

文章编号:1673-9469(2020)04-0094-05

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2020.04.015

动态时效对 Al-Cu-Mg-Ag 合金组织与力学性能的影响

王路路, 刘晓艳*, 刘彦鹏, 杨鸿儒, 王艳琴, 郑立允

(河北工程大学 材料科学与工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 对 Al-Cu-Mg-Ag 新型耐热铝合金进行预时效+中温轧制变形+终时效的动态时效工艺处理, 采用硬度测试、拉伸性能测试, 结合金相显微组织分析和透射电子显微分析, 探究动态时效对其力学性能与微观组织的影响。结果表明: 动态时效能够提高合金的时效硬化速率, 随着变形量的增大, 合金的峰时效时间逐渐减小, 峰值硬度逐渐增大。动态时效能够改变晶粒形貌, 随着变形量的增大, 晶粒的纵横比增大, 位错数量增多, 强化相数量增多尺寸减小, 使得合金强度随着变形量的增大而逐渐增大, 但伸长率逐渐减小。变形量为 50% 合金的强度最高, 抗拉强度和屈服强度最大, 分别为 527.4 MPa 和 467.0 MPa, 伸长率保持在较高值 9.1%。

关键词: 新型耐热铝合金; 动态时效; 形变强化; 力学性能; 微观组织

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

Effect of Dynamic Aging on Microstructure and Mechanical Properties of Al-Cu-Mg-Ag Alloy

WANG Lulu, LIU Xiaoyan*, LIU Yanpeng, YANG Hongru, WANG Yanqin, ZHENG Liyun

(College of Materials Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

Abstract: The dynamic aging process of Al-Cu-Mg-Ag new heat-resistant aluminum alloy was subjected to pre-aging, rolling deformation at intermediate temperature and final aging. The influence of the dynamic aging on the mechanical properties and microstructure were explored by the hardness test, tensile performance test, and combined with metallographic microstructure analysis and transmission electronic microscopy (TEM) analysis. The results show that dynamic aging can increase the age hardening rate of the alloy. As the amount of deformation increases, the peak aging time of the alloy decreases and the peak hardness increases gradually. Dynamic aging can change the morphology of the grains. The aspect ratio of the grains increases with the increase of the deformation amount, more dislocations generate and the number of the strengthening precipitations with finer size increases, leading to the larger strength of the alloy. The sample with a 50% deformation has the largest tensile strength and yield strength of 527.4 MPa and 467.0 respectively, and its elongation remains at a relatively high value of 9.1%.

Key words: new heat-resistant aluminum alloy; dynamic aging; deformation strengthening; mechanical properties; microstructure

Al-Cu-Mg 系铝合金具有较好的力学性能, 被广泛地应用于航空航天领域, 但当使用的温度超过 100 °C 时, 该合金的主要强化相 θ' 粗化, 性能降低^[1]。近年来有研究发现在 Al-Cu-Mg 合金中加入较少的 Ag 元素, 合金中会析出一种更稳定的强

化相 Ω , 合金的高温性能大幅度提高^[2]。Al-Cu-Mg-Ag 合金迅速发展起来, 成为一种新型的高强度耐热铝合金, 引起了材料研究者们的关注^[3-4]。

热机械变形是近年来为提高金属材料综合性能一种新型热机械处理 (Thermo-mechanical treat-

收稿日期: 2020-07-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51601053); 河北省自然科学基金资助项目 (E2017402039, E2017402139); 河北省高等学校科学技术研究项目 (ZD2018213); 邯郸市科学技术研究与发展计划项目 (19422111008-20)

