

强磁场对过冷 Cu-Co 合金组织演化行为的影响

魏 晨, 李金山, 闫育洁, 林凯茜, 王 军

(西北工业大学 材料学院, 陕西 西安 710072)

摘 要:研究了强磁场对过冷 Cu-50at.%Co 合金微观组织演化行为的影响,结合相关理论分析阐述了强磁场的作用机制。结果表明,强磁场显著改变了合金的液相分离行为。由于静磁能的作用,导致核-壳结构发生了变化,平行磁场方向上,富 Co 相和二次相分离的富 Cu 相均沿磁场方向被拉长;随着磁场强度的增加,富 Co 相被拉长的程度愈发显著,并在垂直于磁场的方向上获得了富 Co 相在基体中分布相对均匀的微观结构。凝固后的 Cu-Co 合金,在 10 T 强磁场下达到饱和磁化强度的速度明显加快。此外,随着磁场强度以及过冷度的增加,合金的电阻率数值降低。

关键词:液相分离;凝固;强磁场;组织演化

中图分类号: TG146

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2022)03-0180-07

Effect of High Magnetic Field on the Microstructure Evolution Behavior of Undercooled Cu-Co Alloy

WEI Chen, LI Jinshan, YAN Yujie, LIN Kaixi, WANG Jun

(School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The effect of high magnetic field on the microstructure evolution behavior of undercooled Cu-50at.% Co alloy was studied, and the mechanism of high magnetic field was discussed based on relevant theories. The results show that the high magnetic field significantly changes the liquid phase separation behavior of the alloy. The core-shell structure changes due to the action of magnetostatic energy. In the direction of parallel magnetic field, the Co-rich phase and the Cu-rich phase separated by secondary phase are elongated along the magnetic field direction. With the increase of magnetic field intensity, the co-rich phase is elongated more significantly, and the relatively uniform distribution of co-rich phase microstructure is obtained in the direction perpendicular to the magnetic field. After solidification, the speed of saturation magnetization of Cu-Co alloy is obviously accelerated under 10 T high magnetic field. In addition, the resistivity of the alloy decreases with the increase of magnetic field intensity and subcooling.

Key words: liquid-liquid phase separation; solidification; high-intensity magnetic field; microstructure evolution

难混溶合金,由于其优良的导电性和磁电阻特性,是一类在工业和电子等领域具有广泛应用前景的功能型金属材料,通常用于制作汽车轴瓦合金、电极接触材料、导电填充材料等^[1]。Cu 基难混溶合金在目前难混溶合金的研究领域中引起了广泛关注^[2-3],其中 Cu-Co 是研究相对较为成熟的合金体系。然而 Cu-Co 体系合金存在液相分离的特性^[4-5],液相分离后形成互不相溶的两相组织,高熔点的 L1 相和低

熔点的 L2 相,两种液相的结构相同,但是成分不同,使得传统制备方法极易形成分层甚至偏析结构,严重限制了其应用。因此,对于具有液相分离特征的难混溶合金,探索其过冷状态下的组织演化行为十分必要。

而已有研究表明,强磁场可以有效调控合金凝固中的微观结构^[6-7]。作为一种极端物理场,强磁场作用为非接触,可以直接影响材料中原子的行为,如:排列、迁移与相互匹配等,进而影响到材料的微观组织以及性能^[8],因而将磁场技术应用于材料冶金工艺过程,通常会突破现有的技术瓶颈。近年来,研究学者对强磁场下合金的凝固行为进行了大量研究。王等人^[9]研究了强磁场对纯 Co 的宏观形貌影响。发现随着磁场的施加,纯 Co 出现了尖端和莲花形状的波峰和波谷,使得样品的宏观形貌发生了较大的改变。钟等人^[10]研究了强磁场对 ZnBi 合金凝固过程中对流以及微观组织的影响,磁场产生的热电磁力

收稿日期: 2021-12-14

基金项目: 国家自然科学基金(52174375 和 51690163);陕西省创新能力支撑计划(2020KJXX-073);凝固技术国家重点实验室自主课题(2021-TS-01)

