

强静磁场时效对 Al-4Cu 合金析出动力学的影响研究

陈思宇 帅三三 蒋丹青 胡 涛 陈超越 徐松哲 王 江 任忠鸣
(上海大学材料科学与工程学院,先进特殊钢全国重点实验室,上海 200444)

摘 要 为探究强静磁场对 Al-4Cu 合金析出动力学的影响,在 130 °C 下对 Al-4Cu 合金进行了时效处理,通过透射电镜(TEM)对比了在有、无磁场条件下的铝合金时效行为。结果表明,强磁场阻碍了溶质原子的扩散,从而抑制了 G.P. 区和 θ'' 相的形核与长大。强磁场促进了 θ' 相的粗化,并使得更大尺寸的 θ' 相与基体保持半共格关系,这可能是由于强磁场增大相界面能所致。

关键词 Al-4Cu 合金;强静磁场;时效;析出动力学

中图分类号 TG146.21;TG156.97

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20240145

Effects of High Static Magnetic Field Aging on Precipitation Kinetics of Al-4Cu Alloy

CHEN Siyu, SHUAI Sansan, JIANG Danqing, HU Tao, CHEN Chaoyue, XU Songzhe, WANG Jiang, REN Zhongming

(State Key Laboratory of Advanced Special Steel, School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444)

Abstract: Al-4Cu alloys were aged at 130 °C, and aging behavior before and after applying 10 T magnetic field was investigated using transmission electron microscopy (TEM) to explore the effect of high static magnetic field (HSMF) on precipitation kinetics of Al-4Cu alloys. The results indicate that HSMF can inhibit the nucleation and growth of G.P. zone and θ'' phase by virtue of hindering the diffusion of solute atoms. Additionally, HSMF promotes the coarsening of θ' phase, resulting in a semi-coherent relationship between larger-sized θ' phases and matrix, which is possibly attributed to the increase in interfacial energy caused by HSMF.

Key Words: Al-4Cu Alloy, High Static Magnetic Field, Aging, Precipitation Kinetics

Al-Cu 合金作为一种典型的时效硬化合金,其时效过程中的脱溶贯序为:过饱和固溶体→G.P. 区→ θ'' 相→ θ' 相→ θ 相。时效过程中,高密度的纳米析出物有效地阻碍了位错运动,显著提高了材料性能。铝合金的时效过程本质上是一种扩散相变,溶质原子的扩散在这一过程中起重要作用。目前,主要通过调控时效工艺参数^[1-4]和合金成分^[5-10]来优化铝合金的时效过程。然而,这些时效过程往往相对复杂,需要对时间和温度进行精确控制。近年来,研究者发现磁场可以影响材料的固态相变过程。因此,磁场下热处理成为了一种重要的新工艺,以此来改善材料的微观组织及力学性能。

磁场作为一种外加物理场,具有无接触的特点,为调控材料提供了额外的自由度^[11]。磁场可以改变固态相变的热力学和动力学条件^[12],从而调控材料的微观

结构^[13]、形态^[14]、成分分布^[15]和性能^[16]。由于铁磁材料具有较高的磁化率,磁场对其自由能影响较强,因此磁场对铁磁性材料固态相变的影响得到了广泛的研究^[17-20]。然而,磁场热处理对非磁性材料微观组织和性能的研究报道较少。MORIKAWA H 等^[21]对强磁场下 Al-Si 合金的析出行为进行研究,发现 Al-Si 合金中析出的金属间化合物呈片状并垂直于磁场方向排列。LI G R 等^[22]研究了高脉冲磁场对 TC4 钛合金组织和力学性能的影响,发现脉冲磁场诱导了 β 相向 α 相的转变,同时磁场提高了钛合金的位错密度。LUO J 等^[23]研究了 1 T 磁场下 90~200 °C 时效后超细晶 7075 铝合金的位错形貌和析出行为,发现磁场降低了位错的临界剪切应力,增加了溶质的扩散系数,促进了位错和溶质原子的运动。丁学锋等^[24]在 0.5 T 磁场下对 7A62 铝

收稿日期:2024-04-04;修订日期:2024-05-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52271035,52127807);上海市青年科技启明星资助项目(20QA1403800,21QC1401500);上海市扬帆计划资助项目(21YF1413000)

第一作者:陈思宇,男,1997 年出生,硕士研究生,E-mail:changerd9725@163.com

通信作者:帅三三,男,1988 年出生,副研究员,E-mail: shuai33@shu.edu.cn

引用格式:陈思宇,帅三三,蒋丹青,等. 强静磁场时效对 Al-4Cu 合金析出动力学的影响研究[J]. 特种铸造及有色合金,2026,46(6):915-920.

CHEN S Y, SHUAI S S, JIANG D Q, et al. Effects of high static magnetic field aging on precipitation kinetics of Al-4Cu alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(6): 915-920.

