

TbDyFe 合金的定向凝固和取向生长

周美政, 季诚昌, 朱世根

东华大学材料科学与工程学院, 上海 200051

[摘要] 利用自制的超高温梯度定向凝固装置, 研究了稀土巨磁致伸缩材料 $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_x$ ($x=1.8, 1.95 \text{ at}\%$) 合金在不同凝固条件下的凝固行为。发现 $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.8}$ 合金在不同的凝固条件范围内可以有有序的层状结构、无序的短柱状结构和混合结构, 而 $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.95}$ 合金的显微结构始终是层片状结构, 在实验条件范围内与凝固条件无关; 分析了 $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.95}$ 合金定向凝固条件、晶体生长形貌、晶体择优生长方向间的关系, 发现结晶形貌为胞状晶或无侧向分枝的树枝晶时其择优取向为 $\langle 110 \rangle$, 结晶形貌为发达的树枝晶时其择优生长方向为 $\langle 112 \rangle$, 而在胞-枝转变区晶体为 $\langle 110 \rangle$, $\langle 112 \rangle$, $\langle 113 \rangle$ 等多种取向的混合, 胞枝转变区随温度梯度的提高而减小; $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.95}$ 合金定向凝固时发生胞枝转变的凝固条件为 G_L/V 值介于 $(9.60 \sim 10.45) \times 10^2 \text{ K} \cdot \text{s}/\text{mm}^2$ 之间。

[关键词] TbDyFe; 定向凝固; 取向; 生长方式; 结晶形貌

[中图分类号] TG146

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)04-0035-04

Directional Solidification and Oriented Growth of TbDyFe Alloy

ZHOU Meizheng, JI Chengchang, ZHU Shigen

College of Material Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 200051, China

Abstract: The solidification characteristics of $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_x$ ($x=1.8, 1.95 \text{ at}\%$) alloy, as a giant magnetostrictive material, are studied with a super high temperature gradient directional solidification equipment developed by the authors. The microstructure of $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.8}$ with ordered plate-like structure, unordered cylindrical structure and mixed structure can be formed under different solidification conditions. For $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.95}$ alloy, however, the microstructure is always of ordered plate-like structure, independent of the temperature gradient G_L and the crystal growth velocity V . The relationship between the solidification condition, the crystal morphology and the preferred growth direction of $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.95}$ alloy is analyzed. When the crystal morphology is cellular or non-branch dendritic, $\langle 110 \rangle$ orientation is preferred. A $\langle 112 \rangle$ orientation will be preferred when the crystal morphology is advanced dendritic, and when the crystal morphology is in the transition zone of cellular to dendrite, mixed orientations with $\langle 110 \rangle$, $\langle 112 \rangle$ and $\langle 113 \rangle$ can occur. The cellular to dendrite transition zone is reduced with the increase of the temperature gradient. The solidification point G_L/V is in the range of $(9.60 \sim 10.45) \times 10^2 \text{ K} \cdot \text{s}/\text{mm}^2$ when the crystal morphology transits from cellular to dendrite.

Key Words: TbDyFe; directional solidification; orientation; growth mode; morphology

CLC Number: TG146

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)04-0035-04

稀土巨磁致伸缩材料 TbDyFe 合金是一种电-磁-机械三者间能量或信息转换的新型功能材料, 也称之为 Terfenol-D。由于它在室温下具有大的磁致伸缩应变 ($1\ 500 \times 10^{-6} \sim 2\ 000 \times 10^{-6}$) 和高的能量密度 ($14\ 000 \sim 25\ 000 \text{ J}/\text{m}^3$), 以及低频响应速度快、机电耦合系数大等特点, 自 20 世纪 70 年代被发现以来, 得到了迅速发展^[1-3]。其应用范围也从最早的大功率声纳换能器扩大

到大功率致动器、超声波、有源减振及航空航天智能结构领域。如使用咖啡杯大小的执行器进行有源消振, 可使飞机客舱内的噪声降低 20 dB^[4]。美国 Grumman 飞机公司用 TbDyFe 巨磁致伸缩材料做驱动元件研制的智能机翼, 使军机的航程增加 35%, 机动性提高了 15%~30%, 功率消耗降低 15%, 旋翼雷达反射面积显著减小^[5]。

