

## 7075 铝板多道次轧制和固溶时效工艺优化

武 磊<sup>1</sup>, 何 兵<sup>2</sup>, 覃 铭<sup>2</sup>

(1. 运城职业技术大学 智能制造与数智矿山学院, 山西 运城 044000; 2. 百色学院 材料科学与工程学院, 广西 百色 533000)

**摘要:** 为优化 7075 铝板的生产工艺, 进行了累计压下率为 92% 的 4 道次+二次加热+4 道次的轧制试验, 并对不合格的成品板进行了固溶时效参数优化试验。采用阳极覆膜偏光观察法观察了成品板的微观组织, 对成品板进行了力学性能测试、布氏硬度检测、元素能谱分析和电导率测量, 并将力学性能检测结果与 GB/T 3880. 2—2012 中对 7075 铝合金 T6 处理后铝板的力学性能要求进行了对比。试验结果表明: 在 7075 铝板的 8 道次轧制工艺中, 在二次加热前的 4 道次累计压下率为 71% 时, 所获得的成品板力学性能达到国标要求, 为最优轧制工艺; 对二次加热前的 4 道次累计压下率为 62% 的轧板, 在 500 °C 固溶可以获得更好的综合力学性能。二次加热前后的累计压下率不同, 对最终成品板的力学性能有明显影响, 可以作为调节成品板组织和性能的工艺手段。同时, 在轧制工艺不理想的情况下, 通过优化固溶时效工艺仍可以使成品板的力学性能达到国标要求。

**关键词:** 7075 铝合金; 轧制; 二次加热; 固溶时效; 析出强化

**DOI:** 10. 13330/j. issn. 1000-3940. 2024. 09. 015

中图分类号: TG166. 3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 09-0115-07

## Process optimization of multi-pass rolling and solution aging for 7075 aluminum plate

Wu Lei<sup>1</sup>, He Bing<sup>2</sup>, Qin Ming<sup>2</sup>

(1. College of Intelligent Manufacturing and Digital Mining, Yuncheng Vocational and Technical University, Yuncheng 044000, China;  
2. School of Materials Science and Engineering, Baise University, Baise 533000, China)

**Abstract:** In order to optimize the production process of 7075 aluminum plate, a rolling test was conducted with the cumulative reduction rate of 92% for four passes+secondary heating+four passes, and the solution and aging parameters optimization test was conducted on the unqualified finished plates. Then, the microstructure of the finished plates was observed by polarizing observation with anodic coating, and the mechanical properties, Brinell hardness testing, elemental energy spectrum analysis and electrical conductivity measurement of the finished plates were conducted. Furthermore, the mechanical properties measurement results were compared with those of 7075 T6-treated aluminum plate in GB/T 3880. 2—2012. The results show that in the 8-pass rolling process of 7075 aluminum plate, when the cumulative reduction rate is 71% in the first four-passes before secondary heating, the mechanical properties of the finished plate meet the national standard requirements, which is the optimal rolling process. For the rolled plate with the cumulative reduction rate of 62% in the first four-passes before secondary heating, better comprehensive mechanical properties are obtained by the solid solution at 500 °C. Thus, the different cumulative reduction rates before and after secondary heating have a significant impact on the mechanical properties of the final finished plate, which can be used as a process mean to adjust the microstructure and properties of the finished plate. At the same time, when the rolling process is not ideal, the mechanical properties of the finished plate can meet the national standard requirements by optimizing the solution and aging process.

**Key words:** 7075 aluminum alloy; rolling; secondary heating; solution and aging; precipitation strengthening

7075 铝合金是应宇航工业需求而开发的一种轻质高强材料, 该合金在其他众多行业也均有广

泛的应用<sup>[1]</sup>。尤其是在汽车制造领域, 有学者明确提出, 由钢铁材料制造的诸如汽车 A 柱、B 柱和防撞梁等高强度件也可以由 7 系 (Al-Zn-Mg-Cu) 铝合金替代<sup>[2-5]</sup>。近年来, 对 7075 铝合金的轧制生产工艺开展了大量研究, 文献 [6] 进行了不同道次压下率的多道次热轧试验, 发现采用 11% 道次压下率的 7075 铝板, 在不同的轧制道次后会出现多个沿轧制方向的强度峰值和断后伸长率峰值,

收稿日期: 2023-10-12; 修订日期: 2024-01-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51961001); 2022 年百色市科学研究与技术开发计划 (百科 20221479)

