

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2024.04.014

形变退火工艺对 2024 铝合金性能的影响

肖可谋¹, 蹇海根^{1,2}, 陈 森¹, 牌君君³, 伍江瑶¹, 杨 曼¹

(1. 湖南工业大学 材料与先进制造学院, 湖南 株洲 412007; 2. 株洲欧科亿数控精密刀具股份有限公司, 湖南 株洲 412500; 3. 山东省先进铝基材料与技术重点实验室, 山东 滨州 262207)

摘 要: 采用正交试验法研究了形变量、预回复温度、预回复时间、退火温度和退火时间 5 个因素对 2024 铝合金力学性能和腐蚀性能的影响。结果表明: 各因素对材料性能的影响显著, 其中对力学性能影响最大的因素为退火温度, 对腐蚀性能影响最大和最小的因素分别为形变量和退火时间。通过正交优化得到的最佳形变退火工艺如下: 形变量为 80%, 且在 220 °C 温度下预回复 120 min, 320 °C 温度下退火 10 min, 此工艺下获得的合金具较好综合性能, 样品显微硬度、抗拉强度、屈服强度、延伸率、腐蚀深度、 R_p 和 I_{corr} 分别为 74.49 HV、217.17 MPa、185.84 MPa、13.53%、55.4 μm 、3 885.6 $\Omega\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 9.42E-06 $\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

关键词: 2024 铝合金; 形变退火工艺; 力学性能; 腐蚀性能

中图分类号: TG146.21

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2024)04-0098-09

引文格式: 肖可谋, 蹇海根, 陈 森, 等. 形变退火工艺对 2024 铝合金性能的影响 [J]. 湖南工业大学学报, 2024, 38(4): 98-106.

Influence of Deformation Annealing on Properties of 2024 Aluminum Alloy

XIAO Kemou¹, JIAN Haigen^{1,2}, CHEN Miao¹, PAI Junjun³, WU Jiangyao¹, YANG Man¹

(1. College of Materials and Advanced Manufacturing, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. OKE CNC Precision Tool Co., Ltd., Zhuzhou Hunan 412500, China;
3. Shandong Key Laboratory of Advanced Aluminum Materials and Technology, Binzhou Shandong 262207, China)

Abstract: A research has been conducted on the influence of five factors, namely deformation, pre-recovery temperature, pre-recovery time, annealing temperature, and annealing time, on the mechanical and corrosion properties of 2024 aluminum alloy by adopting the orthogonal experimental method. The results show that each factor has a significant impact on the material properties, with annealing temperature being the most significant factor affecting the mechanical properties, while deformation and annealing time being the most and least significant factors affecting corrosion performance, respectively. The optimal deformation annealing process obtained through orthogonal optimization is as follows: with its deformation variable being 80%, a pre-recovery of alloy for 120 minutes at 220 °C with an annealing for 10 minutes at 320 °C. The alloy obtained under this process is characterized with good comprehensive properties, with the microhardness, tensile strength, yield strength, elongation, corrosion depth, R_p and I_{corr} of the sample being 74.49 HV, 217.17 MPa, 185.84 MPa, 13.53%, 55.4 μm , 3 885.6 $\Omega\cdot\text{cm}^{-2}$ and 9.42E-06 $\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$, respectively.

Keywords: 2024 aluminum alloy; deformation annealing; mechanical property; corrosion property

自美国铝业公司 (Alcoa) 得到 2024 铝合金以来, 其因密度低、比强度高、可加工性能好等优点, 被广

泛应用于航空航天、轨道交通和军工等领域^[1-3]。形变退火是将形变和退火相结合的加工工艺。冷变形后

收稿日期: 2023-06-24

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2023JJ50174); 教育部产学研合作协同育人基金资助项目 (220506429021607); 湖南工业大学大学生创新创业训练计划基金资助项目 (2023176)

作者简介: 肖可谋, 男, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为铝合金形变退火工艺, E-mail: 1335163797@qq.com

通信作者: 蹇海根, 男, 湖南工业大学教授, 博士, 主要研究方向为铝合金微结构机理, E-mail: jianhaigen2001@163.com

的2024铝合金虽强度提高,但塑性、韧性大幅度降低,残留应力高,组织缺陷多,处于热力学上的亚稳定状态,需通过后续退火工艺处理回到稳态。

材料工作者们围绕铝合金的形变退火工艺展开了大量研究。Wang T.等^[4]研究了形变量对粉末冶金2024铝合金微观组织和力学性能的影响,发现组织致密度随冷轧形变量增加而提高,晶粒细化,力学性能改善。梁爽等^[5]研究了退火制度对2024铝合金冷轧板材力学性能的影响,发现退火温度越高、保温时间越长,合金抗拉和屈服强度小幅下降,但合金延伸率大幅提高。王秩农等^[6]研究了不同退火制度下冷轧LY12铝合金晶界特征分布及抗腐蚀性能,得知预回复并低温退火的样品有最高的Σ7晶界出现频度和最好的抗腐蚀性能。

综上,当下铝合金形变退火工艺的研究,主要是单一因素变化对合金微观组织及性能的影响,而对多因素的综合影响较少,因此,本文拟用正交试验法系统研究形变量、预回复温度和时间、退火温度和时间等对2024铝合金力学性能和腐蚀性能的影响。

1 实验材料与方法

1.1 原材料与仪器

1) 原材料。试验材料选用热轧态2024铝合金板材,其主要化学成分如表1所示。

表1 2024铝合金的化学成分

Table 1 Chemical components of 2024 aluminum alloy

元素	Cu	Mg	Si	Zn	Mn	Ti	Al
质量分数 /%	3.8~4.9	1.2~1.8	≤0.5	≤0.3	0.3~0.9	≤0.15	余量

2) 仪器。超声波清洗机, KQ80, 昆山市超声仪器有限公司; 电子恒温不锈钢水浴锅, HHS-2S, 上海虞龙仪器设备有限公司; DK77 系列电火花数控线切割机床, 泰州长德机械制造有限公司; 电化学工作站, CHI670E, 上海辰华仪器公司; 万能试样拉伸机, UTM 4204, 三思泰捷电气设备有限公司; 电阻炉, SX2-4-10, 长沙市远东电炉厂; 金相试样磨抛机, MP-2B 型, 上海电机公司日用电机厂; 金相显微镜, DMC4500, 徕卡显微系统(上海)贸易有限公司; 显微硬度计, HV-1000, 莱州知金测试仪器有限公司; 二辊轧机, 350×400, 无锡兴祥冶金机械厂。

