



Mg-12Gd 合金的时效析出行为

周丽萍¹, 曾小勤^{1,2}, 李德江¹, 杨春明³

- (1. 上海交通大学 材料科学与工程学院, 上海市镁材料及应用工程技术研究中心, 上海 200240;
2. 上海交通大学 材料科学与工程学院, 金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200240;
3. 中国科学院 上海应用物理研究所, 上海 201204)

摘要: 通过同步辐射小角度 X 散射实验方法(SAXS)、透射电镜(TEM)分析和维氏硬度测试, 研究 Mg-12Gd 合金等温时效过程中的析出强化行为。结果表明: Mg-Gd 合金时效过程中主要析出相为 β' 相, 随着时效时间的增加, 析出相的径向尺寸明显增大, 宽度方向增加较小, 逐渐演变成椭圆形。175 °C 时效 180 h 时, 析出相回转半径为 12.9 nm; 随着时效时间延长到 360 h, 析出相长为 13.4 nm; 随着时效时间继续延长, 析出相的尺寸增长速率减慢并最终趋向稳定。透射电镜结果表明: 在 175 °C 时效 296 h 时析出相大部分为 β' 相, 有少量的 β'' 相, β' 相是宽 5 nm, 长 13 nm 的椭圆形, 与小角度 X 散射结果一致。通过在 200 °C 时效 30 min 的散射曲线能看出有析出相析出, 刚析出时回转半径为 2.5 nm, 在 225 °C 时效 30 min 时, 析出相的回转半径为 2.9 nm。

关键词: 镁合金; 小角度 X 散射; 析出相; 回转半径

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

Ageing precipitation behavior of Mg-12Gd alloy

ZHOU Li-ping¹, ZENG Xiao-qin^{1,2}, LI De-jiang¹, YANG Chun-ming³

- (1. Shanghai Engineering Research Centre of Magnesium Materials and Application, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Key State Laboratory of Metal Matrix Composite, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
3. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 201204, China)

Abstract: The precipitation behavior of Mg-12Gd alloys during single aging process was studied by the synchrotron radiation small angle X-ray scattering (SAXS), transmission electron microscopy (TEM) analysis and Vickers hardness test. The results show that main precipitates of Mg-Gd alloy during aging process are β' phases, and with the increase of aging time, the radial size of precipitates increases notably, whereas, the width of the precipitates increases a little. Therefore, the shape of the precipitates gradually changes into oval shape. The gyration radius of the precipitation particles is 12.9 nm after aging at 175 °C for 180 h, and with the increase of aging time to 360 h, the gyration radius of precipitation particles increases to 13.4 nm. And the size of the precipitation particles increases with the increase of aging time and goes to a stable value at last. The TEM results show that main precipitates after aging at 175 °C for 296 h are β' phases with width of 5 nm and length of 13 nm, and a few β'' phases exist, which is consistent with the results of small angle X-ray scattering. Scattering curves of alloys aged at 200 °C for 30 min show that precipitates exist and the gyration radius of precipitation is 2.5 nm, while gyration radius of the precipitates after aging at 225 °C for 30 min is 2.9 nm.

Key words: magnesium alloy; small angle X-ray scattering; precipitation phase; gyration radius

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51171113)

收稿日期: 2014-10-09; 修订日期: 2015-03-18

通信作者: 曾小勤, 教授, 博士; 电话: 021-54742301; 传真: 021-34203730; E-mail: xqzeng@sjtu.edu.cn

近年来,由于能源与环境问题日趋严重,人们对轻质、高强和绿色环保的材料越来越关注。镁合金作为最轻的金属结构材料,具有低密度、高比强度和可循环利用等特点,从而引起了研究人员极大的兴趣^[1]。其中稀土镁合金因其优良的室温和高温力学性能、耐热性以及耐腐蚀性^[2-3],更加受到广泛的关注,特别是在航空、航天、军工等对减重节能有强烈需求的领域应用日益增多。大量研究结果表明,Mg-Gd系合金比商用的Mg-Y-Nd合金具有更优异的高温力学性能^[4-8],因此,研究人员对Mg-Gd合金的析出强化过程进行了大量研究。Mg-Gd系合金的时效析出序列长期被公认为是S.S.S.S.(CPH)→ β'' (DO19)→ β' (BCO)→ β_1 (FCC)→ β (FCC)^[9],XU等^[10-11]通过对Mg-8.2Gd-3.8Y-1.0Zn-0.4Zr合金时效强化行为和相变的系统研究,发现在225℃时效析出进程比在200℃时的快,在200℃时达到的硬度峰值更高; β' 相在晶粒边界处析出物空乏区(PFZ区)析出,继续时效,晶粒随着PFZ区变宽而长大。对于热轧合金,由于应力集中,动态再结晶易发生在晶界处和形变孪晶处。ZHENG等^[12]研究Mg-10Gd-6Y-2Zn-0.6Zr合金的显微组织和力学性能时,认为合金时效强化过程中 β' 相是主要的强化相,对于Mg-Gd二元合金,当Gd的质量分数超过10%时,合金的时效强化作用更强,从而研究Mg-Gd二元合金中的析出过程很有必要。