合金进行了时效处理,发现其峰值时效时间显著缩短,磁场促进了析出相的形核与长大。白庆伟等^[25]在Al-Zn-Mg-Cu系铝合金的时效阶段施加了脉冲磁场,发现脉冲磁场有利于增加析出质点数量并促进析出相长大。以上试验表明,磁场可以改变非磁性材料的固相相变过程。然而,磁场对非磁性材料的作用机制仍不清晰,理论研究缺乏说服力。因此,有必要系统地研究磁场在非磁性材料固态相变中的影响规律和作用机制,这对优化铝合金热处理工艺有重要的科学意义和实际价值。

本研究针对强磁场对Al-4Cu合金时效析出相的影响,通过透射电镜系统研究Al-4Cu合金在130℃分别时效1、5和10 h时,有、无10 T强磁场作用下的显微组织,探究强磁场对时效析出相及形核机制的影响,并进一步讨论强磁场对析出动力学的作用机理,旨在为相关研究提供参考。

1 试验方法

试验用Al-4.0Cu合金材料由(质量分数,下同)高纯铝(99.99%)和高纯铜(99.9%)经真空感应熔炼得到。熔炼后采用真空吸铸法得到直径为 $\phi 8$ mm的棒材。采用线切割方法对棒材中间部分进行切割,得到 $\phi 8$ mm $\times$ 8 mm的圆柱试样。Al-4Cu合金的热处理工艺见图1,包括固溶和时效处理。

试样在YFX18/12Q-GC型箱式马弗炉530℃下固

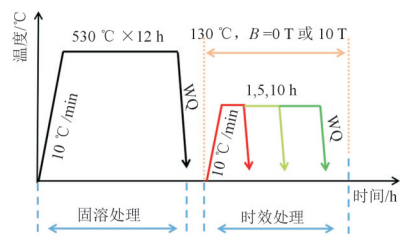


图1 有、无10 T强磁场下Al-4Cu合金的热处理工艺
Fig.1 Heat treatment process for Al-4Cu before and after applying HSMF

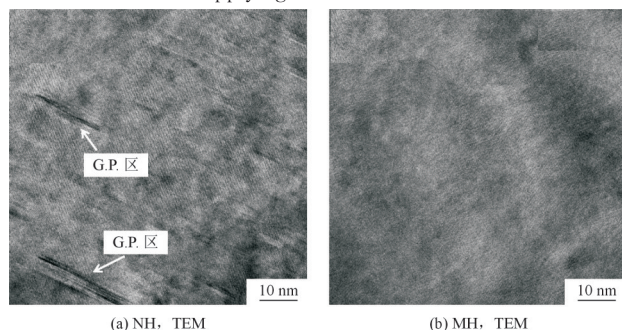


图2 NH合金和MH合金时效处理1 h后沿 $[110]_{\text{Al}}$ 带轴的TEM显微组织和相应的FFT衍射图

Fig.2 TEM microstructure along $[110]_{\text{Al}}$ zone axis and corresponding FFT patterns of NH and MH alloy after aging for 1 h

图3为时效5 h后试样的TEM组织及相应的FFT衍射图。可以发现,随着时效时间延长,NH合金和MH合金中都有大量弥散分布的析出相出现。NH合金中以

溶12 h,水淬(WQ),淬火转移时间小于1 min。长时间固溶目的在于将铸态合金中的初生 θ 相(CuAl_2 相)完全溶解于基体中,同时起到均匀化作用,减少偏析,使溶质原子分布更均匀,降低内应力。提前将磁场升至10 T并稳定一段时间,在130℃下分别时效1、5和10 h,水淬(命名为磁场热处理合金,简称MH合金)。同时,在无磁场条件下时效进行对照试验(命名为普通热处理合金,简称NH合金)。时效时间由Al-Cu合金的析出顺序决定,分别对应G.P.区、 θ'' 相和 θ' 相的析出时间。

通过FEI Nova450型聚焦离子束显微镜的聚焦离子束(FIB)技术制备纳米尺度的超薄试样。然后,将制备好的试样在Tallos F200s型高分辨透射电镜上进行显微组织观察,操作电压为200 kV。在TEM观察中,沿 $[110]_{\text{Al}}$ 晶带轴拍摄。

