DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2022.01.003

热暴露温度对 7A85 铝合金晶界演化规律的影响

屠 涛[1,2],田 军[1,2],李积珍[3],吴博瑞[4],代 盼[4],徐春杰[2,5]

(1. 镁高镁诺奖(铜川)新材料有限公司,陕西 铜川 727031;2.西安谢赫特曼诺奖新材料研究院,陕西 西安 710048;3. 西安北方庆华机电有限公司,陕西 西安 710025;4. 西安石油大学 材料科学与工程学院,陕西 西安,7100654;5. 西安理工大学 材料科学与工程学院,陕西 西安 710048)

摘 要:通过对双级过时效态的 7A85 铝合金超厚板进行不同温度的热暴露处理,探究了热暴露温度对 7A85 铝合金晶界组织演化特征。结果表明,随着温度的升高,晶界处纳米级 η 析出相的尺寸不断增大,晶界无析出带的宽度逐渐增大,同时晶界处析出相的分布由连续网状分布转变为断续分布,因此合金的抗腐蚀性能不断提高。

关键词:热暴露;7A85 铝合金;晶界

中图分类号:TG146.2;TG113 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2022)01-0010-04

Effect of Thermal Exposure Temperature on Grain Boundary Evolution of 7A85 Aluminum Alloy

TU Tao[1,2], TIAN Jun[1,2], LI Jizhen[3], WU Borui[4], DAI Pan[4], XU Chunjie[2,5]

(1. Meigaomei Nobel Prize (Tongchuan) New Materials Co., Ltd., Tongchuan 727031, China; 2. Xi'an Shechtman Nobel Prize New Materials Institute, Xi'an 710048, China; 3. Xi'an North Qinghua Mechanical and Electrical Co., Ltd., Xi'an 710025, China; 4. School of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 5. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The evolution characteristics of grain boundary of two-step artificial overaged 7A85 aluminum alloy under thermal exposure at different temperatures were investigated. The results show that with the increase of temperature, the size of nano-sized precipitated η-phase at grain boundary increases, the width of precipitated zone at grain boundary increases gradually, and the distribution of precipitated phase at grain boundary changes from continuous network distribution to discontinuous network, so the corrosion resistance of the alloy has been improved.

Key words: thermal exposure; 7A85 aluminum alloy; grain boundary

近年来,随着我国航空航天工业的快速发展,对现代飞机制造提出了更高的要求,即通过减少制造成本,进一步降低其运行费用,在此背景下,铝合金材料的发展以更轻质、更可靠及更长寿命为目标,主攻超高强度、高韧性及优良的热加工性等综合性能的发展,以符合严酷服役环境下合金结构件的稳定性[1]。7A85 铝合金是满足此类要求的一种新型高强厚板 7XXX 系(Al-Zn-Mg-Cu)合金,其是我国在吸收国外先进材料特征的基础上研制出与 7085 铝合金性能相当的铝合金,逐渐成为我国航空结构件不可或缺的材料之一[2-3]。

双级过时效态的 7A85 铝合金锻件在航空领域主要用作飞机加强框、接头及承力梁等主承力结构。在实际应用中,该合金不可避免地会长时间暴露于较高温度的严苛环境中,这种恶劣的服役环境会对锻件的组织产生一定程度的影响,进一步破坏其性能的稳定性,最终降低航空器的可靠性。因此,研究热暴露对 7A85 铝合金锻件微观组织和性能演变的影响规律具有重要的理论意义[4-5]。

目前针对 7A85 铝合金的研究已有一些文献报道,但是主要集中在淬火敏感性、热处理工艺及热稳定性的研究等方面[6-8],针对热暴露过程中 7A85 铝合金组织和性能的演变的研究较少,Jabra 等[9]研究了 7085 铝合金在高温环境下的力学性能的变化,但是未对其微观组织的演变进行报道。有文献研

