

# BiMn合金在强磁场中凝固时 MnBi相织构组织的演化<sup>①</sup>

王 晖, 王秋良, 黄 晖, 李丙乐, 马衍伟, 严陆光

(中国科学院 电工研究所应用超导重点实验室, 北京 100080)

**摘 要:** 在 3 种不同凝固条件下, 制备了 BiMn 合金, 研究了合金中 MnBi 相织构组织随磁感应强度和凝固时间的演化。结果表明, 合金从 265~355 °C 的固液两相区凝固时, 随 1.0 T 磁场中凝固时间的延长, 取向棒状 MnBi 晶粒沿磁场方向聚合长大, 长径比增大约 50%; 合金从 355~446 °C 的固液两相区凝固时, 随外磁场强度的增大 (最大达 10.0 T) 和凝固时间的增加, 取向片状 MnBi 晶粒沿磁场方向聚合长大, 形成疏松不规则的粗大棒状晶粒; 合金从完全熔化状态凝固时, 以 0.15 °C/s 的速度冷却可以获得 MnBi 相织构组织, 以 0.015 °C/s 或更小的速度冷却则不能; 延长磁场中 BiMn 合金的凝固时间不能有效提高材料的剩磁性能。

**关键词:** 金属凝固; 磁取向; 强磁场; BiMn 合金; MnBi 相

中图分类号: TG 111.4 O 482.5

文献标识码: A

## Microstructure evolution of magnetic aligned MnBi phase in BiMn alloys solidified in high static magnetic field

WANG Hui, WANG Qiu-liang, HUANG Hui, LI Bing-le, MA Yan-wei, YAN Lu-guang

(CAS Laboratory of Applied Superconductivity, Institute of Electrical Engineering

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** BiMn alloys were prepared under three different solidification conditions respectively. The microstructure evolutions of magnetic aligned MnBi grains were investigated experimentally in dependence on magnetic flux density and solidified time. The results show that solidifying from mushy zone between 265 °C and 355 °C in an 1.0 T magnetic field, the aligned rod-like MnBi grains congregate and grow up along the direction of magnetic field with the increase of solidified time so that the mean ratio of long axis to diameter of the grains increases about 50%; solidifying from mushy zone between 355 °C and 446 °C, the aligned oblate-shaped MnBi grains also congregate and grow up along the direction of magnetic field with the increase of magnetic flux density (up to 10.0 T) and solidified time, while several huge rod-like MnBi grains appear which are irregular and loose; solidifying from molten state, the textured structure of MnBi phase can form at a cooling rate of 0.15 °C/s but can not at 0.015 °C/s or slower. The remanence of BiMn alloys can hardly be enhanced by prolongating solidified time in a magnetic field.

**Key words** metal solidification; magnetic alignment; high static magnetic field; BiMn alloy; MnBi phase

非铁磁材料, 包括大部分有机物、无机氧化物和生物材料, 以及部分金属材料, 普遍具有弱的晶体磁各向异性<sup>[1]</sup>, 在普通强度的磁场 (0.01 T) 中没有明显磁现象, 在大强度的磁场 (> 3 T) 中却表现出晶体取向、形成大体积织构组织等特殊强磁现

象<sup>[2-4]</sup>。近年来传导冷却技术的迅速发展使超导磁体彻底摆脱对液氦、液氮等冷却剂的依赖, 为超导强磁场在材料制备中的广泛应用提供了良好设备条件。

在多种材料的凝固和结晶过程中施加强磁场均

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50307014 50472063); 中国博士后科学基金资助项目 (2004035412)

收稿日期: 2004-08-31; 修订日期: 2004-11-30

作者简介: 王 晖 (1972-), 男, 博士。

通讯作者: 王 晖, 电话: 010-62626276 E-mail: huiwang@mail.iee.ac.cn sdwhc@sh163.net

观察到磁致织构现象,如苯酮<sup>[5]</sup>和蛋白质晶体<sup>[4]</sup>;  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 高温超导陶瓷<sup>[6]</sup>,  $\text{KCl}$ 、 $\text{BaCl}_2$ 无机盐晶体<sup>[5]</sup>;  $\text{Bi-Sn}$ <sup>[7]</sup>、 $\text{Al-Ni}$ <sup>[8]</sup>和  $\text{Sm-Co}$ <sup>[9]</sup>合金等。另外在一些特殊的凝固过程中加强磁场也获得磁致织构组织,如  $\text{Bi-Mn}$ 合金激光区域熔化并快速凝固<sup>[10]</sup>,  $\text{Co-B}$ 合金熔化后过冷到  $\text{Co}$ 的 Curie温度之下凝固<sup>[11]</sup>。在籽晶熔融织构法生长  $\text{YBCO}$ 块材过程中施加强磁场,磁场使材料组织的织构度提高<sup>[12]</sup>。Ferreira等<sup>[13]</sup>通过理论模型分析发现,凝固过程中磁取向主要发生在晶粒生长的初始阶段,随着晶体长大,晶粒间力学作用阻碍磁取向进一步发展。我们建立了一个动力学模型,以便分析液相中单个磁各向异性晶粒在磁场作用下转动取向的过程。结果表明,在一定条件下磁取向过程能够迅速完成<sup>[14]</sup>。Asai等<sup>[15]</sup>独立地得到相似的结果。可见,磁致凝固织构技术,即在材料凝固过程中利用外磁场诱导具有磁各向异性的晶粒取向,可以获得大体积凝固织构组织,制备新型纤维增强复合材料、磁性功能材料、陶瓷复合功能材料以及功能大分子材料等特殊各向异性材料,具有广阔的应用前景。