作者简介: 魏 晨(1996—),博士生。研究方向:强磁场下合金的非平衡凝固。电话:02988460294, Email:18229022561@163.com

通讯作者: 王 军(1985—),教授。研究方向:金属材料及其凝固行为。电话:02988460568, Email:nwpuwj@nwpu.edu.cn

引起了合金中的熔体对流,推动富 Bi 小球的运动,从而改变了偏析行为。Sugioka 等人^[1]采用电磁悬浮结合强磁场研究了过冷 $\text{Cu}_{50}\text{Co}_{50}$ 合金中的相分离结构演变,发现在较小的磁场 (0~1.0 T) 下,富 Cu 相基体中弥散分布着细小的富 Co 球。当磁场强度超过 1.5 T 时,富 Cu 基体中出现了尺寸较大的富 Co 相,且随着磁场强度的增加,富 Co 相的形状在磁场方向上明显变长。此外,刘等人^[2]研究了不同磁场强度下的 Fe-4.5%Si 合金中的晶体取向,磁场强度从 0 增加到 6 T 时,试样的 $\langle 100 \rangle$ 晶向逐渐转变为强磁场方向,从而优化了硅钢的织构,提高了合金饱和磁化强度,降低了矫顽力,大幅度提高了硅钢的磁性。

由此可见强磁场作为一种特殊的物理场,在调控材料的组织及性能方面具有特殊的作用。然而目前对于强磁场下难混溶合金组织演化行为的研究尚不够充分。此外,由于难混溶合金凝固过程中组织演化机制的复杂性,涉及液-液相变的过程中第二相粒子的形核、长大、碰撞凝聚、粗化、沉降等,导致此类合金组织演化行为没有得到系统的研究。本文作者旨在通过循环过热结合熔融玻璃包覆技术在超导体磁体中对 $\text{Cu}_{50}\text{Co}_{50}$ 合金的组织演化行为进行研究。

1 实验材料与方法

实验选取纯度为 99.99 % 的 Co、Cu 纯元素单质为原料,按照原子比换算成质量比后,采用 WK-IIa 型高真空非自耗电弧熔炼炉熔炼得到纽扣锭,然后将其切割、打磨和超声清洗,每个实验样品质量在 1 g 左右。实验装置的具体细节可参考文献[13],为了研究强磁场在合金凝固过程中的影响,排除感应加热方式对实验过程的影响,本实验选用电阻加热方式。将实验样品放置石英玻璃管的底部,表面覆盖一定量的 B_2O_3 玻璃防止试样氧化。样品的温度由安装在装置顶部的双色高温计进行直接监测,实验过程中设置升温速率为 40 K/min,保温温度为 1 430 °C,保温时间大约 7 min,降温速率 40 K/min,之后冷却到 980 °C 左右,再次升温至最高温度,将此循环过程反复进行,直至达到所需过冷度,将样品取出进行水淬,设置的磁场强度分别为 0、5、10 T。

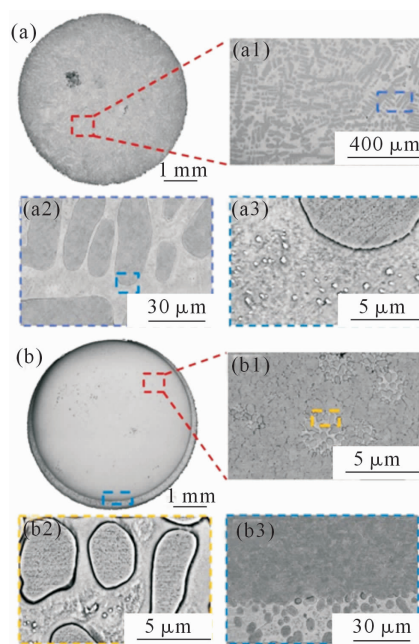
对凝固后的试样按照标准金相程序进行打磨和抛光,然后使用 5 g FeCl_3 、10 mL HCl 和 100 mL $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 溶液对样品表面进行腐蚀。试样微观结构分析分别在光学显微镜(OM、GX71)、扫描电镜(Helios G4 CX)和显微 CT(nanoVoxel 3000)上完成。元素的

分布通过扫描电镜上的能量色散 X 射线光谱(EDS)测量。通过低温 CFMS-14TPPMS,可在 298 K 下获得样品的磁性能(测试范围 -20 000~20 000 Oe)。

2 结果与讨论

2.1 微观组织演化

图 1 是无磁场下 $\text{Cu}_{50}\text{Co}_{50}$ 合金在过冷度分别为 99、256 K 下的凝固组织。 $\text{Cu}_{50}\text{Co}_{50}$ 合金的液相分离发生在过冷度约为 109 K 左右。图 1(a) 是 99 K 过冷度下整个样品的宏观组织图,由于过冷度小于临界液相分离的过冷度,合金熔体处于液相和 α -Co 枝晶相的两相区域,没有发生液相分离,微观结构的特征是 α -Co 枝晶相弥散的分布在富 Cu 基体上。从图 1(a1, a2) 中可以观察到 α -Co 枝晶相在合金内部的任意分布,此外,从图 1(a3) 中观察到在枝晶间存在大量的纳米析出相,根据先前的实验结果^[14],这些纳米富 Co 点的形成是凝固后脱溶析出的结果。图 1b 是 256 K 过冷度下整个样品的宏观组织图。此时样品已经发生了明显的液相分离现象,从图中可以清楚地观察到,富 Co 相在富 Cu 相基体中形成了近似规则的球状微观结构,熔体已经进入混溶间隙,其显微组织特征为双层的核壳结构^[5],以富 Co 相大液滴为核心,被富 Cu 壳层包裹。在 Marangoni 对流、界面张力和熔体流动的作用下^[16],富 Co 液滴在熔体中相互迁移碰撞,这些富 Co 液滴的聚结和凝并降低了表