2 试验结果观察

图2为时效1 h试样的TEM图及相应的FFT衍射图。从图2a和图2b中可以看出,在无磁场的条件下时效1 h后,在NH合金的 $(1\bar{1}1)_{\text{Al}}$ 惯习面上析出一层或两层的Cu原子层,该析出相形貌为针状。从图2c可见,其FFT衍射花样显示在 $[110]_{\text{Al}}$ 投影中观察到了特定方向的特征条纹,该条纹为沿 $(1\bar{1}1)_{\text{Al}}$ 方向的不连续特征条纹,这表明该析出相为与母相完全共格的G.P.区^[26],其生长于 $\{100\}$ 平面上。从图2a和图2c中可以观察到析出的G.P.区数量较少且大小不一,这表明此时处于G.P.区析出的孕育阶段,只有小部分G.P.区形核并长大。对于MH合金,时效1 h后内部没有析出相出现,其对应的FFT衍射图也显示为标准的 α -Al衍射花样,没有出现G.P.区特征条纹,说明MH合金在时效1 h后还没有G.P.区析出。这可能是由于10 T强磁场抑制Cu原子的扩散并引起了界面能的增大,使得Cu原子团簇形成困难,而G.P.区通常在Cu原子团簇处形核,导致10 T强磁场抑制了G.P.区的析出。

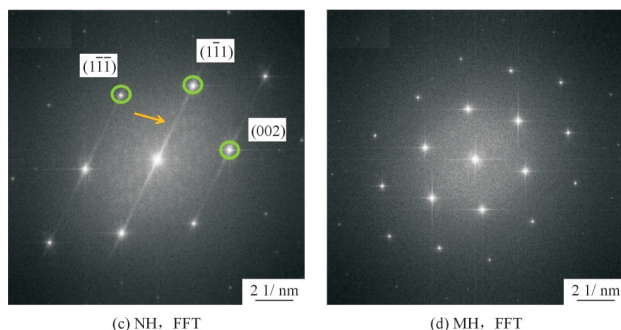


图2 NH合金和MH合金时效处理1 h后沿 $[110]_{\text{Al}}$ 带轴的TEM显微组织和相应的FFT衍射图

Fig.2 TEM microstructure along $[110]_{\text{Al}}$ zone axis and corresponding FFT patterns of NH and MH alloy after aging for 1 h

盘片状析出相为主,而MH合金中以针状析出相为主。另外,两者的FFT衍射花样与时效1 h后NH合金的FFT衍射花样类似,衍射斑点均为 α -Al基体,且都出现

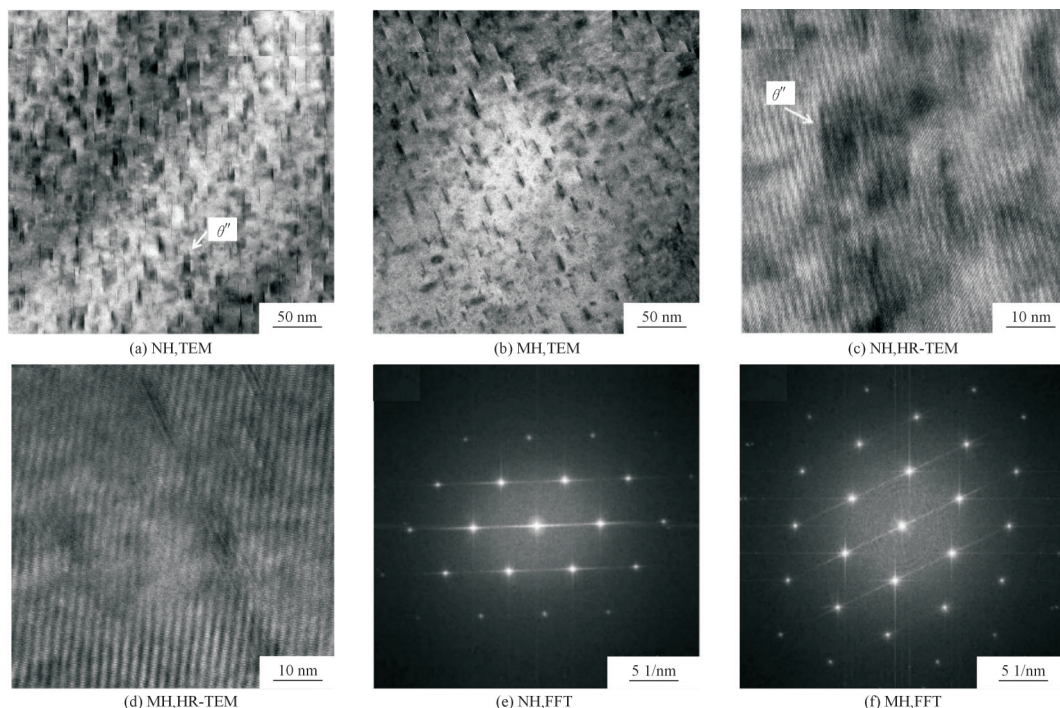


图3 NH合金和MH合金时效处理5 h后的TEM和FFT衍射图

Fig.3 TEM images and FFT patterns of NH and MH alloy after aging for 5 h

了沿 $(1\bar{1}1)_{\text{Al}}$ 方向的特征条纹,时效5 h后试样的特征条纹连续且更加明锐,说明该析出相为 θ'' 相。这种连续明锐的特征条纹是由于Cu原子在Al的 (100) 面进一步富集,G.P.区长大并逐渐有序化转变为 θ'' 相所致。对比图3c和图3d可知,MH合金中的 θ'' 相比NH合金中数量更少、尺寸更小。为了进一步探究10 T强磁场对Al-Cu时效过程中析出相演变的影响,对析出相的平均尺寸和