$\text{Bi-Mn}$ 合金中  $\text{Mn-Bi}$ 相具有显著的磁各向异性,在磁场作用下从不同加热区间凝固均能形成  $c$ 轴平行磁场的凝固织构组织,可以制备新型的过共晶  $\text{Bi-Mn-Bi}$ 磁性复合材料<sup>[16]</sup>。掌握磁场中  $\text{Bi-Mn}$ 合金凝固织构组织的演化规律对于制定合理的磁场凝固制度至关重要,但有关研究还很少见到。本文作者在研究磁场中  $\text{Mn-Bi}$ 相织构组织形成机制和规律<sup>[17]</sup>的基础上,着重研究不同凝固过程中  $\text{Bi-Mn}$ 合金磁致织构组织的演化,并从磁场中  $\text{Mn-Bi}$ 晶粒的磁各向异性、晶粒间磁性相互作用以及晶粒的微结构和分布出发分析实验结果。

## 1 实验

采用金属  $\text{Bi}$  ( $> 99.0\%$ )和  $\text{Mn}$  ( $99.5\%$ ),分别在真空感应加热炉中熔炼出  $\text{Mn}$ 含量为  $3\%$ 和  $6\%$ (质量分数,下同)的  $\text{Bi-Mn}$ 合金,在氩气保护下浇铸到孔径约为  $10\text{mm}$ 的石墨铸模中,快速冷却获得成分均匀的合金棒。将合金棒分割成  $25\text{mm}$ 长的小段,装入  $d 30\text{mm} \times d 10\text{mm} \times 50\text{mm}$ (外径  $\times$ 内径  $\times$ 长度)的石墨管中,用氧化铝粉与水玻璃的混合物封口并烘干,制成实验用试样。磁感应强度不大于  $1.0\text{T}$ 的实验在电磁铁磁体实验装置<sup>[17]</sup>中完成,大于  $1.0\text{T}$ 的实验在超导磁体实验装置中完成,如图 1所示。超导磁体产生垂直方向的静磁场,其强度在

$0 \sim 14\text{T}$ 之间连续可调。加热炉置于磁感应强度最大的位置,炉腔内温度由  $\text{WZK-II}$ 型温度控制仪调节,最高可达  $900\text{ }^\circ\text{C}$ ,控温精度为  $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ 。

