

退火温度对 6016 铝合金板材组织和性能的影响

王 丹^{1,2}, 宋文城^{1,2}, 徐 升^{1,2}, 唐玉龙^{1,2}, 史丹丹^{1,2}

(1. 航鑫材料科技有限公司, 山东 龙口 265713; 2. 国家铝合金压力加工工程技术研究中心, 山东 龙口 265713)

摘要: 以 6016 铝合金冷轧板材为研究对象, 分别在 100、200、300、350、400 和 500 °C 下进行退火处理, 研究退火温度对 6016 铝合金的硬度和电导率的影响, 并分析试样的微观组织, 以得到 6016 铝合金冷轧板材退火的最佳工艺。结果表明: 当退火温度为 100 和 200 °C 时, 材料的显微组织无变化, 仍为轧制形成的伸长的纤维状冷轧组织, 但晶粒内部的空位和位错已经发生变化, 硬度和电导率较轧制状态发生了变化; 当退火温度为 300 °C 时, 材料开始发生再结晶, 晶界处形成亚晶, 硬度继续下降, 电导率值达到最高; 当退火温度为 350 °C 时, 板材组织已完全再结晶, 显微组织为均匀的再结晶组织, 合金的硬度降到最低。综合分析结果表明: 在 350 °C 保温 2 h 为较为理想的退火工艺。

关键词: 6016 铝合金; 退火; 显微组织; 维氏硬度; 电导率; 位错

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.11.024

中图分类号: TG230.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 11-0175-07

Effect of annealing temperature on microstructure and properties of 6016 aluminum alloy sheet

Wang Dan^{1,2}, Song Wencheng^{1,2}, Xu Sheng^{1,2}, Tang Yulong^{1,2}, Shi Dandan^{1,2}

(1. Hangxin Material Technology Co., Ltd., Longkou 265713, China; 2. National Aluminum Alloy Pressure Processing Engineering Technology Research Center, Longkou 265713, China)

Abstract: For 6016 aluminum alloy cold-rolled sheet, the annealing treatment was conducted at 100, 200, 300, 350, 400 and 500 °C, respectively, and the influences of annealing temperature on the hardness and electrical conductivity of 6016 aluminum alloy were studied. Then, the microstructure of sample was analyzed to obtain the optimal annealing process for 6016 aluminum alloy cold-rolled sheet. The results show that when the annealing temperatures are 100 and 200 °C, the microstructure of material does not change and remains as the elongated fibrous cold-rolled structure formed in rolling, but the vacancies and dislocations inside the grains change, and the hardness and electrical conductivity change compared to the rolled state. When the annealing temperature is 300 °C, the recrystallization of material begins, the subgrains are formed at the grain boundaries, the hardness continues to decrease, and the electrical conductivity value reaches the highest. When the annealing temperature is 350 °C, the complete recrystallization of microstructure in sheet has been completed, the microstructure is a uniform recrystallized structure, and the hardness of alloy is reduced to the minimum. Thus, the results of comprehensive analysis show that the heat treatment at 350 °C for 2 h is an ideal annealing process.

Key words: 6016 aluminum alloy; annealing; microstructure; Vickers hardness; electrical conductivity; dislocation

在有色金属材料中, 由于铝合金具有高的比强度和比刚度等许多优良的特性, 成为现代化工业中不可缺少的材料, 日前, 铝及铝合金在汽车车身上的应用日趋广泛^[1], 且铝在地壳中的蕴藏量占首位。金属材料在经过轧制、锻造、挤压等一系列塑性变形后, 为达到改变材料组织和性能的目的, 最常用的热处理手段是退火、固溶处理及时效。李辉等^[2-3]研究了预时效温度、预时效时间, 以及烤漆

硬化处理工艺对 6016 合金组织和性能的影响, 确定了最优的工艺参数。李翔等^[4]研究了温变形对汽车车身用 6061 铝合金自然时效及力学性能的影响。刘晓腾等^[5]研究了中间退火对 Al-Mg-Si 系铝合金汽车板组织和性能的影响。对于 6 系冷轧板材, 轧制之后会产生加工硬化, 随着冷变形量的增加, 强度性能增加, 塑性降低, 为了恢复与提高金属塑性、便于后续工序的顺利进行, 需要对材料进行退火处理^[6-9]。

冷变形金属在加热时先后经历了回复、再结晶和晶粒长大 3 个阶段。在再结晶阶段, 从组织上看, 是以产生无畸变的新晶核, 然后在变形金属基体内长大, 形成大角度晶界的新晶粒为标志的^[10-12]; 从