收稿日期:2021-12-26

基金项目:陕西省技术创新引导专项(基金)科技成果转移与推广计划-百项科技成果转化行动项目(2021CGBX-32),陕西省高等学校学科创新引智基地项目(S2021-ZC-GXYZ-0011),西安市高校重大科技创新平台及科技成果就地转化项目(20GXSF0003),2021 国家级大学生创新创业训练计划(G202110700078),2021 省级大学生创新创业训练计划(S202110705121)

作者简介:屠 涛(1985—),硕士研究生.研究方向:有色金属合金组织性能调控及工艺设计.电话:18309260676,Email: tutaomgm@126.com

通讯作者:代 盼(1988—),博士,讲师.研究方向:金属材料微观组织表征及强韧化机理.电话:15029184261,Email: daipanviola@163.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

究了 7085 铝合金在不同的热暴露工艺条件下合金晶内微观组织以及性能的影响[10-11]，但是针对晶界微观组织的研究甚少，而晶界的宽度及晶界处析出相的分布、形态、尺寸等对合金性能尤其是抗腐蚀性具有重要的影响。研究热暴露过程中 7A85 铝合金晶界组织的变化规律，揭示其对合金抗腐蚀性能的影响机理，为进一步拓宽该合金的应用奠定理论基础。

1　试验材料与方法

本试验选用厚度为 220 mm 的 7A85 铝合金板材，其成分见表 1。对该厚板经过双级过时效处理，具体处理工艺为：470 ℃×6 h 固溶处理 +5%冷压缩 + 两步法人工时效（120 ℃×6 h+160 ℃×10 h）。随后固定热暴露处理的时间为 100 h，选择热暴露处理的温度分别为 125 ℃及 175 ℃。

表1 7A85铝合金的化学成分 *w*(%)
Tab.1 Chemical composition of 7A85 aluminum alloy

Zn	Mg	Cu	Zr	Fe	Si	Al
7.56	1.50	1.45	0.12	0.06	0.02	余量

组织观察采用光学显微镜（OM）及透射电子显微镜（TEM）进行表征分析。其中金相试样通过 400#、800# 及 2000# 砂纸逐级磨制后，然后进行机械抛光，最后采用 Keller 试剂进行腐蚀。透射电镜样品采用机械研磨结合双喷电解的方式制备，其中双喷电解液的成分为 70%酒精及 30%硝酸。本试验所采用的场发射透射电子显微镜的型号为 FEI Tecnai F30 G^2。

2　试验结果与分析

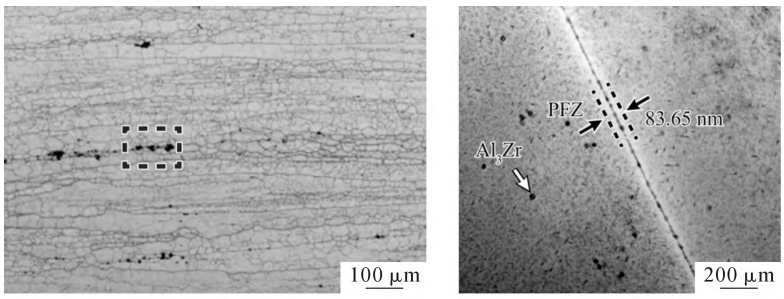
2.1　双级过时效态 7A85 铝合金微观组织

图 1 为双级过时效态 7A85 铝合金的微观组织，其中图 1(a)为合金沿 L 向的金相组织，从图中看出晶粒发生了较为明显的变形，呈现出条带状分布的特征，同时，条带状晶粒的内部发生了较明显地再结晶，在条带状粗大的晶粒内部形成了细小的等轴状再结晶晶粒，同时，合金中存在一些含 Fe 杂质相，一般为 Al_7Cu_2Fe，如图中框图所示。图 1(b)为合金 TEM 像，白色箭头所示的黑色圆形颗粒为 Al_3Zr 颗粒相，晶界处分布着较为连续的粗大 η 析出相，晶界无析出带（Precipitate free zone, PFZ）的宽度约为 83.65 nm。