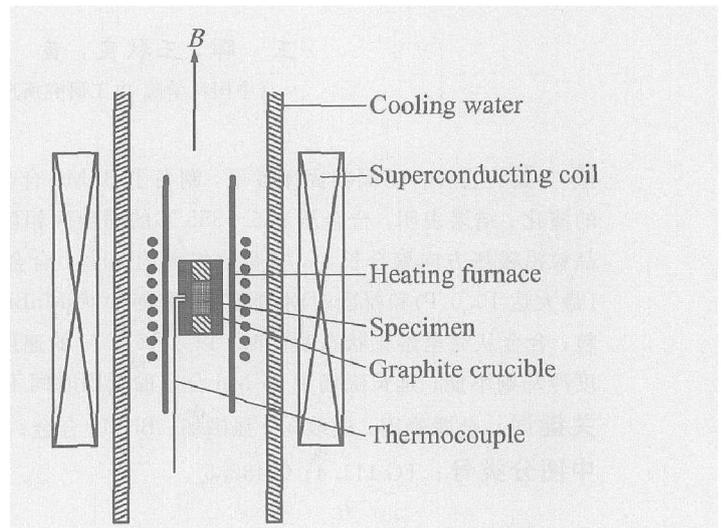


图 1 超导磁体实验装置示意图

Fig 1 Schematic diagram of superconducting magnet apparatus

由相图可知<sup>[18-19]</sup>,  $\text{Bi-Mn}$ 合金的共晶成分为  $0.72\% \text{ Mn}$ ,共晶温度为  $265\text{ }^\circ\text{C}$ 。 $\text{Bi-3\% Mn}$ 和  $\text{Bi-6\% Mn}$ 合金的液相线温度分别为  $365\text{ }^\circ\text{C}$ 和  $448\text{ }^\circ\text{C}$ 左右。 $\text{Mn-Bi}$ 金属间化合物升温至  $355\text{ }^\circ\text{C}$ 发生磁性转变,形成顺磁性  $\text{Mn}_{1.08}\text{Bi}$ 相,继续升温至  $446\text{ }^\circ\text{C}$ 发生分解,形成单质  $\text{Mn}$ 和  $\text{Bi}$ 合金熔体;降温过程中  $\text{Mn}_{1.08}\text{Bi}$ 相在  $340\text{ }^\circ\text{C}$ 发生顺磁-铁磁转变。将合金试样以约  $0.17\text{ }^\circ\text{C/s}$ 的速度加热至预定温度,恒温  $30\text{ min}$ 后降温凝固。通过改变施加磁场的强度 ( $0 \sim 10.0\text{ T}$ )和磁场中凝固速度考察合金中析出相织构组织的演化。实验所用冷却速度分别为: 1) 淬火,约  $80\text{ }^\circ\text{C/s}$ ; 2) 随炉冷却,平均约  $0.15\text{ }^\circ\text{C/s}$ ; 3) 缓慢冷却,  $0.0025\text{ }^\circ\text{C/s}$ 。所得试样分别沿平行和垂直磁场方向剖开,用带偏光片的金相显微镜观察  $\text{Mn-Bi}$ 相组织的特征和变化,采用  $\text{DGY-2C}$ 多功能永磁测量仪测定所得试样的剩磁性能。

## 2 结果和分析

### 2.1 合金从 $265 \sim 355\text{ }^\circ\text{C}$ 的固液两相区凝固

将  $\text{Bi-3\% Mn}$ 和  $\text{Bi-6\% Mn}$ 合金分别加热至  $300\text{ }^\circ\text{C}$ 和  $345\text{ }^\circ\text{C}$ ,恒温  $30\text{ min}$ 后以 3种冷却速度降温凝固,在恒温和降温过程中加  $1.0\text{ T}$ 磁场,所得试样微观组织如图 2所示,  $\text{Mn-Bi}$ 相晶粒平均长径比随磁场中凝固时间的变化列于表 1。

