

7075 铝合金室温等通道转角拉伸模拟与试验

陈细林, 何 涛, 霍元明, 杜向阳, 张俊杰, 李 健, 张 超

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要: 采用有限元软件 Deform-3D 对 7075 铝合金室温等通道转角拉伸过程进行了数值模拟, 分析了室温条件下金属流动、最大主应力、等效应力以及等效应变的分布规律, 揭示了材料的变形机理。利用等通道转角拉伸试验, 验证了 7075 铝合金变形模拟结果的准确性。结果表明: 模具出、入口的金属流动速度差使试样在大变形区出现缩颈, 试样横截面的断面收缩率为 17.97%; 内、外模角区域的剪切力分布不均引起横截面呈椭圆形; 在金属流动速度差和剪切力分布不均的共同作用下, 大变形区出现明显弯曲。变形开始阶段, 内、外模角区域的应力状态复杂, 同时转角区域所产生的拉应力最大, 导致试样在难变形区与大变形区交界处最容易产生裂纹并发生断裂, 同时在大变形区靠近内模角的表面容易产生损伤。变形过程中, 试样的等效应力和等效应变分布呈现不均匀现象, 其横截面表面处的等效应变高于内部的数值, 其大变形区等效应变不均匀度系数为 0.85, 优于同参数的等通道转角挤压的 1.46。等通道转角拉伸试验后, 试样无明显的飞边与毛刺, 横截面的断面收缩率为 17.49%, 与模拟的结果相吻合。

关键词: 7075 铝合金; 等通道转角拉伸; 超细晶; 不均匀度系数; 断面收缩率

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.11.011

中图分类号: TG146.2*1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 11-0067-06

Simulation and experiment on equal channel angular drawing for 7075 aluminum alloy at room temperature

Chen Xilin, He Tao, Huo Yuanming, Du Xiangyang, Zhang Junjie, Li Jian, Zhang Chao

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: The equal channel angular drawing process of 7075 aluminum alloy at room temperature was simulated numerically by finite element software Deform-3D, and the distribution laws of metal flow, maximum principal stress, equivalent stress and equivalent strain at room temperature were analyzed to reveal the deformation mechanism of material. Then, the accuracy of the deformation simulation results for 7075 aluminum alloy was verified by the equal channel angular drawing experiment. The results show that the metal flow velocity difference between inlet and outlet of die causes the sample to shrink in the large deformation zone, and the cross-sectional shrinkage rate of sample is 17.97%. The uneven distribution of shear force in the inner and outer die corner zones results in an elliptical cross-section. Under the combined action of metal flow velocity difference and uneven shear force distribution, obvious bending occurs in the large deformation zone. At the beginning of deformation, the stress state in the inner and outer die corner zones is complex, and the tensile stress generated in the corner zone is the highest, resulting in cracks and fractures at the junction of the zone that is difficult to deform and the large deformation zone. At the same time, damage is prone to occur on the surface near the inner die corner in the large deformation zone. During the deformation process, the equivalent stress and equivalent strain distributions of sample show an uneven phenomenon. The equivalent strain at the cross-sectional surface is higher than the internal value, and the equivalent strain unevenness coefficient in the large deformation zone is 0.85, which is better than 1.46 of equal channel angular pressing with the same parameters. After the equal channel angular drawing experiment, the sample has no obvious flash edges and burrs, and the cross-sectional shrinkage rate is 17.49%, which is consistent with the simulation results.

Key words: 7075 aluminum alloy; equal channel angular drawing; ultra-fine grain; unevenness coefficient; section shrinkage rate

超高强铝合金因具有高比强度、刚度以及良好

的耐腐蚀性能等优势而逐渐成为轻量化制造研究的热点^[1-2]。7075 铝合金作为典型的超高强度铝合金, 具有优异的强度和良好的综合性能, 在航空航天等领域得到了广泛的应用^[3]。随着航空航天的发展对其性能提出了更高的要求。等通道转角挤压 (Equal Channel Angular Pressing, ECAP) 技术可以对材料施加剪切变形来制备块体超细晶材料^[4], 通过对

收稿日期: 2023-09-11; 修订日期: 2023-11-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52275350); 上海工程技术大学国际合作科研平台建设项目 (0301006)

作者简介: 陈细林 (1993-), 男, 硕士研究生

E-mail: 3084510981@qq.com

通信作者: 何 涛 (1979-), 男, 博士, 教授

E-mail: hetao@sues.edu.cn

7075 铝合金进行 ECAP 能够显著改善其组织和提高其力学性能。在进行 ECAP 加工中, 由于模具通道长度的限制和挤压长棒料冲头容易失稳, 不适合长棒材或线材的连续加工^[5]。Suriadi A B 和 Thomson P F 等^[6-7]通过相交通道拉坯的思想, 提出了可适合连续加工超细晶材料的等通道转角拉伸 (Equal Channel Angular Drawing, ECAD) 工艺。

