

引用格式: 赵佳航, 王建国, 刘东, 等. 轴向闭式辗轧成形对 7050 铝合金组织性能的影响[J]. 中国材料进展, 2026, 45(1): 30-36.
ZHAO J H, WANG J G, LIU D, *et al.* Effect of Axial Closed Die Rolling on the Structure and Performance of 7050 Aluminum Alloy[J]. Materials China, 2026, 45(1): 30-36.

轴向闭式辗轧成形对 7050 铝合金组织性能的影响

赵佳航¹, 王建国^{1,2}, 刘东^{1,2}, 南俊刚¹, 张宇¹, 梁邳睿¹

(1. 西北工业大学材料学院, 陕西 西安 710072)

(2. 安徽汉正航空材料有限公司, 安徽 宿州 234000)

摘要: 通过轴向闭式辗轧 (ACDR) 成形技术对 7050 铝合金进行成形加工, 并进行仿真模拟, 研究了 ACDR 对 7050 铝合金组织和性能的影响。结果表明, ACDR 后 7050 铝合金厚板的应变分布为: 中心 $>1/2R$ >边缘, 成形过程中存在“蘑菇效应”。通过 OM 和 SEM 观察后发现不同位置的锻态组织存在一定差异, 中心位置为等轴晶组织; $1/2R$ 处发生动态回复; 边缘处组织已模糊不清, 呈现纤维状。经过 $472\text{ }^{\circ}\text{C}\times 150\text{ min}$ 固溶处理和 $120\text{ }^{\circ}\text{C}\times 400\text{ min}+160\text{ }^{\circ}\text{C}\times 360\text{ min}$ 双级时效处理后分别对中心和边缘的径向和弦向试样进行常温拉伸性能测试, 结果表明, ACDR 后 7050 铝合金在中心和边缘处的屈服强度和延伸率存在一定差异, 在径向和弦向两个方向力学性能差异不大。

关键词: 轴向闭式辗轧; 7050 铝合金; 组织和性能; 铝合金厚板

中图分类号: TG146.21; TG339 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2026)01-0030-07

Effect of Axial Closed Die Rolling on the Structure and Performance of 7050 Aluminum Alloy

ZHAO Jiahang¹, WANG Jianguo^{1,2}, LIU Dong^{1,2}, NAN Jungang¹,
ZHANG Yu¹, LIANG Zhirui¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Anhui Hanzheng Aviation Materials Co., Ltd., Suzhou 234000, China)

Abstract: After axial closed die rolling (ACDR) technology forming and simulation, the influence of ACDR on the microstructure and properties of 7050 aluminum alloy was studied. The results show that the strain distribution of 7050 aluminum alloy thick plate after ACDR is as follows: center $>1/2R$ >edge, and mushroom effect exists in the forming process. By OM and SEM observation, it is found that there are some differences in the forged structure at different locations. The central position is an equiaxed crystal structure, the dynamic recovery occurs at $1/2R$, and the structure at the edge is blurred and shows a fibrous structure. After solution treatment at $472\text{ }^{\circ}\text{C}\times 150\text{ min}$ and dual aging treatment at $120\text{ }^{\circ}\text{C}\times 400\text{ min}+160\text{ }^{\circ}\text{C}\times 360\text{ min}$, radial and chord tensile properties of the center and edge are tested at room temperature, respectively. The results show that there are some differences in the yield strength and elongation of 7050 aluminum alloy at the center and edge, and little difference in the mechanical properties of the radial and chordwise.

Key words: axial closed die rolling; 7050 aluminum alloy; microstructure and property; aluminum alloy thick plate

1 前言

7050 铝合金具有优异的力学性能、良好的加工性、

良好的耐腐蚀性能和抗疲劳性能、低密度、高比强度等优点, 广泛应用于航空、航天等领域^[1-3]。7050 铝合金板材多用于生产飞机的主要结构件, 随着航空航天事业的迅速发展, 对飞机性能的要求越来越高, 因此作为结构件材料的 7050 铝合金不仅要有良好的综合性能, 同时还要具备良好的性能均匀性^[4,5]。

近些年来, 有许多学者研究了成形工艺和热处理制度对 7050 铝合金组织性能的影响^[6]。张洪静等^[7]研究了固溶处理温度对 7050 铝合金锻板组织和性能的影响。沈

收稿日期: 2024-04-10 修回日期: 2024-07-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52101052)