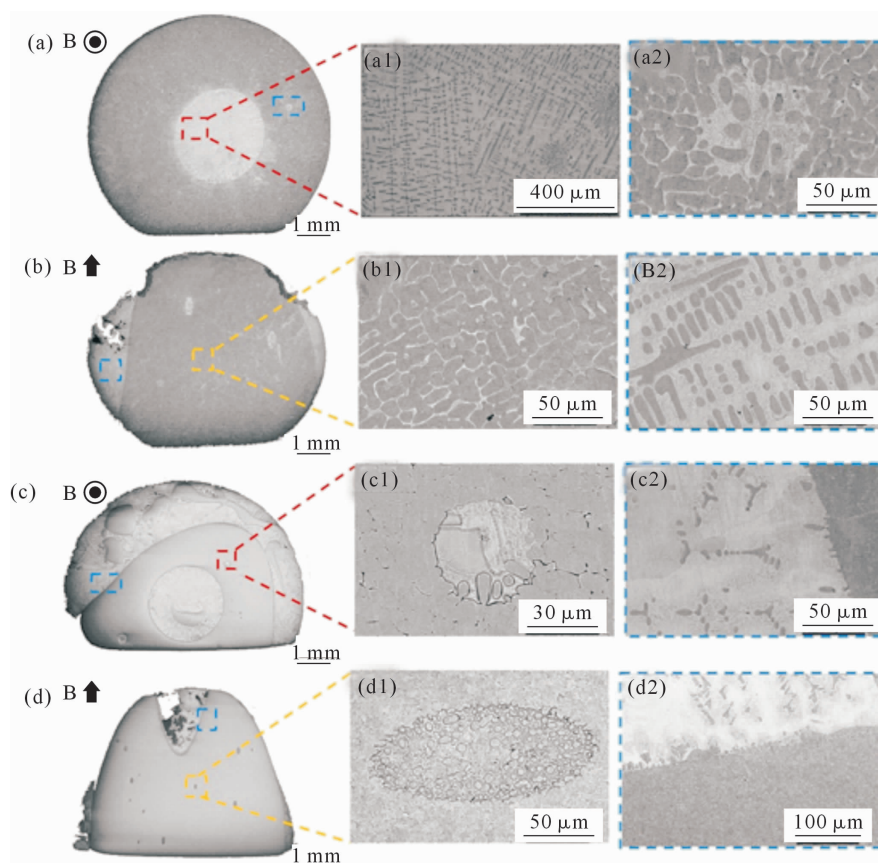
(a) 99 K, (a1, a2) 是 (a) 的放大区域, (a3) 是 (a2) 的放大区域
(b) 256 K, (b1, b3) 是 (b) 的放大区域, (b2) 是 (b1) 的放大区域

图 1 无磁场不同过冷度下 $\text{Cu}_{50}\text{Co}_{50}$ 合金凝固的微观结构
Fig.1 Microstructure of the $\text{Cu}_{50}\text{Co}_{50}$ alloys solidified at different undercooling without magnetic field

面能,导致液滴尺寸的增大。图 1(b1)是核心富 Co 相的局部放大图,可以观察到二次液相分离产生的白色富 Cu 小液滴,对二次液相分离产生的富 Cu 相进一步放大如图 1(b2)所示,发现富 Cu 液滴的内部分布着一些破碎的富 Co 枝晶,分析这是由于富 Co 相凝固时再辉释放潜热产生的产物^[4]。此外,发现大量纳米沉淀相均匀的分布在富 Co 枝晶间区域。图 1(b3)是富 Co 核与富 Cu 壳之间的分离界面,观察到有许多小的球形富 Co 液滴附着在富 Co 核周围。