1.2 实验步骤

为综合考虑形变和退火工艺参数对2024铝合金性能的影响,本文选取形变量、预回复温度、预回复时间、退火温度和退火时间5个因素进行正交试验,具体的5因子5水平见表2。正交试验表格由软件Minitab 19生成,25组试样编号及其工艺参数见表3。

表2 2024铝合金形变退火工艺正交试验因素水平表
Table 2 Horizontal table of orthogonal experimental factors for the deformation annealing of 2024 aluminum alloy

水平值	因 素				
	形变量 / %	预回复温度 /℃	预回复时间 /min	退火温度 /℃	退火时间 /min
1	5	80	60	280	10
2	15	120	90	320	35
3	30	180	120	380	60
4	60	220	150	450	95
5	80	250	180	500	120

表3 2024铝合金形变退火工艺正交设计表
Table 3 Orthogonal design table for the deformation annealing of 2024 aluminum alloy

样品编号	因 素				
	形变量 / %	预回复温度 /℃	预回复时间 /min	退火温度 /℃	退火时间 /min
1-1	5	80	60	280	10
1-2	5	120	90	320	35
1-3	5	180	120	380	60
1-4	5	220	150	450	95
1-5	5	250	180	500	120
2-1	15	80	90	380	95
2-2	15	120	120	450	120
2-3	15	180	150	500	10
2-4	15	220	180	280	35
2-5	15	250	60	320	60
3-1	30	80	120	500	35
3-2	30	120	150	280	60
3-3	30	180	180	320	95
3-4	30	220	60	380	120
3-5	30	250	90	450	10
4-1	60	80	150	320	60
4-2	60	120	180	380	60
4-3	60	180	60	450	60
4-4	60	220	90	500	60
4-5	60	250	120	280	60
5-1	80	80	180	450	60
5-2	80	120	60	500	95
5-3	80	180	90	280	120
5-4	80	220	120	320	10
5-5	80	250	150	380	35

先用线切割法将铝板割成150 mm×50 mm×5 mm板材,然后将经350℃/120 min均匀退火处理后板材分别进行冷轧变形、预回复和退火处理。再将形变退火后板材线切割成10 mm×10 mm的试样。试样工作面经机械预磨、抛光至粗糙度小于0.1 μm后,进行显微硬度、晶间腐蚀和电化学腐蚀性能测试。

晶间腐蚀试样用树脂密封除工作面外的所有面,腐蚀前用酒精和丙酮除油、去离子水超声清洗、冷风吹干。参考GB/T 7998—2005^[7],先将试样在(35±2)℃

晶间腐蚀溶液（57 g/L NaCl 与 10 mL/L H₂O₂ 混合液）中浸泡 24 h，然后垂直于轧向切开试样，对截面磨抛，拍摄金相照片，并测量腐蚀最大深度。

电化学腐蚀试验参考 GB/T 40299—2021^[8]，且样品工作面经机械磨抛，以电化学工作站分析，电解液为质量分数为 3.5%NaCl 溶液，测试使用传统三电极体系，辅助电极为铂电极，参比电极为饱和甘汞电极（saturated calomel electrode，SCE），工作电极为测试试样。极化曲线扫描范围相对开路电位 -1.8~0 V，扫描速率为 1 mV/s。

硬度测量参考 GB/T 4340.1—2009^[9]，用显微硬度计测试 10 个点位数据，加载载荷为 200 g，时间为 15 s，去掉最大值和最小值后取平均值为样品硬度值。

拉伸性能测试参考 GB/T 228.1—2010^[10]，在万能试样拉伸机上进行，拉伸试样尺寸见图 1。根据原始数据绘制应力 - 应变图，并且计算试样的抗拉强度、屈服强度