第一作者: 赵佳航, 男, 1997 年生, 硕士研究生

通讯作者: 王建国, 男, 1987 年生, 助理研究员,

jjanguow@nwpu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202404011

忱等^[8]研究了中间形变热处理对 7050 铝合金再结晶组织和力学性能的影响。马存强^[9]对异步轧制下 7050 铝合金的组织性能进行了研究。Wang 等^[10]研究了双辊工艺参数对于 7050 铝合金板材微观组织和成形性能的影响。孙玉崇等^[11]发现变形量在 75% 时 7050 铝合金的轧制板材有着较好的综合性能。叶凌英等^[12]通过差温轧制工艺提高了 7050 铝合金厚板的再结晶程度，改善了其性能的不均匀性。Jia 等^[13]通过等通道转角挤压和冷镦复合成形工艺改善了 7050 铝合金紧固件组织，使其显微硬度提升了约 10.9%。

轴向闭式辗轧 (axial closed die rolling, ACDR) 作为一种新兴的塑性成形技术，优点是^[14-17]：坯料与上模之间是局部接触成形，成形载荷小，成形所需压力为传统锻造的 1/5~1/15；成形方式具有三向应力 (径向拉伸、周向扭转和轴向压缩) 特征，可有效提高工件可塑性；可调整工艺参数多，工艺灵活性高；加工范围广，生产效率高等。ACDR 成形方式如图 1 所示，坯料通过合适尺寸的定位台固定在下模上；成形时，上模沿轴向下压，下模旋转的同时通过摩擦带动坯料和上模旋转，ACDR 成形过程既有轴向压应力又有扭转特性。

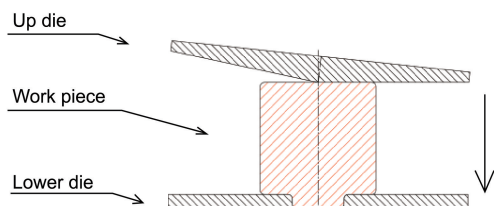


图 1 ACDR 成形示意图

Fig. 1 Schematic of ACDR forming

因此本文采用 ACDR 成形技术制造 7050 铝合金厚板，通过实验和模拟研究不同位置和方向上组织和性能的差异，为改善 7050 铝合金厚板组织和性能均匀性提供新的思路。

2 实验

本文所用 7050 铝合金的化学成分经 ICP-OES: Agilent 5110 检测后在表 1 中列出。

表 1 7050 铝合金化学成分

Table 1 Chemical composition of 7050 aluminum alloy (w/%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Zr	Ti	Al
0.02	0.15	2.23	0.1	2.07	6.56	0.09	0.04	Bal.

对 $\Phi 250 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$ 的棒状坯料进行 ACDR 成形加工，成形后工件尺寸如图 2 所示，实物如图 3 所示。

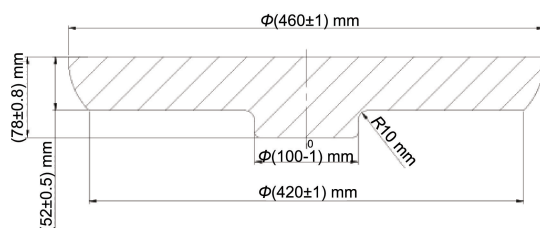


图 2 ACDR 成形后工件尺寸

Fig. 2 Workpiece size after ACDR forming

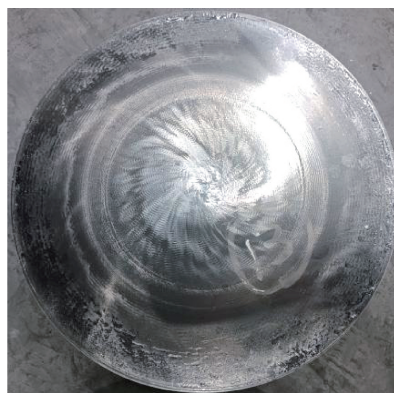


图 3 ACDR 成形后工件

Fig. 3 Workpiece after ACDR forming

使用 Simufact 软件对 ACDR 成形 7050 铝合金过程进行仿真模拟，所用参数在表 2 中列出。

表 2 ACDR 模拟参数

Table 2 Simulated parameters of ACDR

Parameter item	Value
Workpiece temperature/ $^{\circ}\text{C}$	450
Mold temperature/ $^{\circ}\text{C}$	25
Forming speed/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	6
Die speed/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	60