作者简介: 王路路 (1995-), 女, 河北邯郸人, 硕士研究生, 从事高性能金属材料方向的研究。

* 通讯作者: 刘晓艳 (1980-), 女, 山东青岛人, 博士, 教授, 从事高性能金属材料与纳米材料方向的研究。

ment, TMT) 工艺。通过 TMT 处理后材料不仅能够提高力学性能和抗腐蚀性能,还可以减化生产流程、降低成本,创造可观的经济效益,因此在世界各国受到极大地重视并得到飞速的发展^[5]。陈瑞强等^[6]研究不同形变热处理制度对 Al-Cu-Mg-Ag 合金薄板组织与高温性能的影响,在正交试验下确定了最佳形变热处理制度为 515 °C 下固溶 20 min,预拉伸 4%,人工时效 185 °C×6 h。采用该形变热处理工艺,合金可获得高温持久拉伸强度 ≥ 200 MPa、高温短时拉伸强度 ≥ 285 MPa、室温抗拉强度 ≥ 473 MPa、室温屈服强度 ≥ 428 MPa、延伸率 $\geq 11.3\%$ 的良好综合性能,满足了当前航空工业对于铝合金高温持久强度的要求。刘平等^[7]发现采用合适的时效+中温轧制变形后,随着变形量的增加,晶内析出相发生变形并向晶界移动,导致无沉淀析出带 (precipitation free zone, PFZ) 变窄,抗晶间腐蚀性能得到提高,但是,沿着轧制方向晶粒变细小又会降低合金的抗剥落腐蚀性能。由此可见热机械变形处理可以在一定程度上改善铝合金的综合性能,对其研究具有重要的工程价值。

本文设计了一种新型热机械变形处理工艺,其工艺为预时效+中温轧制变形+终时效,也可称为动态时效。以 Al-Cu-Mg-Ag 新型耐热铝合金为研究对象,探索动态时效对合金的微观组织与力学性能的影响,并对其机理进行探讨,这可以为开发 Al-Cu-Mg-Ag 合金和其他时效硬化铝合金提供依据。

1 实验材料与方法

实验合金为 Al-5.3Cu-0.8Mg-0.5Ag-0.3Mn-0.15Zr (wt. %), 在电阻炉中用石墨坩埚熔炼,用水冷铜模浇铸。铸锭在 515 °C 下均匀化 24 h 后,热轧至 6 mm,经过中间退火后,冷轧至 2 mm。试样在 515 °C 下固溶处理 1.5 h,然后在 185 °C 下预时效 1 h,之后经过轧制变形,最后在 150 °C 下再时效,每隔 2 h 取样测试硬度以得到时效硬化曲线图。获得峰值时效时间后,对板材进行峰时效处理,然后进行力学性能测试和微观分析。热处理过程如图 1 所示。传统时效未变形,变形量为 0,编号 1 号,动态时效变形量为 30%、50% 的试样编号分别为 2 号、3 号。

硬度测试在 TMVS-IS 型电子显微硬度计上进行,施加载荷时间为 10 s,加载载荷为 0.2 kg。拉伸试验用万能电子试验机 YT8000-A,拉伸速率为

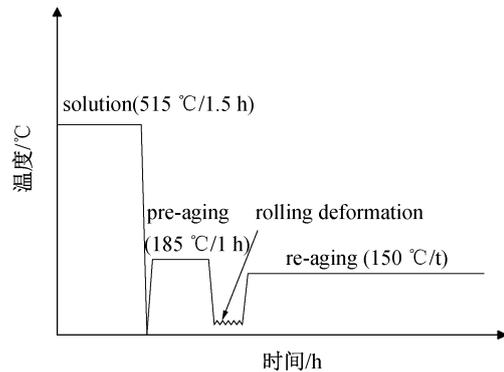


图 1 热处理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the heat treatment employed in this study

2 mm/s。用 Olympus DSX500 光学显微镜观察样品的金相组织。TEM 样品通过双喷电解减薄制备,工作电流设定为 75 mA,工作电压设定为 20 V。然后在 TECNAI G2F30 透射电子显微镜下观察,加速电压设置为 300 kV。

2 实验结果

2.1 动态时效对 Al-Cu-Mg-Ag 合金时效硬化行为的影响

图 2 给出了 Al-Cu-Mg-Ag 合金的时效硬化曲线。淬火后样品的硬度约为 111 HV,并在预时效后达到 156 HV。通过轧制处理,由于位错的存在,初始硬度急剧增加。2 号样品为 170 HV,3 号样品为 174 HV。随后在终时效过程中,合金硬度随着时效时间的增加而逐渐增加。随着变形量的增加,合金峰值时效时间缩短,峰值硬度增加。对于 1 号、2 号和 3 号样品,峰值时效时间分别为 15、10 和 8 h,峰值硬度分别为 170、181 和 186 HV。由此可见,动态时效能够提高合金的时效硬化速率,缩短峰值时效时间,提高合金的峰值硬度。