收稿日期: 2024-07-01; 修订日期: 2024-09-29

作者简介: 王 丹 (1985-), 女, 学士, 工程师

E-mail: 358975646@qq.com

性能上看,是以力学性能(如强度、硬度)和物理性能(如电导率、储存变形能的释放)产生急剧变化为标志的^[13-15]。本文以 6016 铝合金冷轧板为研究对象,主要研究不同退火温度阶段 6016 铝合金冷轧板的硬度、电导率、晶粒度、位错密度等的变化规律,了解这些过程的组织与性能变化,为进一步控制和改善轧制态铝合金的性能和组织具有重要意义。

1 试验材料及方法

1.1 轧制工艺

采用铸造的厚度为 8.5 mm 的 6016 铝合金板材,经冷轧退火轧制成厚度为 0.8 mm 的板材,6016 铝合金冷轧板的工艺为:热轧来料→冷轧→电火花毛化轧制(Electro-discharge Texturing, EDT)→连退→横切。冷轧道次为:3.0 mm→2.0 mm→退火→1.6 mm→1.05 mm→0.84 mm→0.8 mm(EDT)→连退化学成分。

1.2 化学成分

试验用 6016 铝合金冷轧板材的名义化学成分见表 1。

表 1 6016 铝合金冷轧板材的化学成分(%,质量分数)

Table 1 Chemical compositions of 6016 aluminum alloy cold-rolled sheet(%, mass fraction)

Mg	Si	Fe	Mn	Cu	Cr	Ti	Zn	Al
0.37	1.08	0.18	0.13	0.08	0.03	0.10	0.10	余量

1.3 试验方法

选用厚度为 1.6 mm 的 6016 铝合金冷轧板材,分别在 100、200、300、350、400 和 500 ℃ 下进行退火,保温时间为 2 h。在不同退火板材纵向截面上截取显微试样,然后进行锯切、机械研磨、抛光及阳极化制膜,将制膜后的样品在 ZEISS Imager M2m 金相显微镜偏振光下观察并拍照。将退火后的冷轧态 6016 铝合金试样进行精密切割锯切→粗细砂纸研磨→冲孔仪冲孔→电解双喷,最后制成直径为 $\Phi 3$ mm 的、中间仅有十几纳米厚度的透射电镜试样。试样在 JEM-2100F 透射电镜下进行晶界位错线、析出相观察。

对经退火处理的冷轧铝合金板材进行硬度测试。对试样进行锯切、机械研磨、抛光后,进行显微硬度测试,测试所用设备为 INNOVATEST FALCON 500,加载应力为 0.98 N,加载时间为 20 s,每个试样测 3 点并取平均值。采用 FOERSTER 电导率仪对不

同退火温度下的试样进行电导率的测试,测试前后进行标块的校准,每个试样测试 3 点并取平均值。

2 试验结果与讨论

2.1 退火温度对微观组织的影响

图 1 为 6016 铝合金冷轧板经不同退火温度后的显微组织形貌。未经退火的板材的显微组织为晶粒及晶间物质(残留相)沿轧制方向拉长,是典型的纤维组织形貌,由图 1 可知,经 100 ℃×2 h、200 ℃×2 h 退火处理的板材(图 1a 与图 1b)虽然经过了退火处理,但仍处于退火过程中的回复阶段,从显微组织上看几乎看不出任何变化,晶粒仍为伸长的纤维状冷轧组织。经 300 ℃×2 h 退火处理的板材,可以看到在变形的晶粒内部开始沿晶界长出新的小晶粒,如图 1c 所示,随着退火温度的升高,退火温度达到 350 ℃ 时(图 1d),显微组织已经看不到塑性变形后的纤维状颗粒,组织已经全部改组为新的等轴晶粒。说明在 300 ℃ 退火,材料开始发生再结晶,350 ℃ 时材料已经发生完全再结晶。当退火温度继续升高至 400 和 500 ℃ 时(图 1e 与图 1f),由于材料中添加了一些合金元素,形成颗粒很小的第二相并钉扎住晶界,阻碍晶界的移动,新的晶粒未逐步相互吞并长大,晶粒达到一个较为稳定的尺寸^[5]。