从成形的铝合金盘件的中心、1/2R 处、边缘处分别取 20 mm×10 mm×10 mm 的方块试样，经过粗磨、细磨、抛光后，使用 Graff Seagent 试剂 (成分为 1 mL HF+16 mL HNO₃+3 g CrO₃+83 mL H₂O) 擦拭腐蚀试样，后用酒精擦拭吹干，使用光学显微镜和 TESCAN 场发射扫描电子显微镜进行组织分析。

试样的热处理在箱式电阻炉中进行，热处理制度为单级固溶 (472 $^{\circ}\text{C} \times 150 \text{ min}$) + 双级时效 (120 $^{\circ}\text{C} \times 400 \text{ min} + 160 \text{ }^{\circ}\text{C} \times 360 \text{ min}$)，淬火转移时间小于 10 s，水温为 25 $^{\circ}\text{C}$ 。

在铝合金盘件的中心和边缘处分别取径向 (0 $^{\circ}$)、弦向 (45 $^{\circ}$) 拉伸试样，拉伸试样尺寸如图 4 所示，对经过固溶和双级时效处理后的试样进行常温拉伸测试，图 5 为常温拉伸试验前后的试样对比图。

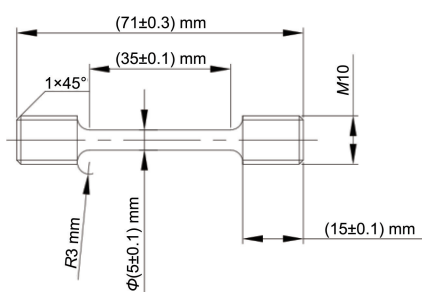


图 4 拉伸试样尺寸

Fig. 4 Size of tensile specimen



图 5 常温拉伸试验前后试样实物照片

Fig. 5 Photos of specimens before and after the room temperature tensile test

3 结果与讨论

3.1 模拟成形结果

图 6 为模拟成形所用上模、坯料、下模的初始状态。

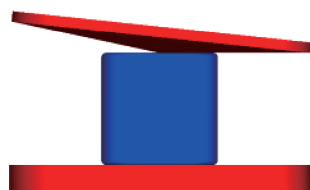


图 6 ACDR 模拟成形示意图

Fig. 6 Diagram of simulated ACDR forming

由于上模与坯料之间是局部连续成形，同时在扭转的作用下，ACDR 成形后的工件塑性流动与常规工艺成形工件存在差异，经过学者的深入研究发现：当坯料高径比超过 0.5 时，ACDR 成形过程中坯料上表面金属流动速率大于下表面，往往会形成上大下小的蘑菇状，称为“蘑菇效应”^[18-20]。

按照表 2 的参数模拟后成形结果如图 7 所示，图 7a~7d 分别为模拟进行至 30%，50%，70% 和 100% 时等效塑性应变分布剖面云图。受 ACDR 成形方式的影响，模

拟进行至 30% 时，受“蘑菇效应”影响坯料产生变形后随着金属流动上表面半径首先增大。从图 7a 可以看出，模拟进行至 30% 时，上表面中心应变最大，沿着半径和厚度方向逐渐减小，坯料大部分区域未发生明显应变变化。

图 7b 为模拟进行至 50% 的应变分布状况，坯料整体应变随之增大，大部分区域发生塑性应变，工件形状呈上大下小的蘑菇状。对比图 7a 可以发现，随着模拟的进行，两侧边缘处应变渗透深度与中心的渗透深度差异逐渐拉大。模拟进行至 70% 时(图 7c)，坯料整体应变进一步增大，上表面边缘处存在小范围不均匀应变区域，这是由于成形时应变以轴向应变渗透为主，径向应变渗透速率低于轴向速率造成的。

如图 7d 所示，模拟完成后工件应变基本保持在 1.2 以上。在整个成形过程中，随着模拟继续进行，“蘑菇效应”加剧，可以清楚看到随着坯料外轮廓半径差值增大，半径发生改变的部分与轴向间的夹角逐渐增大，导致的应变沿轴向和径向扩展时坯料两侧的应变渗透高于中心。成形阶段产生塑性应变最大的区域为上表面中心，随后向四周扩展，定位台部分是 ACDR 成形过程中的变形死区，因此其塑性应变最小，坯料应变为：中心>1/2R>边缘>定位台。由于成形时上模与坯料存在局部接触的特点，坯料上表面始终存在着一定的高度差，成形完成需要经过模具空转一段时间来消除上表面的高度差。