数量密度($100 \text{ nm}^{-1} \times 100 \text{ nm}^{-1}$)进行统计(约1 000个 θ'' 相计数)。发现NH合金和MH合金时效5 h后 θ'' 相的平均尺寸分别为12.0 nm和8.2 nm,平均数量密度分别为23和18。这说明10 T强磁场使 θ'' 相的平均尺寸和析出数量减少,抑制了 θ'' 相的形核过程。

图4为NH合金和MH合金时效10 h后试样的TEM组织。可以发现,与NH合金相比,MH合金中析

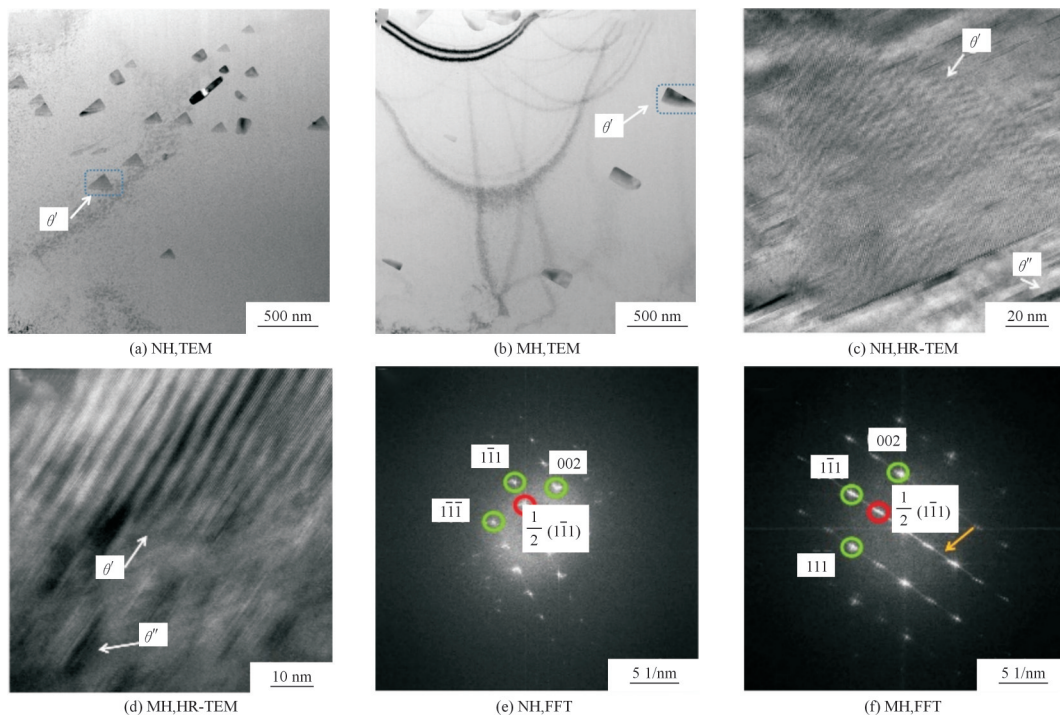


图4 NH合金和MH合金时效处理10 h后的TEM和FFT衍射图

Fig.4 TEM images and FFT patterns of NH and MH alloy after aging for 10 h

出相数量较少,分布更为分散。对明场像中蓝色框选位置的析出相进行放大观察,发现新析出相周围仍有少量 θ'' 相存在,但MH合金中的新析出相内部仍保留了与周围 θ'' 相方向相同的条纹,而NH合金中的新析出相内部没有保留类似的条纹。从FFT衍射花样可见,在基体的 $\frac{1}{2}(1\bar{1}1)_{\text{Al}}$ 处都出现了新的明锐的衍射斑点。这表明在时效10 h后,无论是否处于10 T强磁场作用下,Al-Cu合金中都出现了从 θ'' 相演化为四方结构的 θ' 相。对比发现,MH合金中 θ' 相的衍射花样仍四方结构存在沿 $(1\bar{1}1)_{\text{Al}}$ 方向的衍射条纹,该方向与 θ'' 相的方向相同,且 $\frac{1}{2}(1\bar{1}1)_{\text{Al}}$ 处的新衍射斑点较 α -Al基体的衍射斑点强度较弱,这表明MH合金中的 θ' 相仍与 α -Al基体呈部分共格或半共格关系,而NH合金中的 θ' 相与基体则丧失了共格关系。值得注意的是,从明场像中可以看出,MH合金中半共格的 θ' 相尺寸比NH合金中非共格的 θ' 相尺寸更大。而在通常情况下,由于共格会产生额外的弹性畸变能, θ' 相会随之长大而与基体丧失共格关系。同时,还可以发现,NH合金中沿 $\{100\}$ 面析出的盘片状 θ' 相,其宽面具有较好的对称性,而在10 T强磁场的作用下, θ' 相的形貌逐渐转变为板条状,失去了对称性。