从统计意义上获得析出相的尺寸、体积分数与时效温度和时间的关系对材料性能的预测非常重要,比较常用的方法为TEM图像分析和小角度X散射分析。ANTION等^[13]通过TEM和SAXS方法研究了Mg-Y-Nd合金在150和250℃的时效析出过程和析出相的长大过程,结果表明:WE43在150℃时效初期析出单一DO19相,随着时间延长,转变成片状 β'' 相和球状 β' 相, β'' 相的DO19结构经过重组后转变成BCO结构的 β' 相,并进一步利用SAXS测定了Mg-Y-Nd中片状析出物的体积分数。FERRAGUT等^[14]利用同步辐射SAXS的方法研究了Mg-Nd-Gd合金在150和200℃时效析出相的尺寸、体积分数和数密度。结果表明:在200℃时效初期,纳米粒子形核并随着溶质原子析出而长大,初期基体中存在空位,激活能为0.78 eV;时效后期,完全依靠溶质原子扩散而长大的激活能为1.16 eV。在200℃时效2h后,析出相的回转半径为2 nm,所占体积分数为1.5%,大于在150℃时效同样时间的析出效果。与传统TEM像分析不同,小角度X射线散射可以获得具有统计意义的析出相定量信息。国内外的研究人员利用SAXS方法对Mg-Y-Nd、Mg-Nd-Gd、Mg-Gd-Zr等合金进行了

研究^[13-17],这些合金早期析出相主要为盘片状。

本文作者利用TEM和同步辐射SAXS研究了Mg-Gd二元合金时效初期的析出过程,得到了析出相回转半径、积分强度与时效温度和时间的关系,为进一步获得与实验结果高度逼近的强化模型积累数据,并对盘片状析出相镁合金在小角度范围内对X射线的散射规律进行初步探索。

1 实验

1.1 实验材料和热处理工艺

实验用Mg-Gd合金是用纯Mg和Mg-90%Gd(质量分数)熔炼而成,最终成分为Mg-12.24%Gd。合金经过500℃、8h固溶淬火,之后分别在175、200和225℃下进行不同时间的等温时效,时效时间为0.5~1024h。

1.2 室温硬度测试和TEM分析

试样的硬度测试在HV-30型维氏硬度计进行,载荷选用49N,载荷加载时间均为15s,硬度值取9个点的平均值。TEM样品采用Struers的Tenupol-5型电解双喷减薄仪进行电解双喷减薄,电解液为4%的高氯酸酒精溶液,双喷电压为45~50V、电流为20~40mA、温度为-40~-50℃,在几分钟之内就可以将直径3mm的试样制备成透射电镜用带孔试样。采用ZEISS的Axio Observer A1型光学显微镜和JEOL的JEM-2100F透射电镜分别分析试样的显微组织和衍射斑点。

1.3 小角度X射线散射研究

小角度X射线散射(SAXS)是指X射线入射束透射在样品上,发生于原光束附近小角度范围内电子对X射线的漫散射现象,物质内部几纳米到几百纳米尺度范围内电子密度的起伏是产生这种散射效应的根本原因^[18]。小角度X射线散射实验在中国科学院上海应用物理研究所上海光源同步辐射小角度X射线站(BL16B1)进行。同步辐射是速度接近光速的带电粒子在作曲线运动时沿切线方向发出的电磁辐射,由于同步辐射与常规X射线相比具有亮度高、准直性好、波长连续可调等优点,因此,可以大大提高实验的灵敏度、分辨率和效率。

样品的尺寸为直径12mm、厚度100 μ m,样品处的光源能量范围为5~20keV。当光源能量为10keV时,能量分辨率为 6×10^{-4} ,光子通量为 $5\times 10^{10}\text{S}^{-1}$,

光斑尺寸为 $0.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$, 工作波长 λ 为 0.124 nm , 角分辨率为 $4 \times 10^{-4}\text{ rad}$ 。

2 结果与讨论

2.1 时效硬化曲线

为了揭示时效温度和时效时间对 Mg-12Gd 合金强度的影响, 对经过 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 、 8 h 固溶处理的 Mg-12Gd 合金分别在 175 、 200 和 $225\text{ }^\circ\text{C}$ 下进行不同时间的等温时效。图 1 所示为 T4 态样品在 3 个温度时效的硬化曲线。由图 1 可知, 3 个不同温度的时效硬化曲线形状极为相似, 都是在时效初期阶段硬度上升, 到达峰值后硬度下降。经 $175\text{ }^\circ\text{C}$ 时效的硬度峰值出现最晚, 峰时效时间为 420 h , 峰值硬度最高, 达到 123.4 HV ; 在 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 时效的峰时效时间为 60 h , 硬度值为 117.4 HV ; 而在 $225\text{ }^\circ\text{C}$ 时效的硬度峰值出现最早, 峰时效时间为 16 h , 硬度值为 116.6 HV , 峰值硬度最低。其中, 在 175 和 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 时效 10 h 的起始阶段, 硬度上升增值一样, 而在 $225\text{ }^\circ\text{C}$ 时效 10 h 时, 硬度值已接近峰值。从 200 和 $225\text{ }^\circ\text{C}$ 的时效硬化曲线能看出存在一段硬度值几乎不变的孕育期, 持续时间分别为 60 和 12 h 。