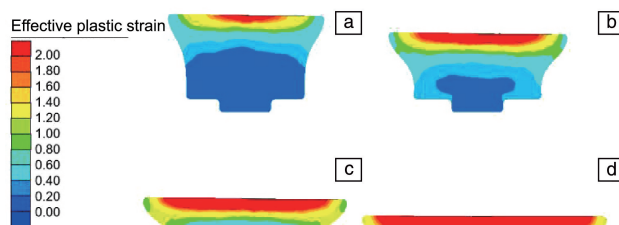


图 7 ACDR 模拟进行至不同程度时坯料等效塑性应变分布剖面云图：(a)30%，(b)50%，(c)70%，(d)100%

Fig. 7 Section view of the equivalent plastic strain distribution of the blank during the ACDR forming process: (a) 30%, (b) 50%, (c) 70%, (d) 100%

3.2 显微组织

3.2.1 光学显微组织

图 8 为 7050 铝合金不同热处理状态和位置的组织照片。图 8a~8c 分别为锻态的中心、1/2R、边缘处的晶粒组织照片，可以看出成形后 1/2R 和边缘处的晶粒组织沿变形方向被拉长，1/2R 处组织变形程度较弱，边缘处晶粒组织已模糊不清，而中心处未发现变形晶粒组织。结

合图 8 模拟成形应变分布来看, 3 个位置的累积应变大小排序为: 中心 $>1/2R>$ 边缘。由于中心位置组织应变大, 产生了充足的形变储能, 为再结晶提供了充足的驱动力, 成形时发生了再结晶形成等轴晶粒; $1/2R$ 处的组织仅发生动态回复, 出现晶粒组织长大现象; 边缘处晶粒组织未发生动态回复。

经过 $472\text{ }^{\circ}\text{C}\times 150\text{ min}$ 的固溶处理后, 中心到边缘处晶粒组织如图 8d~8f 所示, 中心、 $1/2R$ 和边缘位置部分晶粒组织长大的同时有大量的再结晶晶粒析出, 析出的晶粒反过来又阻碍了其他晶粒继续长大, 起到了细化晶粒的作用。与锻态组织相比, 固溶处理后只剩下少量的第二相组织, 这是因为在 $472\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下固溶第二相中大量熔点较低的 $\eta(\text{MgZn}_2)$ 相和 $\text{S}(\text{Al}_2\text{CuMg})$ 相已经回溶进入基体相, 剩下熔点高的 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ 相尚未

溶解。

图 8g~8i 为固溶和时效处理后的晶粒组织。表 3 为时效态不同位置平均晶粒尺寸, 不同位置晶粒尺寸的排序为: 中心 $>1/2R>$ 边缘。与固溶后组织相比, 时效态基体相中的再结晶晶粒有所长大。细小的再结晶晶粒组织和晶界处析出的第二相同时对工件起到了强化作用。