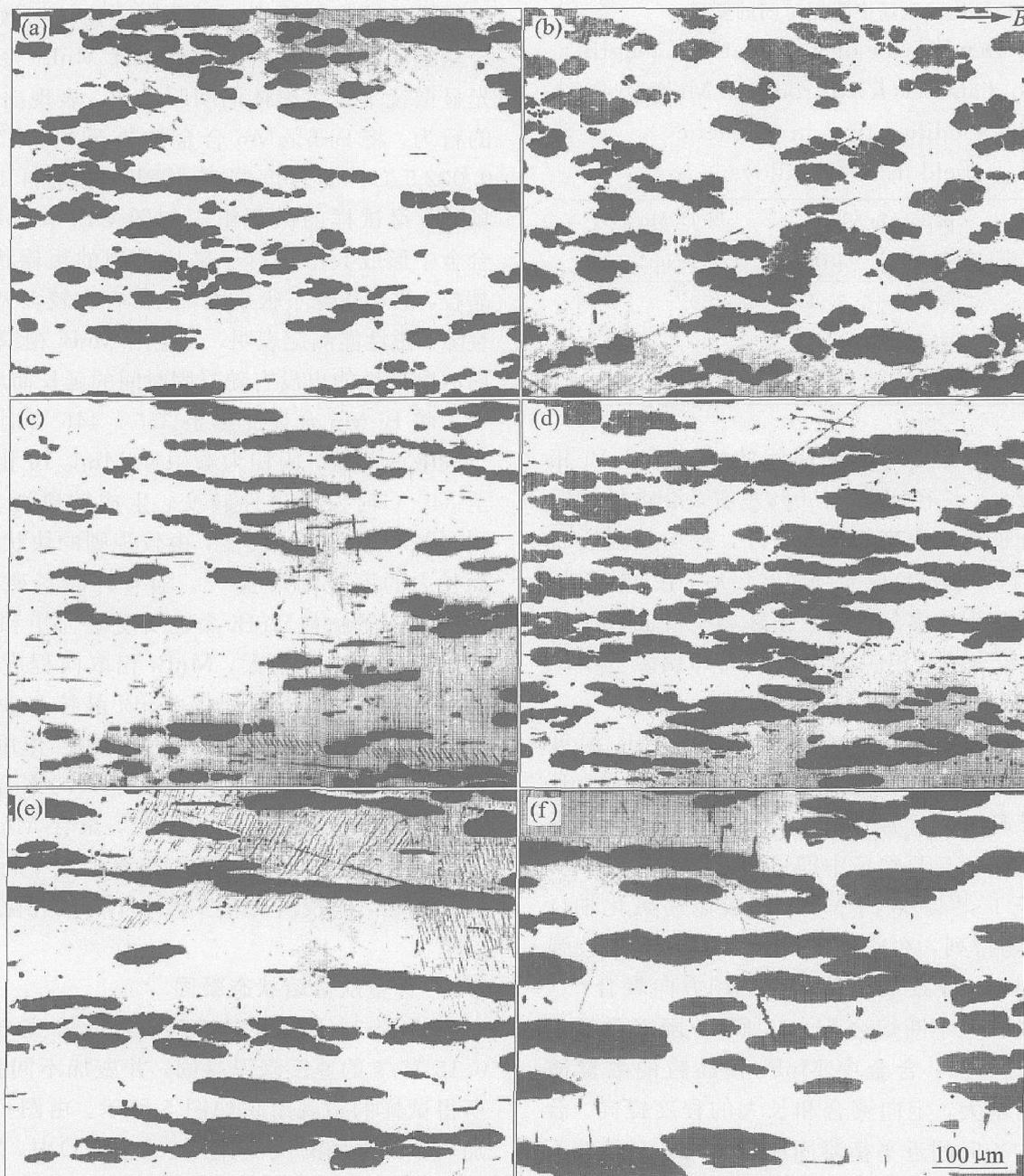


图 2 Bi-Mn 合金加热至低于 355 °C 的固液两相区凝固析出相组织结构组织的演化

**Fig 2** Microstructure evolutions of magnetic aligned MnBi grains in Bi-Mn alloys heated up to mushy zone below 355 °C

(Bi-3% Mn alloy was heated up to 300 °C for 30 min with 1.0 T magnetic field and then cooled at rates of 80 °C/s (a), 0.15 °C/s (c), 0.0025 °C/s (e);

Bi-6% Mn alloy was heated up to 345 °C for 30 min with 1.0 T magnetic field and then cooled at rates of 80 °C/s (b), 0.15 °C/s (d), 0.0025 °C/s (f).

All the pictures are parallel to the direction of magnetic field )

由图 2 和表 1 可见, Bi-3% Mn 合金淬火试样 (图 2(a)) 在磁场中的凝固时间约为 30 min, 平行磁场截面上的 MnBi 相晶粒为小棒状, 以晶粒长轴方向平行磁场规则排列, 并沿磁场方向聚合; 晶粒的长径比为 3.95。随炉降温试样 (图 2(c)) 在磁场中凝固时间增加到 35 min 左右, 可见 MnBi 相晶粒

数量减少、长径比增大, 沿磁场方向的聚合程度提高, 并表现出较明显的熔合长大迹象。缓慢凝固试样 (图 2(e)) 在磁场中凝固时间大幅延长至约 250 min 时, 可见 MnBi 相显著沿磁场方向聚合长大, 晶粒数量减少, 长径比增大了约 50%。Bi-6% Mn 合金中 MnBi 相组织结构的演化规律与 Bi-3% Mn

表 1 BiMn合金中棒状 MnBi相晶粒平均长径比随磁场中凝固时间的变化

**Table 1** Dependence of mean ratio of length axis( $L$ ) to diameter( $R$ ) of rod-like MnBi grains on solidified time in magnetic field in BiMn alloys

Cooling rate/ ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Bi3%Mn alloy		Bi6%Mn alloy	
	Time/min	$L/R$	Time/min	$L/R$
80 000 0	30	3.95	30	2.94
0.150 0	35	4.77	40	3.73
0.002 5	250	6.04	500	4.43

合金类似,即随磁场中凝固时间的延长, MnBi相晶粒数量减少、长径比增大 50%左右,沿磁场方向聚合和熔合长大的程度提高。另外,磁场中缓慢凝固试样(图 2(e)和(f))放大到 400倍后,在 MnBi相晶粒内部观察到较多的孔洞。随磁场中凝固时间的延长,合金沿 MnBi相织构组织方向的剩磁基本维持在 0.126 T左右,没有提高。

将合金加热至低于 MnBi化合物 Curie 温度 (355  $^{\circ}\text{C}$ )时,合金处于固液两相区,铁磁性 MnBi相晶粒由于具有明显磁各向异性,在磁场中受到磁力矩作用,在 0.5 T 磁场中即可迅速旋转取向,所需时间小于  $1 \text{ s}^{[14]}$ 。取向 MnBi晶粒以易磁化轴( $c$ 轴)平行磁场排列,在磁场方向上晶粒间存在较强的磁性吸引力,导致取向晶粒沿磁场方向聚合<sup>[17]</sup>,并在凝固过程中不断熔合长大。所以,随着磁场中凝固时间的增加,合金中 MnBi相晶粒的数量减少,长径比增大,定向聚合和长大的程度提高。合金在磁场中长时间近平衡凝固所得 MnBi大晶粒不够致密和规则,聚合的大晶粒在基体中分布不均匀,可能是合金剩磁性能没有提高的原因。

## 2.2 合金从 355~ 446 $^{\circ}\text{C}$ 的固液两相区凝固

将 Bi6%Mn合金加热至 380  $^{\circ}\text{C}$ ,以 0.15  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的速度降温凝固,并施加不同强度磁场,所得试样的微观组织如图 3所示。由图可见,在施加了 0.2 T 磁场中(图 3(a),(b)), MnBi相晶粒为不规则的片状,平行磁场取向和定向聚合的程度较低;随磁感应强度增大到 5.0 T(图 3(c)和(d)),片状 MnBi晶粒以平面的法线方向平行磁场取向的程度明显提高,并在垂直和平行磁场两个方向上聚合,初步形成一些大的聚合区域。随着磁感应强度进一步增大至 10.0 T, MnBi相晶粒在垂直磁场截面上(图 3(e))为较规则的六方形,表明在 10 T 磁场中晶粒