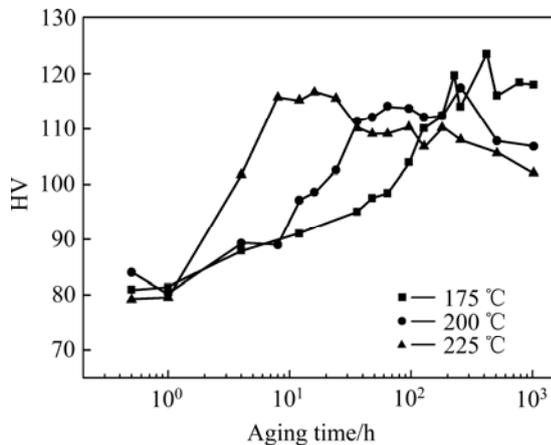


图 1 铸造 T4 态 Mg-12Gd 样品的 175 、 200 、 $225\text{ }^\circ\text{C}$ 时效硬化曲线

Fig. 1 Aging curves of cast-T4 Mg-12Gd samples aged at 175 , 200 and $225\text{ }^\circ\text{C}$

2.2 基于 TEM 的合金析出相分析

对于选区衍射花样, 由于与电子束交互作用的 α -Mg 的体积分数多数情况下比析出相的大, 所以基体 α -Mg 的衍射斑点一般都大而亮, 析出相的衍射斑点一般都小而弱。图 2(a)所示为在 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 固溶处理 8 h 后

的 Mg-12Gd 合金的金相照片。图 2(b)所示为 Mg-12Gd 合金在 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 固溶 8 h 样品 $(11\bar{2}0)_{\text{Mg}}$ 轴 TEM 像及其对应的衍射花样。从图 2 可看出, 固溶处理后的试样晶粒尺寸约为 $200\text{ }\mu\text{m}$, 其中弥散分布着未溶解的第二相。比较不同固溶温度和保温时间的第二相, 可以发现它们非常稳定, 并在随后的时效处理中也难以溶解, 存在于镁基体内部及晶界处。

从图 2(b)可以看出, 基体内分布着长 $1\text{ }\mu\text{m}$ 左右的条状相, 能谱分析发现 Gd 含量较高。从图 2(c)可看

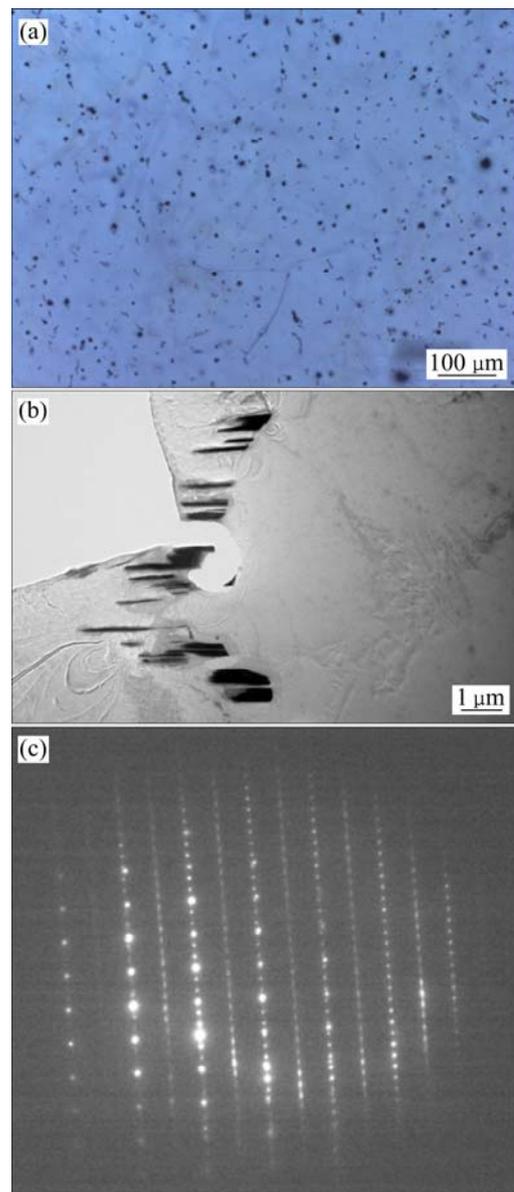


图 2 Mg-12Gd 合金在 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 固溶 8 h 的金相组织照片和 $(11\bar{2}0)_{\text{Mg}}$ 轴的 TEM 像及对应的衍射花样

Fig. 2 Metallograph of Mg-12Gd alloy solid solution heat treated at $500\text{ }^\circ\text{C}$ for 8 h (a) and TEM image taken along $(11\bar{2}0)_{\text{Mg}}$ zone axis (b) and corresponding SAED pattern (c)

出,此相对X射线衍射有影响,通过提高固溶温度也不能消除,所以后面SAXS分析里当作背底扣除。

图3所示为Mg-12Gd合金在175℃时效296h欠时效的HRTEM像及对应选区的衍射花样,电子束入射方向大约平行于 $\langle 0001 \rangle_{\text{Mg}}$ 轴。从图3(a)能看出,Mg-12Gd合金在175℃时效296h时,析出相大部分为 β' 相,有少量的 β'' 相, β' 相呈宽5nm、长13nm的椭圆形状。从图3(b)能看到主斑点之间有复杂附加斑点,此时,析出物为 β' 和 β'' 相共存,且主要为 β' 相。