2.2　不同热暴露温度下 7A85 铝合金的微观组织

图 2 为热暴露温度为 125 ℃时双级过时效态 7A85 铝合金的微观组织，将图 2(a)与图 1(a)中的金相组织对比可看出，在此温度下热暴露后的金相组织依然由拉长状的晶粒及其内部的在再结晶晶粒组成。图 2(b)中的平衡相 η 尺寸变得更为粗大，且晶界出相的连续相稍差。

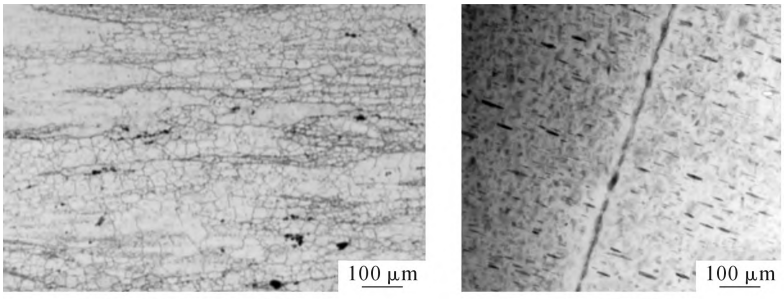
图 3 为热暴露温度为 175 ℃时双级过时效态 7A85 铝合金的微观组织，将图 3(a)与图 1(a)及图 2(a)中的金相组织对比可看出，在此温度下合金经过



(a)沿L相光学组织　　(b)TEM组织

图 1 双级过时效态 7A85 铝合金组织

Fig.1 Microstructure along L direction and TEM image of two-step overaged 7A85 aluminum alloy



(a)沿L方向光学组织　　(b)TEM组织

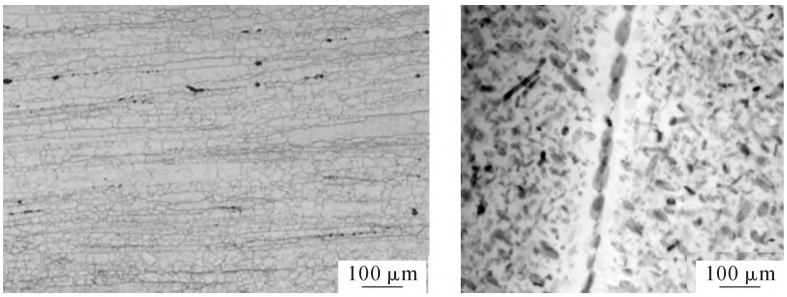
图 2 双级过时效态 7A85 铝合金热暴露温度为 125 ℃时的组织

Fig.2 Microstructure of overaged 7A85 aluminum alloy after thermal exposure at 125 ℃

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

热暴露后的金相组织变化不大,即该合金的热稳定性能较好。图 3(b)中的平衡相 η 尺寸变得更加粗大,且晶界析出相由连续分布变为断续分布,同时晶界无析出带的宽度也进一步增大。

对图 2(b)及图 3(b)中晶界析出相尺寸以及晶界无析出带宽度进行统计,其结果如图 4 所示,可以看出晶界析出相 (Grain boundary precipitate, GBP)的长度随着热暴露温度的升高而增加,同时晶界无析出带(precipitate free zone, PFZ)的宽度也不断变大。粗大且断续的晶界析出相形态有利于合金抗腐蚀性能的提升。其主要原因是,在铝合金中,最常发生的腐蚀是晶间腐蚀,而连续网状分布的晶界析出相极易发生优先腐蚀,其所形成的阳极腐蚀通道很容易促进腐蚀裂纹的扩展,但另一方面,在合金的变形过程中,连续网状分布的纳米级晶界析出相可以有效阻碍晶粒的相对运动,降低晶界在合金变形过程中的协调作用,导致合金的塑性及韧性降低。因此,随着热暴露温度的不断升高,合金的塑韧性稍有降低,但是抗腐蚀性能提高[12-15]。