的形态变得较规则;在平行磁场截面上(图 3(f))形成数个较明显的聚合区域,但还比较松散;部分聚合晶粒间有熔合长大迹象,并且 MnBi大晶粒在偏光显微镜下发生整体的明暗变化,表现出类似单晶的行为。将 Bi6%Mn合金加热至 380  $^{\circ}\text{C}$ ,然后以 0.002 5  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的速度降温凝固,并施加 10.0 T 磁场,所得试样的微观组织如图 4所示。由图可见,合金中形成数个平行于磁场排列的粗棒状 MnBi相晶粒,晶粒边缘不很规则,内部存在较多大的孔洞和裂隙。磁性能测定表明,合金沿 MnBi相织构组织方向的剩磁性能也没有随凝固时间的延长而增大。

将 BiMn合金加热至 355~ 446  $^{\circ}\text{C}$ 时,合金处于固液两相区,固相为顺磁性  $\text{Mn}_{1.08}\text{Bi}$ 相,在降温至 340  $^{\circ}\text{C}$ 时发生磁性转变,生成铁磁性 MnBi相,同时晶粒形态发生突变,由较规则的块状变为沿  $ab$ 面长大的不规则片状<sup>[20]</sup>。随着外磁场磁感应强度的增强,合金中 MnBi晶粒所受磁力矩和晶粒间磁性相互力都显著增大, MnBi相取向程度和聚合程度随之提高。邻近的片状 MnBi晶粒在垂直磁场方向上间距较小,存在较强的磁性相互作用,导致晶粒在较大范围内聚合,形成数个大的聚合体。随着合金在磁场中凝固时间的延长,聚合 MnBi小晶粒不断相互靠近并熔合长大,最终形成平行磁场的大棒状晶粒,但残留有较多大小不等的孔隙。

## 2.3 合金从全熔状态凝固

将 Bi3%Mn合金加热至 400  $^{\circ}\text{C}$ 完全熔化,以 0.15  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的速度降温凝固,并施加不同强度磁场,所得试样的微观组织如图 5所示。由图可见,在施加 0.1 T 磁场的试样(图 5(a)和(b))中, MnBi相晶粒为不规则的小片状,以片的法线方向平行磁场取向和聚合。磁感应强度增大至 10.0 T(图 5(c)和(d))时, MnBi相晶粒沿磁场方向的聚合程度显著增强,形成数个平行磁场的长条状聚合体。进一步放大可以清楚地看到(图 6(a)和(b)),聚合体是由大小不等的取向众多的片状 MnBi晶粒组成的疏松团聚,其中部分晶粒明显沿磁场方向熔合长大。需要说明的是,实验表明冷却速度为 0.015  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 或更小时,合金中 MnBi相晶粒发生严重偏聚,不能形成磁致织构组织。

将 BiMn合金加热至完全熔化状态后,由于金属 Mn与 Bi的熔点、密度差别很大,在常规凝固过程中合金中 Mn元素容易偏析。冷却速度低至 0.015  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时, MnBi晶粒在 Mn偏聚区域内大量形成并迅速长大,晶粒间的碰撞阻碍了晶粒磁取

