

7050 铝合金热轧板 T651 态热处理工艺优化

贾桂龙 陈愿情 韦修勋 郑 许 谭自盟 何克准
(广西南南铝加工有限公司,广西铝合金材料与加工重点实验室)

摘 要 采用光学显微镜、扫描电镜、透射电镜、电子万能试验机等试验手段,研究了 7050 热轧板 T651 态热处理工艺优化,分析了时效态板材的断裂机制,得到了最佳的时效热处理制度。结果表明,经过 475 ℃×30 min 的固溶处理后,板材晶界处第二相基本完全固溶进铝基体,固溶效果良好;经过 130 ℃×15 h 的时效处理后,板材的力学性能达到最高,其抗拉强度、屈服强度、伸长率分别为 603 MPa、539 MPa、17%。

关键词 7050 热轧板;T651 热处理;显微组织;力学性能;断裂机制

中图分类号 TG146.21;TG156.9 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.02.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optimization of T651 Heat Treatment Process for Hot-rolled 7050 Plate

Jia Guilong, Chen Yuanqing, Wei Xiuxun, Zheng Xu, Tan Zimeng, He Kezhun
(Guangxi Key Laboratory of Materials and Processes of Aluminum Alloys, Guangxi Alnan Aluminium Fabrication Co., Ltd.)

Abstract: The optimization of T651 heat treatment process for hot-rolled 7050 plate was investigated by means of OM, SEM, TEM and electronic universal testing machine. The fracture mechanism of the aging plate was analyzed and the optimized aging heat treatment process was presented. The results indicate that the second phase at the grain boundary of the plate are all basically dissolved into the aluminum matrix after the solution treatment at 475 ℃ for 30 min with the satisfied solid solution effect. After the aging treatment at 130 ℃ for 15 h, the mechanical properties of the plate reach the desirable value, where the tensile strength, yield strength and elongation of the alloy reach 603 MPa, 539 MPa and 17%, respectively.

Key Words: Hot-rolled 7050 Plate, T651 Heat Treatment, Microstructure, Mechanical Properties, Fracture Mechanism

Al-Zn-Mg-Cu 系合金属于可热处理强化超高强度合金,拥有高的比强度、比刚度,低密度,易于回收,无污染等特点,广泛应用于航空航天、轨道交通等领域^[1~3]。7050 合金为典型的 7xxx 系铝合金,优异的综合性能使其成为航空结构件不可或缺的材料之一^[4~6]。目前 7050 铝合金板材的供应状态主要为 T7451 态,主要采用双级时效制度,使合金拥有良好的耐腐蚀性能,该状态板材多用于飞机的重要结构件上^[7]。随着航空工业的飞速发展,除飞机结构件外的工装用铝合金板材的需求量逐渐增加,因此 7050-T651 态板材完全可以作为工装用材料进行推广使用。7050-T651 态板材消除了双级时效的制约,这对于降低生产成本、提高经济效益具有积极意义。

目前,针对 7050 铝合金热轧板 T651 态热处理制

度的研究报道很少,国内外针对该状态板材也没有相应的标准,所以该状态板材的力学性能还没有参考依据^[8~11]。本课题主要以 7050 铝合金热轧板为研究对象,研究 T651 热处理制度对其显微组织和力学性能的影响,探索板材的最优时效热处理工艺,以期对指导 T651 态 7050 铝合金板材的工业化生产和制定 7050-T651 态板材执行标准提供参考。

1 试验材料与方法

试验材料为 20 mm 厚的 7050 铝合金热轧板,热轧板经过熔铸→均匀化处理→机加铣面→预热→热轧等工序生产^[12~14]。采用 iCAP6300 型 ICP 光谱仪测定 7050 铝合金板材的化学成分,见表 1。沿热轧板轧制方向切取尺寸为 25 mm(轧向)×300 mm(横向)×20

收稿日期:2020-08-07;修改稿收到日期:2020-09-16
基金项目:广西创新驱动发展专项资金资助项目(桂科 AA17204012)
第一作者简介:贾桂龙,男,1989 年出生,博士研究生,南宁(530031),E-mail:jiaguilong@126.com
引用格式:贾桂龙,陈愿情,韦修勋,等. 7050 铝合金热轧板 T651 态热处理工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(2):185-188.
JIA G L, CHEN Y Q, WEI X X, et al. Optimization of T651 heat treatment process for hot-rolled 7050 plate[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(2):185-188.