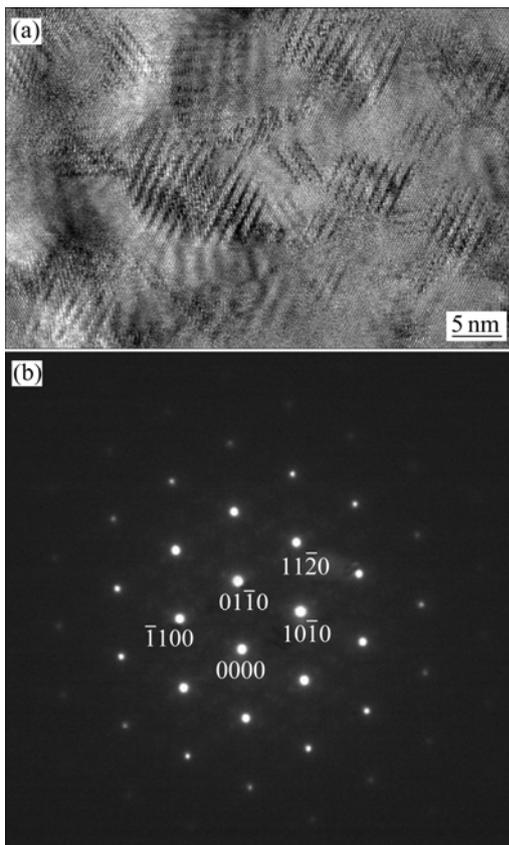


图3 在175℃时效296h Mg-12Gd合金样品的 $\langle 0001 \rangle_{\text{Mg}}$ 轴HRTEM像及对应选区的衍射花样

Fig. 3 HRTEM image taken along $\langle 0001 \rangle_{\text{Mg}}$ axis(a) and corresponding SAED pattern(b) of Mg-12Gd alloy sample aged at 175 °C for 296 h

图4所示为Mg-12Gd合金在200℃时效20h欠时效的TEM像及对应的衍射花样,电子束入射方向大约平行于 $\langle 0001 \rangle_{\text{Mg}}$ 轴。从图4(b)能清楚看到,主斑点之间弥散分布的附加斑点,在镁基体 $\langle 0001 \rangle_{\text{Mg}}$ 正六角斑点中依原方位内嵌另一套小正六角漫散斑,小斑点的亮度和大小已经没有明显差别,表明此时析出相主要是 β' 相,且随着时效时间继续延长, β' 相不断长大。从图4(a)可以看出,许多形状不规则的析出相密

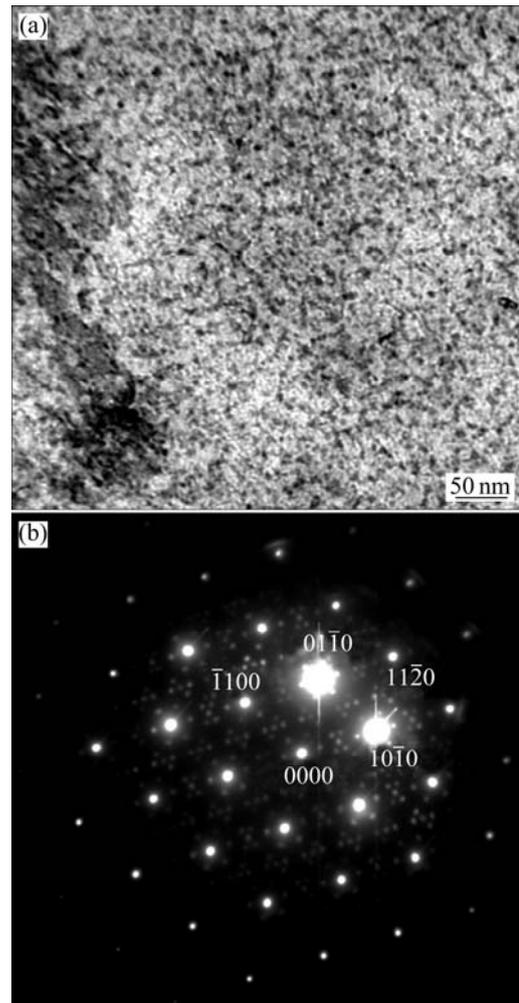


图4 在200℃时效20h Mg-12Gd合金样品 $\langle 0001 \rangle_{\text{Mg}}$ 轴的TEM像及对应的衍射花样

Fig. 4 TEM image taken along $\langle 0001 \rangle_{\text{Mg}}$ axis(a) and corresponding SAED pattern(b) of Mg-12Gd alloy sample aged at 200 °C for 20 h

集、均匀地分布在基体当中,尺寸为15.7nm左右,可以推断这是合金硬度上升很快的主要原因。

图5所示为Mg-12Gd合金在225℃时效30min(时效初期)的TEM像、HRTEM像和对应的衍射花样,电子束入射方向大约平行于 $\langle 0001 \rangle_{\text{Mg}}$ 轴。从图5(c)可以清楚看到,在 $1/2\{10\bar{1}0\}_{\text{Mg}}$ 处有弥散的斑点,这些附加的衍射斑点符合DO19结构的衍射特征。从图5(a)可以看出,明场像衬度均一,没有观察到明显的析出相特征,可能是由于析出相尺寸的大小,低倍下观察不到。从图5(b)可以看到很明显的明暗衬度差别,镁基体的晶格条纹中均匀分布着许多暗点,表明已经有析出结构的生成。这种亮暗相间的析出结构根据衍射斑点可确定为DO19结构的 β'' 相。