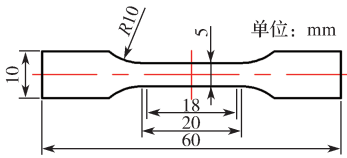


图 1 拉伸试样尺寸
Fig. 1 Tensile sample dimension

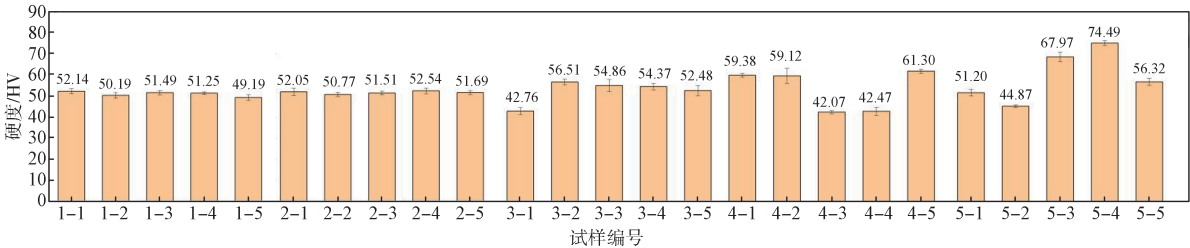


图 2 不同编号样品的显微硬度
Fig. 2 Microhardness of samples with different numbers

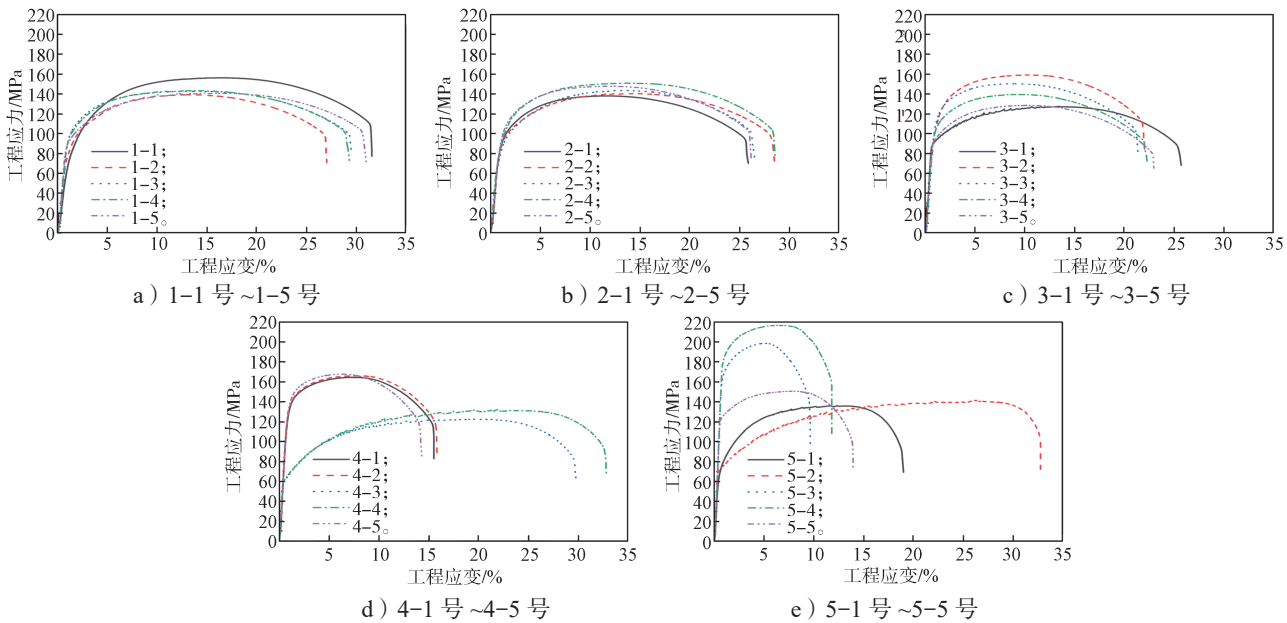


图 3 不同编号样品的应力 - 应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curves of samples with different numbers

和延伸率。

2 实验结果与分析

2.1 原材料性能测试

对 2024 铝合金热轧板原材料进行常温力学拉伸、显微硬度、晶间腐蚀和电化学测试，所得结果见表 4。

表 4 2024 铝合金热轧板原材料性能测试结果
Table 4 Performance test results of raw materials for 2024 aluminum alloy hot-rolled plates

名称与单位	取值	名称与单位	取值
抗拉强度 /MPa	150.76	腐蚀深度 /μm	55.6
屈服强度 /MPa	71.65	E_{corr}/V	-1.138
延伸率 /%	19.37	$R_p/(\Omega \cdot \text{cm}^{-2})$	4 301.4
硬度 /HV	55.12	$I_{\text{corr}}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	9.46E-06

2.2 力学性能测试

根据表 3 中的因素和水平进行显微硬度和常温力学拉伸试验，各样品的显微硬度及应力 - 应变曲线分别见图 2 和 3，性能测试结果汇总见表 5。

表 5 2024 铝合金力学性能正交试验结果

Table 5 Orthogonal test results of mechanical properties of 2024 aluminum alloy

样品 编号	力 学 性 能			
	硬度 /HV	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	延伸率 /%
1-1	52.14	156.20	73.65	18.24
1-2	50.19	139.18	78.28	22.94
1-3	51.49	142.71	98.29	25.88
1-4	51.25	143.34	93.63	25.35
1-5	49.19	140.92	90.10	27.06
2-1	52.05	138.01	85.27	20.00
2-2	50.77	140.38	85.93	24.94
2-3	51.51	143.50	78.19	25.76
2-4	52.54	150.86	91.25	20.71
2-5	51.69	147.77	92.95	18.24
3-1	42.76	127.37	90.28	23.18
3-2	56.51	159.07	110.12	16.47
3-3	54.86	150.22	111.60	17.53
3-4	54.37	139.52	99.83	18.47
3-5	52.48	128.57	91.35	21.76
4-1	59.38	164.62	131.87	10.94
4-2	59.12	166.17	129.88	12.94
4-3	42.07	122.65	60.77	27.06
4-4	42.47	133.19	62.35	27.76
4-5	61.30	167.77	134.30	10.59
5-1	51.20	136.33	69.91	15.06
5-2	44.87	142.55	71.85	28.24
5-3	67.97	199.32	167.57	10.24
5-4	74.49	217.17	185.84	13.53
5-5	56.32	150.98	124.69	15.65

从图 2、3 可直观看出,当样品形变量为 5%~15% 时,样品力学性能变化相对较小;当样品形变量为 60%~80% 时,其力学性能表现出较大差异。

由表 5 可以得知,25 组不同工艺样品中,样品 5-4 的硬度、抗拉强度和屈服强度最高,分别为

74.49 HV、217.17 MPa 和 185.84 MPa,样品 4-3 的最低,分别为 42.07 HV、122.65 MPa 和 60.77 MPa,相差 32.42 HV、94.52 MPa 和 125.07 MPa。样品 5-2 的延伸率最高,为 28.24%,而 5-3 最低,为 10.24%,相差 18%,说明各因素和水平对材料力学性能影响显著。

25 组样品中,综合力学性能在原始样品之上的仅有 7 组样品,即 3-2、4-1、4-2、4-5、5-3、5-4 和 5-5 号样品。其中,综合性能最优的为 5-4 号样品,4 组力学性能指标中,除延伸率外,其他力学性能指标均远高于原始样品的对应值。

为研究各因素对合金材料力学性能影响的权重次序,本文采用极差分析法对试验结果进行分析,即利用极差的大小反映各因素对试验结果影响的显著程度。极差分析见表 6。

表 6 极差分析表

Table 6 Extreme deviation analysis table

均值	因 素				
	形变量 / %	预回复 温度 /℃	预回复 时间 /min	退火 温度 /℃	退火 时间 /min
I	A_1	B_1	C_1	D_1	E_1
II	A_2	B_2	C_2	D_2	E_2
III	A_3	B_3	C_3	D_3	E_3
IV	A_4	B_4	C_4	D_4	E_4
V	A_5	B_5	C_5	D_5	E_5
R	$\text{Max}[A_i]-\text{Min}[A_i]$ $i=1,2,\cdots,5$	$\text{Max}[B_i]-\text{Min}[B_i]$ $i=1,2,\cdots,5$	$\text{Max}[C_i]-\text{Min}[C_i]$ $i=1,2,\cdots,5$	$\text{Max}[D_i]-\text{Min}[D_i]$ $i=1,2,\cdots,5$	$\text{Max}[E_i]-\text{Min}[E_i]$ $i=1,2,\cdots,5$