mm(高向)试样,按照 GB/T 228.1-2010 加工成标准拉伸试样。试样经过 475 ℃×30 min 固溶处理后,在 CMT5305 型万能试验机上进行变形量为 2.5% 的预拉伸,然后在箱式电阻炉中进行时效处理,时效处理工艺为 130 ℃×(11、13、15、17) h。使用 Axio Vert. A1 型光学显微镜、JEM 2100 型透射电镜进行显微组织观察,利用 EVO18 型扫描电镜进行拉伸断口形貌观察。

表 1 7050 铝合金热轧板的化学成分

Tab.1 Chemical composition of hot-rolled 7050 plate										%
合金元素	w_B									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Al
标准值	≤ 0.12	≤ 0.15	2.0~ 2.6	≤ 0.10	1.9~ 2.6	≤ 0.04	5.7~ 6.7	≤ 0.06	0.08~ 0.15	余量
实测值	0.034	0.11	2.5	0.027	2.3	0.017	6.13	0.042	0.13	88.71

2 试验结果与分析

2.1 显微组织

热轧 7050 铝合金板材横截面的显微组织见图 1。可以看出,热轧板材的显微组织呈现明显的方向性特征,晶粒沿横向被拉长,晶界处的第二相均匀细小。这是因为板材的轧制工艺采用强应变大压下量轧制,且严格控制开轧温度及终轧温度,使得能量主要消耗在变形上,晶粒几乎不发生再结晶行为,因此板材的晶粒尺寸

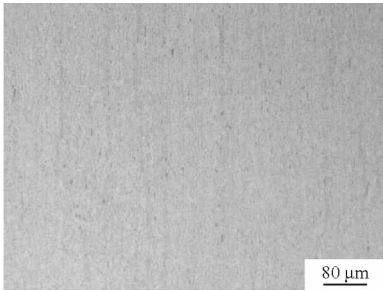


图 1 热轧态 7050 铝合金板材横截面显微组织
Fig.1 Cross-section microstructure of hot-rolled 7050 plate

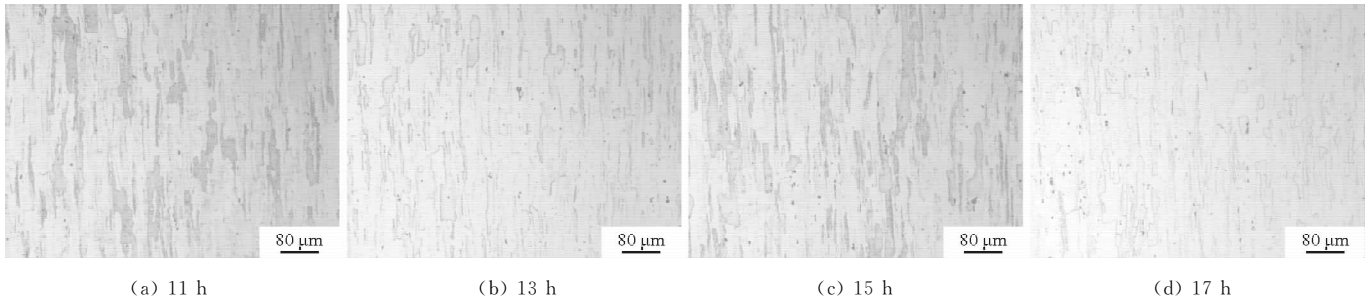


图 3 475 ℃×30 min 的固溶处理后在 130 ℃时效不同时间 7050 板材横截面的显微组织
Fig.3 Cross-section microstructure of 7050 plate after various aging processes

要使用电子显微镜才可以观察到。
经 475 ℃×30 min 固溶+不同时间时效后时效态 7050 铝合金板材横截面析出相的 TEM 形貌见图 4。

非常细小。同时由于道次压下量及总变形量都很大,使得板材整体变形彻底,晶界处的第二相充分破碎。显微组织中细小均匀的晶粒可以最大限度地提高板材的力学性能,破碎后尺寸细小的第二相也有利于在随后的固溶处理中充分回溶,提高合金的固溶强化作用。

固溶态 7050 铝合金板材横截面的显微组织见图 2。可以看出,经过固溶处理后,板材的晶粒明显长大,晶粒沿横向被拉长、沿纵向被压缩的现象明显,此时板材的显微组织呈现出典型的再结晶组织特征。通常情况下,固溶温度越高、固溶时间越长,第二相回溶越彻底,固溶效果越好,但同时,再结晶行为越容易发生,晶粒长大也就越明显,因此选择合适的固溶工艺使得两者兼顾至关重要^[15,16]。经过 475 ℃×30 min 的固溶处理后,7050 铝合金晶界处的第二相基本全部回溶到 Al 基体中,再结晶晶粒尺寸也没有出现异常粗大的情况,说明采用的固溶制度比较合理。