作者简介: 武 磊 (1981-), 男, 博士, 工程师

E-mail: toalbvi@163.com

而采用 16% 道次压下率时则无多峰值现象；在轧制变形量对 7075 铝板性能的影响方面，文献 [7] 发现当变形量为 80% 时铝板强度达到最大；文献 [8] 发现随着轧制变形量的增大，7075 铝板的原始组织被逐渐破坏，观察平行于轧制方向的金相组织时，可以看到晶粒逐渐难以辨别，呈现更加明显的平行于轧向的纤维状组织。除传统轧制工艺外，有学者进行了 7075 铝厚板龙形轧制工艺的试验，研究了轧辊异速比对轧制渗透性的影响<sup>[9]</sup>；还有试验证实，对 7075 铝合金进行温轧可以有效改善其延展性<sup>[10]</sup>。在特殊外场环境下的轧制工艺和机理是近些年研究的热点，当脉冲电场引入 7075 铝合金双辊铸轧工艺时，会使得到的轧板晶粒明显细化，且显著减少偏析，有效改善 7075 铝合金轧板的热变形能力<sup>[11]</sup>；采用超声波轧制，可以有效增强轧板表面的残余应力，提高 7075 铝板表面的抗疲劳性能<sup>[12]</sup>。在 7 系铝合金的固溶时效研究方面，王江涛等<sup>[13]</sup>研究了固溶时效对轧制 7075 铝合金微观组织和力学性能的影响，徐戊矫<sup>[14]</sup>研究了强化固溶对 7050 铝合金组织与性能的影响。但是，以上研究均未将 7075 铝板的轧制和固溶时效工艺相结合，对实际生产工艺优化的指导意义还有待增强。

本文主要研究和优化 7075 铝板的多道次轧制工艺和固溶时效工艺，旨在探索出性能指标达到 GB/T 3880.2—2012<sup>[15]</sup> 要求，又具备可行性和经济性的 7075 铝板生产工艺方案。为了实现 7075 铝板的大变形量轧制，在多道次轧制过程中加入了二次加热，并围绕二次加热前后的道次分配设计了 3 种轧制工艺。同时，从柔性生产的角度出发，针对成品板性能不达标的轧制工艺进行了固溶时效优化试验，期望在轧制工艺不理想的情况下，通过对固溶时效工艺参数的合理调整，同样实现成品板性能达标，从而为实际生产提供可借鉴的解决方案。

## 1 试验材料和方法

试验用经过 T6 处理的 7075 铝合金成品板，经锯切和铣面，获得长度×宽度×高度为 300 mm×100 mm×50 mm 的轧制坯料，经充分预热后进行前 4 道次轧制，然后对轧板进行二次加热处理，再进行后 4 道次轧制。采用单机架轧制，轧辊直径为  $\Phi 350$  mm，转速为  $17 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ，道次中间使用保温棉覆盖铝板进行保温。采用台车式电阻炉进行轧板二次加热，固溶时效采用箱式电阻炉。扫描电镜观察和能谱分析采用日立 SU5000 场发射扫描电镜。力学性能测试采用 Wance ETM105D 万能试验机，执行 GB/T 228.1—2021<sup>[16]</sup>，沿轧制方向取样，拉伸试样标距为 50 mm。电导率测量采用便携式 PZ-60A 涡流金属电导率测试仪。金相观察采用阳极覆膜偏光观察法，将磨抛后的试样在高氯酸水溶液（体积比为 2.5 mL : 100 mL）中进行阳极覆膜，电压为 25 V，电流控制在 0.1 ~ 0.3 A，覆膜时间为 60 s，观察面为垂直于轧向的沿轧板厚向的横断面。

## 2 多道次轧制试验及结果

### 2.1 试验方案

多道次轧制试验采用了 3 种累计变形量均为 92% 的多道次轧制工艺，如表 1 所示。在本试验前期工作中发现，随着轧制道次的增加，轧板变形抗力加大，在第 5 道次即出现轧制压下量达不到设计要求的情况，因此，本试验在连续进行前 4 道次轧制后，对轧板进行二次加热，再连续进行后 4 道次轧制。轧制坯料均经过 460 °C、保温 6 h 的预热，二次加热温度为 460 °C 并保温 1 h。轧板固溶工艺均为 460 °C 保温 1 h，出炉后水淬，时效工艺均为 120 °C 保温 24 h，出炉后空冷。