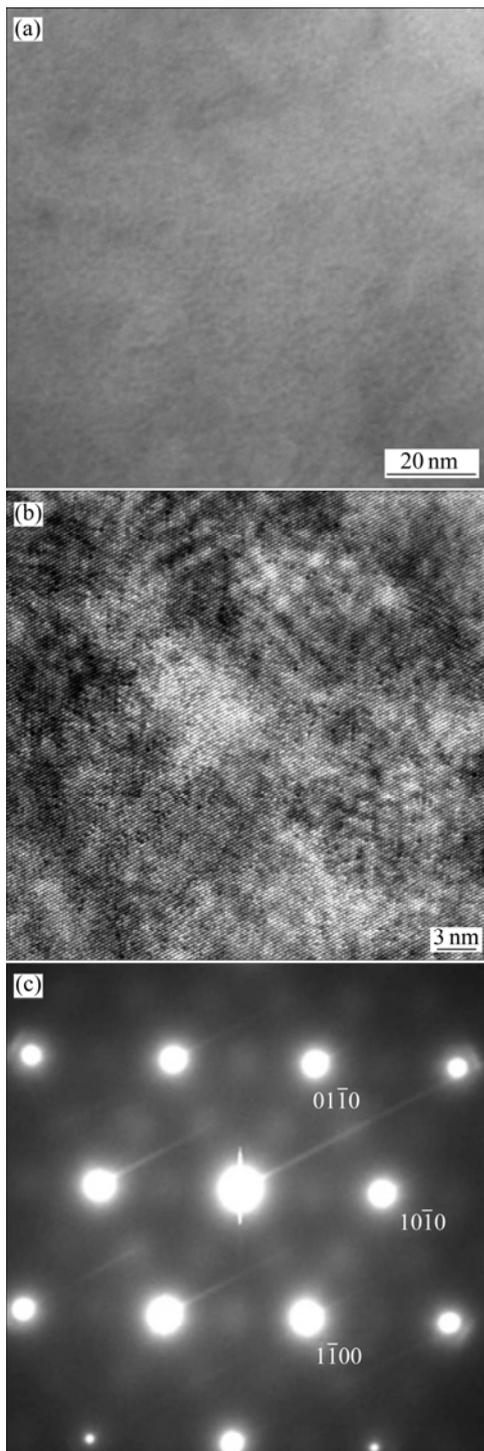


图5 在 225 °C 时效 30 min Mg-12Gd 合金样品的 $\langle 0001 \rangle_{\text{Mg}}$ 轴 TEM 像、HRTEM 像及对应的衍射花样

Fig. 5 TEM image(a) and HRTEM image(b) taken along $\langle 0001 \rangle_{\text{Mg}}$ axis and corresponding SEAD pattern(c) of Mg-12Gd alloy sample aged at 225 °C for 30 min

2.3 合金的小角度 X 散射分析

2.3.1 典型时效条件下的 SAXS 强度图

图 6(a)和(b)所示分别为 Mg-12Gd 合金在 175 °C

时效 180 和 360 h 的 SAXS 强度图。图 6(c)和(d)所示分别为 Mg-12Gd 合金在 200 °C 时效 30 min 和 8 h 的 SAXS 强度图。不同的颜色代表不同的光强, 中心强度最大, 随着与中心距离的增大, 光强减小。在时效初期 SAXS 强度图呈圆形, 说明这时的析出物近似于球形; 随着时效时间的延长, 析出相的形状效应逐渐增强, 析出相逐渐从圆形变成了椭圆形。从图 6(c)可看出, 析出相对 X 射线的散射存在取向效应, 并随着时效时间延长到 8 h 一直演变成径向明显增大而厚度变化较小的椭圆形。

2.3.2 时效条件对 SAXS 回转半径的影响

利用 FIT2D 软件在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 上对散射强度图进行积分, 得到由于析出相和基体之间的电子密度差产生的 SAXS 曲线。图 7 所示为 Mg-12Gd 合金在 200 °C 时效 30 min 和 8 h 的强度散射曲线和 Guinier 曲线。在图 7 中, $I(q)$ 为相对散射强度; q 为散射向量, $q=4\pi\sin\theta/\lambda$; 2θ 为散射角; λ 为入射波波长。

根据 Guinier 近似, 在小角度范围内, 散射强度满足以下关系:

$$I(q) = I_e N n^2 \exp(-R_g^2 q^2 / 3) \quad (1)$$

式中: I_e 为一个电子的散射强度; n 为一个粒子中的总电子数; N 为 X 射线照射体积内的总粒子数; R_g 为粒子的回转半径。做图 6(c)和(d)对应的 Guinier 曲线 $\ln I(q) - q^2$ 如图 7(b)所示, 令 Guinier 曲线低角部分直线斜率为 α , 则回转半径为

$$R_g = \sqrt{3\alpha} \quad (2)$$

回转半径的变化趋势可以等效为析出相粒子尺寸的变化趋势。

从图 7 可知, 在 200 °C 时效 30 min 的散射曲线就能看出有析出相析出, 刚析出时, 回转半径为 2.5 nm。图 8 所示为 Mg-12Gd 合金在 225 °C 时效 30 min 和 6 h 的 Guinier 曲线。由图 8 可看出, 在 225 °C 时效 30 min 时, 有析出相粒子析出, 析出相的回转半径为 2.9 nm。