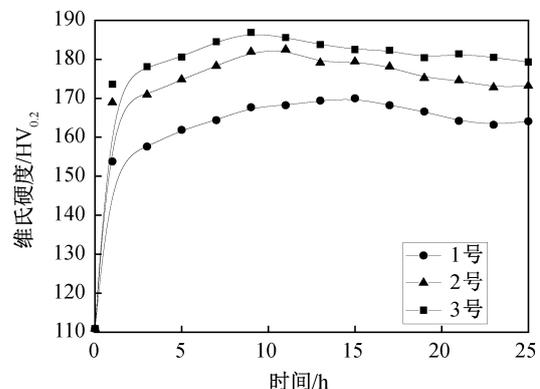


图 2 时效硬化曲线图

Fig. 2 Age hardening curves of the samples

2.2 动态时效对 Al-Cu-Mg-Ag 合金力学性能的影响

对不同变形量动态时效峰值时效试样进行拉伸性能测试,结果列于表1。可以看出,时效过程中的轧制变形对 Al-Cu-Mg-Ag 合金的拉伸性能起重要作用,轧制变形能够提高合金的强度。随着变形量的增加,拉伸强度和屈服强度均增加,而伸长率降低。3号样品具有最高的抗拉强度 527.4 MPa 和屈服强度 467.0 MPa,而伸长率仍保持较高值,为 9.1%。

表1 抗拉强度数据

Tab.1 Tensile test results for Al-Cu-Mg-Ag alloys

样品	拉伸强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
1号	497.5	425.8	13.8
2号	518.9	465.0	11.3
3号	527.4	467.0	9.1

2.3 显微组织

图3给出了 Al-Cu-Mg-Ag 合金的金相组织。从图3(a)可以看出1号样品中晶粒沿着轧制方向分布,发生了部分再结晶(图中箭头所示)。图3(b)中,经轧制后2号样品中可以明显看到晶粒沿着轧制方向拉长,随着变形量进一步增加到50%,晶粒拉长的趋势更加明显,纵横比变大,可以观察到明显的纤维结构如图3(c)所示。

图4给出了峰时效下 Al-Cu-Mg-Ag 合金的TEM图像,其中图4(a)、图4(c)、图4(e)电子束沿近 $\langle 110 \rangle_{\alpha}$ 方向入射。在1号样品中有大量的析出相并均匀分布(图4(a))。如图4(a)所示,基体中均匀分布着大、小两种尺寸的 Ω 相,大尺寸的 Ω 相在预时效过程中析出,并在终时效过程中继续长大,与此同时基体中仍有小尺寸 Ω 相不断析出。在2号(图4(c))和3号(图4(e))样品中,经过动态时效处理后这两种析出相的尺寸减小、数量增加。3号样品中析出了大量尺寸细小的 Ω 相,弥散分布在基体中。并且在2号和3号样品中都出现了大量的位错(图4(c)和图4(f)中箭头所示)。在1号样品中只有少量的 θ' 相,而在2、3号样品中均没有观察到 θ' 相。形变也会对晶界结构产生影响。在图4(b)中可观察到当样品变形量为0时有明显的无沉淀区析出带(PFZ)。PFZ是某些时效铝合金中的常见现象^[8-10]。当变形量为30%时,在图4(d)可观察到PFZ宽度明显变窄;当变形量增加到50%时,PFZ几乎消失(图4(f))。