3 分析与讨论

结果显示,在整个时效过程中,强磁场抑制了G.P.区的析出,降低了 θ'' 相的尺寸和数量密度,改变了 θ' 相的共格关系和形貌。这表明,10 T强磁场抑制了Al-4Cu合金的时效过程。从热力学上分析,由强磁场引起的相变驱动力变化(ΔG_m)可以表示为:

$$\Delta G_m = -\frac{1}{2\mu_0} \Delta\chi B^2 \quad (1)$$

式中, μ_0 为真空磁导率; $\Delta\chi$ 为母相与新相的磁化率差; B 为磁感应强度。Al-Cu合金中 α -Al基体和析出相均为顺磁态,即使在10 T强磁场下, $\Delta\chi$ 也较小。因此从热力学上看,强磁场对Al-Cu合金的时效过程影响较小。

Al-Cu合金的时效过程本质上是扩散型相变,主要由Cu原子的长程扩散过程控制。一般来说,溶质原子的扩散速率与溶质扩散系数(D)密切相关,可以用Arrhenius公式来描述^[27]:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

式中, D_0 为频率因子; Q 为扩散激活能; R 为摩尔气体常数; T 为热力学温度。YUAN Z J等^[28]发现强磁场通过降低频率因子 D_0 而不是扩散激活能 Q 来抑制Ni-Al体系中扩散系数。频率因子 D_0 可表示为:

$$D_0 = \frac{1}{6} a^2 v \exp\left(\frac{\Delta S_f + \Delta S_m}{R}\right) \quad (3)$$

式中, a 为原子的跳动距离; v 为原子的跳动频率; ΔS_f 和 ΔS_m 分别为空位形成熵和空位迁移熵。在强磁场的作用下,顺磁性合金,如Al-Cu合金,也会发生感应磁化现象。当施加强磁场时,原子磁矩排列有序,磁有序会引起晶格硬化,使原子的跳动频率大幅降低^[29]。同时,磁有序状态会影响扩散过程中的熵变($\Delta S_f + \Delta S_m$),从而降低了频率因子 D_0 。对于Al-Cu合金这种面心立方晶体, $\frac{1}{6}$ 因子是考虑到原子在空间的6个指向(前、后、左、右、上、下)跳动的等几率性,而在磁场作用下,原子运动会产生洛伦兹力,影响了扩散过程中原子前后两次跳动的相关性,使得磁场下的原子扩散过程变得更加复杂。以上讨论都说明强磁场可能抑制溶质原子扩散。

此外,考虑强磁场对缺陷的影响。Al-Cu合金作为置换固溶体,在固溶淬火后,合金内会保留大量空位。而置换固溶体中的溶质原子通常以空位机制迁移。强磁场会诱导顺磁性合金的磁化,而空位的形成会导致Al-Cu合金的磁化强度降低,使得磁场中单位体积的磁自由能增加。空位的体积过小,因此外加磁场对空位形成能的影响可以忽略不计。在强磁场作用下,Al-Cu合金的空位浓度会降低,从而抑制了Cu原子的扩散。

在时效处理初期,溶质原子在 α -Al基体中大量均匀分布。此时,Cu原子浓度和空位浓度较高,强磁场对扩散的抑制作用十分显著。因此,时效1 h后,当NH合金中只有少量G.P.区形核析出时,MH合金中没有G.P.区出现。

随着时效时间延长,在时效5 h后,MH合金中 θ'' 相的数量小于NH合金,说明强磁场抑制了 θ'' 相的形核析出。由于试验中的Al-Cu合金没有经过形变,TEM中未发现大量位错线,因此假设 θ'' 相的析出属于均匀形核。在时效过程中,均匀形核的形核率(I)可表示为:

$$I = N v \exp\left(-\frac{\Delta G_k}{kT}\right) \exp\left(-\frac{\Delta G_A}{kT}\right) \quad (4)$$

式中, N 为单位体积中能够形成核心的位置数; ΔG_k 为临界形核功; ΔG_A 为扩散活化能; k 为玻尔兹曼常数。 ΔG_k 则又可以表示为:

$$\Delta G_k = \frac{1}{3} \gamma A^* \quad (5)$$

式中, γ 为相界面能; A^* 为临界晶核的表面积。HUANG C L等^[30]通过二面角法发现,在0~12 T磁场之间,Al-Cu合金的界面能随着磁感应强度的增加而显著增加,界面能最高增加3倍。由于临界形核功(ΔG_k)与界面能成正比,界面能的增加使得均匀形核困难,从