图 2 为 5 T 磁场不同过冷度下凝固后合金的横向和纵向组织,不同过冷度下富 Co 相的形貌均发生了明显变化。图 2(a)为试样的横向组织,过冷度为 133 K,略大于临界过冷度,合金中分布着大量的 α -Co 枝晶,同时合金的中心发生了二次液相分离产生了白色的富 Cu 区域。从图 2(a1)中可以看到二次液相分离产生的富 Cu 区域由大量的枝晶组成。对合金的基体富 Cu 区域进行局部放大如图 2(a2)所示,仍然观察到了二次液相分离产生的富 Cu 区域。图 2(b)为试样的纵向组织,显然与 0 T 磁场下试样的形貌不同,此时 α -Co 枝晶的形貌呈细长条的棒状,沿磁场方向被拉长。对富 Co 区域进行局部放大(图 2

(b1)), 观察到富 Co 区域由近似等轴的 Co 枝晶组成,而富 Cu 基体由 α -Co 枝晶组成(图 2(b2))。随着过冷度的增加,熔体发生显著的液相分离,图 2(c)为过冷度 245 K 时合金的横向宏观组织图,从图中可以观察到合金边缘区域的富 Co 相尺寸较小且分布均匀,中间区域的富 Co 相发生了变形,图 2(c1)为图 2(c)中富 Co 区域的局部放大图,由于过冷度较大,发生了二次液相分离现象,形成了富 Cu 液滴。图 2(c2) 是富 Co 相与富 Cu 基体相之间的分离界面,可以发现相分离的富 Co 相由等轴晶组成,此外,由于一次和二次液相分离释放的潜热会提高液相的温度,液相温度升高到可混溶间隙以上,导致富 Cu 基体相中形成了大量 α -Co 枝晶。图 2(d)为过冷度 245 K 时合金的纵向宏观组织图,富 Co 相发生了进一步的凝聚长大进而粗化,但是沿磁场方向上被拉长,呈现棒状的结构。但值得注意的是,棒状富 Co 相的亚结构发生了显著变化。较高的过冷度下,二次液-液相分离更容易发生且更为明显^[1],从图中观察到富 Cu 相也沿着磁场方向被拉长,如图 2(d1)所示。由于富 Co 相呈长条棒状,富 Cu 相在整个凝固过程中往往会沿磁场方向被挤压,去协调铁磁性



(a, b) 133 K, (a1, a2) 是 (a) 的放大区域, (b1, b2) 是 (b) 的放大区域;
(c, d) 245 K, (c1, c2) 是 (c) 的放大区域, (d1, d2) 是 (d) 的放大区域

图 2 5 T 磁场不同过冷度下 $\text{Cu}_{50}\text{Co}_{50}$ 合金的横向和纵向微观组织

Fig.2 Transverse and longitudinal microstructures of $\text{Cu}_{50}\text{Co}_{50}$ alloy solidified at different undercooling under 5 T magnetic field

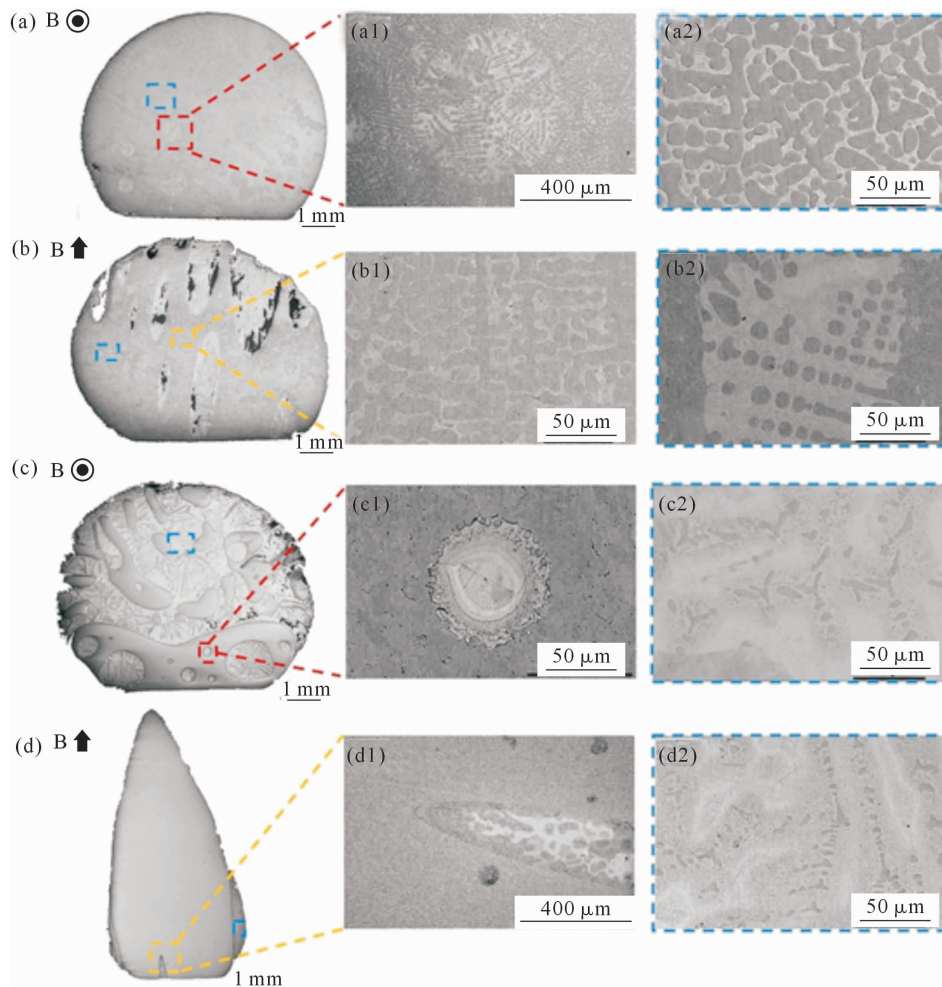
富 Co 相的变形^[15]。图 2(d2)中富 Co 相与富 Cu 基体的界面处同样由一些分散的 α -Co 枝晶与等轴的富 Co 相组成。

