]. Nature Communications, 2021, 12: 4 576.
- [6] YANG Y, PARK J H, LIM J T, et al. Effect of phase purity on enhancing the magnetic properties of Mn-Bi alloy[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2021, 517: 167 344.
- [7] TANG M, WANG Q L, ZHOU S M, et al. Anomalous Hall effect of MnBi films with perpendicular magnetic anisotropy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 820: 153 080.
- [8] SARKAR A, MALLICK A B. Synthesizing the hard magnetic low-temperature phase of MnBi alloy: Challenges and prospects[J]. JOM, 2020, 72(8): 2 812-2 825.
- [9] NGUYEN T X, NGUYEN V V. Temperature-gradient-driven annealing process for formation of MnBi ferromagnetic phase[J]. Applied Physics, 2020, A126(10).
- [10] POUDYAL N, PING L J. Advances in nanostructured permanent magnets research[J]. Appl. Phys., 2012, 46(4): 43 001-43 023.
- [11] SELLMYER D J, BALAMURUGAN B, ZHANG W Y, et al. Advances in rare-earth-free permanent magnets[A]// PRICM: 8 Pacific Rim International Congress on Advanced Materials and Processing, Hawaii: USA, 2013.
- [12] HEIKES R. Magnetic transformation in MnBi[J]. Physical Review, 1955, 99(2): 446-447.
- [13] RAO N V R, GABAY A M, HADJIPANAYIS G C. Anisotropic fully dense MnBi permanent magnet with high energy product and high coercivity at elevated temperatures[J]. Appl. Phys., 2013, 46(6): 62 001-62 004.

- [14] CHINNASAMY C, JASINSKI M M, ULMER A, et al. Mn-Bi magnetic powders with high coercivity and magnetization at room temperature[J]. IEEE Trans. Magn., 2012, 48(11): 3 641-3 643.
- [15] CUI J, CHOI J P, LI G, et al. Thermal stability of MnBi magnetic materials[J]. J. Phys-Condens Mat., 2014, 26(6): 163-167.
- [16] POUDYAL N, LIU X B, WANG W, et al. Processing of MnBi bulk magnets with enhanced energy product[J]. AIP Advances, 2016, 6(5): 056 004.
- [17] 涂元浩, 吴琼, 曾未佳, 等. 低能球磨制备  $\text{Mn}_{55}\text{Bi}_{45}$  永磁合金的微结构及矫顽力机理研究[J]. 中国计量大学学报, 2020, 31(3): 310-316.
- [18] NGUYEN V V, POUDYAL N, LIU X B, et al. Novel processing of high-performance MnBi magnets[J]. Materials Research Express, 2016, 1(3): 036 108.
- [19] NGUYEN T X, NGUYEN V V. Fabrication of MnBi alloys with high ferromagnetic phase content: Effects of heat treatment regimes and dopants[J]. Journal of Materials Science, 2019, 30(7): 6 888-6 894.
- [20] 张素银, 刘泽民, 邵诚, 等. 稀土元素 Gd 对 MnBi 合金的微结构与磁性能的影响[J]. 功能材料, 2017, 48(1): 1 221-1 224.
- [21] CHAROENSUK T, SIRISATHITKUL C, BOONYANG U, et al. Enhanced magnetic squareness in manganese-bismuth mechanical alloys incorporating magnesium oxide[J]. Materials Science, 2019, 25(2): 166-170.
- [22] LAM N M, THI T M, THANH P T, et al. Fabrication of Mn-Bi nanoparticles by high energy ball milling[J]. Materials Transactions, 2015, 56(9): 1 394-1 398.
- [23] GABAY A M, HADJIPANAYIS G C, CUI J. New anisotropic MnBi permanent magnets by field-annealing of compacted melt-spun alloys modified with Mg and Sb[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2019, 495: 165 860.
- [24] 曹俊. MnBi 永磁合金的微结构及磁特性研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.
- [25] ZHANG W, BALASUBRAMANIAN B, KHAREL P, et al. High energy product of MnBi by field annealing and Sn alloying [J]. APL Materials, 2019, 7(12): 121 111.
- [26] HIRIAN R, DUDRICK. Effects of the C interstitial doping on the magnetic properties of LTP MnBi[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 532: 167 997.
- [27] MAZHAR H, HUSSAIN W. Synthesis and characterization of MnBi magnetic alloy via two different processing routes[J]. Key Engineering Materials, 2021, 875: 76-80.