表 3 时效态 7050 铝合金的平均晶粒尺寸

Table 3 Average grain size of aged 7050 aluminum alloy

Location	Average grain size/ μm
Center	20.38
$1/2R$	20.11
Edge	16.44

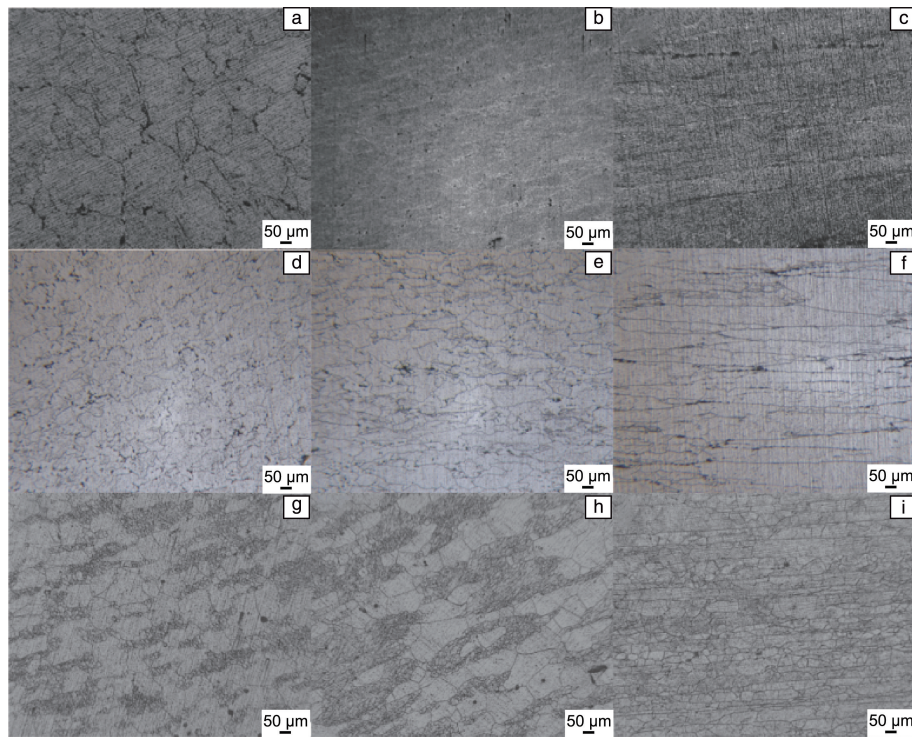


图 8 不同热处理状态和位置的 7050 铝合金的金相显微组织: (a) 锻态, 中心; (b) 锻态, $1/2R$; (c) 锻态, 边缘; (d) 固溶态, 中心; (e) 固溶态, $1/2R$; (f) 固溶态, 边缘; (g) 时效态, 中心; (h) 时效态, $1/2R$; (i) 时效态, 边缘

Fig. 8 Metallographs of 7050 aluminum alloy at different heat treatment states and positions: (a) center of forging, (b) $1/2R$ of forging, (c) edge of forging; (d) center of solution, (e) $1/2R$ of solution, (f) edge of solution; (g) center of aging, (h) $1/2R$ of aging, (i) edge of aging

图 9 为轧制 7050 铝合金板材的时效态组织^[21], 与图 8 ACDR 成形后的时效态组织相比, 轧制板材的晶粒尺寸均匀性较差。

3.2.2 扫描电子显微组织

7050 铝合金中的第二相主要为强化相 η 相、 S 相和难

溶相 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ 相。图 10 为锻态、固溶态以及时效态 7050 铝合金的 SEM 照片, 结合表 4 第二相元素含量的能谱分析结果, 可以发现图 10a 中锻态组织表面分布着大量的强化相, η 相和 S 相散乱分布在基体表面。锻态下 η 相和 S 相颗粒较大, 粗大的第二相容易对合金的性能产生负面影响^[22]。

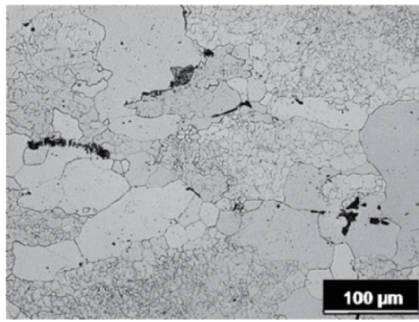


图 9 轧制 7050 铝合金板材时效态组织^[21]

Fig. 9 Aging microstructure of 7050 aluminum alloy rolled plate^[21]

经 472 °C×150 min 的固溶处理后(图 10b), 低熔点的 η 相和 S 相全部溶于基体相中, 表面只剩下难溶的 Al₇Cu₂Fe 相。

进一步进行时效处理后(图 10c), 结合表 4 能谱分析结果来看, 析出相以细小的 η 相为主, 还有少量颗粒较大的 S 相, η 相和 S 相优先在晶界附近析出, 阻碍了晶界移动使得晶粒细化。与锻态中的 η 相和 S 相相比, 时效析出的 η 相和 S 相颗粒更小, 能起到更好的强化效果。

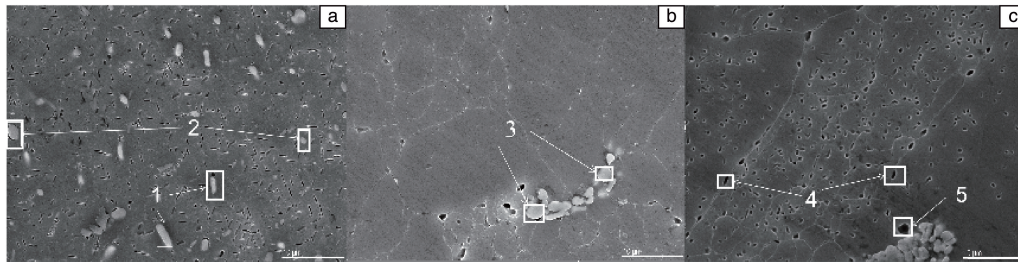


图 10 不同状态的 7050 铝合金的 SEM 照片: (a) 锻态, (b) 固溶态, (c) 时效态

Fig. 10 SEM images of 7050 aluminum alloy in different status: (a) forging, (b) solution, (c) aging