表 1 3 种轧制工艺的道次分配

Table 1 Pass arrangements of three rolling processes

轧制工艺	变形情况	道次								累计压下率/%	板厚/mm
		1	2	3	4	5	6	7	8		
1	压下量/mm	10.00	10.00	9.00	6.30	4.41	3.09	2.16	1.01	92	4.03
	压下率/%	20	25	30	30	30	30	30	20		
2	压下量/mm	7.50	8.50	8.50	6.38	6.69	4.35	2.42	1.70	92	3.96
	压下率/%	15	20	25	25	35	35	30	30		
3	压下量/mm	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	92	4.00
	压下率/%	12	13	15	18	21	27	37	59		

## 2.2 金相组织

3种轧制工艺的成品板金相组织如图1所示,其中 $RD$ 为轧制方向, $ND$ 为板厚方向。从图1可见:工艺1成品板金相组织仍以纤维状组织为主,

也存在少部分细长的条状晶粒,这表明再结晶进行不完全;工艺2成品板金相组织中晶粒长大明显,但沿轧制方向的变形程度较大;工艺3成品板金相组织中晶粒也沿轧制方向伸长,但组织明显细化。

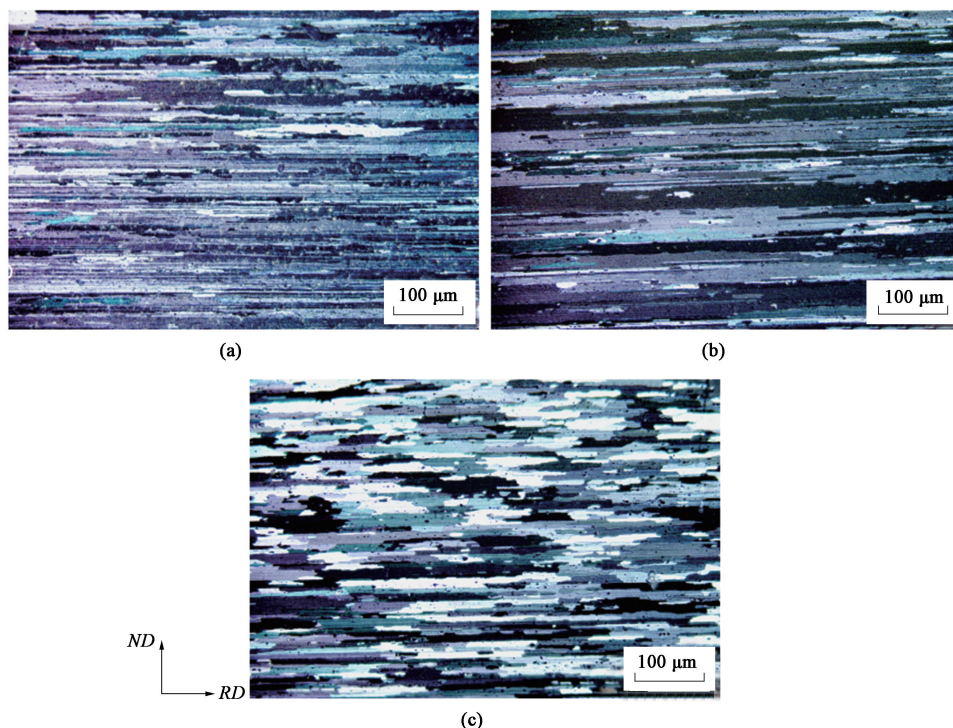


图1 3种轧制工艺下成品板的金相组织

(a) 工艺1 (b) 工艺2 (c) 工艺3

Fig. 1 Metallographic structures of finished plates under three rolling processes

(a) Process 1 (b) Process 2 (c) Process 3

## 2.3 力学性能

图2为工艺1、工艺2和工艺3获得的成品板的力学性能,以及与GB/T 3880.2—2012<sup>[15]</sup>(以下简称“国标”)中对T6处理后7075铝合金的铝板力学性能的对比结果。根据国标要求,7075铝板厚度为3.00~6.00 mm时,规定非比例延伸强度不小于475 MPa,抗拉强度不小于545 MPa,断后伸长率不小于8%<sup>[15]</sup>。通过图2可知,工艺1成品板的规定非比例延伸强度和抗拉强度均高于国标,工艺2成品板的规定非比例延伸强度和抗拉强度均低于国标,工艺3成品板的规定非比例延伸强度高于国标,但抗拉强度低于国标,3种工艺下成品板的断后伸长率均超过8%。因此,只有工艺1成品板的3项指标均达到国标要求。