(a)沿L相光学组织　　(b)TEM组织

图 3 双级过时效态 7A85 铝合金热暴露温度为 175 ℃时的组织

Fig.3 Microstructure of overaged 7A85 aluminum alloy after thermal exposure at 175 ℃

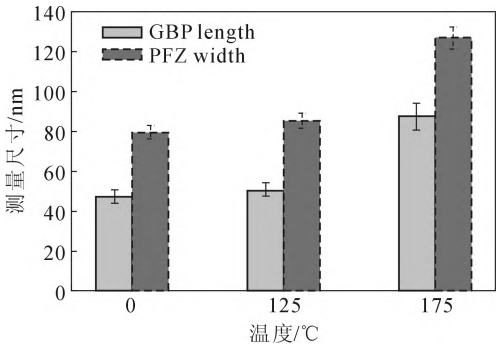


图 4 不同热暴露温度对双级过时效 7A85 铝合金晶界 GBP 长度和 PFZ 宽度的影响

Fig.4 Effect of different thermal exposure temperature on GBP length and PFZ width of two-step overaged 7A85 aluminum alloy

3 结论

(1)随着热暴露温度的升高,合金的金相组织变化不大,表明其具有较好的热稳定性。

(2)随着热暴露温度的升高,晶界处的纳米级 η 析出相尺寸不断增大,晶界无析出带的宽度逐渐增大,同时晶界处析出相的分布由连续网状分布变为断续分布,使得合金的抗腐蚀性能不断提高。

参考文献:

[1] ROMETSCH P A, ZHANG Y, KNIGHT S, et al. Heat treatment of 7xxx series aluminium alloys—Some recent developments [J]. Transactions Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24 (7): 2003-2017.

[2] 柏璠,高文理,何正林,等. 时效工艺对 7A85 铝合金力学和晶间腐蚀性能的影响[J]. 中国有色金属学报,2016,26(5): 957-963.

[3] 姚晓红,张林,高文理,等. 时效状态对 7A85 高强铝合金力学性能和晶间腐蚀性能的影响 [J].稀有金属材料与工程,2013,42 (12): 2581-2585.

[4] 何正林,高文理,陆政,等. 热处理对 7A85铝合金组织和性能的影响[J]. 材料工程,2015,43(8): 13-18.

[5] DAI Pan, LUO Xian, YANG Yanqing, et al. High temperature tensile properties, fracture behaviors and nanoscale precipitate variation of an Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2020, 30(1): 63-73.

[6] LIU S D, LI Q, LIN H Q, et al. Effect of quench-induced precipitation on microstructure and mechanical properties of 7085 aluminium alloy [J]. Materials & Design, 2017, 132: 119-128.

[7] NIE B H, LIU P Y, ZHOU T T. Effect of compositions on the quenching sensitivity of 7050 and 7085 alloys [J]. Materials Science & Engineering A, 2016, 667: 106-114.

[8] CHEN S Y, CHEN K H, DONG P X, et al, Effect of heat treatment on stress corrosion cracking, fracture toughness and strength of 7085 aluminium alloy[J]. Transactions Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(7): 2320-2325.

[9] JABRA J, ROMIOS M, LAI J, et al, The effect of thermal exposure on the mechanical properties of 2099-T6 die forgings, 2099-T83 extrusions, 7075-T7651 plate, 7085-T7452 die forgings, 7085-T7651 plate, and 2397-T87 plate aluminum alloys [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2006, 15 (5): 601-607.

[10] DAI Pan, LUO Xian, YANG Yanqing, et al. Thermal stability analysis of a lightweight Al-Zn-Mg-Cu alloy by TEM and tensile tests [J]. Materials Characterization, 2019, 153: 271-283.

[11] DAI Pan, LUO Xian, YANG Yanqing, et al. Nano-scale precipitate

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

evolution and mechanical properties of 7085 aluminum alloy during thermal exposure [J]. Materials Science & Engineering A, 2018, 729: 411-422.

[12] TSAI T C, CHUANG T H, Role of grain size on the stress corrosion cracking of 7475 aluminium alloys [J]. Materials Science & Engineering A, 1997, 225(1): 135-144.