图 3 为 10 T 磁场不同过冷度下凝固后合金的横向和纵向组织。图 3(a)中合金的过冷度为 116 K, 接近临界液相分离的过冷度, 合金中分布着大量的 α -Co 枝晶, 同时可以观察到合金由于少量的二次液相分离导致了局部白色区域球形富 Cu 相的形成。从图 3(a1)中可以发现二次相分离产生的富 Cu 区域仍然存在大量的 α -Co 枝晶相。对富 Cu 基体进行局部放大如图 3(a2)所示, 观察到大量的富 Co 枝晶相。图 3(b)为合金的纵向组织, 部分聚集的 α -Co 枝晶沿磁场方向被拉长且产生了二次相分离的富 Cu 相, 同时由于非平衡凝固导致合金内部存在一些缺陷。对基体相区域进行局部放大(图 3(b1)), 发现均由近似等轴的 α -Co 枝晶组成。图 3(b2)为富 Co 区域中产生的二次富 Cu 相, 由于富 Co 相凝固潜热的释放, 导致二次液相分离的富 Cu 相内部产生了一些破碎的 α -Co 枝晶。随着过冷度进一步增加, 熔体

内部发生显著的液相分离, 图 3(c) 为过冷度 245 K 时合金的横向宏观组织图, 与 5 T 磁场下的形貌类似, 合金部分边缘区域的富 Co 相尺寸较小且分布均匀, 而另外一部分的富 Co 相发生了变形且呈环状。图 3(c1)为图 2(c)中富 Co 相的局部放大图, 由于二次液相分离, 形成了球形富 Cu 液滴且分离的富 Co 相由等轴枝晶组成。富 Cu 基体相中分布着大量的 α -Co 枝晶以及脱溶析出的纳米富 Co 点, 如图 3(c2)所示。图 3(d) 为过冷度 245 K 时合金的纵向宏观组织图, 整个合金试样都被沿磁场方向拉长, 呈现针尖状, 表明强磁场下由于顺磁性富 Co 相的存在导致其产生的静磁场远远大于其表面张力^[16]。同时从图中观察到二次液相分离产生的富 Cu 相也沿着磁场方向被拉长, 如图 3(d1)所示。从图 3(d2)中富 Cu 基体的局部放大图可以观察到, 富 Cu 相由一些分散的 α -Co 枝晶相及脱溶析出的大量纳米富 Co 相组成。

2.2 物理性能分析

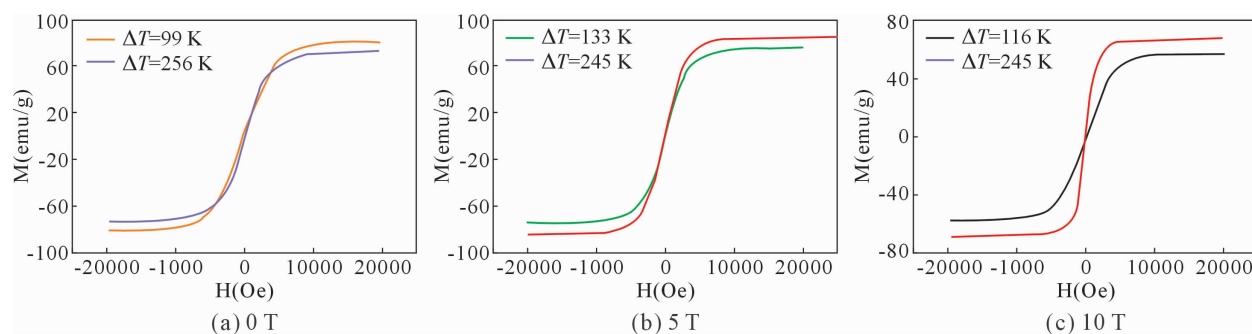
图 4 为不同磁场强度及不同过冷度下凝固后 $\text{Cu}_{50}\text{Co}_{50}$ 合金的磁滞回线。图 4(a)是无磁场不同过冷