而降低了 MH 合金的形核速率和 θ'' 相的数量。这种磁场对界面能的影响可以通过磁偶极子理论 (Magnetic dipole theory) 解释。在 Al-Cu 合金的时效过程中, θ'' 相沿基体的 $\{100\}$ 面析出并与基体保持完全共格, 因此假设 α -Al/ θ'' 相界面见图 5。在强磁场下, α -Al 基体及 θ'' 相均会被磁化, 其中作为最小磁化单位的单个原子可以被视为一个磁偶极子, 磁偶极子的方向沿磁场方向排列, 两个磁偶极子之间也会产生相互作用力。磁偶极子间的相互作用力 F_{ij} 可表示为^[31]:

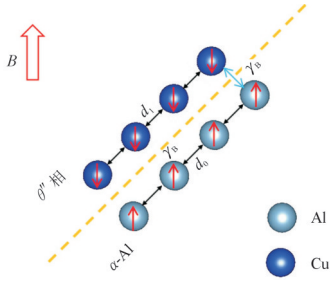


图 5 α -Al/ θ'' 相界面处磁偶极子相互作用示意图

Fig.5 Schematic diagram of magnetic dipole interaction at α -Al/ θ'' phase interface

$$F_{ij} = -\frac{\mu_0}{4\pi} \nabla \left[\left(\nabla \cdot \frac{\vec{m}_i \vec{l}}{l^3} \right) \vec{m}_j \right] \quad (6)$$

式中, $\vec{m}_i$ 和 $\vec{m}_j$ 分别为磁偶极子 i 和 j 的磁偶极矩; l 为磁偶极子质心距离; $\vec{l}$ 为磁偶极矩间的距离。当磁偶极矩方向相同时, 两者互相吸引; 方向相反时, 两者互相排斥。在同一介质中, 磁偶极子受到周围磁偶极矩的作用是对称的, 因此, 受到磁场诱导的相互作用力合力为 0。而在两相界面处, 由于两侧材料不同, 磁偶极矩的方向或大小不同, 因此产生了磁偶极子相互作用力。这种作用力会对界面产生压力, 称为磁界压, 从而改变了界面能。这种磁场造成的附加界面能 γ_0 可表示为^[30]:

$$\gamma_0 \cong \frac{A_{ij} B^2}{4\kappa\mu_0} \quad (7)$$

式中, κ 为界面曲率, 在形核中代表临界形核半径; A_{ij} 为界面处的相互作用因子, 与界面两侧材料的磁化率相关, 当两者方向相同时, $A_{ij} < 0$; 当两者方向相反时, $A_{ij} > 0$ 。在 θ'' 相的析出过程中, Al 为顺磁性原子, Cu 为抗磁性原子, 因此在界面处存在方向相反的磁偶极子, 使得界面增大。因此, 在 10 T 强磁场下, 随着界面能的增大, 临界形核功随之增大, 导致难以均匀形核, 降低了 MH 合金中的形核率, 减少了 MH 合金中 θ'' 相的数量。随着时效的进一步进行, θ'' 相逐渐转化为 θ' 相。当时效时间达到 10 h, NH 合金和 MH 合金中均出现了少量的 θ' 相, 但 MH 合金中析出的 θ' 相数量较少, 原因是强磁场抑制了形核。 θ'' 相是 θ' 相非常有利的形核位

置, 随着 θ' 相的长大, 周围的 θ'' 相溶解。因此, θ' 相的形核长大类似于一个 Ostwald 熟化过程^[32]。在时效后期, α -Al 基体中析出了大量分散的 θ'' 相, 具有很高的总界面能。为了减小总界面能, θ'' 相将以小颗粒溶解、大颗粒长大的方式粗化, 而长大后的 θ'' 相会逐渐转变为 θ' 相。Ostwald 熟化主要受界面能和溶质扩散两个因素控制。在 10 T 强磁场作用下, 界面能更大, 驱动力增强, 促进了 Ostwald 熟化。而随着时效时间延长, 基体内部的溶质原子浓度和空位浓度大幅降低, 强磁场对 Cu 原子扩散的抑制作用变小。因此, 综合考虑 10 T 强磁场对界面能和扩散的影响, 使得磁场促进了 θ'' 相和 θ' 相的粗化过程, 导致 MH 合金中出现了更大尺寸的 θ' 相。