## 3 固溶时效工艺的参数优化

### 3.1 布氏硬度

表2为固溶时效多参数交叉试验的布氏硬度数

据,采用成品板强度偏低的工艺2轧板,进行固溶时效工艺参数优化试验。固溶温度分别为440、460、480和500℃,固溶时间分别为1和3 h,时效温度分别为120、130、140和150℃,3组参数进行交叉试验,时效时间均为24 h。试验测得的布氏硬度显示:固溶温度为440℃、固溶时间为1 h、时效温度为150℃的成品板的布氏硬度值最低,为142 HBW,称此工艺为工艺4;固溶温度为500℃、固溶时间为1 h、时效温度为120℃的成品板的布氏硬度值最高,为179 HBW,称此工艺为工艺5。而工艺2成品板的布氏硬度值为159 HBW,正好处在工艺4和工艺5之间。

### 3.2 金相组织

图3为工艺4、工艺2和工艺5的成品板的金相组织。在对7075铝合金固溶温度的相关研究中证实,随着固溶温度的升高,7075铝合金中发生不同程度的再结晶,原始的变形纤维晶粒转变为等轴晶粒,晶粒平均尺寸增大<sup>[17]</sup>。由图3a可见,工艺4成品



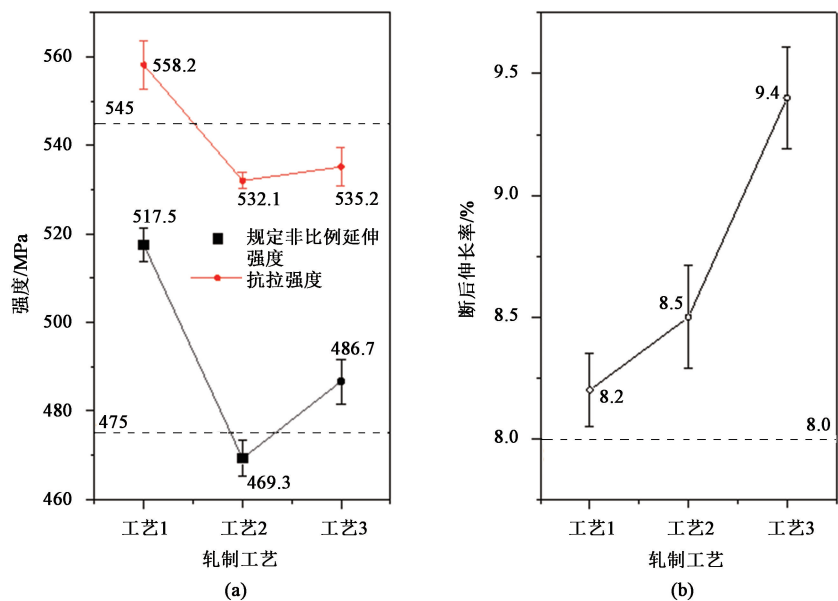


图2 工艺1、工艺2和工艺3下成品板的力学性能  
(a) 强度 (b) 断后伸长率

Fig. 2 Mechanical properties of finished plates under process 1, process 2 and process 3  
(a) Strength (b) Elongation after fracture

表 2 固溶时效多参数交叉试验的布氏硬度数据

Table 2 Brinell hardness data from multi-parameter cross test of solution aging

固溶温度/ ℃	固溶时间/ h	时效温度/ ℃	硬度值/ HBW	固溶温度/ ℃	固溶时间/ h	时效温度/ ℃	硬度值/ HBW
440	1	120	146	480	1	120	154
		130	150			130	168
		140	152			140	165
		150	142			150	170
	3	120	164		3	120	168
		130	170			130	162
		140	150			140	170
		150	148			150	162
460	1	120	159	500	1	120	179
		130	156			130	164
		140	156			140	168
		150	150			150	157
	3	120	168		3	120	174
		130	157			130	171
		140	159			140	168
		150	159			150	164

板的金相组织纤维化特征较为明显,虽然也可见伸长的条状晶粒,但晶界断续、不易分辨且数量较少;图 3b 为工艺 2 成品板的金相组织,晶粒沿轧制方向明显伸长,但晶界基本清晰;图 3c 为工艺 5 成品板的金相组织,晶粒仍然具有条状特征,虽然未形成