(a, b) 116 K, (a1, a2) 是 (a) 的放大区域, (b1, b2) 是 (b) 的放大区域; (c, d) 245 K, (c1, c2) 是 (c) 的放大区域, (d1, d2) 是 (d) 的放大区域

图 3 10 T 磁场不同过冷度下 $\text{Cu}_{50}\text{Co}_{50}$ 合金的横向和纵向微观组织

Fig.3 Transverse and longitudinal microstructures of $\text{Cu}_{50}\text{Co}_{50}$ alloy solidified at different undercoolings under 10 T magnetic field

图4 不同磁场强度及不同过冷度下凝固后 $\text{Cu}_{50}\text{Co}_{50}$ 合金的磁滞回线Fig.4 Hysteresis loops of solidified $\text{Cu}_{50}\text{Co}_{50}$ alloy under different undercoolings and magnetic fields

度下的磁滞回线,从图中可以看出随着过冷度增加,熔体发生液相分离后,合金的饱和磁化强度 (M_s) 明显降低。过冷度越大,球形富 Co 相的碰撞聚集越严重,富 Co 相里面固溶的 Cu 原子含量增加,从而导致二次液相分离产生的富 Cu 相增加。而富 Cu 相是抗磁性物质,因此,合金中 M_s 值的降低可能是由于二次分解产生的富 Cu 相的贡献增加导致。然而施加 5 T 和 10 T 磁场后,随着过冷度的增加,合金的 M_s 明显增加,如图 4(b,c)所示,这是由于不同过冷度下合金中均发生了液相分离,随着过冷度的增大富 Co 相的聚集导致熔体中 Co 的含量增加。另一方面,如表 1 所示,通过 EDS 测量的 $\text{Cu}_{50}\text{Co}_{50}$ 合金不同相中 Co 的化学成分(at.%),可以合理的解释其磁性能的变化。此外,值得注意的是随着磁场强度的增加,合金达到饱和的速度显著加快,分析认为磁场强度越大使物质产生的磁能就会越大,从而导致其达到饱和磁化强度的速度加快。

表1 不同磁场强度和不同过冷度下 $\text{Cu}_{50}\text{Co}_{50}$ 合金不同相中 Co 的化学成分(at.%)Tab.1 Chemical composition of Co in different phases of $\text{Cu}_{50}\text{Co}_{50}$ alloy solidified under different magnetic field intensities and undercoolings

B/T	$\Delta T/\text{K}$	富 Co 相	富 Cu 基体相	$\alpha\text{-Co}$ 枝晶相
0	99		8.48	85.18
0	256	86.89	7.11	80.01
5	133		9.57	86.32
5	245	88.95	5.77	84.59
10	116		10.45	86.40
10	245	87.33	8.04	83.24

已有的报道表明电阻率对过冷熔体的结构演化具有很高的敏感性,研究凝固过程中电阻率的变化,有利于研究 Cu-Co 合金中亚稳态液-液相分离的情况。表 2 是不同磁场强度及不同过冷度下合金的电阻率值。从表 2 中看出,不同磁场强度下随着过冷度的增加,合金的电阻率均有所减小。发生相分离后,随着液滴的长大,微观结构的演化对电阻率的影响比界面的变化更为重要。在液态中 Cu 的

表2 不同磁场强度及不同过冷度下 $\text{Cu}_{50}\text{Co}_{50}$ 合金的电阻率
Tab.2 The resistivity of $\text{Cu}_{50}\text{Co}_{50}$ alloy solidified at different undercoolings under magnetic fields

B/T	$\Delta T/\text{K}$	电阻率 $/(\Omega \cdot \text{cm})$
0	99	9.26×10^{-6}
0	256	7.92×10^{-6}
5	133	8.67×10^{-6}
5	245	8.50×10^{-6}
10	116	8.43×10^{-6}
10	245	7.94×10^{-6}