采用透射电子显微镜(Transmission Electron Microscope, TEM)进一步观察 6016 铝合金试样,从图 2a 可以看出,板材经过冷轧变形以后,透射组织内出现明显的位错胞,位错胞壁处的位错缠结密度很大,位错胞的内部几乎无位错。经 100 ℃×2 h、200 ℃×2 h 退火处理后,位错获得能量而产生运动,刃型位错之间形成空位,透射组织表现为位错线数量略有减少,如图 2a 和图 2b 所示。随着退火温度的升高,开始聚集规律排布,当退火温度达到 300 ℃ 时(图 2c),刃型位错在滑移面上规律排布,形成位错墙,将大晶粒分割为许多小晶粒,形成亚晶。退火温度继续升高,达到 350 ℃ 时,材料已完全再结晶,如图 2d 所示,300 ℃ 退火形成的亚晶通过亚晶界的迁移而逐渐长大,亚晶粒内的位错密度则进一步下降。当退火温度达到 400 ℃ 时(图 2e),透射组织也未见明显变化,大角度晶界已完全形成,再结晶结束。当退火温度达到 500 ℃(图 2f),合金组织中部分晶粒由于合金元素的加入,形成颗粒很小的第二相而钉扎住了晶界,并未出现二次再结

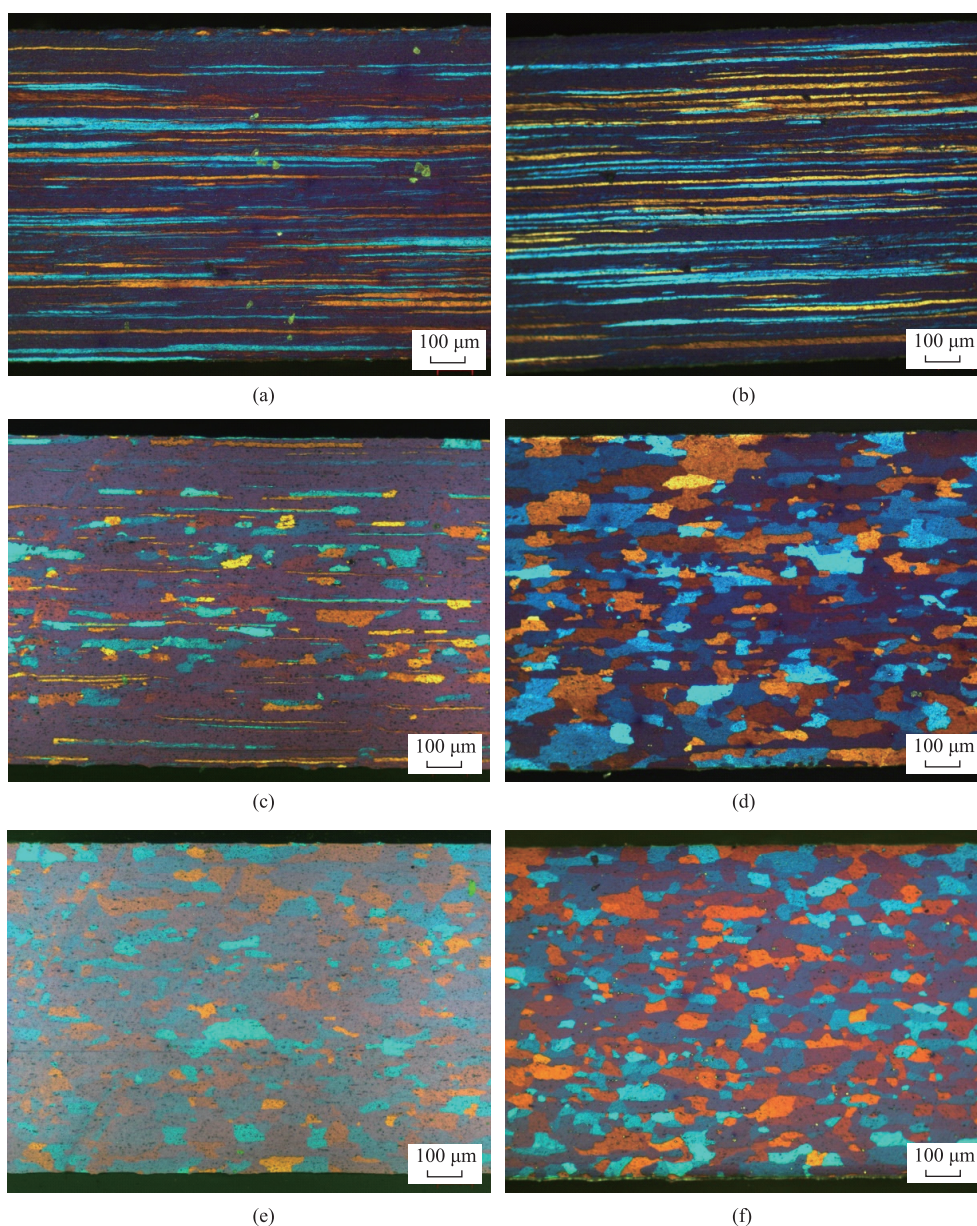


图 1 不同温度退火处理后的 6016 铝合金试样的显微组织

(a) 100 °C (b) 200 °C (c) 300 °C (d) 350 °C (e) 400 °C (f) 500 °C

Fig. 1 Microstructures of 6016 aluminum alloy specimens after annealing treatment at different temperatures