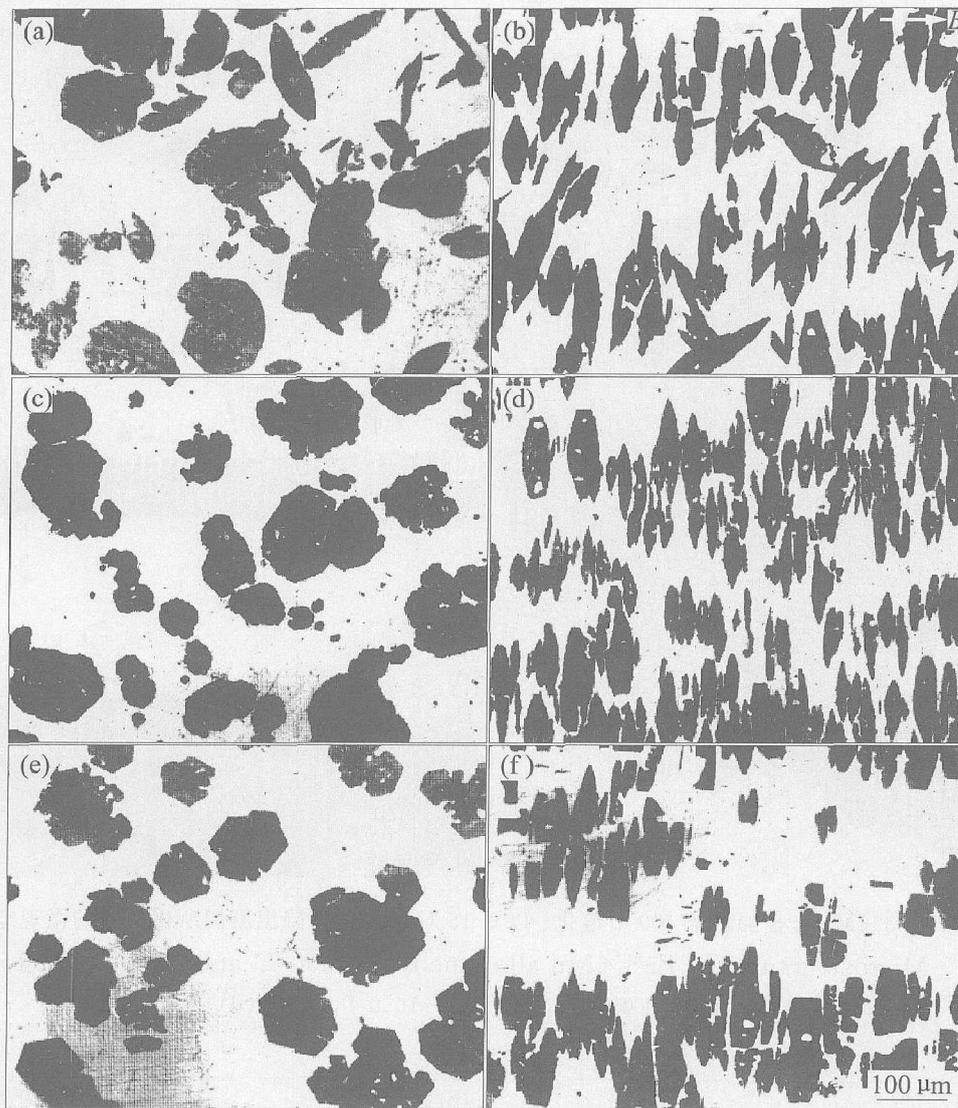


图 3 Bi-6% Mn合金在加热至 380 °C、以 0.15 °C/s 的速度降温凝固，析出相组织结构随磁场磁感应强度的变化

**Fig 3** Dependence of microstructure of magnetic aligned MnBi grains on magnetic flux density in Bi-6% Mn alloy

(Heated up to 380 °C and cooled at 0.15 °C/s)

(a) -0.2 T,  $\perp B$ ; (b) -0.2 T,  $\parallel B$ ; (c) -5.0 T,  $\perp B$ ; (d) -5.0 T,  $\parallel B$ ; (e) -10.0 T,  $\perp B$ ; (f) -10.0 T,  $\parallel B$ )

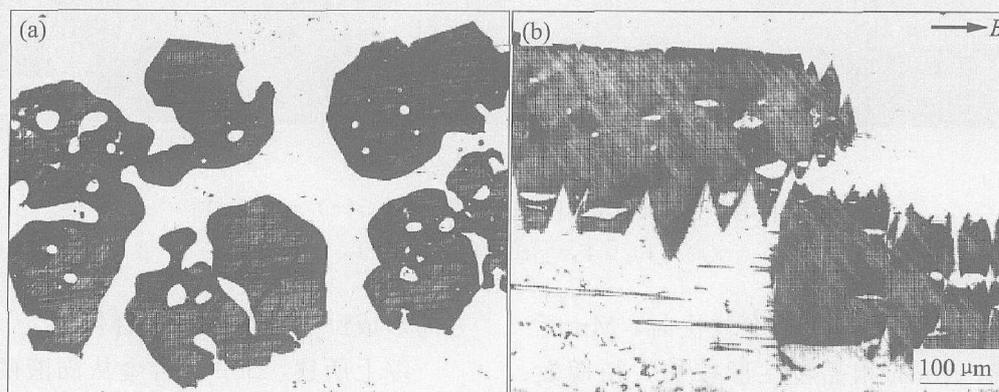


图 4 Bi-6% Mn合金加热至 380 °C、在 10.0 T 磁场中以 0.0025 °C/s 的速度降温凝固时所得试样的微观组织

**Fig 4** Microstructures of Bi-6% Mn alloy heated up to 380 °C and cooled at 0.0025 °C/s with 10.0 T magnetic field applied

(a) - $\perp B$ ; (b) - $\parallel B$ )