电阻率比 Co 低的多,一些富 Co 相被富 Cu 相包裹,外层富 Cu 液相的电阻率较低,为电子迁移提供了优先路径,并决定了其电阻率行为,而 Cu 浓度随着分离的进行而降低,从而使分离熔体的电阻率降低。同时观察到随着磁场强度的增加,合金的电阻率数值的有所减小,由于强磁场下会产生与熔体运动方向相反的洛伦兹力从而抑制熔体流动,导致合金中的溶质输运受到阻碍,减小了 Cu 的溶质含量,从而减小合金的电阻率数值。

2.3 强磁场对组织演化的影响机制

以上实验结果表明,强磁场的应用有效地改变了 Cu-Co 难混溶合金的微观组织结构。分析认为未施加磁场时,富 Co 液滴的初始形状为球形,由于快速凝固过程中界面能与温度梯度的强烈相互作用会形成 Marangoni 对流,在对流的作用下液滴会发生碰撞及长大,但不是一个稳定的状态^[17]。一旦熔体被施加强磁场后,它开始振荡以平衡洛伦兹力、熔体流动、表面张力和流体压力^[18]。流体在运动时作切割磁力线运动,将产生一个环形电流,与磁场相互作用,使颗粒受到一个与运动方向相反的洛伦兹力^[19]。洛伦兹力是与磁场强度的平方成正比的制动力,磁场强度越大,产生的洛伦兹力就会越大,液滴的变形越严重,并且导致液滴的运动速度受到阻碍,影响溶质输运,使宏观偏析程度得到一定抑制,从而导致富 Co 相的分布较为分散。

平行于磁场方向上,显然合金中的富 Co 相沿

强磁场方向均被拉长,且随着磁场强度的增大,被拉长的程度明显增加。根据先前的研究结果,过冷度的增加将使液态样品在相同磁场下比固态样品具有更强的磁性,因为在被磁化之前,液体将形成有序结构^[9]。因此,熔体的磁性会非常强。在任意椭球形状的均匀磁化样品中,退磁场 H_d 是均匀的。对于 $\alpha = \frac{c}{a} > 1$ 的椭球体退磁因子可计算为^[20]:

$$N_c = \frac{1}{(\alpha^2 - 1)} \left[\frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 - 1}} \cosh^{-1}(\alpha)^{-1} \right] \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{c}{a} \quad (2)$$

式中, c 代表长轴, a 代表短轴。

物质在磁化过程中将受到自身退磁场的作用,产生退磁场能^[21]:

$$E_d = \int_0^M H_d dM \quad (3)$$

磁化强度 M 为单位体积中磁矩矢量和,相对于磁场强度 H 可近似表示为^[20]:

$$M = \chi H \quad (4)$$

均匀磁化样品的退磁场能只与退磁因子有关,即与物质的几何形状有关。而当物质被置于外磁场中将处于磁化状态,此时具有静磁能量,静磁能通常被定义为^[20]:

$$\varepsilon_m = 1/2 \mu_0 V N M^2 \quad (5)$$

式中, μ_0 为真空磁导率常数; V 为物体体积; N_c 是退磁因子; M 为磁化强度。

对 10 T, 245 K 过冷度下合金中富 Co 相的形貌改变进行理论分析,从图 5 计算的退磁因子与长径比的函数关系可以发现,当长径比越大时退磁因子越小。而合金中最大的针状富 Co 相其长径比最小,意味着其退磁因子最大,结合等式(5)可以得出其静磁能也越大,此时表面张力的作用远小于静磁能,因此富 Co 相被拉长的程度最为显著。

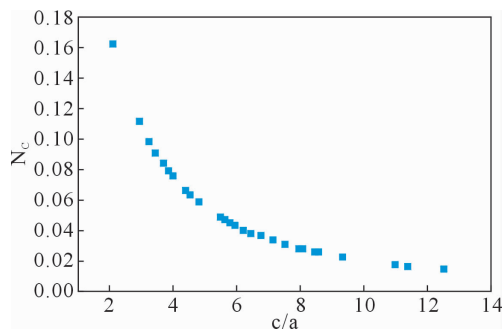


图 5 10 T 磁场 245 K 过冷度时计算的退磁因子与富 Co 相长径比的关系

Fig.5 The calculated demagnetizing factors as a function of the Co-rich phase length-diameter ratio under 10 T magnetic field with 245 K undercooling

3 结论

(1) 无磁场小过冷度下,合金未发生液相分离,主要呈现枝晶形貌。随着过冷度的增大,微观结构呈现相分离的核-壳结构以及出现二次液相分离现象。

(2) 强磁场的施加对过冷 Cu-Co 合金的凝固组织演化行为产生了显著的影响。磁场显著地改变了富 Co 相的形貌。强磁场的施加导致核-壳结构发生了变化,平行磁场方向上,富 Co 相在静磁能的作用下,沿磁场方向形成细长的形貌,且随着磁场强度的增大,长径比较小的富 Co 相具有较大的磁能导致被拉长的程度增加。垂直磁场方向上,由于洛伦兹力对熔体流动的抑制作用导致富 Co 相分布相对均匀。