图 2 固溶态 7050 铝合金板材横截面显微组织
Fig.2 Cross-section microstructure of solid-soluted 7050 plate

经 475 ℃×30 min 固溶处理后再不同时效工艺处理的 7050 铝合金板材横截面的显微组织见图 3。可以看出,时效态的显微组织与固溶态相似,晶粒没有发生异常长大;随着时效时间延长,能够观察到晶内尺寸较大的颗粒状未溶相。这是因为时效处理后,析出相的尺寸通常为纳米级,利用光学显微镜只能观察到极少数尺寸较大的未溶相,而更加细小且弥散分布的析出相则需

可以看出,合金中的析出相主要以颗粒状形貌在晶内弥散分布。随着时效时间的延长,析出相的数量、密度逐渐增加,但是析出相的尺寸有逐渐长大的趋势。这种弥

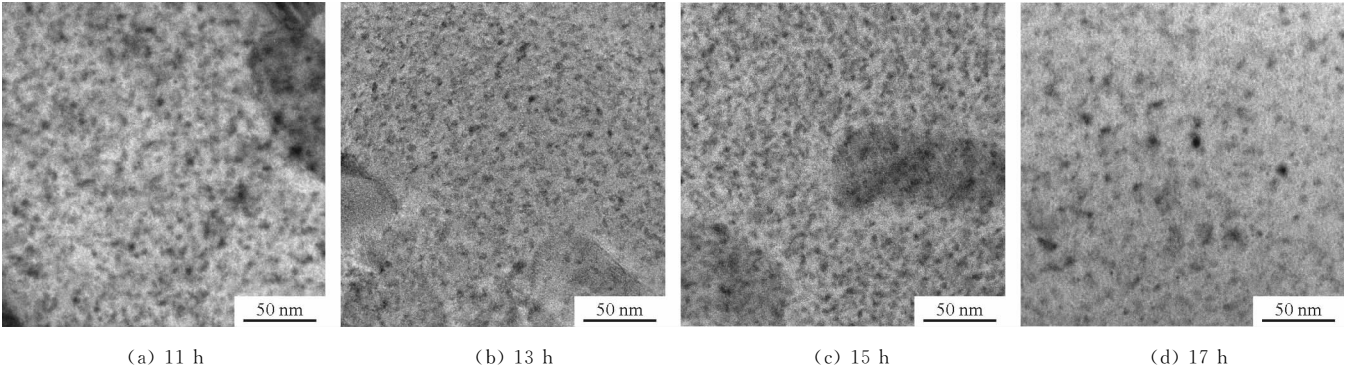


图4 7050 铝合金板材经 475 ℃×30 min 固溶后再在 130 ℃下不同时间时效处理后 7050 板材横截面 TEM 析出相形貌

Fig.4 Cross-section morphology of precipitated phase in 7050 plate after various aging processes

散分布的颗粒状析出相能够对位错运动起到强烈的钉扎作用,是板材力学性能显著提高的重要原因。

2.2 力学性能

在 130 ℃经不同时间时效处理下 7050 铝合金板材横向的力学性能见图 5。可以看出,随着时效时间延长,板材的屈服强度呈现逐渐增加、抗拉强度先略微升高后降低、伸长率逐渐降低的变化规律。板材在时效 15 h 后,其抗拉强度达到最高,为 603 MPa,同时屈服强度为 539 MPa,伸长率为 17%,此时板材表现出良好的力学性能。根据有关研究,7050 铝合金中的时效析出相主要为 GP 区、非平衡相 η' 相以及平衡相 η 相,其中 η' 相与 Al 基体呈共格关系,通常在过时效前 η' 相尺寸细小且分布均匀,因此能够起到强烈的析出强化作用,使得合金的力学性能很高^[4,7,17]。同时随着时效时间延长,析出相逐渐长大变粗,分布的均匀性也变差,导致合金的抗拉强度降低。

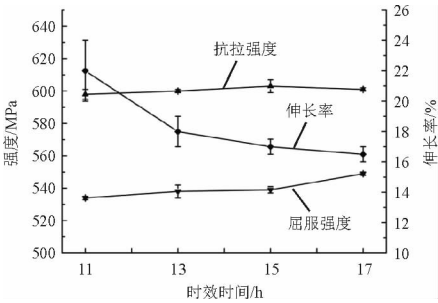


图5 130 ℃下不同时间时效处理下 7050 铝合金板材横向的力学性能

Fig.5 Transverse mechanical properties of 7050 plate after various aging processes