实验结果表明,轧制变形会显著影响动态时

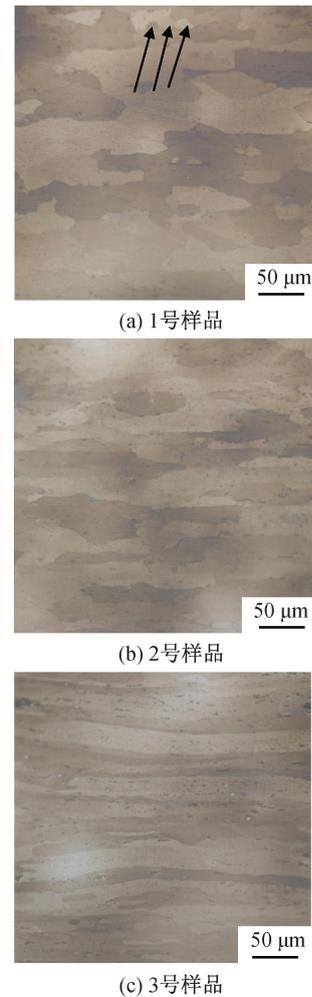


图3 Al-Cu-Mg-Ag 合金的金相组织

Fig.3 Metallographic structure for Al-Cu-Mg-Ag alloy

效 Al-Cu-Mg-Ag 合金的组织 and 力学性能。随着变形量的增加,晶粒沿着轧制方向伸长,晶粒内和晶界处的微观结构也随之改变。Al-Cu-Mg-Ag 合金的强化相为 Ω 相和少量 θ' 相^[11]。这两种相都具有相同的化学成分 Al_2Cu ,它们在时效过程中竞争析出。微量元素Mg或Mg和Ag可以加速 Ω 相的析出^[12-13]。文献[14]表明,位错的存在可以加速 θ' 相的析出,同时抑制了 Ω 相的析出。但是,在本文中有与上述文献不同的实验现象产生。与1号样品相比,2、3号样品中的小尺寸 Ω 相的析出相更多,且在其中观察不到 θ' 相(图4),这可能与不同的热处理过程有关。在其他文献^[15]中,热处理过程是固溶处理+变形+时效处理,而在本课题中是预时效+变形+再时效处理。预时效过程对 Al-Cu-Mg-Ag 合金的组织 and 力学性能有着重要的作用。根据课题组早期研究^[15],在预时效过程中(185℃/1h),一些细小的 Ω 相沿 $\{111\}_{\alpha}$ 晶面析出。这些强化相可在变形过程中钉扎位错并使晶