(3) 强磁场的施加改变了凝固后合金的磁性能以及电阻率。随着磁场强度的增加合金趋于饱和磁化的速度明显加快,而电阻率由于外层富 Cu 液相的电阻率较低为电子迁移提供了优先路径,导致其数值明显减小。

参考文献:

- [1] 江鸿翔,孙小钧,李世欣,等. 直流电流作用下 Al-Bi 偏晶合金连续凝固研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(10): 5-9.
- [2] 张盼,刘平,刘新宽,等. 不同成分铜铁合金组织与性能变化研究[J]. 铸造技术, 2018, 39(3): 506-511.
- [3] SHOJI E, ISOGAI S, SUZUKI R, et al. Neutron computed tomography of phase separation structures in solidified CuCo alloys and investigation of relationship between the structures and melt convection during solidification [J]. Scripta Materialia, 2020, 175(C): 29-32.
- [4] 孙占波,宋晓平,胡柱东,等. 深过冷条件下 Cu-Co 合金的液相分解[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(1): 72-77.
- [5] MULLIS A M, JEGEDE O E, BIGG T D, et al. Dynamics of core-shell particle formation in drop-tube processed metastable monotectic alloys[J]. Acta Materialia, 2020, 188: 951-958.
- [6] 孙占波,宋晓平,胡柱东,等. 深过冷条件下 Cu-Co 合金的二次液相分解于合金的凝固 [J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(2): 172-175.
- [7] HE S Y, LI C J, GUO R, et al. Evolution of microsegregation in directionally solidified Al-Cu alloys under steady magnetic field [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 800: 41-49.
- [8] 余挺,耿桂宏,王东新,等. 电磁模拟微重力+电脉冲复合场作用下 Cu-20Pb 亚偏晶合金的组织与性能 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(1): 4.
- [9] WANG J, LI J, KOU H, et al. Instability Pattern Formation in a Liquid Metal under High Magnetic Fields [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 2248.
- [10] ZHENG T, ZHONG Y, LEI Z, et al. Effects of high static magnetic field on distribution of solid particles in BiZn immiscible alloys with metastable miscibility gap [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 623: 36-41.

- [11] SUGIOKA K I, INOUE T, KITAHARA T, et al. Study on the Effect of Melt Convection on Phase Separation Structures in Undercooled CuCo Alloys Using an Electromagnetic Levitator Superimposed with a Static Magnetic Field[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2014, 45(4): 1439-1445.
- [12] LIU C, ZHONG Y, SHEN Z, et al. Effect of a transverse weak magnetic field on the texture evolution and magnetic property of Fe-1.0 wt.% Si alloy during bulk solidification [J]. Materials Research Express, 2019, 6(6): 066105.
- [13] WANG J, HE Y X, LI J S, et al. Experimental platform for solidification and in-situ magnetization measurement of undercooled melt under strong magnetic field [J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(2): 025102.
- [14] WEI C, WANG J, HE X Y, et al. Liquid-liquid phase separation in immiscible Cu-Co alloy [J]. Materials Letters, 2020, 268 (2): 127585.
- [15] JEGEDE O E, COCHRANE R F, MULLIS A M. Metastable monotectic phase separation in Co-Cu alloys [J]. Journal of Materials Science, 2018, 53(16): 11749-11764.
- [16] WEI C, WANG J, HE X Y, et al. Influence of high magnetic field on the liquid-liquid phase separation behavior of an undercooled Cu-Co immiscible alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 842: 155502.
- [17] FENG L, SHI W Y. The influence of Marangoni effect on flow and deformation of an electromagnetically levitated molten droplet under static magnetic fields [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 101: 629-636.
- [18] DU D, HALEY J C, DONG A, et al. Influence of static magnetic field on microstructure and mechanical behavior of selective laser melted AlSi10Mg alloy [J]. Materials & Design, 2019, 181: 107923.
- [19] SUN Z, ZHANG X, GUO M, et al. Strong magnetic field effects on solid-liquid and particle-particle interactions during the processing of a conducting liquid containing non-conducting particles [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2012, 375(1): 203-212.
- [20] COEY, MD J. Magnetism and Magnetic Materials: Magnetostatics [J]. Electronics & Power, 2010, 15(7): 259-260.
- [21] 王强, 赫冀成. 强磁场材料科学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.