不同热处理态 7050 铝合金板材横向力学性能见图 6。可以看出,热轧板材的力学性能最低,其抗拉强度仅为 385 MPa,屈服强度为 257 MPa,伸长率为 13%;经过 475 ℃×30 min 的固溶处理后,板材的抗拉强度达到 441 MPa,屈服强度为 268 MPa,伸长率达到 32%;经过 130 ℃×15 h 的时效处理后,板材的力学性能能

著提升,其中抗拉强度达到 603 MPa,同时屈服强度和伸长率达到 539 MPa 和 17%,同热轧板材相比,时效板材的抗拉强度、屈服强度、伸长率分别提高了 57%、110%、31%。热轧板材由于轧制变形充分,板材中晶粒尺寸细小,此时板材的强化作用主要为细晶强化;固溶处理后,由于再结晶行为的发生,晶粒尺寸明显长大,一定程度上削弱了细晶强化的作用,但同时由于晶界第二相的充分回溶,引起晶格畸变,此时板材存在固溶强化的作用,因此其力学性能有所提高。由于晶界第二相的充分回溶及晶内合金元素的均匀分布,使得固溶态板材拥有最高的伸长率;时效处理后,晶内弥散析出细小均匀的强化相,这些强化相对位错运动起到钉扎作用,位错切过强化相,从而提高板材的力学性能。

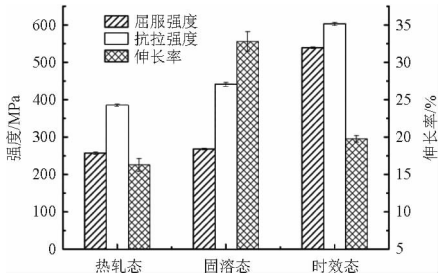


图6 不同热处理态 7050 板材横向力学性能

Fig.6 Transverse mechanical properties of 7050 plate at different heat treatment states

2.3 断裂机制

经 475 ℃×30 min 固溶+在 130 ℃下不同时间时效处理后 7050 铝合金板材横向拉伸断口形貌见图 7。可以看出,时效态板材的断口形貌呈现出相似的具有沿板材横向变化的方向性特征,同时随着时效时间延长,断口形貌又有细微的变化。断口主要由解理面及撕裂棱组成,随着时效时间延长,解理面上出现类似韧窝的“孔洞”形貌,板材的主要断裂机制为穿晶解理断裂;有些“孔洞”形貌呈现出冰糖状断口特征,因此板材也同时存在沿晶断裂机制。这主要是因为,当板材受到拉应力作用时,容易在晶界第二相处形成微裂纹源,随后裂纹

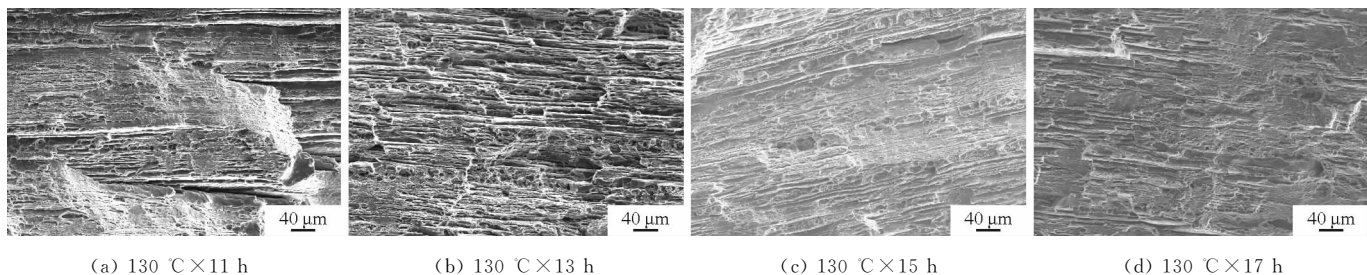


图 7 经 475 °C×30 min 固溶再 130 °C 下时效不同时间后 7050 铝合金板材横截面断口形貌

Fig.7 Cross-section fracture morphologies of 7050 plate after various aging processes

沿晶内扩展形成穿晶断裂,少数裂纹沿晶界扩展形成沿晶断裂。

3 结 论

(1)热轧 7050 铝合金板材变形彻底,晶界第二相充分破碎,显微组织均匀且细小。

(2)热轧 7050 铝板经 475 °C×30 min 固溶处理后,发生再结晶行为,晶粒有所长大,同时晶界第二相充分回溶,固溶效果良好。

(3)热轧 7050 铝板经 475 °C×30 min 固溶再 130 °C×15 h 时效处理后,其力学性能达到最高,抗拉强度、屈服强度、伸长率分别为 603 MPa、539 MPa、17%。