表 4 图 10 中标注的不同位置的元素成分分析结果

Table 4 Analysis results of elemental composition at different positions marked in figure 10 (w%)

Position	Cu	Mg	Zn	Fe	Al	Phase
1	—	1.86	2.83	—	Bal.	MgZn ₂
2	6.68	5.47	—	—	Bal.	Al ₂ CuMg
3	21.32	—	0.58	8.47	Bal.	Al ₇ Cu ₂ Fe
4	—	2.21	3.59	—	Bal.	MgZn ₂
5	—	1.72	—	1.57	Bal.	Al ₂ CuMg

3.3 拉伸性能

在电子万能试验机上对拉伸试样进行常温力学性能测试。铝合金不同位置的试样的应力-应变曲线如图 11 所示。拉伸性能具体数值在表 5 中列出。

从图 11 中中心和边缘位置试样的性能来看, 靠近边缘处的强度均高于中心, 但是相应的延伸率有所降低; 从径向(0°)与弦向(45°)对比来看, 中心和边缘 2 处的径向强度和延伸率都略高于弦向, 两个方向的力学性能差距在 2%~2.7%。

相较于径向(0°)与弦向(45°)性能的差异, 中心与边缘处的差异较大, 从表 5 可以看出, 相比于中心处, 边缘处强度较高, 延伸率较低; 径向(0°)方向上抗拉强度提高约 4%, 屈服强度提高约 4%, 延伸率降低了 4%; 弦向(45°)方向上抗拉强度提高了约 8%, 屈服强度提高了约 15%, 延伸率降低了 3.8%。结合图 8g 和 8i 的时效态中心和边缘位置组织进行分析, 由于时效态中

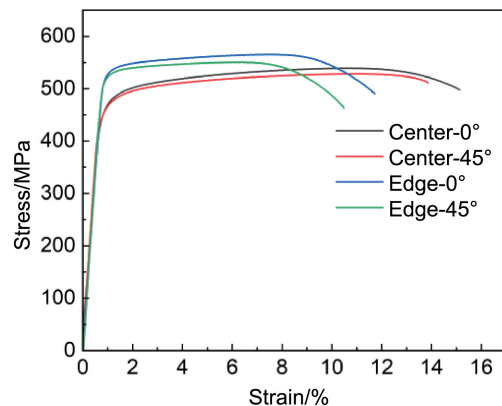


图 11 时效态 7050 铝合金不同位置试样的应力-应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curves of aged 7050 aluminum alloy at different positions

心组织为再结晶晶粒, 完全消除了加工硬化带来的影响, 边缘处组织为变形晶粒, 保留着一定的加工硬化特

性，因此两者在强度和延伸率上存在差异。从盘件中心到边缘处，抗拉强度和屈服强度越来越高，延伸率逐渐减小。径向方向(0°)上强度提高较少，延伸率降低明显，弦向方向(45°)上与径向方向相反，强度升高较多。

表 5 时效态 7050 铝合金拉伸试验结果

Table 5 Tensile test results of aged 7050 aluminum alloy

Location	Direction	Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Elongation/%
Center	0°	539.2	456.6	15.8
	45°	528.3	452.7	13.5
Edge	0°	565.5	527.1	10.9
	45°	550.6	520.5	9.7

表 6 为部分 7050 铝合金轧制厚板不同方向的拉伸性能数据^[23, 24]，可以看出轧制厚板不同方向力学性能差距在 3.8%~5%，结合表 5 的拉伸试验结果可知，ACDR 成形的 7050 铝合金厚板不同方向差距为 2%~2.7%，相比之下可以得出，ACDR 成形的 7050 铝合金厚板不同方向的力学性能更为均匀，而不同位置的性能差异则与 7050 铝合金轧制板材相当。结合图 8 和图 9 可以看出，性能的均匀性与晶粒组织的均匀性呈正相关，7050 铝合金轧制厚板的晶粒尺寸差异大因而不同方向的力学性能差异较大，相反 ACDR 成形 7050 铝合金厚板的晶粒尺寸差异较小，因此不同方向力学性能差异较小。

表 6 7050 铝合金轧制厚板不同方向性能

Table 6 Properties of 7050 aluminum alloy rolled thick plates in different directions