晶的异常长大。综合对比，确定 350 °C 为 6016 铝合金的最佳退火温度。

2.2 退火温度对合金性能的影响

图 3 为冷轧态 6016 铝合金试样经不同温度退火 2 h 后的硬度，可以发现，冷轧态金属的硬度较高，这是因为 6016 铝合金经轧制变形后，位错密度增大并发生交互作用，在晶粒内部形成晶格畸变，导致加工硬化，如图 2a 所示。在退火温度为 100 ~ 200 °C 时，材料处于回复阶段，硬度值略有下降，但数值变化很小。这是因为退火温度较低时，冷变形金属主要发生低温回复，试样内部的位错密度并

未出现明显的减少，主要涉及点缺陷的运动，点缺陷运动的结果使变形产生的空位密度显著降低，而对位错影响不大^[16]，如图 2b 所示，硬度对点缺陷的变化不敏感，所以这时 6016 铝合金的硬度变化数值较小。在 300 °C 时，随着退火温度的升高，硬度值下降明显，这是因为 300 °C 下材料开始发生再结晶，如图 2d 所示，晶体中的位错缠结变成规律排列的刃型位错墙，位错强化作用消失，再结晶阶段材料的硬度与强度均显著下降，塑性大大提高。退火温度升至 350 °C 时，硬度值降到最低。随着退火温度升高至 400 °C，硬度随退火温度的升高而增大。当退