图 9(a)和(b)所示分别为 Mg-12Gd 合金在 175 °C 时效 180 和 360 h 后合金 SAXS 的 $I(q)q^2 - q$ 曲线和 Guinier 曲线。从图 9(a)可看出, 随着时效时间的延长, q 峰值越来越小, 也就是析出相尺寸越来越大, 且随着时效时间的继续延长, 析出相尺寸长大速率减慢。从图 9(b)可看出, 在 175 °C 时效 180 h 时, 析出相回转半径为 12.9 nm, 随着时效时间延长到 360 h, 析出

相长大为 13.4 nm。从图 3(a)中观察到了共存的 β'' 相和 β' 相, 且主要析出相为 β' 相, 测量出主要析出相长为 13 nm、宽为 5 nm, 介于小角散射研究结果 175 °C

时效 180 h 的尺寸 12.9 nm 和时效 360 h 的尺寸 13.4 nm 之间。因此, TEM 的观察与 SAXS 得到的时效析出相规律基本一致, 表明 SAXS 结果比较可靠。

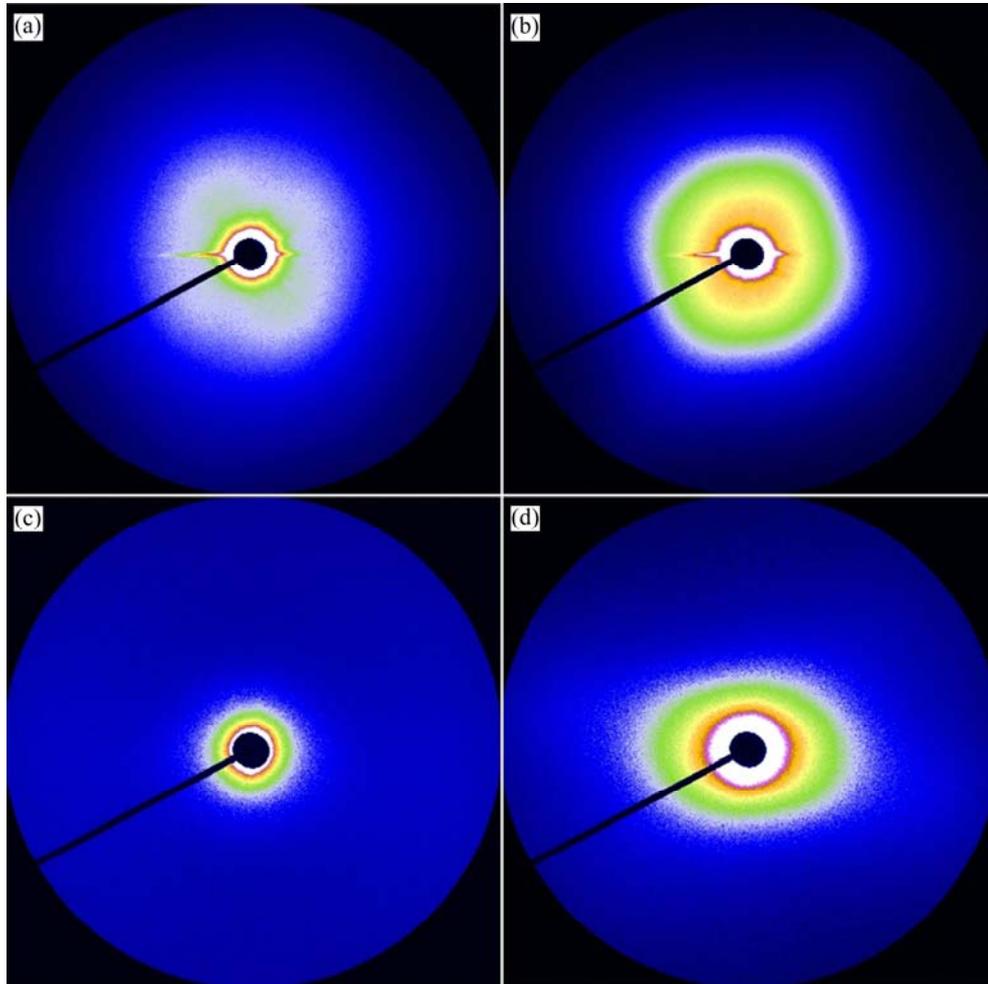


图 6 经不同条件热处理后合金的 SAXS 结果

Fig. 6 SAXS results of alloys after different heat treatments: (a) (175 °C, 180 h); (b) (175 °C, 360 h); (c) (200 °C, 30 min); (d) (200 °C, 8 h)