表 6 中, I、II、III、IV 和 V 分别为 5 个水平下的平均值,例如 A_1 代表 5 组形变量为 5% 样品测试结果的平均值,剩余的 A_2 、 A_3 、 A_4 和 A_5 则对应形变量为 15%、30%、60%、80% 样品测试结果的平均值。 R 为极差,即 I、II、III、IV 和 V 中最大值和最小值之差。极差越大,该因素对测试性能的影响越大。各因素的极差分析结果及权重次序汇总于表 7。

表 7 力学性能因素的极差结果汇总及权重次序

Table 7 Extreme results and weighting order of mechanical property factors

极差 R	因 素					各因素对力学性能影响的权重由高到低排序
	形变量 / %	预回复 温度 /℃	预回复 时间 /min	退火温度 / ℃	退火时间 / min	
硬度 /HV	8.12	3.52	7.13	11.96	9.17	退火温度、退火时间、形变量、预回复时间、预回复温度
抗拉强度 /MPa	28.32	12.31	17.34	32.39	24.11	退火温度、形变量、退火时间、预回复时间、预回复温度
屈服强度 /MPa	37.25	16.48	39.12	41.55	28.34	退火温度、预回复时间、形变量、退火时间、预回复温度
延伸率 /%	7.35	3.81	4.12	11.15	3.58	退火温度、形变量、预回复时间、预回复温度、退火时间

由表 7 可知,对于显微硬度,5 个因素中极差 R 由大到小排序为 $R_{\text{退火温度}}$ 、 $R_{\text{退火时间}}$ 、 $R_{\text{形变量}}$ 、 $R_{\text{预回复时间}}$ 、 $R_{\text{预回复温度}}$,对强硬度影响最大和最小的因素分别为退

火温度和预回复温度;对延伸率影响最大和最小的因素则分别为退火温度和退火时间。

为了能更加直观地反映各影响因素对 2024 铝合

金力学性能的影响, 根据表 6, 对表 5 中的试验结果进行了计算和分析, 按照各水平的均值绘制了形变

退火工艺对样品力学性能的影响趋势图, 具体如图 4 所示。

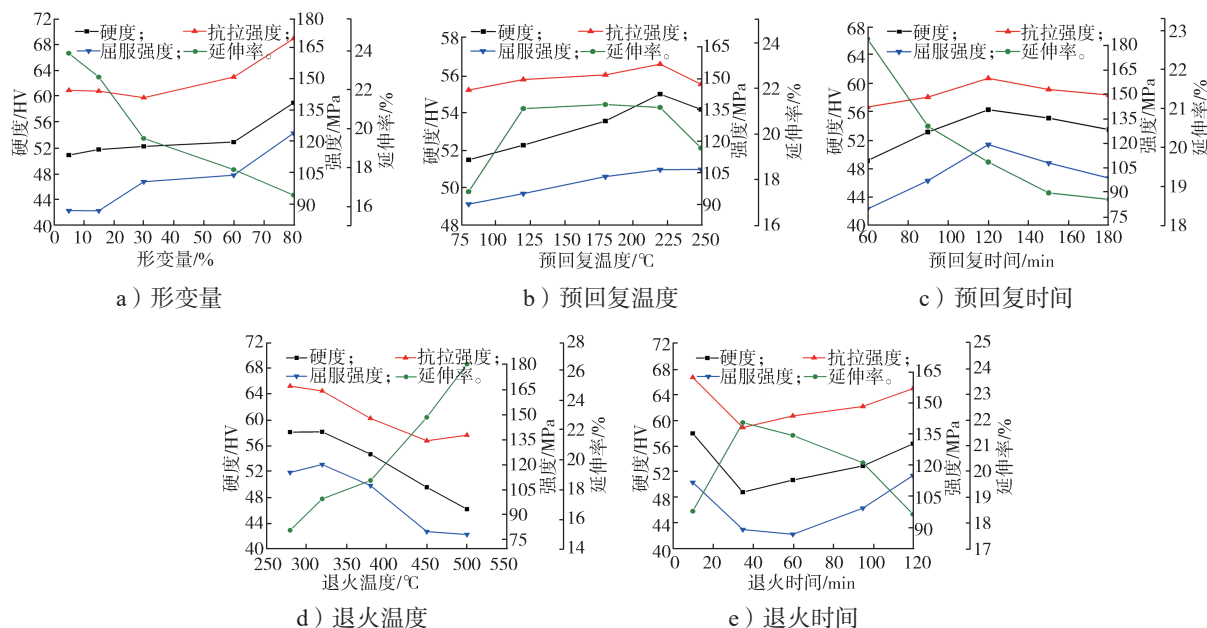


图 4 形变退火工艺对 2024 铝合金力学性能的影响趋势

Fig. 4 Influence of deformation annealing on the mechanical properties of 2024 aluminum alloy

由图 4a 可知, 随着样品冷轧形变量增加, 样品的显微硬度提高、延伸率降低; 抗拉强度和屈服强度均表现出先轻微下降后又随形变量增加而提高的变化趋势。一般来说, 铝合金材料的强度和硬度存在一定的线性关系, 但因本文所用的原始材料为热轧态铝合金板材, 材料表层的形变量更大^[1], 当冷轧形变量较小时, 材料受冷轧工艺影响较小且厚度较厚, 此时形变量对材料表层测得的显微硬度和整体拉伸得到的强度的影响趋势会存在差异, 但这种差异会随着冷轧形变量的进一步增加而逐渐缩小并最终消失。材料强度出现下降趋势主要是受再结晶程度的影响。形变量较小时, 材料的形变储能有限并在预回复阶段被部分释放, 使得后续退火过程的再结晶程度较低。此时, 随着形变量增加, 形变储能能力增加, 退火后的再结晶程度也增加, 导致材料强度降低。

由图 4b 可知, 随着预回复温度升高, 合金的显微硬度、抗拉强度、屈服强度和延伸率均先增后减, 不过最大值所处温度有所不同。延伸率最大值出现在预回复温度为 180 °C 时; 而显微硬度、抗拉强度和屈服强度最大值则出现在 220 °C 时, 此预回复温度下样品的延伸率达 21.16%, 仅次于 180 °C 时的 21.29%。