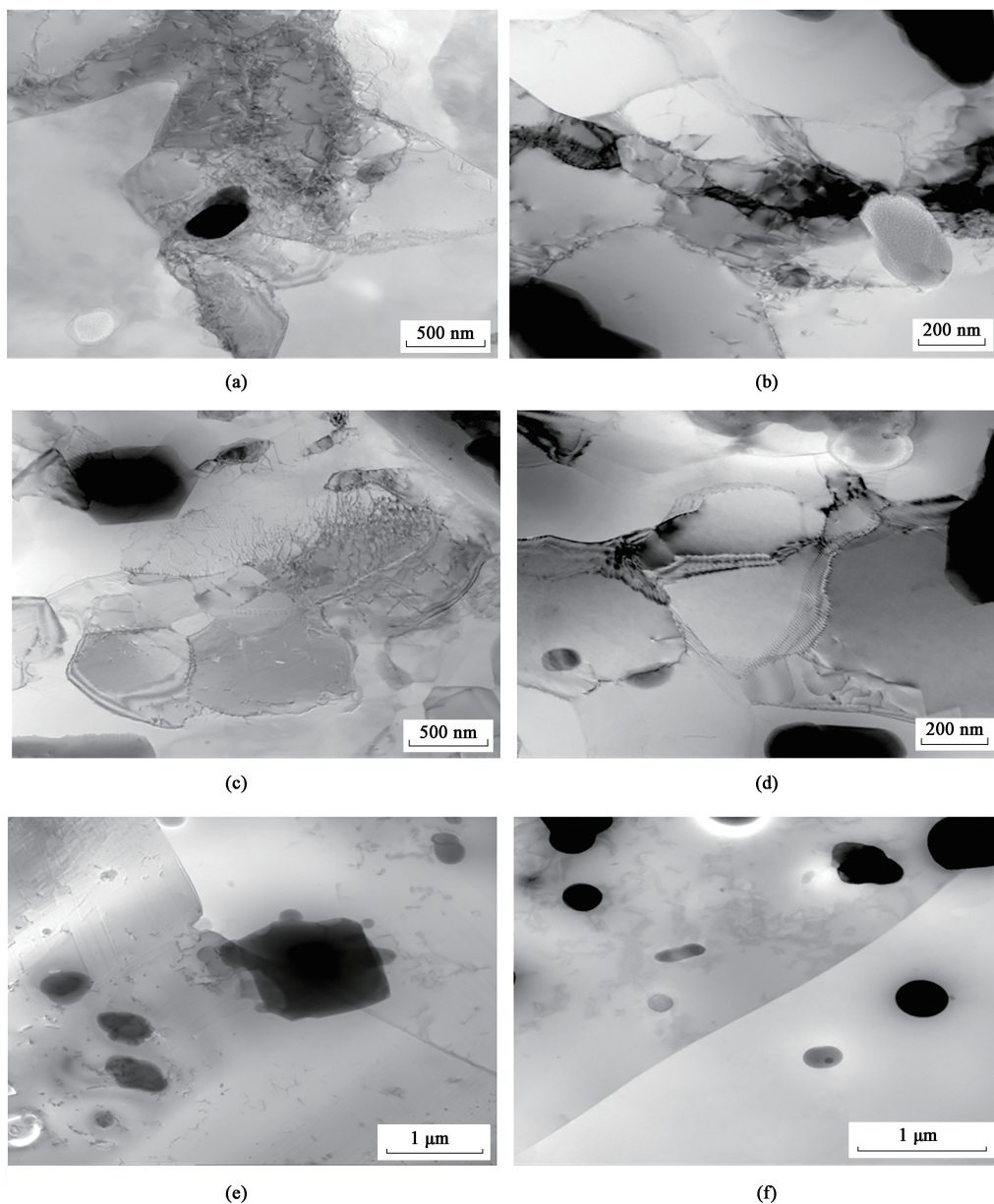


图 2 不同温度退火处理后的 6016 铝合金试样的 TEM 形貌

(a) 100 °C (b) 200 °C (c) 300 °C (d) 350 °C (e) 400 °C (f) 500 °C

Fig. 2 TEM morphologies of 6016 aluminum alloy specimens after annealing treatment at different temperatures

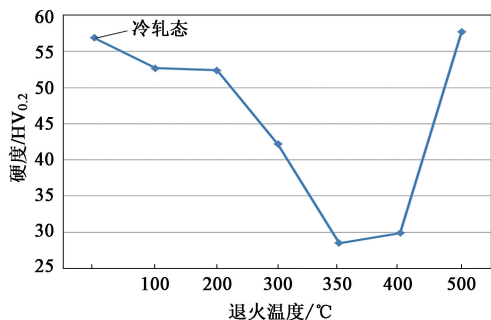


图 3 不同退火温度下 6016 铝合金的硬度

Fig. 3 Hardnesses of 6016 aluminum alloy under different annealing temperatures

火温度升高至 500 °C 时, 硬度显著增加几乎达到未退火时的硬度值, 这是因为 Mg_2Si 相溶入基体而发生固溶强化, 从而导致硬度迅速升高。

图 4 为冷轧态 6016 铝合金试样经不同温度退火 2 h 的电导率变化, 可以看出电导率的变化趋势刚好与硬度的变化趋势相反。在 100~200 °C 材料未发生再结晶的低温退火阶段, 主要表现为空位的消失, 空位又是影响电子迁移的很重要的因素, 所以, 电导率呈升高的趋势。退火使所有的合金元素析出, 形成粗大的析出物, 因此, 材料在退火条件时的电导率最大, 当退火温度达到 500 °C, 随着 Mg_2Si 相

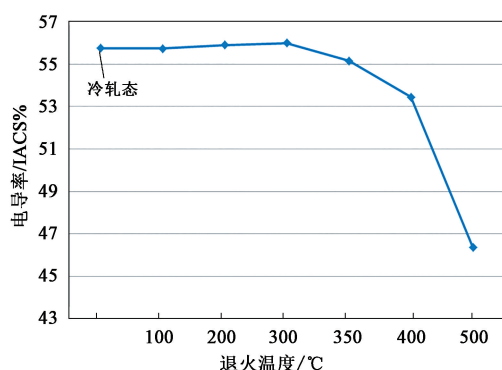


图 4 不同退火温度下 6016 铝合金的电导率

Fig. 4 Electrical conductivities of 6016 aluminum alloy under different annealing temperatures

的溶解,电导率急剧下降。

2.3 退火温度对晶面取向的影响

图 5 为不同温度退火处理 6016 铝合金试样的 X 射线衍射 (X-ray Diffraction, XRD) 图谱。金属材料在轧制变形的过程中,晶体的滑移面会转动,使滑移层逐渐转向与拉力轴平行,这就形成了晶体的择优取向, X 射线衍射图谱表现为某个晶面的衍射峰强度较高,如图 5a 和图 5b 所示,当回复处理温度在 200 °C 以下时,沿 (200) 晶面取向的晶粒会向 (220) 晶面、(311) 晶面转动,使这两个晶面的衍射峰强度略有升高。随着退火温度的升高,300 °C 时试样开始发生再结晶,大量沿 (200) 晶面取向的晶粒会向 (220) 晶面、(311) 晶面转动, X 射线衍射图谱上这两个晶面的衍射峰强度大幅升高 (图 5c)。当退火温度升高至 400 和 500 °C 时,虽然显微组织上看不到明显的晶粒的长大,但从 XRD 图谱可以看出,继续加热使晶体向 (220) 晶面、(311) 晶面发生了转动 (图 5e 与图 5f)。通过以上试验可以知道,冷轧之后的退火处理只会影响 6016 铝合金的衍射峰的强度,而对衍射峰位置的影响不大。