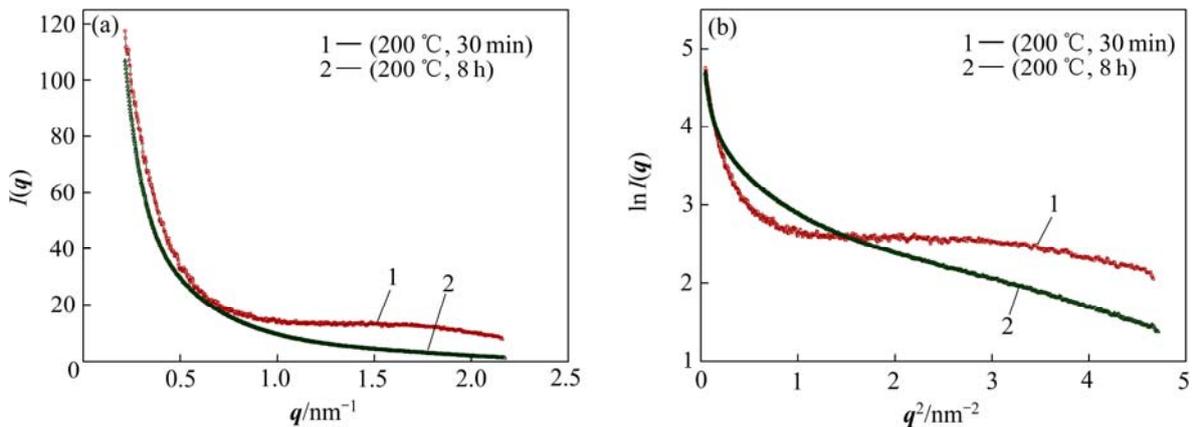


图 7 Mg-12Gd 合金在 200 °C 时效 30 min 和 8 h 的散射曲线和 Guinier 曲线

Fig. 7 Scattering(a) and Guinier(b) curves of Mg-12Gd alloy after aging at 200 °C for 30 min and 8 h

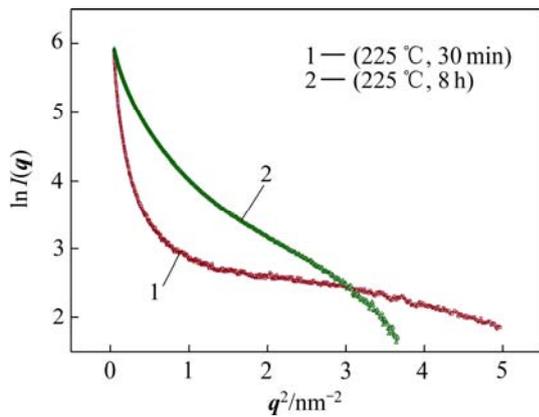


图 8 Mg-12Gd 合金在 225 °C 时效 30 min 和 6 h 时效的 Guinier 曲线

Fig. 8 Guinier curves of Mg-12Gd alloy after aging at 225 °C for 30 min and 6 h

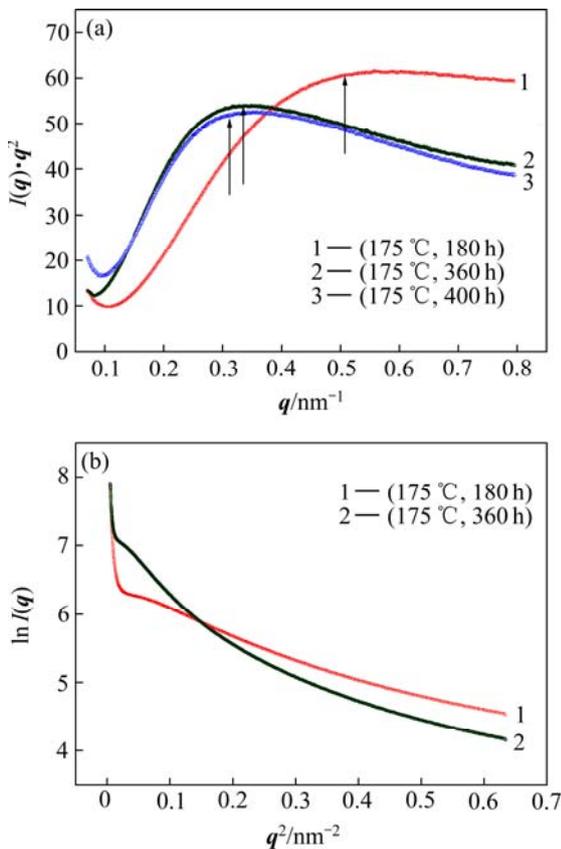


图 9 在 175 °C 时效 180 和 360 h 后 Mg-12Gd 合金的 SAXS $I(q) \cdot q^2 - q$ 曲线和 Guinier 曲线

Fig. 9 $I(q) \cdot q^2 - q$ SAXS profiles(a) and Guinier curves(b) of Mg-12Gd alloy after aging at 175 °C for different 180 and 360 h

3 结论

1) Mg-Gd 合金时效过程中主要析出相为 β'' 相, 随

着时效时间的延长, 析出相的径向尺寸明显增大, 宽度方向变化较小, 逐渐演变成为椭圆形。

2) 在 175 °C 时效 180 h 时, 析出相回转半径为 12.9 nm; 随着时效时间延长到 360 h, 析出相半径增加到 13.4 nm; 且随着时效时间继续延长, 析出相尺寸增长速率减慢并趋向稳定。

3) TEM 分析结果表明: Mg-12Gd 合金在欠时效阶段, 时效温度较低时 β'' 相存在时间较长, 当时效温度较高时, 只在时效时间较短的阶段存在 β'' 相; 随着时效时间延长, 析出相主要是 β'' 相, 得到的析出相尺寸与 SAXS 结果一致。