- [28] CHEN Y C, SAWATZKIS, ENER S, et al. On the synthesis and microstructure analysis of high performance MnBi[J]. AIP Advances, 2016, 6(12): 125 301.
- [29] 方瑞宜, 戴道生, 孙允希, 等. 掺 Nd 的 MnBi 薄膜的磁性和磁光特性[J]. 物理学报, 1991, 40(5): 833-843.
- [30] 刘何燕, 孟凡斌, 李养贤, 等. 溅射 MnBiAl 薄膜的结构相变[A]. 第四届全国磁性薄膜与纳米磁学会议论文集[C]. 北京, 2004.
- [31] 张银峰, 韩景智, 刘顺荃, 等. 脉冲激光沉积在各向异性 MnBi 薄膜制备方面的探索[A]. 第八届全国磁性薄膜与纳米磁学会议论文集[C]. 江苏无锡, 2014.
- [32] 睢彩云. 无稀土永磁材料低温相 MnBi 的制备与性能研究[D]. 山西临汾: 山西师范大学, 2019.
- [33] VILLANUEVA M, NAVÍOC, CÉSPEDSE, et al. MnBi thin films for high temperature permanent magnet applications[J]. AIP Advances, 2019, 9(3): 035 325.
- [34] THNA B, MTMA B, HMD C, et al. Magnetic properties and electronic structure of the Sb-doped MnBi from DFT calculations [J]. Solid State Communications, 2021, 336: 114 385.
- [35] TAUFOUR V, THIMMAIAH S, MARCH S, et al. Structural and ferromagnetic properties of an orthorhombic phase of MnBi stabilized with Rh additions[J]. Physical Review Applied, 2015, 4(1): 67-70.
- [36] YANG Y, JUNG T L, PARK J H, et al. Effects of Sn addition on the microstructure and magnetic properties of MnBi bulk magnets[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 891: 161 999.
- [37] CHEN Y C, GREGORI G, LEINWEBER A, et al. Unique high-temperature performance of highly condensed MnBi permanent magnets[J]. Scripta Materialia, 2015, 107: 131-135.
- [38] QIAN H D, PARK J, LIM J T, et al. Magnetic properties of Mn-Bi bulk magnets with NaCl and C addition[J]. AIP Advances, 2019, 9(11): 115 213.
- [39] SAMOILOVA O V, TROFIMOV E A, GERASKIN V I. A Study of the magnetic characteristics of Cu-Mn-Bi alloys[J]. Russian Metallurgy, 2019(11): 1 212-1 219.
- [40] HUANG J H, HE W, YANG T H, et al. Study on the structure and magnetic properties of Gd-doped LTPMnBi[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2020, 22(7): 180-184.
- [41] NGUYEN H T, MAN T M, NGUYEN V V. Regulating the performance of MnBi magnetic materials by Sb doping: DFT calculations and experiments[J]. Journal of Electronic Materials, 2020, 49(8): 4 962-4 968.
- [42] YANG Y, KIM J W, SI P Z, et al. Effects of Ga-doping on the microstructure and magnetic properties of MnBi alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 769: 813-816.
- [43] LI Y Q, YUE M, ZUO J H, et al. Investigation of magnetic properties of MnBi/Co and MnBi/ $\text{Fe}_{65}\text{Co}_{35}$  nanocomposite permanent magnets by micro-magnetic simulation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(7): 3 391-3 393.
- [44] XU X, HONG Y K, PARK J H, et al. Magnetic self-assembly for the synthesis of magnetically exchange coupled MnBi/Fe-Co composites[J]. J. Solid State Chem., 2015, 231(2): 108-113.
- [45] YAN Y, GUO J, LI J, et al. Magnetically exchange coupled Mn-Bi/FeCo thin film composites with enhanced maximum energy products[J]. Mater. Lett., 2016, 184: 13-16.
- [46] YANG Y, WU Q, HU Y C, et al. Synthesis, structure and magnetization behaviors of MnBi/Fe<sub>3</sub>B/Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B nanocomposite alloy[J]. Journal of Magnetism, 2016, 21(2): 235-238.
- [47] NGUYEN T X, VUONG O, NGUYEN H T, et al. Preparation and magnetic properties of MnBi/Co nanocomposite magnets[J]. Journal of Electronic Materials, 2017, 46(6): 3 359-3 366.
- [48] ZHANG D T, WANG P F, YUE M, et al. High-temperature magnetic properties of anisotropic MnBi/NdFeB hybrid bonded magnets[J]. Rare Metals, 2016, 35(6): 471-474.

(编辑: 彭瑾)