3 结论

(1) 对冷轧板材进行退火处理,在回复与再结晶阶段 6016 铝合金的电导率均会提高,而且在 350 °C 进行热处理对再结晶阶段的电导率的影响更大。

(2) 对冷轧板材进行退火处理,在回复与再结晶阶段均会改变 6016 铝合金特定晶面的衍射峰强度,但是随着退火温度的升高,对 350 °C 下再结晶开始阶段之后衍射峰强度的影响更大。

(3) 对冷轧板材进行退火处理,在回复阶段,硬度数值略有降低,350 °C 下再结晶之后 6016 铝合金硬度大幅降低。

(4) 对微观组织分析可知,轧制之后的组织表现为明显的纤维组织,回复处理之后组织变化不明显,350 °C 下再结晶之后组织变为细小的等轴晶粒,晶粒细化效果明显。

(5) 随着退火温度的升高,6016 铝合金冷轧板材的硬度先降低再升高,电导率的变化趋势与硬度相反。热处理对于大部分铝合金的硬度和电导率均会有影响,但使用接触检测器测量硬度的效率较低,对于大型复杂工件有困难,并且会对样品表面造成损害,如果材料的合金已知,可采用流涡电导率的测试代替硬度测试,为热处理与否提供便捷、无损的反馈。

(6) 6016 铝合金冷轧板材的最佳退火温度为 350 °C,保温时间为 2 h,此时材料硬度最低,合金已完全再结晶。

参考文献:

- [1] 张新明,邓运来,张勇,等. 高强铝合金的发展及其材料的制备加工技术 [J]. 金属学报, 2015, 51 (5): 257-271.
Zhang X M, Deng Y L, Zhang Y, et al. Development of high strength aluminum alloys and processing techniques for the materials [J]. Acta Metallica Sinica, 2015, 51 (5): 257-271.
- [2] 李辉,张华,祝贞凤,等. 预时效时间对汽车用 6016 铝合金组织与性能的影响 [J]. 金属热处理, 2016, 41 (12): 149-152.
Li H, Zhang H, Zhu Z F, et al. Influence of pre-aging time on microstructure and mechanical properties of 6016 aluminum alloy for automobile [J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41 (12): 149-152.
- [3] 李辉,李铸铁,晋宏炎,等. 预时效及烤漆硬化处理对 6016 铝合金微观组织及硬度的影响 [J]. 金属热处理, 2017, 42 (11): 148-151.
Li H, Li Z T, Jin H Y, et al. Influence of pre-aging and bake hardening on microstructure and hardness of 6016 aluminum alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42 (11): 148-151.
- [4] 李翔,唐建国,张新明,等. 温变形对汽车车身用 6061 铝合金自然时效及力学性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2016, 26 (1): 1-6.
Li X, Tang J G, Zhang X M, et al. Effect of temperature deformation on natural aging and mechanical properties of 6061 aluminum alloy for automobile body [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26 (1): 1-6.
- [5] 刘晓腾,赵佳蕾,孙有政,等. 中间退火对 Al-Mg-Si 系铝合金汽车板组织和性能的影响 [J]. 金属热处理, 2020, 45