由图 4c 可知, 随着预回复时间增加, 延伸率小幅度降低; 硬度、抗拉强度和屈服强度先升高后降低。4 组力学性能指标的极差分别为 7.13 HV、17.34 MPa、39.12 MPa 和 4.12%, 这说明预回复时间对屈

服强度的影响相对明显。

从图 4d 中可看出, 退火温度为 320~450 °C 时, 样品的显微硬度、抗拉强度和屈服强度随升温而下降, 延伸率则由 17.36% 升至 22.83%。当退火温度由 280 °C 升至 320 °C 时, 抗拉强度降低, 硬度和屈服强度提高, 但总体变化都较小, 延伸率明显提高。当退火温度为 450~500 °C 高温区间时, 样品的抗拉强度提高, 硬度和屈服强度降低, 且硬度下降的幅度较大。文献 [5] 结果表明, 冷轧态 2024 铝合金在低于 320 °C 的温度区间退火 20~80 min 时, 合金内部组织仍处于回复阶段, 力学性能随升温变化较小, 抗拉强度会随退火温度升高表现出一定的上升趋势, 当退火时间延长至 110 min, 又会转变为下降趋势; 而屈服强度则在 20~50 min 表现出上升趋势, 后续转为下降趋势。图 4d 中性能结果为不同退火时间的样品测试结果均值, 因此当退火温度由 280 °C 升至 320 °C 时, 样品抗拉强度减小, 屈服强度提高。当退火温度由 450 °C 升至 500 °C 时, 由于退火温度较高, 合金中第二相溶解形成过饱和固溶体, 并在后续的空冷过程中并未完全分解, 留下的部分溶质原子聚集在位错线附近形成柯氏气团, 这对位错有钉扎作用, 使得抗拉强度不降反升, 硬度下降则是因为高温退火使材料完全再结晶, 而形变量较小的样品表层变形大, 退火再结晶程度高, 使得硬度的均值下降。

由图 4e 可以看出, 随着退火时间增加, 材料的

强度和硬度均先减小后增大。当退火时间从 10 min 延长到 35 min 时,合金的显微硬度和抗拉强度分别降低到 48.78 HV 和 138.21 MPa;当退火时间为 35~120 min 时,显微硬度和抗拉强度则随之增加到 56.34 HV 和 156.95 MPa。屈服强度的最低点出现在退火时间为 60 min 时,此时屈服强度为 86.72 MPa。

延伸率与强度和硬度的变化趋势相反,即随退火时间的延长先增后减,最大值为 21.91 MPa,出现在退火时间为 35 min 时。

2.3 腐蚀性测试

根据表 3 中因素和水平进行腐蚀试验,不同编号样品的晶间腐蚀截面图和极化曲线见图 5 和 6。

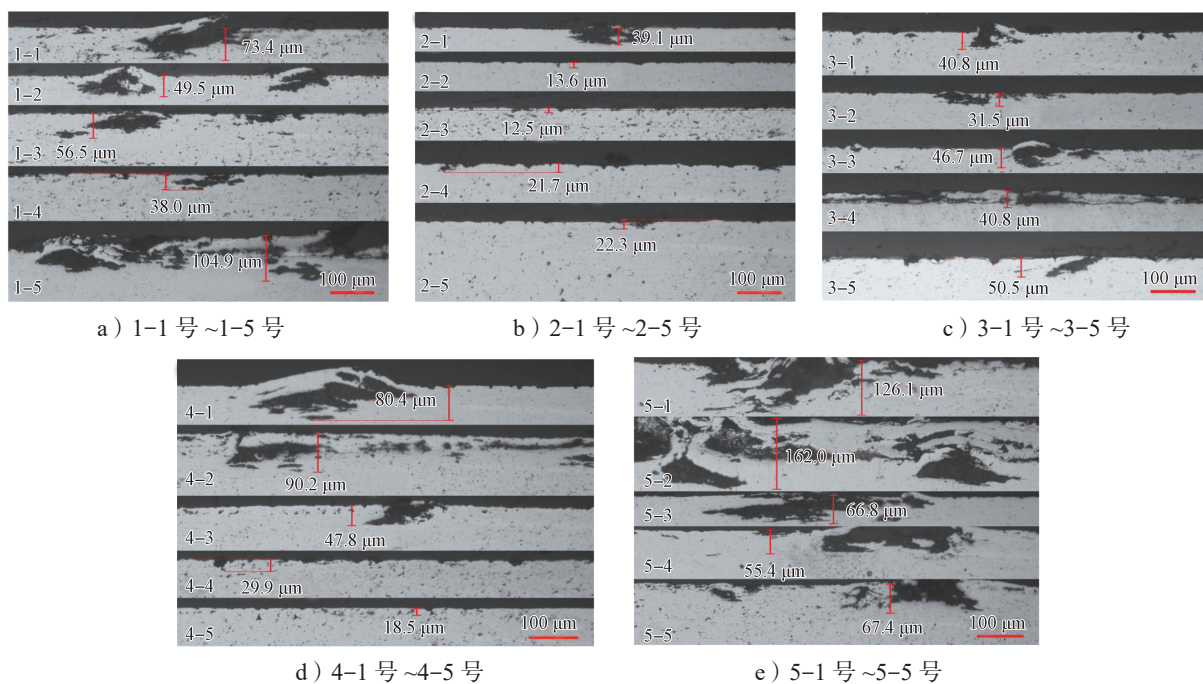


图 5 不同编号样品的晶间腐蚀截面图

Fig. 5 Cross sections of intergranular corrosion of samples with different numbers