Direction	Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Ref.
0°	610	315	[23]
45°	641	345	
0°	563.5	468.5	[24]
45°	531.5	466.5	

图 12a~12d 分别为边缘径向、边缘弦向、中心径向、中心弦向拉伸试样断口 SEM 照片，可以看出试样断口中存在较多的椭圆形韧窝，韧窝尺寸大小不一，其中大部分韧窝较浅。裂纹首先在第二相附近产生，最终以韧窝的方式断裂。对比边缘和中心处拉伸试样断口可以发现：韧窝较少的边缘拉伸试样延伸率低，与之相反的韧窝数量较多的中心拉伸试样延伸率较高，延伸率大小和韧窝数量呈正相关。结合图 8g 和 8i 时效态组织可知，中心和边缘两位置晶粒组织和形状上的差异与其力学性能差异存在关联。

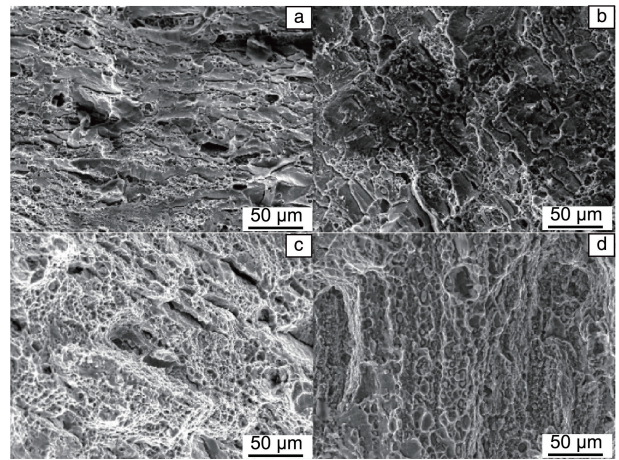


图 12 7050 铝合金拉伸试样断口 SEM 照片：(a) 边缘径向，(b) 边缘弦向，(c) 中心径向，(d) 中心弦向

Fig. 12 SEM images of 7050 aluminum alloy tensile specimen fracture: (a) radial of edge, (b) chordwise of edge, (c) radial of chordwise, (d) chordwise of center

相较于轧制生产的 7050 铝合金厚板，ACDR 技术成形的 7050 铝合金厚板晶粒尺寸均匀性更好，ACDR 成形技术在减少了 7050 铝合金不同方向之间性能差异的同时实现了中心和边缘不同位置组织性能的差异化。ACDR 不仅可以生产不同尺寸及厚度的圆板，还可以通过改变上下模具的形状成形不同类型的锻件，由于小批量生产时需要频繁更换模具，因此 ACDR 成形技术更适合大批量生产盘、齿轮、封头等对称性强的回转体锻件。

4 结论

(1) 轴向闭式辗轧(axial closed die rolling, ACDR)成形特点为局部连续加载，成形期间上表面存在一定的高度差，成形过程中应变分布特点为：中心 $>1/2R$ >边缘，成形时出现“蘑菇效应”，呈现出上大下小的形状。

(2) ACDR 成形后组织特点：晶粒组织由中心至边缘变形程度逐渐增大。中心处组织形变储能较大，回复和再结晶驱动力大，形成等轴晶； $1/2R$ 处组织发生动态回复，晶粒有所长大；边缘处晶粒已经不能分辨，呈现出纤维状组织。