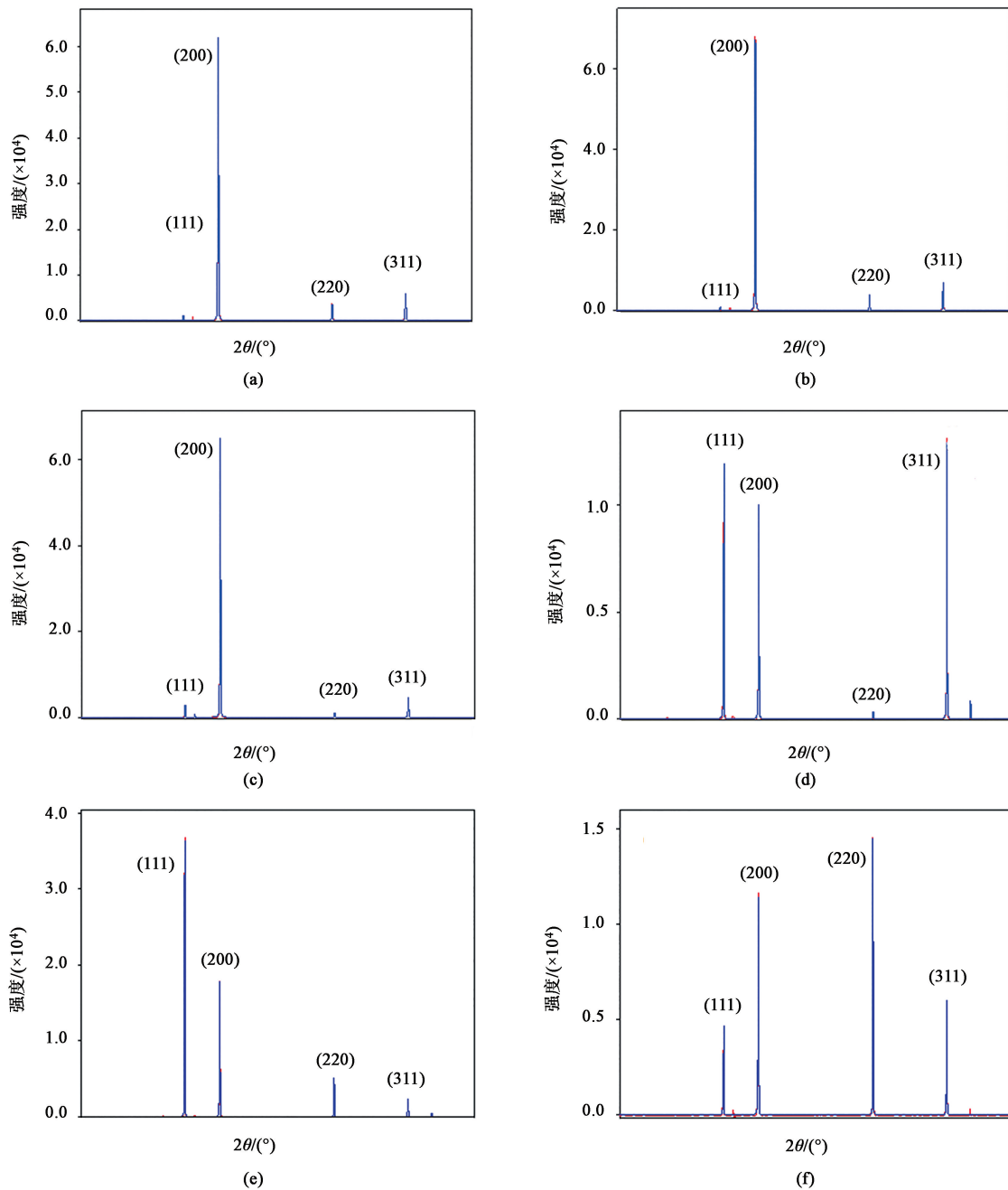


图 5 不同温度退火处理后 6016 铝合金试样的 XRD 图谱

(a) 100 °C (b) 200 °C (c) 300 °C (d) 350 °C (e) 400 °C (f) 500 °C

Fig. 5 XRD patterns of 6016 aluminum alloy specimens after annealing treatment at different temperatures

(10): 119-124.

Liu X T, Zhao J L, Sun Y Z, et al. Effect of intermediate annealing on microstructure and properties of Al-Mg-Si aluminum alloy automotive sheet [J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45 (10): 119-124.

[6] 贾海龙, 张海涛, 艾峥嵘, 等. 退火温度对深冷轧制 6063 铝合金组织性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2013, 42 (22): 159-166.

Jia H L, Zhang H T, Ai Z R, et al. Effect of annealing tempera-

ture on microstructure and properties of 6063 aluminum alloy by cryogenic rolling [J]. Hot Working Technology, 2013, 42 (22): 159-166.

[7] 杨丽娟, 吴红艳, 高冠军, 等. 深冷轧制对 AA6069 铝合金组织和性能的影响 [J]. 轻合金加工技术, 2018, 46 (1): 14-19.

Yang L J, Wu H Y, Gao G J, et al. Effect of cryogenic rolling on microstructure and properties of AA6069 aluminum alloy [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2018, 46 (1): 14-19.