值得注意的是, MH 合金中尺寸更大的 θ' 相与 α -Al 基体呈半共格关系, 而 NH 合金中尺寸较小的 θ' 相却与基体丧失了共格关系。通常情况下, 共格界面可以降低界面能, 易于形核, 但是共格会引起弹性畸变能, 弹性畸变能与核心体积成正比。当核心长大到一定尺寸后, 共格引起的弹性畸变能比丧失共格后增加的非共格界面能更高时, 便会丧失共格。因此, θ' 相会随着长大而丧失共格, 可表示为:

$$\Delta G_{st} = A\gamma \quad (8)$$

式中, ΔG_{st} 为弹性畸变能; A 为总面积。假设 θ' 相为圆盘状, 其相间距为 l_θ , 临界直径为 d , 切变模量为 G , 与基体错配度为 δ , 则根据式 (8) 可得:

$$G\delta^2\pi d^2 l_\theta = (\pi d^2/2 + \pi d l_\theta)\gamma \quad (9)$$

式中, d 为 γ 的单调增函数。在 10 T 强磁场下, 界面能 γ 的增大导致了临界直径 d 的增大, 故而 MH 合金中尺寸更大的 θ' 相仍然与 α -Al 基体呈半共格关系。

对于纳米析出相, θ' 相的生长倾向于形成低界面能的晶面, 从而决定了 θ' 相的形貌。根据 Gibbs-Wulff 定律, 晶体在等温恒容的情况下, 当其总表面能最小时, 相应的形态为晶体的平衡形态。某一晶面族的线性生长速率与该晶面族的比界面能成正比, 可表示为:

$$\frac{\gamma_1}{r_2} = \frac{\gamma_2}{r_2} = \dots = \frac{\gamma_i}{r_i} \quad (10)$$

式中, γ_i 为第 i 个晶面的比界面能; r_i 为晶体中心到第 i 个晶面的距离。在 NH 合金中析出的盘片状 θ' 相的宽面具有较高对称性, 这是由 θ' 相的晶体结构决定的。而 MH 合金中的 θ' 相逐渐转变为板条状, 因此, 可以推断出 10 T 强磁场对 θ' 相不同晶面的界面能影响不同, 从而导致了 MH 合金中 θ' 相的形貌失去了对称性。

4 结 论

(1) 10 T 强磁场使溶质原子的扩散系数降低, 这可

能是由于磁有序降低了原子跳动频率、空位形成熵和空位迁移熵,从而延缓了溶质原子的扩散;根据磁偶极子理论,强磁场可以增加 Al-Cu 合金的相界面能。

(2)短时间时效时间下(1~5 h),强磁场抑制了 G.P. 区和 θ'' 相的形核和粗化,这主要是由于时效前期 α -Al 基体中 Cu 原子浓度和空位浓度较高,此时强磁场对 Cu 原子扩散的抑制作用很强,从而抑制了新相的生成。在长时效时间(10 h)下,强磁场加速了 θ' 相的粗化,这主要是由于界面能的增加促进了 Ostwald 熟化过程。