(3) ACDR 成形后盘件中心和边缘位置的位伸性能存在一定差异，两位置强度差异较小、延伸率差异较大，相比之下中心处的综合性能更好。

(4) 固溶和时效处理后 ACDR 成形的 7050 铝合金厚板相比于轧制 7050 铝合金厚板在不同方向上的性能均匀性更好。

(5) 受 ACDR 特殊的运动形式影响，通过更改上模形状 ACDR 可大批量生产盘、齿轮、封头等对称性强的回转体零件。

参考文献 References

- [1] 朱钦, 麻彦龙, 谭巧缘, 等. 中国有色金属学报[J], 2023, 33(11): 3525-3546.
ZHU Q, MA Y L, TAN Q Y, *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous Metals[J], 2023, 33(11): 3525-3546.
- [2] ZHANG X, LUO Z G, XIE G M, *et al.* Material Letters[J], 2022, 324: 132608.
- [3] GONG H, CAO X, LIU Y Q, *et al.* Metals[J], 2020, 10(4): 515.
- [4] 党元晓, 王晓宁, 汪兵兵, 等. 广东化工[J], 2020, 47(2): 228-229.
DANG Y X, WANG X N, WANG B B, *et al.* Guangdong Chemical Industry[J], 2020, 47(2): 228-229.
- [5] 任伟才, 王金花, 丛福官, 等. 轻合金加工技术[J], 2019, 47(6): 9-19.
REN W C, WANG J H, CONG F G, *et al.* Light Alloy Fabrication Technology[J], 2019, 47(6): 9-19.
- [6] 马力, 魏振伟, 周杰, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2024, 53(5): 1262-1267.
MA L, WEI Z W, ZHOU J, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2024, 53(5): 1262-1267.
- [7] 张洪静, 黄晓冬, 孙有政, 等. 材料热处理学报[J], 2020, 41(11): 46-52.
ZHANG H J, HUANG X D, SUN Y Z, *et al.* Transaction of Materials and Heat Treatment[J], 2020, 41(11): 46-52.
- [8] 沈忱, 孙会. 热加工工艺[J], 2020, 49(2): 122-127.
SHEN C, SUN H. Hot Working Technology[J], 2020, 49(2): 122-127.
- [9] 马存强. 异步轧制 7xxx 系铝合金中厚板形变及翘曲优化研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2016.
MA C Q. Deformation and Bending Optimization of Asymmetrical Rolled 7xxx Series Al Alloy Plate[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2016.
- [10] WANG H B, ZHOU L, ZHANG Y W, *et al.* Journal of Materials Processing Technology[J], 2016, 233: 186-191.
- [11] 孙玉崇, 高安妮, 徐振, 等. 辽宁科技大学学报[J], 2022, 45(2): 99-103.
SUN Y C, GAO A N, XU Z, *et al.* Journal of Liaoning University of Science and Technology[J], 2022, 45(2): 99-103.
- [12] 叶凌英, 黄心悦, 范世通, 等. 中南大学学报(自然科学版)[J], 2018, 49(9): 2160-2167.
YE L Y, HUANG X Y, FAN S T, *et al.* Journal of Central South University(Science and Technology)[J], 2018, 49(9): 2160-2167.
- [13] JIA D S, HE T, SONG M, *et al.* Journal of Central South University[J], 2023, 30(11): 3682-3695.
- [14] 李晓龙. GH4169 合金轴向闭式辗轧过程中的组织演化[D]. 西安: 西北工业大学, 2019.
LI X L. Microstructure Evolution of GH4169 Alloy During Axial Closed Die Rolling[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2019.
- [15] WANG H, LIU D, ZHANG F X, *et al.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology[J], 2021, 114(1/2): 579-589.
- [16] 郑勇. 钛合金盘件 ACDR 成形运动学规律及组织性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
ZHENG Y. Kinematics Laws of ACDR Processing of Titanium Disc and Its Effect on Microstructures and Properties[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018.
- [17] 任柳吉. 热态轴向闭式辗轧(ACDR)过程的动力学分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2017.
REN L J. Dynamic Analysis of Hot Axial Closed Die Rolling (ACDR) Process[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2017.
- [18] ZHENG Y, LIU D, QIU S Y, *et al.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology[J], 2019, 104(9-12): 4105-4116.
- [19] 焦宇光. ACDR 成形过程中数值模拟与实验装置的设计[D]. 西安: 西北工业大学, 2013.
JIAO Y G. Numerical Modeling of Forming Process and Design of Testing Apparatus for ACDR[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2013.
- [20] LIU G, YUAN S J, WANG Z R, *et al.* Journal of Materials Processing Technology[J], 2004, 151(1-3): 178-182.
- [21] ANTUNES A M B S, BAPTISTA C A R P, BARBOZA M J R, *et al.* Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering[J], 2019, 41(8): 319.
- [22] 朱钦, 麻彦龙, 谭巧缘, 等. 中国有色金属学报[J], 2023, 33(11): 3525-3546.
ZHU Q, MA Y L, TAN Q Y, *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous Metals[J], 2023, 33(11): 3525-3546.
- [23] 任平平, 胡会娥. 锻压技术[J], 2021, 46(9): 163-168.
REN P P, HU H E. Forging & Stamping Technology[J], 2021, 46(9): 163-168.
- [24] 王经涛, 孙宁, 黄同斌, 等. 航空材料学报[J], 2023, 43(4): 76-85.
WANG J T, SUN N, HUANG T J, *et al.* Journal of Aeronautical Materials[J], 2023, 43(4): 76-85.