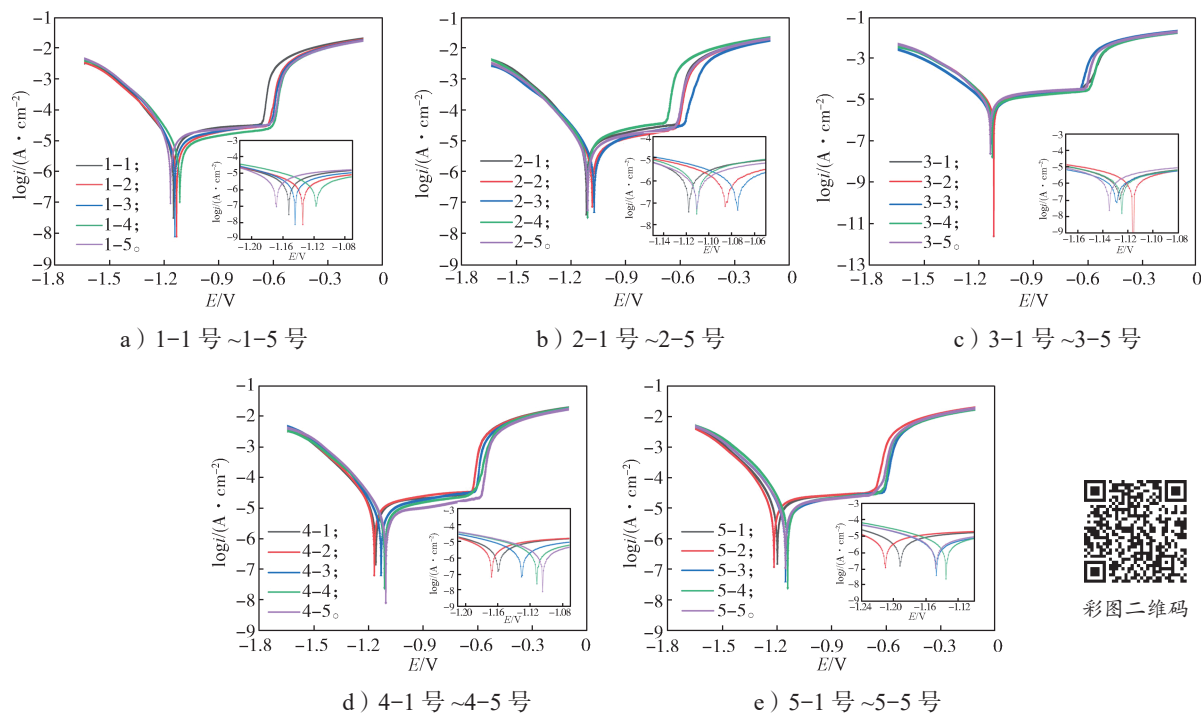


图 6 不同编号样品的极化曲线图

Fig. 6 Polarization curves of samples with different numbers

由图 5 和图 6 可看出,各组样品均发生了不同程度的腐蚀,其中样品 5-2 腐蚀程度最为严重,腐蚀电

位负移明显,而样品2-3腐蚀程度最轻,腐蚀电位最正。

各样品的腐蚀性能结果汇总于表8。

表8 2024 铝合金腐蚀性能正交试验结果
Table 8 Corrosion property orthogonal test results of 2024 aluminum alloy

样品 编号	腐蚀性能			样品 编号	腐蚀性能		
	腐蚀 深度/ μm	$R_p/(\Omega\cdot\text{cm}^{-2})$	$I_{\text{corr}}/(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$		腐蚀 深度/ μm	$R_p/(\Omega\cdot\text{cm}^{-2})$	$I_{\text{corr}}/(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$
1-1	73.4	3 697.3	1.15E-05	3-4	40.8	5 431.0	7.08E-06
1-2	49.5	5 558.0	6.85E-06	3-5	50.5	4 723.5	8.13E-06
1-3	56.5	4 430.4	8.50E-06	4-1	80.4	3 780.2	1.07E-05
1-4	38.0	5 491.8	6.95E-06	4-2	90.2	3 459.8	1.17E-05
1-5	104.9	3 186.8	1.16E-05	4-3	47.8	5 063.0	7.42E-06
2-1	39.1	5 473.5	7.04E-06	4-4	29.9	5 761.3	6.60E-06
2-2	13.6	8 759.5	4.31E-06	4-5	18.5	6 404.6	6.43E-06
2-3	12.5	9 318.3	3.93E-06	5-1	126.1	2 892.5	1.40E-05
2-4	21.7	5 132.5	7.90E-06	5-2	162.0	2 842.2	1.31E-05
2-5	22.3	6 966.5	5.53E-06	5-3	66.8	4 547.5	7.92E-06
3-1	40.8	5 249.6	7.04E-06	5-4	55.4	3 885.6	9.42E-06
3-2	31.5	5 048.1	7.90E-06	5-5	67.4	3 823.7	1.02E-05
3-3	46.7	6 794.5	5.94E-06				

本研究中,样品的晶间腐蚀性能选择腐蚀深度作为其衡量指标,电化学腐蚀性能则选取极化曲线拟合参数中的 R_p 和 I_{corr} 作为指标。一般来说,样品的腐蚀深度越浅, R_p 值越大,而 I_{corr} 值越小,则耐蚀性能越好。

分析表8中的数据可以得知,25组样品中,样品2-3的耐蚀性能最好,其腐蚀深度、 R_p 和 I_{corr} 分别为12.5 μm 、9 318.3 $\Omega\cdot\text{cm}^{-2}$ 和3.93E-06 $\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$;而样品5-2的腐蚀深度最深, R_p 最小,其值分别为162.0 μm 和2 842.2 $\Omega\cdot\text{cm}^{-2}$;样品5-1的 I_{corr} 最大,其值达1.40 E-05 $\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。由此可以得知,3组指标的最大值和最小值之差分别为149.5 μm 、6 476.1 $\Omega\cdot\text{cm}^{-2}$ 和1.007E-05 $\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$,这一结果说明,各影响因素对材料的腐蚀性能均有显著影响。

对表8所示的试验结果按照表6所示极差分析表进行分析和计算,得到各因素对样品性能影响的权重,次序总结于表9中。由表9可知,对腐蚀深度、 R_p 和 I_{corr} 影响最大和最小的因素,分别为形变量和退火时间。

表9 腐蚀性能因素的极差汇总及权重次序
Table 9 Extreme deviation and weighting order of the corrosion property factors

极差 R	因 素					各因素对力学性能影响的权重由高到低排序
	形变量 / %	预回复 温度/℃	预回复 时间/min	退火温度 / ℃	退火时间 / min	
腐蚀深度/ μm	73.70	34.80	40.96	27.64	15.86	形变量、预回复时间、预回复温度、退火温度、退火时间
$R_p/(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	3 531.8	1 812.1	1 452.7	873.3	436.0	形变量、预回复温度、预回复时间、退火温度、退火时间
$I_{\text{corr}}/(\Omega\cdot\text{cm}^{-2})$	5.19E-06	3.32E-06	3.09E-06	1.21E-06	1.05E-06	形变量、预回复温度、预回复时间、退火温度、退火时间