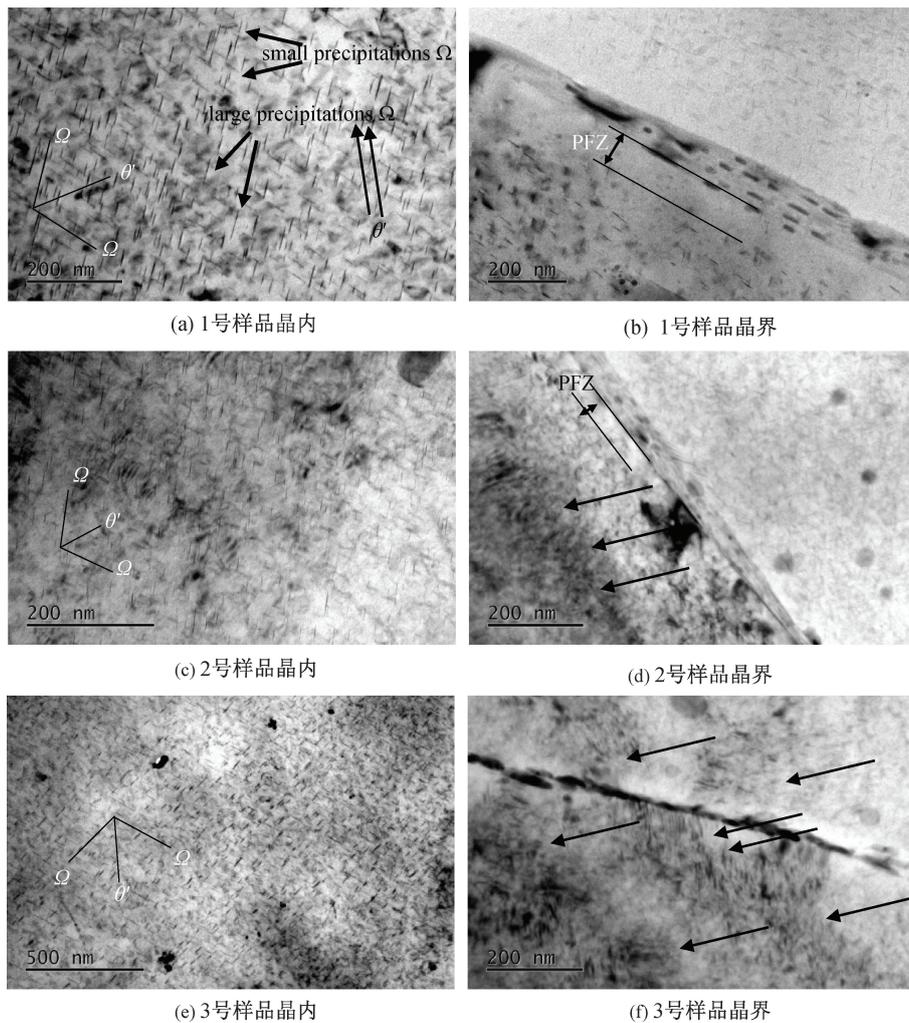


图4 峰值时效 Al-Cu-Mg-Ag 合金的 TEM 图

Fig. 4 TEM images for the peak aged Al-Cu-Mg-Ag alloy

粒沿特定方向旋转,有利于后续时效处理过程中 Ω 相的析出。如图4(c)和图4(e)所示,在终时效之后, Ω 相沿 $\{111\}$ α 晶面析出,并且没有观察到 θ' 相。均匀分布的 Ω 相加上大量的位错使2、3号样品的强度显著升高,并随变形量的增加而增加。在无变形样品中,晶界处粗大的第二相的析出需要消耗大量的溶质原子,在晶界附近形成PFZ。轧制变形后,一些位错出现在晶粒内和晶界附近。位错也可以吸收附近的空位,这些空位有利于原子的扩散从而促进强化相的形成,晶界附近也有强化相析出,导致PFZ变窄。

3 结论

1) 动态时效能够提高 Al-Cu-Mg-Ag 合金的时效硬化速率,随着变形量的增大,合金的峰值时效时间逐渐减小,硬度逐渐增大。

2) 动态时效能够提高合金的抗拉强度,随着

变形量的增大,合金的强度逐渐增大,但伸长率逐渐减小,变形量为50%合金的强度最高,抗拉强度为527.4 MPa,屈服强度为467.0 MPa,伸长率保持在较高值9.1%。

3) 动态时效能够促进 Ω 相的析出,随着变形量的强化相数量增多,尺寸减小,强化效果增强。随着变形量的增大,晶粒沿轧制方向拉长趋势更加明显,纵横比增大,亚结构增多,位错数量增多,也同样会提高合金强度。

参考文献:

- [1] POLMEAR I J, COUPER M J. Design and Development of an Experimental Wrought Aluminum Alloy for Use at Elevated Temperatures [J]. Metallurgical Transactions A, 1988, 19(4): 1027-1035.
- [2] SONG M, CHEN K H, HUANG L P. Effects of Ag Addition on Mechanical Properties and Microstructures of Al-Cu-Mg alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society