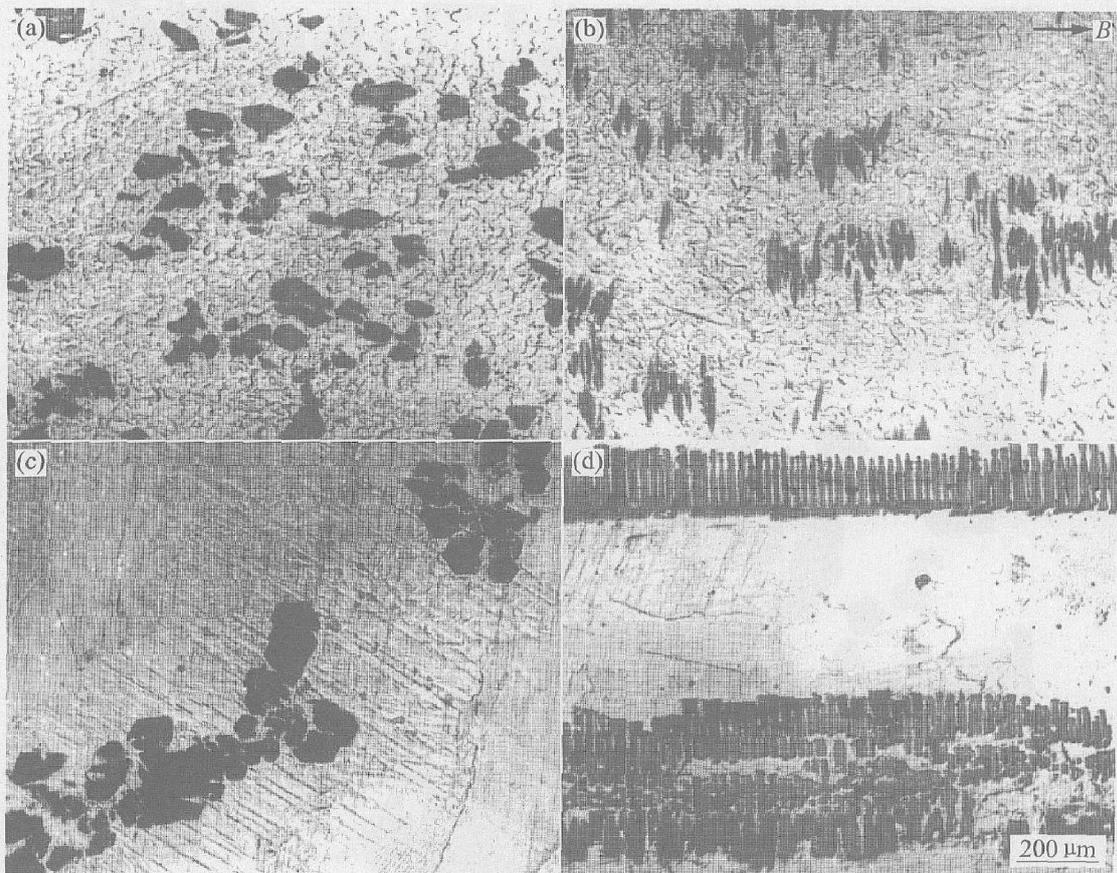


图 5 Bi-3% Mn 合金加热至 400 °C 熔化、以 0.15 °C /s 的速度降温凝固所得试样的微观组织  
**Fig 5** Microstructures of Bi-3% Mn alloy melted at 400 °C and cooled at 0.15 °C /s  
 (a) -0.1 T,  $\perp B$ ; (b) -0.1 T,  $\parallel B$ ; (c) -10.0 T,  $\perp B$ ; (d) -10.0 T,  $\parallel B$

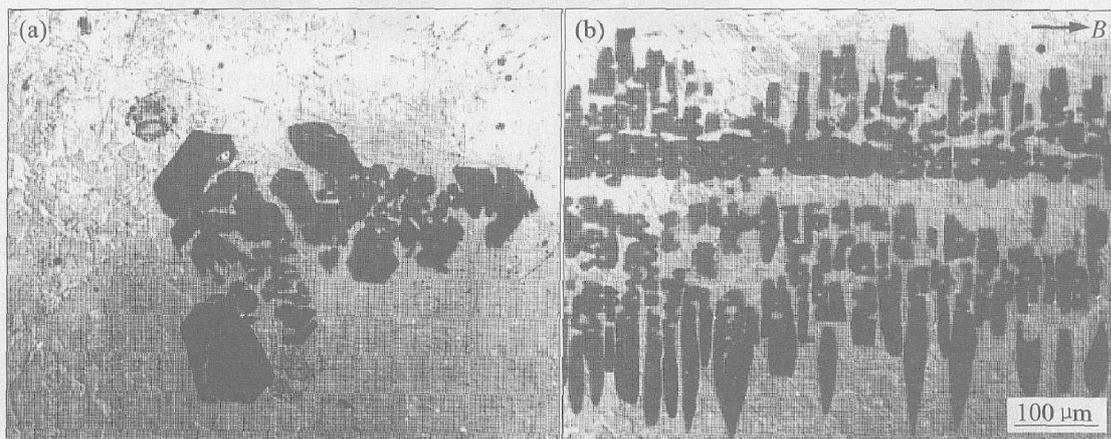


图 6 图 5(c) 和 (d) 的放大像  
**Fig 6** Magnified images of Fig 5(c) and (d)  
 (a) -10.0 T,  $\perp B$ ; (b) -10.0 T,  $\parallel B$

向，不能形成织构组织。冷却速度较快时，Mn 元素偏聚程度较低，MnBi 相晶粒在形核长大初期发生旋转取向。在施加了 0.1 T 磁场的试样中，MnBi 晶粒间磁性相互作用较弱，沿磁场方向的聚合程度较低；磁感应强度增大至 10.0 T 时，磁化取向晶粒间的磁性相互作用力增大 4 个数量级，晶粒沿磁场方