根据极差分析表计算得到的各水平的均值绘制

了形变退火工艺对腐蚀性能影响趋势图,如图7所示。

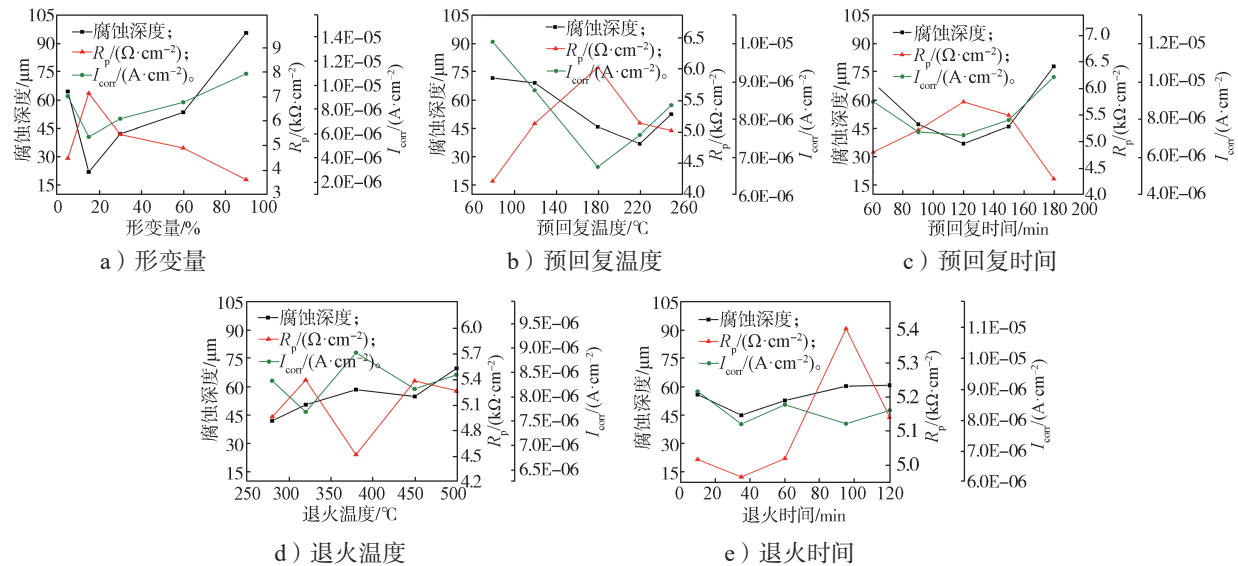


图7 形变退火工艺对2024 铝合金腐蚀性能的影响趋势

Fig. 7 Influence trend of deformation annealing process on the corrosion properties of 2024 aluminum alloy

由图7a可知,腐蚀深度和 I_{corr} 随形变量的增加

表现出先减后增的变化趋势,最小值出现在形变量

为 15% 时。 R_p 的变化趋势与腐蚀深度和 I_{corr} 相反,即先增后减,最大值同样出现在形变量为 15% 时。以上结果说明,随着形变量的增加,样品腐蚀性能呈先升高后降低的趋势。一般来说,随着冷轧形变量的增加,合金内引入的形变储能增加,位错密度升高,合金腐蚀性能降低,从图 7a 可以看到,当样品的形变量为 15%~80% 时,合金腐蚀性能变化符合该一般规律。当形变量为 5% 时,形变量较小,再加上预回复消耗了一部分形变储能,再结晶驱动力低,几乎不发生再结晶;随着形变量提高到 15%,此时形变储能增加,足以驱动再结晶,因而再结晶程度增加,腐蚀性能得到改善。

由图 7b 可知,随着预回复温度升高,腐蚀深度和 I_{corr} 两组指标均表现出先减后增的变化趋势,其中腐蚀深度最小值出现在预回复温度为 220 °C 时, I_{corr} 最小值出现在预回复温度为 180 °C 时; R_p 变化趋势与 I_{corr} 的相反,预回复温度为 180 °C 时有最大值。这表明,随着预回复温度升高,合金的腐蚀性能先升高后降低。其中电化学腐蚀性能和晶间腐蚀性能最佳分别在预回复温度为 180 °C 和 220 °C 时。

从图 7c 可看出,当预回复时间从 60 min 增加到 120 min 时,合金的腐蚀深度和 I_{corr} 减小, R_p 增加。当预回复时间延长到 180 min 时,腐蚀深度和 I_{corr} 增加,而 R_p 减小。由此可知,当预回复时间为 120 min 时,合金拥有最佳的晶间腐蚀和电化学腐蚀性能。

观察 7d 可以发现,在 280~380 °C 温度范围内,腐蚀深度随着退火温度的升高由 42.38 μm 增加到 58.80 μm ,但达到 450 °C 时又有所降低,450~500 °C 区间腐蚀深度由 55.20 μm 再度提高到 70.02 μm 。 R_p 和 I_{corr} 随退火温度提高,无明显递增或递减趋势,但在退火温度为 380 °C 时分别存在最小值和最大值,说明退火温度为 380 °C 时合金电化学腐蚀性能最差。

由图 7e 可看出,退火时间对腐蚀性能的影响较小,其极差 R 也是 5 个因素中影响最小的一个,随着退火时间延长,腐蚀深度只出现轻微的先降后升的变化趋势,最小值出现在退火时间为 35 min 时。电化学腐蚀性能无明显变化规律,最佳性能出现在退火时间为 95 min 时。

3 最佳退火工艺确定

本研究中正交试验衡量试验结果的性能指标较多,包括 4 个力学性能指标和 3 个腐蚀性能指标。其中延伸率和腐蚀性能与强硬度都存在竞争关系,相互矛盾,难以统一,在此前提下要寻找一个同时兼顾所有指标的最优方案较为困难。因此,本文采用综合平