- ty of China, 2006, 16(4): 766-771.
- [3] 刘志义, 李云涛, 刘延斌. Al-Cu-Mg-Ag 合金析出相的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(12): 1905-1915.
- [4] 夏卿坤, 余日成. 时效制度对 Al-Cu-Mg-Ag 合金组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2006, 35(18): 22-24.
- [5] 王泾文. 高温形变热处理及其应用[J]. 安徽机电学院学报, 2000, 15(1): 1-9.
- [6] 陈瑞强, 沈健. Al-Cu-Mg-Ag 合金形变热处理工艺研究[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2009, 33(2): 175-179.
- [7] 刘平, 刘晓艳. 中温轧制对 Al-Cu-Mg-Ag 耐热铝合金组织与抗腐蚀性能的影响[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2018, 35(3): 97-100.
- [8] ZHANG X X, ZHOU X R, HASHIMOTO T, et al. Localized Corrosion in AA2024-T351 Aluminium Alloy: Transition from Intergranular Corrosion to Crystallographic Pitting [J]. Materials Characterization, 2017, 130: 230-236.
- [9] LIN Y C, JIANG Y Q, ZHANG X C, et al. Effect of Creep-aging Processing on Corrosion Resistance of an Al-Zn-Mg-Cu Alloy [J]. Materials & Design, 2014, 61: 228-238.
- [10] CAO C, ZHANG D, WANG X, et al. Effects of Cu Addition on the Precipitation Hardening Response and Intergranular Corrosion of Al-5.2Mg-2.0Zn (wt.%) Alloy [J]. Materials Characterization, 2016, 122: 177-182.
- [11] RINGER S P, HONO K. Nucleation of Precipitates in Aged Al-Cu-Mg-Ag Alloys with High Cu/Mg Ratios [J]. Acta Materialia, 1996, 44(5): 1883-1898.
- [12] MUDDLE B C, POLMEAR I J. The Precipitate Ω Phase in Al-Cu-Mg-Ag Alloys [J]. Acta Materialia, 1989, 37(3): 777-789.
- [13] GARG A, HOWE J M. Convergent-beam Electron Diffraction Analysis of the Ω Phase in an Al-4.0Cu-0.5Mg-0.5Ag Alloy [J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1991, 39(8): 1939-1946.
- [14] GAZIZOV M, KAIBYSHEV R. Effect of Pre-straining on the Aging Behavior and Mechanical Properties of an Al-Cu-Mg-Ag Alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 625: 119-130.
- [15] QI H, LIU X Y, LIANG S X, et al. Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Al-Cu-Mg-Ag Heat-resistant Alloy Modified by Interrupted Aging [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 657: 318-324.

(责任编辑 周雪梅)

投稿须知

1. 本刊来稿要求:选题新颖,观点明确,逻辑清晰,结构完整,数据真实可靠;具有省部级及以上科研项目支撑,对于有国家自然科学基金及以上科研项目支撑的来稿,优先刊登;综述类来稿第一作者须为领域内知名专家或学科带头人,且内容要具有较强的学术前瞻性和指导性。
2. 本刊严禁一稿两投、重复内容多次投稿(包括以不同文种分别投稿)以及抄袭他人论文等现象。一旦发现上述情况,该作者的稿件将作退稿处理。
3. 电子稿件请以 WORD(*.doc)文档上传投稿系统。所投稿件如果有照片和曲线图,则需要尽量提供彩色图片,且做到层次分明、清晰,线条粗细均匀、比例合理美观(建议曲线图用 Origin、化学结构式等用 Chemi Bio Draw 制图,再拷贝到文档中)。
4. 稿件的作者必须是直接参与研究工作或对其有重要指导作用的成员(如研究生导师等),协助做实验的人员可放入致谢中。
5. 请务必在稿件首页页脚处依次注明:收稿日期(格式为 2015-02-20),基金项目(包括项目来源、项目名称及项目编号)和第一作者简介(包括姓名(出生年—)、性别、民族(汉族可不写)、籍贯、职称、学历及研究方向、E-mail 和联系电话)。
6. 通过审查后需要修改和补充实验的稿件,最晚不超过 2 个月将修改稿返回编辑部,如有困难需及时向编辑部说明情况,逾期按自动撤稿处理。
7. 本刊编辑部对拟用稿有权作技术性和文字性修改,作者若不允许对其文稿作修改,务请在来稿时注明;论文发表后,版权即属编辑部所有。凡在投稿时未作特别声明的,本刊均认为作者已同意将其论文编入有关的数据库在网上传播。

投稿系统网址: <http://xuebao.hebeu.edu.cn/journal.htm>

通讯地址:河北省邯郸市经济技术开发区太极路 19 号 邮编:056038

联系电话:0310-3969121