(4)经 475 °C×30 min 固溶后时效态 7050 铝合金板材的断裂机制为穿晶与沿晶混合断裂。

(5)7050 铝合金热轧板 T651 态最优时效工艺为 130 °C×15 h,但是为了降低生产成本,建议实际生产使用时效工艺为 130 °C×11 h。

参 考 文 献

- [1] 邓运来,张新明.铝及铝合金材料进展[J].中国有色金属学报,2019,29(9):2115-2145.
- [2] GONG H, CAO X, LIU Y Q, et al. Simulation and experimental study on the inhomogeneity of mechanical properties of aluminum alloy 7050 plate[J]. Metals, 2020, 10(4): 515-524.
- [3] 彭英浩,刘崇宇,徐峥峥,等.高锌 Al-Zn-Mg-Cu 合金淬火敏感性研究[J].特种铸造及有色合金,2020,40(3):331-335.
- [4] 燕云程,黄蓓,李维俊,等. Al-Zn-Mg-Cu 系超高强度铝合金的研究进展[J].材料导报,2018,32(32):358-364.
- [5] ROMETSCH P A, ZHANG Y, KNIGHT S. Heat treatment of 7xxx series aluminum alloys-Some recent developments[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(7): 2003-2017.
- [6] CAO J, LI F G, MA W F, et al. A strain rate dependent fracture model of 7050 aluminum alloy[J]. Metals, 2020, 10(1): 3-14.
- [7] 冯迪.时效对 7055 铝合金中厚板组织及性能均匀性的影响研究[D].长沙:中南大学,2014.
- [8] REN J P, SONG R G. Strengthening mechanism of two-stage double-peak aging in 7050 aluminum alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(4): 1159-1165.
- [9] 吴懿萍,何臻毅,周志纲,等.非等温回归再时效对 7050 铝合金组

织与力学性能的影响[J].材料导报,2019,33(S2):394-397.

- [10] 崔振华,刘晓艳,刘彦鹏,等.时效处理对 7050 铝合金组织与性能的影响[J].河北工程大学学报(自然科学版),2019,36(3):101-105.
- [11] 盛晓菲,饶晓晓.喷射沉积 7055 合金制备冷却过程对第二相析出的影响[J].特种铸造及有色合金,2020,40(6):673-676.
- [12] 郝爱国,吉卫,郝花蕾.7050 铝合金的热变形行为及热加工图研究[J].热加工工艺,2018,47(17):141-144.
- [13] 李江,李付国,袁战伟.基于 Malas 准则的 7050 铝合金 3D 热加工图研究[J].热加工工艺,2017,46(23):26-29.
- [14] YU X W, CHEN J H, LI J Y, et al. Effect of pre-deformation on quench-induced inhomogeneity of microstructure and hardness in 7050 aluminum alloy[J]. Materials Characterization, 2019, 158: 110005.
- [15] 罗海云,肖翔,刘成,等.双级固溶工艺对 7050-T7451 超厚板显微组织的影响[J].特种铸造及有色合金,2019,39(8):832-835.
- [16] 李亚,邓运来,张劲,等.7050 铝合金第二相溶解行为[J].材料工程,2020,48(4):116-122.
- [17] CHEN Y, LIU Z Y, BAI S, et al. The effect of multistage aging on mechanical properties and microstructure of forged 7050 aluminum alloys[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28(6): 3590-3599.

(编辑:栗万仲)

中国 2020 年铝产量 3 708 万 t

国家统计局公布数据显示,2020 年中国铝产量为 3 708 万 t,创下年度最高纪录,因铝厂利用铝价飙升获利。尽管 12 月价格上涨势降温,但产量亦创下月度纪录高位。

数据显示,2020 年 12 月原铝产量为 327 万 t,较 11 月的 318.2 万 t 增加 2.8%,亦打破了 10 月份 320 万 t 的月度纪录。作为铝生产国,中国 2020 年产量超过 2018 年创下的 3 580.2 万 t 的纪录高位。2019 年产量为 10 年来的首次下降。

CRU 分析师 Wan Ling 表示,中国 2020 年 12 月新增 30 万 t 冶炼产能,这远远超过预估的中国冬季采暖季削减 2 万 t 产能。预计中国铝产量将在 2021 年再增长 6.5%。中国目标是将年产能限制在 4 500 万 t 左右。

(摘自压铸周刊)