等轴晶粒,但变形纤维晶粒已经明显减少。同时,在 Al-Zn-Mg-Cu 合金的熔炼凝固过程中, $\eta$  (Mg-Zn<sub>2</sub>)、T (Al<sub>2</sub>Mg<sub>3</sub>Zn<sub>3</sub>)、S (Al<sub>2</sub>CuMg)、 $\theta$  (Al<sub>2</sub>Cu)、Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe、Al<sub>13</sub>Fe<sub>4</sub> 和 Mg<sub>2</sub>Si 等第二相会相继出现<sup>[18-19]</sup>,大部分第二相粒子,如 Mg(Zn, Cu, Al)<sub>2</sub> 会在固溶过程中被基体重新溶解吸收,并在时效过程中弥散析出,起到强化作用<sup>[20]</sup>。图 3d 为图 3a 中析出颗粒的显微形貌和能谱分析,白色箭头所指颗粒中 Zn、Mg、Cu 元素的含量偏高,与文献 [20] 结果基本一致。图 3c 中  $\alpha$  (Al) 晶粒内部颗粒状第二相较图 3a 和图 3b 明显减少,即表明固溶温度达到 500 ℃ 时,前期析出的第二相大量回溶到基体中,基体达到过饱和固溶状态,第二相在时效过程中弥散析出,对基体起到强化作用。

### 3.3 力学性能

将工艺 4、工艺 2 和工艺 5 成品板的力学性能数据列于图 4 中。由图 4 可知,3 种工艺下成品板的规定非比例延伸强度和抗拉强度逐渐升高,但只有工艺 5 成品板达到 GB/T 3880.2—2012<sup>[15]</sup> 的要求,且抗拉强度和断后伸长率在本文试验的全部 5 种工艺中最高,另外,工艺 2 和工艺 4 成品板的断后伸长率也均超过 8%。

## 4 电导率

图 5 为 5 种工艺在轧板固溶后水淬和时效下的



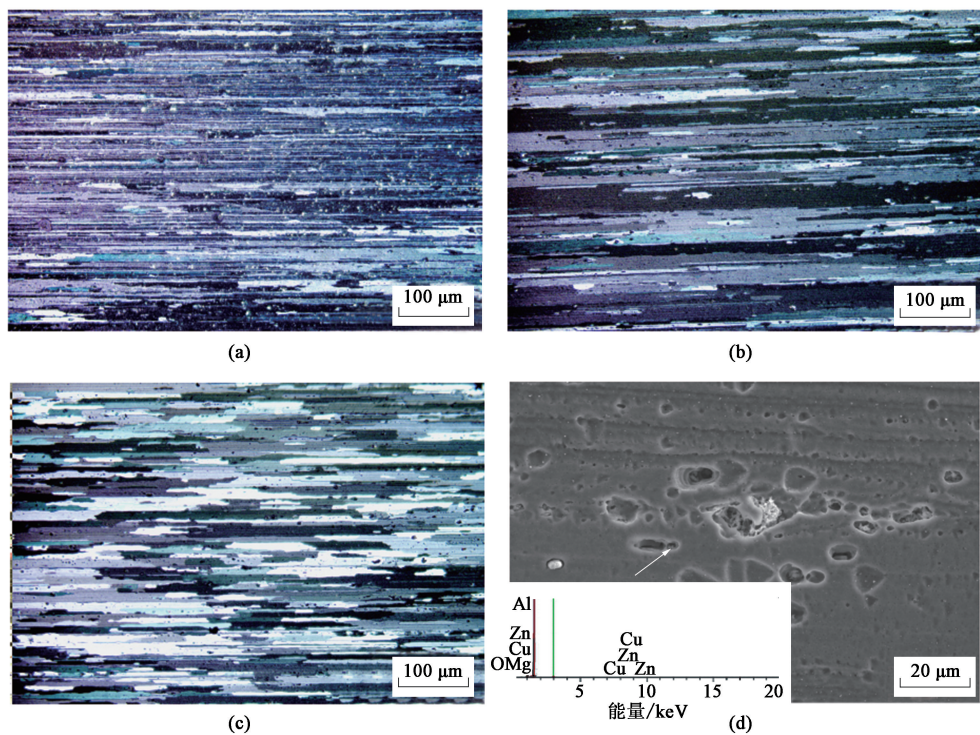


图 3 不同固溶时效工艺下成品板的金相组织  
(a) 工艺 4 (b) 工艺 2 (c) 工艺 5 (d) 工艺 4 中的析出颗粒  
Fig. 3 Metallographic structures of finished plates by different solution and aging processes  
(a) Process 4 (b) Process 2 (c) Process 5 (d) Precipitated particles in process 4