(3)强磁场使得具有较高对称性的盘片状 θ' 相转变为板条状,同时使得尺寸更大的 θ' 相保留了与基体的半共格关系,这主要是由于界面能的增大所引起的。

参 考 文 献

- [1] YANG R X, LIU Z Y, YING P Y, et al. Multistage-aging process effect on formation of GP zones and mechanical properties in Al-Zn-Mg-Cu alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(5): 1 183-1 190.
- [2] CHEN J L, LIAO H C, WU Y, et al. Contributions to high temperature strengthening from three types of heat-resistant phases formed during solidification, solution treatment and ageing treatment of Al-Cu-Mn-Ni alloys respectively[J]. Materials Science and Engineering, 2020, A772: 138 819.
- [3] 李承波,赵偲,肖博,等.冷却速率对 7050 铝合金淬火析出行为的影响[J].中国有色金属学报,2024,34(3): 739-750.
- [4] 田洪雷,孙琳,邓运来.断续时效工艺对 7N01 铝合金组织性能的影响[J].轻合金加工技术,2023,51(12): 29-35, 39.
- [5] BOURGEOIS L, DWYER C, WEYLAND M, et al. The magic thicknesses of θ' precipitates in Sn-microalloyed Al-Cu [J]. Acta Materialia, 2012, 60(2): 633-644.
- [6] CHEN Y Q, ZHANG Z Z, CHEN Z, et al. The enhanced theta-prime (θ') precipitation in an Al-Cu alloy with trace Au additions [J]. Acta Materialia, 2017, 125: 340-350.
- [7] GAO Y H, CAO L F, KUANG J, et al. Assembling dual precipitates to improve high-temperature resistance of multi-microalloyed Al-Cu alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 822: 153 629.
- [8] CHEN B A, LIU G, WANG R H, et al. Effect of interfacial solute segregation on ductile fracture of Al-Cu-Sc alloys[J]. Acta Materialia, 2013, 61(5): 1 676-1 690.
- [9] 刘晓涛,白杰,张海涛,等.钎对铝合金组织性能影响的研究现状与趋势[J].铸造技术,2021,42(1): 48-52.
- [10] 闫莹洁,吴名冬,肖代红,等.Fe 含量对 7075 铝合金的显微组织与性能影响[J].特种铸造及有色合金,2024,44(4): 551-558.
- [11] GUILLON O, ELSASSER C, GUTFLEISCH O, et al. Manipulation of matter by electric and magnetic fields: Toward novel synthesis and processing routes of inorganic materials [J]. Materials Today, 2018, 21(5): 527-536.
- [12] GARCIN T, RIVOIRARD S, ELGOYHEN C, et al. Experimental evidence and thermodynamics analysis of high magnetic field effects on the austenite to ferrite transformation temperature in Fe-C-Mn alloys[J]. Acta Materialia, 2010, 58(6): 2 026-2 032.
- [13] ZHANG Y D, HE C S, ZHAO X, et al. New microstructural features occurring during transformation from austenite to ferrite under the kinetic influence of magnetic field in a medium carbon steel[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, 284: 287-293.
- [14] YUAN Z J, LI C J, MA C K, et al. Effect of static magnetic heat treatment on microstructures and mechanical properties of DZ483 alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 631: 86-89.
- [15] WANG K, WANG Q, WANG C J, et al. Formation of aligned two-phase microstructure in Fe-0.25 mass% C alloy under gradient high magnetic fields [J]. Materials Letters, 2008, 62 (10-11): 1 466-1 468.
- [16] LI Y C, CHEN S, ZHU F H, et al. Effect of high magnetic field in combination with high-temperature tempering on microstructures and mechanical properties of GCr15 bearing steel[J]. Metals, 2022, 12(8): 1 293.
- [17] CHOI J Y, FUKUDA T, KAKESHITA T. Effect of magnetic field on isothermal martensitic transformation in a sensitized SUS304 austenitic stainless steel[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 577: S605-S608.
- [18] DONG B Q, HOU T P, WU K M, et al. Low-temperature nano-structured bainite transformation: The effect of magnetic field [J]. Materials Letters, 2019, 240: 66-68.
- [19] WANG F, QIAN D S, HUA L, et al. Effect of high magnetic field on the microstructure evolution and mechanical properties of M50 bearing steel during tempering[J]. Materials Science and Engineering, 2020, A771: 138 623.
- [20] 张东,侯廷平,郑一航,等.强磁场下钢中析出相演变规律研究进展[J].铸造技术,2022,43(8): 615-624.
- [21] MORIKAWA H, SASSA K, ASAI S. Control of precipitating phase alignment and crystal orientation by imposition of a high magnetic field[J]. Materials Transactions, 1998, 39(8): 814-818.
- [22] LI G R, LI Y M, WANG F F, et al. Microstructure and performance of solid TC4 titanium alloy subjected to the high pulsed magnetic field treatment [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 644: 750-756.
- [23] LUO J, LUO H Y, LIU C, et al. Effect of magnetic field on precipitation kinetics of an ultrafine grained Al-Zn-Mg-Cu alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2020, A798: 139 990.
- [24] 丁学锋,刘文辉,黄浩,等.7A62 铝合金在热磁时效后的析出行为与力学性能[J].中国有色金属学报,2024,34(3): 751-762.
- [25] 白庆伟,麻永林,邢淑清,等.可控电磁能(CEME)时效处理下 Al-Zn-Mg-Cu 合金的析出及强化机理研究[J].材料导报,2021,35(20): 20 143-20 148,20 160.
- [26] RIOJA R J, LAUGHLIN D E. The early stages of GP zone formation in naturally aged Al-4Cu alloys[J]. Metallurgical Transactions, 1977, A8: 1 257-1 261.
- [27] SUN W W, ZHU Y M, MARCEAU R, et al. Precipitation strengthening of aluminum alloys by room-temperature cyclic plasticity[J]. Science, 2019, 363: 972-975.
- [28] YUAN Z J, REN Z M, LI C J, et al. Effect of high magnetic field on diffusion behavior of aluminum in Ni-Al alloy[J]. Materials Letters, 2013, 108: 340-342.
- [29] NAKAMICHI S, TSUREKAWA S, MORIZONO Y, et al. Diffusion of carbon and titanium in γ -iron in a magnetic field and a magnetic field gradient [J]. Journal of Materials Science, 2005, 40: 3 191-3 198.
- [30] HUANG C L, WANG J, SHUAI S S, et al. The effect of static magnetic field on solid/liquid interfacial energies of Al-Cu studied by dihedral angle method [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2023, A54(9): 3 400-3 411.
- [31] YUNG K W, LANDECKER P B, VILLANI D D. An analytic solution for the force between two magnetic dipoles [J]. Magnetic and Electrical Separation, 1998, 9(1): 39-52.
- [32] 张思雨,王凯,闫超杰,等.强磁场下第二相颗粒 Ostwald 熟化行为[J].铸造技术,2022,43(9): 780-791.

(编辑:栗万仲)