衡法,先对每个指标单个进行分析,然后将它们进行综合分析,最终筛选出 1 组或多组较佳方案组合。

从图 4a 和图 7a 中可看出样品晶间腐蚀和电化学腐蚀性的变化趋势与抗拉强度相反,即随着形变量的增加,样品抗拉强度先减小后增大,腐蚀性能则是先提高后降低,其最值均在形变量为 15% 时出现。而硬度、屈服强度随形变量的增加而提高,延伸率则表现出递减的变化趋势。这些结果表明,对于形变量来说,样品的强硬度与延伸率及腐蚀性能表现出明显的竞争关系。考虑到当样品形变量小时,形变储能也较少,后续的预回复及退火对样品性能的影响也较小,为方便后续的控制变量试验法研究,这里选择拥有最好强硬度的 80% 作为样品的形变量。

图 4b 和图 7b 表明,随着预回复温度升高,样品的力学性能和腐蚀性能均先提高后降低。其中显微硬度、抗拉强度和腐蚀深度的最佳水平均在退火温度为 220 °C 时,且此时屈服强度、延伸率、 R_p 和 I_{corr} 均为仅次于最佳水平的第二水平。综合考虑,预回复温度选择 220 °C。

观察图 4c 和图 7c 发现,显微硬度、抗拉强度、屈服强度、腐蚀深度、 R_p 和 I_{corr} 的最优水平均为预回复时间为 120 min,此时延伸率处于中等水平,但与最高水平仅相差 3.16%,差距较小。综合考虑,选择 120 min 作为预回复时间。

图 4d 和图 7d 表明,退火温度为 320~450 °C 时强硬度下降明显,延伸率持续提高,而腐蚀性能除退火温度为 380 °C 时明显降低之外,其余水平差距均相对较小。280 °C 和 320 °C 两组水平强硬度和腐蚀性能相对较好,且数值接近,但 320 °C 具有更好的延伸率。因此,选取 320 °C 作为退火温度。

从图 4e 和图 7e 中可看出,随着退火时间延长,强硬度先减后增,最佳水平位于退火时间为 10 min 处;延伸率先提高后降低;腐蚀性能总体变化较小。综合考虑,选取 10 min 作为退火时间。

综上,形变退火工艺选择如下:形变量、预回复温度、预回复时间、退火温度和退火时间分别为 80%、220 °C、120 min、320 °C 和 10 min。此时显微硬度、抗拉强度、屈服强度、延伸率、腐蚀深度、 R_p 和 I_{corr} 分别为 74.49 HV、217.17 MPa、185.84 MPa、13.53%、55.4 μm 、3 885.6 $\Omega\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 9.42E-06 $\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$,与其余样品相比,其综合性能较好。

4 结论

本文采用正交试验方法,研究了不同形变退火工艺对 2024 铝合金性能的影响,得出如下结论:

1) 所选各因素对材料性能的影响显著, 其中对力学性能影响最大的因素为退火温度, 对腐蚀性能影响最大和最小的因素分别为形变量和退火时间。

2) 各因素对样品硬度和强度影响的变化趋势存在差异, 主要是因材料表层和心部变形不均匀。

3) 正交优化得出的最佳形变退火工艺如下: 形变量为 80%, 预回复温度为 220 °C, 预回复时间为 120 min, 退火温度为 320 °C, 退火时间为 10 min。

参考文献:

- [1] 王业东, 蹇海根, 杨孝梅, 等. 2A12 铝合金电化学腐蚀行为研究[J]. 湖南工业大学学报, 2021, 35(1): 69-75.
WANG Yedong, JIAN Haigen, YANG Xiaomei, et al. Electrochemical Corrosion Behavior of 2A12 Aluminum Alloy[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2021, 35(1): 69-75.
- [2] 仲晓晓. 高压扭转制备细晶 2A12 铝合金及组织性能研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
ZHONG Xiaoxiao. Study on Microstructure and Properties of Fine Grain 2A12 Aluminum Alloy Prepared by High Pressure Torsion[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021.
- [3] 肖可谋, 聂伟军, 蹇海根, 等. 阳极氧化时间对 2A12 铝合金剥落腐蚀性能的影响[J]. 湖南工业大学学报, 2022, 36(4): 39-46.
XIAO Kemou, NIE Weijun, JIAN Haigen, et al. Effects of Anodizing Time on Exfoliation Corrosion Properties of 2A12 Aluminum Alloy[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2022, 36(4): 39-46.
- [4] WANG T, HUANG Y F, MA Y Z, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Powder Metallurgy 2024 Aluminum Alloy During Cold Rolling[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 3337-3348.
- [5] 梁爽, 刘智鑫, 赵伟, 等. 退火制度对 2024 铝合金冷轧板材力学性能的影响[J]. 世界有色金属, 2020(5): 8-9.
LIANG Shuang, LIU Zhixin, ZHAO Wei, et al. Effect of Annealing on Mechanical Properties of the Cold-Rolled Sheet of 2024 Aluminum Alloy[J]. World Nonferrous Metals, 2020(5): 8-9.
- [6] 王轶农, 武保林, 王刚, 等. LY12 铝合金的再结晶织构、晶界特征分布及抗腐蚀性能[J]. 金属学报, 2000, 36(10): 1085-1088.
WANG Yinong, WU Baolin, WANG Gang, et al. Recrystallization Texture, Csl Grain Boundary Distribution and Corrosion-Resisting Property of LY12 Alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000, 36(10): 1085-1088.
- [7] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 铝合金晶间腐蚀测定方法: GB/T 7998—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 1-4.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Test Method for Intergranular Corrosion of Aluminium Alloy: GB/T 7998—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005: 1-4.
- [8] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 金属和合金的腐蚀 腐蚀试验电化学测量方法适用惯例: GB/T 40299—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 1-8.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Corrosion of Metals and Alloys: Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing: GB/T 40299—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021: 1-8.
- [9] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属材料 维氏硬度试验 第 1 部分: 试验方法: GB/T 4340.1—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 2-4.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic Materials: Vickers Hardness Test: Part 1: Test Method: GB/T 4340.1—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010: 2-4.
- [10] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011: 9-19.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic Materials-Tensile Testing-Part 1: Method of Test at Room Temperature: GB/T 228.1—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011: 9-19.
- [11] 张华. 变形程度及退火温度对 7005-O 板材组织性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 1998(2): 34-36.
ZHANG Hua. Effect of Deformation Degree and Annealing Temperature on the Organizational Properties of 7005-O Sheet Light[J]. Alloy Fabrication Technology, 1998(2): 34-36.

(责任编辑: 廖友媛)