- [8] 黄元春, 成再春, 肖政兵, 等. 退火温度对冷轧态 5754 铝合金板材组织与性能的影响 [J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2017, 45 (2): 24-28.
Huang Y C, Cheng Z C, Xiao Z B, et al. Effect of annealing temperature on microstructure and properties of cold-rolled 5754 aluminum alloy sheet [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2017, 45 (2): 24-28.
- [9] 陈才, 孔诚, 王名川, 等. 厚度比与退火温度对铜/铝冷轧板冲压性能与界面结合强度的影响 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (7): 82-92.
Chen C, Kong C, Wang M C, et al. Influences of thickness ratio and annealing temperature on stamping properties and interfacial bonding strength for copper/aluminum cold rolled plate [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (7): 82-92.
- [10] 岳峰丽, 赵子瑄, 邓偲瀛, 等. 低温退火对 C5210 合金带材折弯性能的影响 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (7): 192-201.
Yue F L, Zhao Z X, Deng S Y, et al. Influence of low temperature annealing on bending properties for C5210 alloy strip [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (7): 192-201.
- [11] Saito T, Marioara D C, Røyset J, et al. The effects of quench rate and pre-deformation on precipitation hardening in Al-Mg-Si alloys with different Cu amounts [J]. Materials Science & Engineering: A, 2014, 609: 72-79.
- [12] Yan L Z, Zhang Y A, Li X W, et al. Effect of Zn addition on microstructure and mechanical properties of an Al-Mg-Si alloy [J]. Progress in Nature Science Materials Interinational, 2014, 24: 97-100.
- [13] 王孟君, 任杰, 黄电源, 等. 预时效对汽车用 2000 系铝合金板材性能的影响 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2008, 39 (8): 755-759.
Wang M J, Ren J, Huang D Y, et al. Effect of pre-aging on properties of 2000 series aluminum alloy sheet for automobile [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2008, 39 (8): 755-759.
- [14] 李祥平. 铜钢复合板材界面结构及性能研究 [D]. 沈阳: 沈阳大学, 2015.
Li X P. Study on Interface Structure and Properties of Copper-steel Composite Sheet [D]. Shenyang: Shenyang University, 2015.
- [15] Wang X F, Guo M X, Chapuis A, et al. The dependence of final microstructure, texture evolution and mechanical properties of Al-MgSi-Cu alloy sheets on the intermediate annealing [J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 633: 46-58.
- [16] Wang X F, Guo M X, Cao Li Y, et al. Influence of thermo mechanical processing on microstructure, texture evolution and mechanical properties of Al-Mg-Si-Cu alloy sheets [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25: 1752-1762.

欢迎订阅《锻压技术》杂志 (月刊)

国内外公开发行, 全国各地邮局均可订阅, 逾期未订上者可与编辑部联系邮购

《锻压技术》杂志 1958 年创刊, 中国机械工业联合会主管、中国机械总院集团北京机电研究所有限公司和中国机械工程学会塑性工程分会主办。本刊是全国锻压行业会刊, 全国中文核心期刊, 被国内外多个著名检索系统收录。突出技术内容, 注重技术和信息相结合, 全面反映锻压行业的技术进步和发展趋势。

主要栏目: 综述、锻造、板料成形、管材成形、特种成形、装备与成套技术、模具、摩擦与润滑、加热与热处理、测试技术、节能技术、材料与成形性能、理论与实验研究、计算机应用、技术交流、标准化、行业信息等。

读者对象: 大专院校的师生, 金属塑性成形(锻压)领域的科研、设计、生产部门的工程技术人员以及中等以上文化程度的工人等。

本刊为月刊, 每月 25 日出版, 大 16 开本, 256 页。统一刊号: CN11-1942/TG。邮发代号: 2-322。

(一) 购买期刊: ● 每册定价: 25.00 元; ● 年定价: 300.00 元。

(二) 购买合订本: ● 1991-2011 年合订本 (每本包含全年 1-6 期杂志): 110 元/本;

● 2012-2013 年合订本 (每本包含全年 1-6 期杂志): 140 元/本;

● 2014-2018 年合订本 (上册) (包含上半年 1-6 期杂志)、2014-2018 年合订本 (下册) (包含下半年 7-12 期杂志): 180 元/本。

直接通过编辑部订阅者, 请与杂志发行部负责人林玉彤联系。并按编辑部地址汇款, 款到后我们会定期寄给您刊物。

邮局汇款信息:

地址: 北京市海淀区学清路 18 号北京机电研究所有限公司 709 室

收款人: 《锻压技术》编辑部

联系人: 林玉彤 电话: 010-62920652-801

邮编: 100083

附言处: 请注明“订阅《锻压技术》”

E-mail: fst_linyutong@163.com

《锻压技术》编辑部