收稿日期: 2006-12-20

作者简介: 周美政, 女, 东华大学材料科学与工程学院, 硕士研究生, 主要研究方向为金属材料加工;

E-mail: zhoumeizheng@mail.dhu.edu.cn

季诚昌(通讯作者), 男, 东华大学材料科学与工程学院, 副教授, 主要研究方向为材料凝固; E-mail: jicc@dhu.edu.cn

但 TbDyFe 合金也是一种具有强烈各向异性的磁致伸缩材料,有<110>,<112>,<113>,<100>,<111>等多种取向及混和取向,性能差异较大。因此,作者用自制的高温梯度定向凝固装置 ZMLMC,在不用籽晶的情况下,对 Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_x($x=1.8,1.95\text{at}\%$) 合金在定向凝固过程中显微组织结构变化、晶体取向、凝固条件、结晶形貌间的关系进行了研究,为制备不同取向的 TbDyFe 合金材料提供了理论和技术依据。

1 实验条件

在自制的超高温梯度定向凝固装置中将纯稀土金属 Tb,Dy 和纯 Fe 熔炼浇铸成 Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.9} 母合金棒材^[6-7],尺寸为 $\phi 7\text{ mm}\times 120\text{ mm}$,并在同一设备中进行定向凝固研究。先将母合金棒置于内径为 7.2 mm 的高纯薄壁石英管中,然后将该石英管固定于圆形刀口状线圈中;系统抽真空至 $2\times 10^{-3}\text{ Pa}$ 时充入高纯氩气,压力为 0.08 MPa;采用 SIT 高频电源加热,电源频率为 175 kHz;预热母合金棒和石英管数分钟,再加热到合金棒材熔化,熔化区域长度约为 5 mm,温度梯度为 800 K/cm,抽拉速度为 6~10 $\mu\text{m/s}$ 。该装置采用液态金属冷却,液态金属组成为 Ga62wt%In25wt%Sn13wt%,熔点约为 5℃。固液界面形貌是通过 ZMLMC 熔体处理装置中的快淬机构将定向凝固过程中的熔体快速淬入到液态金属 Ga-In-Sn 合金中获得的,液淬冷却速率一般大于 10^3 K/s 。

在 LECO 图像分析仪和扫描电镜上进行金相组织分析,样品腐蚀剂为 4% 硝酸酒精溶液或 Vilella 试剂(1 g 苦味酸+5 ml 盐酸+95 ml 甲醇)。用 X 射线衍射和 Laue X 射线分析确定晶体取向。

2 结果与讨论

2.1 凝固条件与晶体生长方式的关系

对以小平面方式生长的物质,其晶体形态一般呈多角形或板条状^[8]。通过对大量 Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_x ($x=1.8,1.95\text{at}\%$) 合金定向凝固金相组织照片的观察和分析发现,Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_x ($x=1.8,1.95\text{at}\%$) 合金定向凝固时,晶体

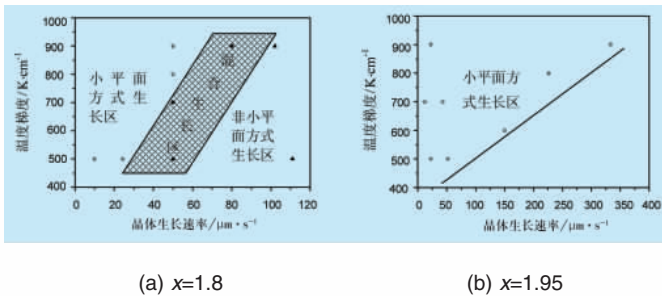


图 1 Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_x 合金晶体生长方式与凝固条件的关系
Fig. 1 Crystal growth modes of Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_x alloy with the different directional solidification conditions

生长方式与凝固条件的关系如图 1 所示。

从图 1(a)可以看出,Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.8} 合金随温度梯度和晶体生长速率的变化,可出现小平面生长、非小平面生长和混合生长 3 种方式。当温度梯度 G_L 较小时,晶体生长速率 V 必须控制在较小的值, Terfenol-D 晶体才能以小平面方式生长,而温度梯度较大时, Terfenol-D 晶体以小平面方式生长的晶体的生长速率也相应地增加。