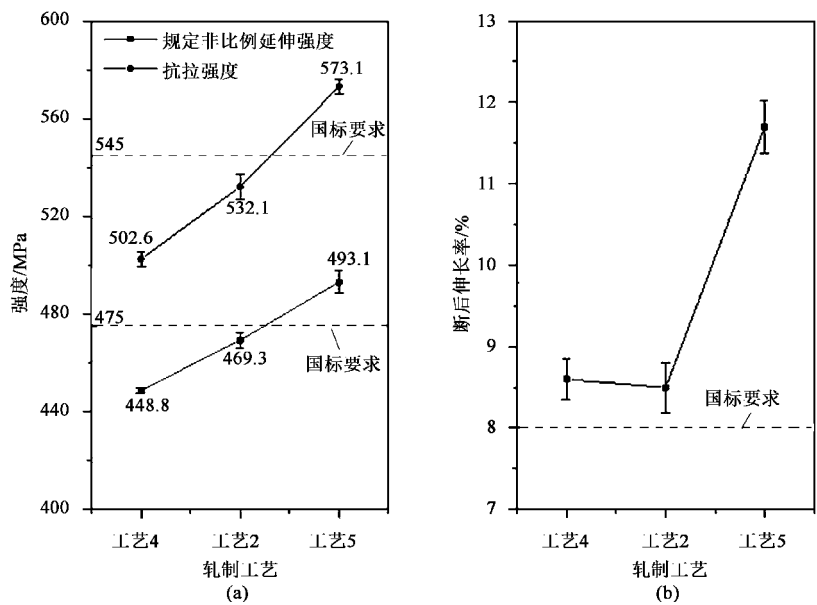


图 4 工艺 4、工艺 2 和工艺 5 下成品板与国标的力学性能对比  
(a) 强度 (b) 断后伸长率  
Fig. 4 Comparison of mechanical properties for finished plates under process 4, process 2 and process 5 with national standard  
(a) Strength (b) Elongation after fracture

电导率。周期性受损的晶体点阵变成自由电子新的散射源，进而对自由电子的运动产生额外的阻碍，即晶格缺陷电阻，此时金属晶体的导电性能下降<sup>[21]</sup>。因此，可以用电导率的变化来表征铝合金中元素的固溶和析出水平，评价固溶时效工艺的效果<sup>[22]</sup>。

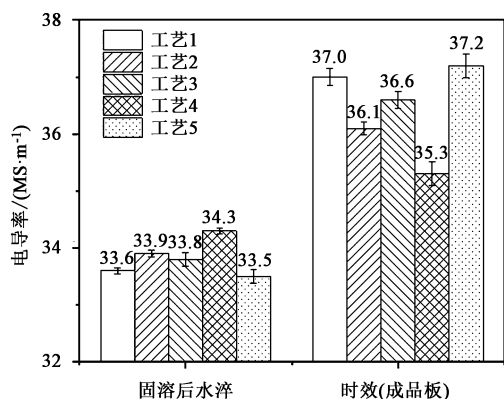


图5 5种工艺固溶后水淬和时效的电导率

Fig. 5 Conductivity of water quenching after solution and aging by five processes

本文试验中,因工艺1、工艺2和工艺3轧制过程中二次加热的温度和时间均与后续固溶处理相同,因此,二次加热也对前4道次轧制后的轧板起到了固溶处理的作用。经过二次加热后,前4道次轧制过程中析出的第二相粒子部分回溶入基体中,累积的变形储能也通过再结晶过程部分被释放。因此,成品板的组织性能受后4道次轧制的影响更直接。工艺1、工艺2和工艺3的后4道次轧制累计压下率分别为73%、79%和85%。文献[7]表明,随轧制变形量的增加,7075铝板材组织的动态再结晶进行得越完全,固溶时效处理后的金相组织中的晶粒会逐渐细化,使成品板的强度和断后伸长率持续升高。工艺2和工艺3的成品板晶粒随着后4道次轧制累计压下率的增加逐渐细化,强度和断后伸长率逐渐升高,与文献[7]的结论相同。但工艺1成品板的晶粒以纤维状组织为主,强度高的同时,断后伸长率较工艺2和工艺3低。分析认为,工艺1前4道次轧制累计压下率达到71%,而工艺2和工艺3分别为62%和46%,较高的累计压下率使工艺1轧板在前4道次轧制过程中发生的动态再结晶和在二次加热过程中发生的静态再结晶都更完全,因此,在二次加热后晶粒更加细化。而工艺1后4道次轧制累计压下率较工艺2和工艺3偏小,因此,后4道次轧制过程中的动态再结晶和固溶过程中的静态再结晶不如工艺2和工艺3完全,造成工艺1的成品板的纤维状组织更多,晶粒组织的协调变形能力较弱,导致断后伸长率也较低。同时,工艺1成品板中有大量纤维状组织,这些组织在轧板中已存在,阻挡了自由电子的长程移动,导致工艺1轧板固溶后水淬的电导率低于工艺2和工艺3的电导率,但纤维状组织提供了原子迁移通道,有利于