向形成巨大的长条状聚合体。

综上所述，Bi-Mn 合金从固液两相区长时间凝固和从完全熔化状态凝固时，都能够形成平行磁场取向的棒状 MnBi 大晶粒组织，并且表现出近似单晶的行为。但由于所得 MnBi 大晶粒不规则、不致密，在基体中的分布也不均匀，并不能有效提高材

料的剩磁性能。将强静磁场的取向作用与电磁场的细化作用复合,可获得均匀分布的组织细晶组织,有望制备出微观组织结构合理、性能优良的功能或力学复合材料。

## REFERENCES

- [1] Herlach F. Strong and Ultrastrong Magnetic Fields and Their Applications[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1985. 146
- [2] Rango P D, Lee M, Lejay P, et al. Texturing of magnetic materials at high temperature by solidification in a magnetic field[J]. Nature, 1991, 349(6312): 770-772
- [3] Uyeda C, Tanaka K, Takashima R, et al. Magnetic alignment at reduced field intensity due to decrease of temperature observed for nonferromagnetic particles possessing paramagnetic and diamagnetic anisotropy[J]. Jap J Appl Phys, 2004, 43: 980-984
- [4] Sato T, Yamada Y, Saijo S, et al. Improvement in diffraction maxima in orthorhombic HfW L crystal grown under high magnetic field[J]. J Cryst Growth, 2001, 232: 229-236
- [5] Katsuki A, Tokunaga R, Watanabe S I. The effect of high magnetic field on the crystal growth of benzophenone[J]. Chem Lett, 1996(8): 607-608
- [6] Lees M R, Bourgault D, Rango P D, et al. A study of the use of a magnetic field to control the microstructure of the high-temperature superconducting oxide  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ [J]. Philosophical Magazine B, 1992, 65(6): 1395-1404
- [7] Asai S. Application of high magnetic fields in inorganic material processing[J]. Modelling Simul Mater Sci Eng, 2004, 12: R1-R12
- [8] 王 晖. 强磁场对合金中析出相凝固行为的影响[D]. 上海: 上海大学, 2003. 35-119  
WANG Hui. Effects of a High Magnetic Field on the Behavior of Precipitated Phases in Alloys[D]. Shanghai Shanghai University, 2003. 35-119
- [9] Gillon P. Uses of intense D. C. magnetic fields in materials processing[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 287: 146-152
- [10] Yasuda H, Ohnaka I, Yamamoto Y, et al. Alignment of BMn crystal orientation in Bi-20% Mn alloys by laser melting under a magnetic field[J]. Mater Trans, 2003, 44(12): 2550-2554
- [11] Gaucherand F, Beaunon E. Magnetic texturing in ferromagnetic cobalt alloys[J]. Physica B, 2004, 346-347: 262-266
- [12] Awaji S, Watanabe K, Motokawa M, et al. Melt textured process for YBCO in high magnetic fields[J]. IEEE Trans Appl Supercond, 1999, 9(2): 2014-2017.
- [13] Ferreira P J, Liu H B, Sande J B V. A model for the texture development of high-Tc superconductors under an elevated magnetic field[J]. J Mater Res, 1999, 14(7): 2751-2763
- [14] 张邦文, 任忠鸣, 王 晖, 等. 合金凝固过程中晶粒磁取向的动力学研究[J]. 金属学报, 2004, 40(6): 604-608  
ZHANG Bang-wen, REN Zhong-ming, WANG Hui, et al. On dynamics of grain alignment during alloy solidification under applied magnetic field[J]. Acta Metall Sinica, 2004, 40(6): 604-608
- [15] Sugiyama T, Tahashi M, Sassa K, et al. The control of crystal orientation in nonmagnetic metals by imposition of a high magnetic field[J]. ISIJ International, 2003, 43(6): 855-861.
- [16] 王 晖, 任忠鸣, 李伟轩, 等. 磁场凝固法制备过共晶 MnBi/Bi 磁性功能复合材料[J]. 功能材料, 2004, 35: 550-552  
WANG Hui, REN Zhong-ming, LI Wei-xuan, et al. Fabrication of hypereutectic MnBi/Bi magnetic functional composites by solidification in a magnetic field[J]. 2004, 35: 550-552
- [17] WANG Hui, REN Zhong-ming, LIX J, et al. The alignment behavior of the MnBi phase in Bi-Mn alloy solidified in a static magnetic field[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2003, 13(6): 1405-1409
- [18] Moffatt W G. The Handbook of Binary Phase Diagrams[M]. New York: General Electric Company, 1984. 11-83
- [19] Pirich R G, Busch G, Poit W, et al. The Bi-Mn eutectic region of the Bi-Mn phase diagram[J]. Metall Trans A, 1980, 11: 193-194
- [20] 王 晖, 任忠鸣, 徐匡迪, 等. 强磁场对 Bi-Mn 合金半固态凝固过程中 MnBi 析出相组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(7): 1095-1100  
WANG Hui, REN Zhong-ming, XU Kuang-di, et al. Effects of high magnetic field on the microstructures of MnBi precipitated phase in Bi-Mn alloy solidified from mushy zone[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(7): 1095-1100

(编辑 何学锋)