从图 1(b)可以发现,在实验条件范围之内,Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.95} 合金始终以小平面方式生长,保持以小平面方式生长的晶体生长速率随温度梯度的增大而提高。

2.2 Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.95} 合金凝固条件、固液界面形貌及晶体择优取向的关系

对 Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.95} 合金定向凝固界面形貌和晶体择优生长方向间关系的研究发现,不同的凝固界面形貌对应于不同的择优生长方向。表 1 列出了 Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.95} 合金在不同凝固条件下的界面形态及晶体择优取向。

表 1 Tb _{0.27} Dy _{0.73} Fe _{1.95} 合金在不同凝固条件下的界面形态和晶体择优取向					
Table 1 Relationship between the solid-liquid interface patterns, preferred orientations and the different solidification conditions during solidification of Tb _{0.27} Dy _{0.73} Fe _{1.95} alloy					
序号	温度 梯度 /K·cm ⁻¹	晶体生 长速率 /μm·s ⁻¹	G_L/V /10 ⁻² K·s·mm ⁻²	界面 形态	晶体取向
1	500	22.7	22.1	胞	<110>
2	700	10.0	70.0	胞	<110>
3	700	50.5	13.9	胞	<110>
4	900	33.3	27.0	胞	<110>
5	900	50.0	18.0		<110>
6	500	48.5	10.3	胞+枝	<113>+<110>+<112>
7	500	111.0	4.5	胞+枝	<110>+<113>
8	700	67.0	10.4	胞+枝	<110>+<113>
9	900	93.3	9.6	胞+枝	<110>+<113>
10	500	200.0	2.5	枝	<112>
11	700	150.0	4.7	枝	<112>
12	700	216.0	3.2	枝	<112>
13	800	146	5.5	枝	<110>
14	900	123.0	7.3	枝	<110>
15	900	166.7	5.4	枝	<110>
16	900	333.3	2.7	枝	<110>

从表 1 中可以看出如下结果。
1) 随着 G_L/V 值的减少,Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.95} 合金的固液界面从胞状向树枝状转变,发生胞枝转变的 G_L/V 值为 $(9.60\sim 10.45)\times 10^2\text{ K}\cdot\text{s}/\text{mm}^2$, 低于理论计算值 $17.4\times 10^2\text{ K}\cdot\text{s}/\text{mm}^2$ ^[9]。这是因为理论推导时均以界面局域平衡为前提,而在实际凝固过程中,固液界面处于非平衡状态,发生胞枝转变的临界速率 V_{tr} 总是大于理论推导的胞枝转变速率,也就是非平衡效应提高了胞状界面的稳定

性,另外在实际的亚快速定向凝固过程中,固液相间的实际温度间隔也小于平衡态的温度间隔 ΔT_0 ,也会导致其值的下降。

2) 晶体择优生长方向相应地从 $\langle 110 \rangle$ 方向到混合取向再到 $\langle 112 \rangle$ 和 $\langle 110 \rangle$ 方向变化。

3) 当固液界面形貌为胞状晶时,晶体的择优生长方向为 $\langle 110 \rangle$,而固液界面形貌为树枝状晶时,则有 $\langle 110 \rangle$ 或 $\langle 112 \rangle$ 择优取向。当 G_L/V 值较小时,尽管晶体生长形貌均为枝状晶,但晶体择优生长方向有 $\langle 112 \rangle$ 和 $\langle 110 \rangle$ 。实际上,在大的温度梯度和晶体生长速率下,树枝晶没有足够的发展空间和时间,结晶形貌实质上为无侧向分枝的树枝晶,该现象可从枝胞转变的时空条件判据^[12]来说明,因此,当结晶形貌为无侧向分枝的树枝晶时,晶体的择优生长方向仍为 $\langle 110 \rangle$ 。

根据 $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.95}$ 合金在不同定向凝固条件下晶体择优生长方向和晶体生长形貌的实验结果,可得到如图 2 所示的关系。从图中可以发现, $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.95}$ 合金在定向凝固时有以下特点。

1) $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.95}$ 合金在定向凝固时的结晶形貌与晶体择优生长方向是对应的。晶体以胞状晶生长或以无侧向分枝的树枝晶生长时,其择优取向为 $\langle 110 \rangle$;以树枝状晶生长时,其择优生长方向为 $\langle 112 \rangle$;而在胞-枝转变区晶体为 $\langle 110 \rangle$, $\langle 112 \rangle$, $\langle 113 \rangle$ 等多种取向的混合。