时效过程中第二相弥散析出,增强了析出强化作用。试验和模拟计算结果均表明,析出强化是Al-Zn-Mg-Cu合金的主要强化机制,其强化效果明显高于固溶强化和细晶强化<sup>[23]</sup>。从图5也可以看出,工艺1成品板的电导率高于工艺2和工艺3的电导率,表明析出强化效果更佳,因此,强度也明显高于工艺2和工艺3的成品板强度。

工艺4的固溶温度低于工艺2和工艺5的固溶温度,固溶效果不理想,因此,轧板固溶后水淬的电导率较高,即部分析出相未能回溶入基体中,基体过饱和度偏低;时效后成品板的电导率增加最少,说明过饱和溶质原子的析出量少于工艺2和工艺5,析出强化作用较弱。工艺5的固溶效果最好,时效时能够析出更多的固溶原子,形成最强的析出强化作用,因此,强度和电导率均高于工艺4和工艺2。同时,工艺4的固溶温度偏低,导致静态再结晶进行不完全,晶粒形核和长大均不充分,成品板断口中韧窝细小且浅;工艺2成品板中晶粒仍明显伸长,不利于断后伸长率的提升,其断口韧窝深浅不均;工艺5成品板再结晶充分完成,晶粒尺寸分布均匀,第二相粒子弥散析出,断后伸长率有明显的提高。

## 5 结论

(1) 采用8道次轧制并加入二次加热工艺生产的厚度为4.00 mm的7075铝板,其累计压下率达到92%,在二次加热前4道次累计压下率71%时,所获得的成品板的规定非比例延伸强度达517.5 MPa,抗拉强度达558.2 MPa,断后伸长率达8.2%,力学性能达到国标要求,为最优轧制工艺;而前4道次累计压下率为62%和46%的工艺得到的成品板的力学性能未能达到国标要求。

(2) 对二次加热前4道次累计压下率为62%的轧板进行固溶时效多参数交叉试验,在固溶温度为500℃、固溶时间为1 h、时效温度为120℃、时效时间为24 h的固溶时效工艺下,获得的成品板的力学性能也达到了国标要求。在轧制工艺不理想的情况下,通过优化固溶时效工艺仍可以使成品板的力学性能达到国标要求,且相较于在440℃、460℃和480℃固溶,在500℃固溶可以使成品板获得更好的综合性能。