[13] LI J H, LI F G, MA X K, et al, Effect of grain boundary characteristic on intergranular corrosion and mechanical properties of severely sheared Al-Zn-Mg-Cu alloy [J]. Materials Science & Engineering A, 2018, 732: 53-62.

[14] YANG W C, JI S X, ZHANG Q, et al, Investigation of mechanical and corrosion properties of an Al-Zn-Mg-Cu alloy under various ageing conditions and interface analysis of η' precipitate [J]. Materials & Design, 2015, 85: 752-761.

[15] LI J F, PENG Z W, LI C X, et al. Mechanical properties, corrosion behaviors and microstructures of 7075 aluminium alloy with various aging treatments[J]. Transactions Nonferrous Metals Society of China, 2008,18(4): 755-762.

河北省冀州市华北铸钉铸造工具总厂



冀州市华北铸钉铸造工具总厂座落于河北省冀州市城南白庄工业区，紧靠全国大动脉京九、石梅铁路，交通十分便利。我厂是生产铸顶（泥芯撑）、羊毛掸笔、硬扫笔、圆水笔的专业厂家。建厂36多年来,技术设备先进，产品销往全国各地,深受用户欢迎。本厂始终承诺：诚信至上，守信誉,质高价低，实行三包，交货及时，代办发运，可供图订做。热情欢迎国内外来人来电选购。

四同

同类产品比质量　同等质量比价格
同样价格比服务　同等服务比速度

两免

免费为客户提供产品技术咨询
免费为客户提供初期试用产品

一、常用修造工具规格（材质为不锈钢或弹簧钢）

/mm

名称	型号	规格	名称	型号	规格	名称	型号	规格	名称	型号	规格
刮刀	2#	160×45	秋叶	1#	180×30	三角光子	2#	50×30	东北压钩	1#	270×50
尖刮刀	3#	140×35	单头钢批	2#	240×22	蛋圆光子	1#	75×50	圆型钩	2#	200×30
提钩	2#	350×15	单头钢批	3#	210×20	压钩	1#	270×50	长把压钩	1#	220×30
提钩	4#	300×10	法兰钩	1#	270×14	压钩	2#	240×45	柳叶钩	1#	240×40
钢批钩	1#	280×16	榔头铲	1#	240×24	单齐压钩	2#	240×45	单开提钩	2#	320×12

二、掸笔、硬扫笔：20～120 mm 10个品种；圆水笔：12～17 mm 3个品种；
三、铸顶（芯撑）有圆、方、长方形，单、双、多柱、异形铸顶等各种铸铁、铸钢用铸顶材质为A3或A3F，表面镀锌、镀锡等；
四、过滤网、木型工具、皮风箱、铸尺、百叶轮、角磨片、树脂油、固化剂、粘结剂、木型锤等。



图中从左至右依次为：1.刮刀 2.尖刮刀 3.压勺 4.单齐压勺 5.提钩 6.单头钢批 7.秋叶 8.单开提钩 9.法兰钩 10.钢批钩 11.掸笔、扫笔 12.圆水笔 13.铸顶

诚征各地代理商

厂址：河北省冀州市城南白庄工业区（053200） 联系人：白英韩 13831863803 白其水 13582484193（中国农行金穗卡，户名：白英韩 卡号：9559982130332490310）
电话/传真：0318-8682135 网址：www.hbzhz.com E-mail:hbbyh@hbzhz.com 银行汇款：冀州市华北铸钉铸造工具总厂 开户行：市中行 帐号：100148643069

经销处
哈尔滨市铸材门市部 13831863803　包头市铸材经销处 13633184318
杭州市中亚铸材有限公司 13932860882　贵阳市忠信铸材公司 13831888322
长沙市铸材办事处 13831823340　西宁市铸材办事处 13931810511
上海市铸材办事处 13932894585　南宁市铸材办事处 0771-8994686

本单位为一般纳税人，增值发票税率17%。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net