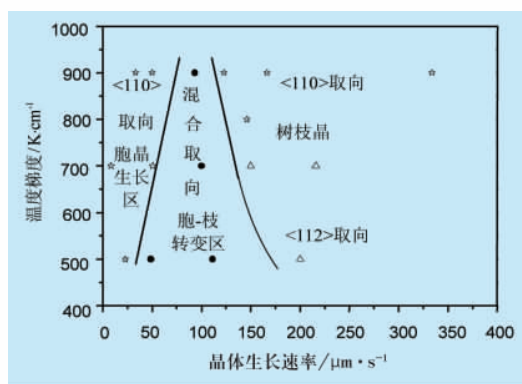


图 2 $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.95}$ 合金定向凝固时凝固条件与晶体取向及结晶形貌间的关系

Fig. 2 Relationship between the solidification conditions and the crystal orientation during the directional solidification of $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.95}$ alloy

2) 在凝固条件改变的情况下,可出现不同的择优生长方向,如 $\langle 110 \rangle$, $\langle 112 \rangle$, $\langle 113 \rangle$ 。在较低晶体生长速率时,容易出现 $\langle 110 \rangle$ 择优生长方向,并且出现 $\langle 110 \rangle$ 择优生长方向时的晶体生长速率范围随温度梯度的增大而扩大。

3) 在定向凝固过程中, Terfenol-D 晶体都存在 $\langle 110 \rangle$, $\langle 113 \rangle$, $\langle 112 \rangle$ 等多种取向共存的状态,但在不同的温度梯度下这种状态所对应的晶体生长速率各不相

同,这个晶体生长速率随温度梯度的提高而提高。这个对应的晶体生长速率实际上就是胞枝转变速率。

4) 当温度梯度较高或晶体生长速率较大时,晶体的择优生长方向并不完全单一,总有少量其他生长方向的晶体存在。这是因为在一定的凝固条件下,只有与之相适应的取向晶体满足动力学要求后才得以生存并生长,动力学条件不满足的将被抑制或淘汰。晶体生长动力学过冷度与冷却速率(温度梯度与晶体生长速率的乘积)有关,冷却速率越大,晶体生长的动力学过冷度就越大,满足动力学条件的晶面就越多,即择优生长方向越多,因此在较大温度梯度和晶体生长速率时就会有较多的晶体生长方向出现。

3 结论

1) TbDyFe 合金定向凝固时晶体生长方式与铁含量有密切的关系。 $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.8}$ 合金在不同的凝固条件下可呈现出非小平面生长和小平面生长方式。在较低的晶体生长速率时以小平面方式生长,小平面生长区随温度梯度的增大而扩大,在较高的晶体生长速率下则以非小平面方式生长,在两者之间存在一个混合生长区。 $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.95}$ 合金凝固时的固液界面结构特征基本上与温度梯度和晶体生长速率无关,始终表现出以小平面方式生长的固液界面结构特征。

2) $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.95}$ 合金定向凝固时发生胞枝转变的凝固条件为 G_L/V 值介于 $(9.60 \sim 10.45) \times 10^2 \text{ K} \cdot \text{s}/\text{mm}^2$, 低于理论计算值 $17.4 \times 10^2 \text{ K} \cdot \text{s}/\text{mm}^2$ 。

3) $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.95}$ 合金在定向凝固过程中,结晶形貌为胞状晶或无侧向分枝的树枝晶时其择优取向为 $\langle 110 \rangle$,结晶形貌为树枝晶时其择优生长方向为 $\langle 112 \rangle$,而在胞-枝转变区晶体为 $\langle 110 \rangle$, $\langle 112 \rangle$, $\langle 113 \rangle$ 等多种取向的混合。

4) $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.95}$ 合金以较低的晶体生长速率定向凝固时易产生 $\langle 110 \rangle$ 择优生长方向,并且产生 $\langle 110 \rangle$ 择优生长方向时的晶体生长速率范围随温度梯度的增加而扩大。

参考文献 (References)