4) 通过 200 °C 时效 30 min 的散射曲线就能看出, 有析出相析出, 刚析出时, 析出相的回转半径为 2.5 nm; 而在 225 °C 时效 30 min 时, 析出相的回转半径为 2.9 nm。

REFERENCES

- [1] 李露冉, 孙 威, 刘林林. 合金元素对 Mg-Gd 系合金组织及时效硬化行为的影响[J]. 稀有金属, 2012, 36(1): 19-24.
LI Lu-ran, SUN Wei, LIU Lin-lin. Effect of alloying elements on microstructure and aging hardening behaviors of Mg-Gd based alloys[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2012, 36(1): 19-24.
- [2] NIE J F, GAO X, ZHU S M. Enhanced age hardening response and creep resistance of Mg-Gd alloys containing Zn[J]. Scripta Materialia, 2005, 53: 1049-1053.
- [3] 何兰强, 马鸣龙, 李兴刚, 李永军, 张 奎. Mg-9.0Y-3.0MM-0.6Zr 合金均匀化热处理研究[J]. 稀有金属, 2011, 35(2): 164-169.
HE Lan-qiang, MA Ming-long, LI Xing-gang, LI Yong-jun, ZHANG Kui. Homogenization heat treatment of Mg-9.0Y-3.0MM-0.6Zr alloy[J]. Chinese Journal of Rare Alloys, 2011, 35(2): 164-169.
- [4] ANYANWU I A, KAMADO S, KOJIMA Y. Aging characteristics and high temperature tensile properties of Mg-Gd-Y-Zr alloys[J]. Materials Transactions-JIM, 2001, 42(7): 1206-1211.
- [5] ANYANWU I A, KAMADO S, KOJIMA Y. Creep properties of Mg-Gd-Y-Zr alloys[J]. Materials Transactions, 2001, 42(7): 1212-1218.
- [6] MORDIKE B L. Creep-resistant magnesium alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 324: 103-112.
- [7] HE S M, ZENG X Q, PENG L M, GAO X, NIE J F, DING W J. Precipitation in a Mg-10Gd-3Y-0.42Zr(wt%) alloy during isothermal ageing at 250 °C [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2006, 421: 309-313.
- [8] NIE J F, MUDDLE B C. Characterization of strengthening precipitate phases in a Mg-Y-Nd alloy[J]. Acta Materialia, 2000,

- 48: 1691–1703.
- [9] 汤伊金, 章桢彦, 靳丽, 董杰, 丁文江. Mg-Gd系合金时效析出研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(1): 8–24.
TANG Yi-jin, ZHANG Zhen-yan, JIN Li, DONG Jie, DING Wen-jiang. Research progress on ageing precipitation of Mg-Gd alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(1): 8–24.
- [10] XU C, XU S W, ZHENG M Y, WU K, WANG E D, KAMADO S, WANG G J, LÜ X Y. Microstructures and mechanical properties of high-strength Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy sheets processed by severe hot rolling[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 524: 46–52.
- [11] XU C, ZHENG M Y, WU K, WANG E D, FAN G H, XU S W, KAMADO S, LIU X D, WANG G J, LÜ X Y. Effect of ageing treatment on the precipitation behaviour of Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 550: 50–56.
- [12] ZHENG L, LIU C M, WAN Y C, YANG P W, SHU X. Microstructures and mechanical properties of Mg-10Gd 6Y-2Zn-0.6Zr(wt.%) alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509: 8832–8839.
- [13] ANTON C, DONNADIEU P, PERRARD F, DESCHAMPS A, TASSIN C, PISCH A. Hardening precipitation in a Mg-4Y-3RE alloy[J]. Acta Materialia, 2003, 51: 5335–5348.
- [14] FERRAGUT R, MOIA F, FIORI F, LUSSANA D, RIONTINO G. Small-angle X-ray scattering study of the early stages of precipitation in a Mg-Nd-Gd (EV31) alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 495: 408–411.
- [15] APPS P J, KARIMZADEH H, KING J F, LORIMER G W. precipitation reactions in magnesium-rare earth alloys containing yttrium, gadolinium or dysprosium[J]. Scripta Materialia, 2003, 48(8): 1023–1028.
- [16] VOSTRY P, SMOLA B, STULIKOVA I, von BUCH F, MORDIKE B L. Microstructure evolution in isochronally heat treated Mg-Gd alloys[J]. Physica Status Solidi A, 1999, 175: 491–500.
- [17] GAO X, HE S M, ZENG X Q, PENG L M, DING W J, NIE J F. Microstructure evolution in a Mg-15Gd-0.5Zr alloy during isothermal aging at 250 °C [J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 431(1/2): 322–327.
- [18] 张建波, 张永安, 朱宝宏, 王锋, 郑毅, 熊柏青, 王玉柱. 时效析出过程中 Al-4.74Cu-0.50Mg-0.30Ag 合金的小角度 X 散射研究[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(4): 708–713.
ZHANG Jian-bo, ZHANG Yong-an, ZHU Bao-hong, WANG Feng, ZHENG Yi, XIONG Bai-qing, WANG Yu-zhu. Small angle X-ray scattering study of Al-4.74Cu-0.50Mg-0.30Ag alloys during aging process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(4): 708–713.

(编辑 王超)