### 参考文献:

- [1] 王梦寒,咸国材,黄龙. 时效温度对轧制态7075铝合金组织

- 及性能的影响 [J]. 金属热处理, 2014, 39 (5): 129-131.
- Wang M H, Xian G C, Huang L. Effects of aging temperature on microstructure and mechanical properties of as-rolled 7075 aluminum alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 39 (5): 129-131.
- [2] Choi Y, Lee J, Panicker S S, et al. Mechanical properties, springback, and formability of W-temper and peak aged 7075 aluminum alloy sheets: Experiments and modeling [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 170: 105344.
- [3] Lee Y S, Koh D H, Kim H W, et al. Improved bake-hardening response of Al-Zn-Mg-Cu alloy through pre-aging treatment [J]. Scripta Materialia, 2018, 147: 45-49.
- [4] Zhang W P, Li H H, Hu Z L, et al. Investigation on the deformation behavior and post-formed microstructure/properties of AA7075-T6 alloy under pre-hardened hot forming process [J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 792: 139749.
- [5] Paulisch M C, Lentz M, Wemme H, et al. The different dependencies of the mechanical properties and microstructures on hot extrusion and artificial aging processing in case of the alloys Al 7108 and Al 7175 [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 233: 68-78.
- [6] Jiang J F, Liu Y Z, Xiao G F, et al. Effect of pass reduction on microstructure, mechanical properties and texture of hot-rolled 7075 alloy [J]. Materials Characterization, 2019, 147: 324-339.
- [7] 夏华丹. 轧制变形量对汽车用 7075 铝合金组织和力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (11): 104-106.
- Xia H D. Effects of rolling deformation on microstructure and mechanical properties of 7075 aluminum alloy for automobile [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (11): 104-106.
- [8] 龚文源, 郑小平, 田亚强, 等. 7075 铝合金热轧工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (7): 1-4.
- Gong W Y, Zheng X P, Tian Y Q, et al. Research on hot rolling process of 7075 aluminum alloy [J]. Hot Working Technology, 2017, 46 (7): 1-4.
- [9] 黄冠腾, 黎国立, 梁昌旺, 等. 龙形轧制铝厚板弯曲程度和变形渗透性研究 [J]. 热处理技术与装备, 2022, 43 (6): 8-11.
- Huang G T, Li G L, Liang C W, et al. Study on bending degree and deformation permeability of aluminum thick plates by dragon rolling [J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2022, 43 (6): 8-11.
- [10] Zhao X D, Yang X R, Chu Z B, et al. Investigations on warm rolling and post-rolling aging of 7075 alloy [J]. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2022, 62 (6): 709-719.
- [11] Su X, Shen S Z, Xu J B, et al. Thermal formability of 7075 alloy strip under electric pulse rheo-rolling process [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51 (3): 850-857.
- [12] Zheng J X, Shang Y H, Guo Y L, et al. Analytical model of residual stress in ultrasonic rolling of 7075 aluminum alloy [J]. 2022, 80 (8): 132-140.
- [13] 王江涛, 谭文胜, 周东帅, 等. 固溶时效对 7075 铝合金微观组织和力学性能的影响 [J]. 金属热处理, 2017, 42 (12): 148-154.
- Wang J T, Tan W S, Zhou D S, et al. Effects of solution treatment and aging on microstructure and mechanical properties of 7075 aluminum [J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42 (12): 148-154.
- [14] 徐戊娇. 强化固溶对 7050 铝合金组织与性能的影响 [J]. 金属热处理, 2015, 40 (4): 57-61.
- Xu W J. Effect of strengthening-solid-solution on microstructure and properties of 7050 aluminum alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40 (4): 57-61.
- [15] GB/T 3880.2—2012, 一般工业用铝及铝合金板、带材 第2部分: 力学性能 [S].
- GB/T 3880.2—2012, Wrought aluminium and aluminium alloy plates, sheets and strips for general engineering—Part 2: Mechanical properties [S].
- [16] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法 [S].
- GB/T 228.1—2021, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].
- [17] 叶拓, 唐明, 刘吉兆, 等. 固溶温度对 7075 铝板组织与力学性能的影响 [J]. 金属热处理, 2022, 47 (3): 119-123.
- Ye T, Tang M, Liu J Z, et al. Effect of solution temperature on microstructure and mechanical properties of 7075 aluminum alloy sheet [J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47 (3): 119-123.
- [18] Cong F G, Zhao G, Jiang F, et al. Effect of homogenization treatment on microstructure and mechanical properties of DC cast 7X50 aluminum alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25 (4): 1027-1034.
- [19] Rokhlin L L, Dobatkina T V, Bocharov N R, et al. Investigation of phase equilibria in alloys of Al-Zn-Mg-Cu-Zr-Sc-system [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2004, 367 (1-2): 10-16.
- [20] Zou X L, Yan H, Chen X H. Evolution of second phases and mechanical properties of 7075 Al alloy processed by solution heat treatment [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27 (10): 2146-2155.
- [21] 张亚宁, 严文, 陈建, 等. 塑性变形对单晶铜线材导电性影响的研究 [J]. 西安工业学院学报, 2005, 25 (2): 150-152.
- Zhang Y N, Yan W, Chen J, et al. Effects of plastic deformation on the electric property of single crystal copper wires [J]. Journal of Xi'an Technological University, 2005, 25 (2): 150-152.
- [22] 武磊, 何兵, 石伟和, 等. 轧制方案对 7075 铝合金 T6 板的影响 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (11): 159-164.
- Wu L, He B, Shi W H, et al. Influence of rolling scheme on 7075 aluminum alloy T6 plates [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (11): 159-164.
- [23] Zou Y, Wu X D, Tang S B, et al. Investigation on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloys with various Zn/Mg ratios [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 85: 106-117.