- [1] CLARK A E, ABBUNDI R, GILMOR W R. Magnetization and anisotropy of TbFe_2 , DyFe_2 , $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_2$ and TmFe_2 [J]. IEEE Trans Mag, 1978, MAG-14: 542-544.
- [2] JIKS D C. The development of highly magnetostrictive rare earth-iron alloys[J]. J Phys D: Apply Phys, 1994, 27: 1-11.
- [3] HIDEKI M, KEIJI K, HIDEAKI N, et al. Synthesis of $\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_{1.9}$ magnetostrictive alloy by unidirectional solidification in magnetic field and microgravity[J]. J Mag Mag Mat, 2002, 248: 230-235.
- [4] LARSON L G. International Conference on Giant Magne-

计算含多处裂纹结构基频的一种近似方法

李学平, 余志武

中南大学铁道校区土木建筑学院, 长沙 410075

[摘要] 将计算单裂纹结构基频的方法推广到求含多处裂纹梁弯曲振动的近似基频。通过在不损伤梁位移的基础上叠加一个多项式来构造裂纹梁的位移函数, 它满足梁的边界条件和运动条件; 应用 Rayleigh 方法, 求出含多处裂纹简支梁的弯曲振动基频, 得到了梁的近似基频的闭式表达式。与 Ansys 计算结果比较表明, 该方法具有较高的精度。

[关键词] 近似基频; 多裂纹梁; Rayleigh 方法

[中图分类号] TU323.3, O322

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)04-0038-03

An Approximate Method of Calculating the Fundamental Frequency of Multi-Cracked Beams

LI Xueping, YU Zhiwu

Department of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China

Abstract: An approximate method of calculating the fundamental frequency of bending vibrations of multi-cracked beams is proposed on the basis of a modification of the method for single-cracked structures. The deflection of multi-cracked beams is assumed by adding polynomial functions to that of the uncracked beams. This new deflection function satisfies the boundary and the kinematic conditions. The closed-form expressions for the fundamental frequency are obtained by using the Rayleigh method. Its validity is confirmed by comparison with Ansys simulation results.

Key Words: fundamental frequency; multi-cracked beams; Rayleigh method

CLC Numbers: TU323.3, O322

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)04-0038-03

0 引言

近年来, 损伤结构固有频率和固有振型的研究受到越来越多学者的关注。前期研究表明, 裂纹的存在会降低结构的固有频率。由于固有频率测量容易, 且精度较高, 因此可将固有频率作为探测损伤位置及程度的参

数, 这也更加激发了人们对存在裂纹结构的动力特性的研究兴趣。一般来说, 第一阶固有频率是起决定作用的, 但求解损伤结构的固有频率求解比完好结构的困难得多, 因此需要寻求一种近似解法。Christides和 Barr^[1]用 Rayleigh-Ritz 方法讨论了简支梁在跨中存在裂纹时基

收稿日期: 2006-12-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50078007, 10572153)

作者简介: 李学平, 男, 中南大学铁道校区土木建筑学院, 副教授, 主要研究方向为结构振动分析及损伤识别; E-mail: xpli@mail.csu.edu.cn

tostrictive Materials[C]. ICGMM'96, Honolulu, Hawaii, US-A, 1996: 6-8.

[5] STEVEN A. Magnetostrictive actuators [J]. Mech Eng (American), 1998, 120(6): 68-70.

[6] JI Chengchang, MA Weizeng, LI Jianguo, *et al.* Technique of melting and casting the (TbDy)Fe₂ matrix alloy bars[J]. J Alloys Comp, 2001, 327(1-2): 220-223.

[7] 季诚昌, 朱世根, 李建国, 等. TbDyFe 合金棒材的熔铸新工艺 [J]. 特种铸造与有色合金, 2005, 25(1): 32-34.

JI Chengchang, ZHU Shigen, LI Jianguo, *et al.* New tech-

nique of melting and casting the TbDyFe alloy[J]. Spec Type Cast Alloy, 2005, 25(1): 32-34.

[8] KURZ W, FISHER D J. Fundamentals of solidification[M]. Trans Tech Publications, 1984: 34-42.

[9] JI Chengchang, LI Jianguo, ZHU Shigen, *et al.* Cellular/dendritic transition in directional solidification of Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.95} alloy[J]. Trans Mat Res Soc Japan, 2004, 29(7): 3091-3094.

(责任编辑 代丽)