在 ECAD 工艺的研究中, León J 等^[8]通过对 ECAD 中的应力、应变进行分析, 认为在相同的断面收缩率下, ECAD 工艺获得的塑性应变高于常规拉伸工艺, 可以以较低的面积减少量获得较高的变形值, 从而减少拉伸道次, 降低制造成本。Volokiti-na I E 等^[9]对普通拉拔和 ECAD 变形工艺的两种制丝方法进行了对比分析, 表明采用 ECAD 变形工艺时, A0 铝的加工效果明显优于普通拉拔, 晶粒细化得更小及力学性能提升得更高。Naizabekov A 等^[10]分析新型 ECAD 工艺对变形丝组织和性能的影响时认为, 此方法与现有的铜线生产工艺相比具有显著的优势, 可以获得超细晶结构, 且变形次数少。Naizabekov A 等^[11]通过模拟比较了 ECAP 和 ECAD 之间变形的差异, 发现 ECAD 能够获得符合尺寸和几何形状要求的超细晶结构线材。然而, 目前对于 ECAD 工艺的研究多用于改善纯铝或铜线的组织和性能, 关于 7075 铝合金室温 ECAD 变形机理还需进一步研究。

本文采用 Deform-3D 有限元模拟软件对 7075 铝合金室温 ECAD 变形过程进行模拟, 分析其室温 ECAD 变形过程中试样金属的流动规律、最大主应力以及等效应力、等效应变分布, 并通过试验进行验证, 为揭示 7075 铝合金室温 ECAD 变形特征、组织演变规律及变形机理提供理论依据, 对实现其超细晶材料的连续生产具有指导意义。

1 有限元模型的建立

等通道转角拉伸是一种将试样放入两个成一定角度连接的通道, 在拉模具的作用下, 试样通过转角模具以连续获得超细晶材料的工艺, 其原理如图 1 所示。

本文试验采用内模角为 $\varphi = 120^\circ$, 外模角为 $\psi = 30^\circ$ 的模具。试样采用尺寸为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 340 \text{ mm}$ 的 7075 铝合金。ECAD 的拉伸温度为 20°C , 每步行程为 0.2 mm , 拉伸速度为 $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。设定工件为塑性体, 上、下模具与拉模具设定为刚性体, 材料流动应力、应变采用自带库中的幂律关系曲线。对试样进行四面体网格划分, 网格数量为 32000, 当网

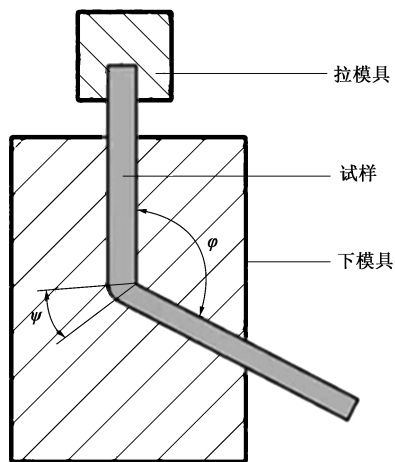


图 1 ECAD 工作原理图

Fig. 1 Working principle diagram of ECAD

格畸变干涉达到 0.7 时, 进行整体网格重新划分。模拟过程选用剪切摩擦类型, 由于试验过程采用 MoS_2 作为润滑剂, 因此设定摩擦因数为 0.1。

2 模拟结果与分析

2.1 ECAD 过程中金属流动规律

根据一道次 ECAD 后的表面形貌特点, 可将试样的变形划分为 3 个区域: 难变形区 I、大变形区 II 和小变形区 III^[12], 如图 2 所示。I 区试样仅受垂直通道的约束, 未经过转角区域, 此处为 ECAD 模具中与夹紧模具接触部分, 该部分试样在夹紧模具带动下在模具通道中运动, 仅受夹紧模具拉力与摩擦力作用, 未发生剪切变形。II 区试样通过该区域受到模具转角提供的剪切力与夹紧模具提供的拉力, 试样在两向压应力、一向拉应力的作用下发生剪切变形。III 区试样最后经过转角, 但并未经过剪切变形, 端部发生了一定的翘曲, 这是由于摩擦力作用的影响使得试样靠近外模角部的金属流动速度大于靠近内模角部的。

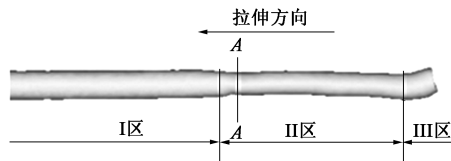


图 2 变形区域分布

Fig. 2 Distribution of deformation zones

图 3 为从图 2 中截取试样的 A-A 横截面, 从图 3 中可以看出, 经过 ECAD 变形后, 试样在难变形

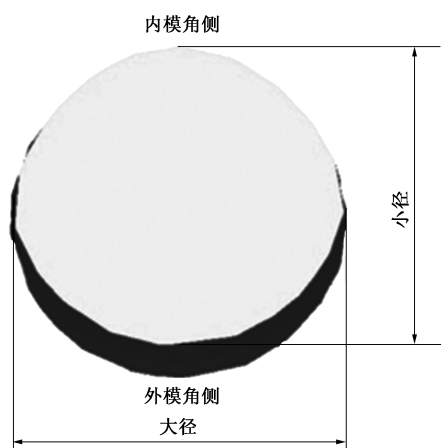


图 3 ECAD 试样截面尺寸图

Fig. 3 Dimension diagram of cross-section for ECAD sample

区与大变形区的交界处产生了一定程度的缩颈, 计算得出断面收缩率为 17.97%。其原因为: 在拉伸过程中的摩擦力和转角提供的剪切力的共同作用下, 变形开始时, 试样在模具出口处的金属流动速度为 $0.966 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, 而在模具入口处的金属流动速度为 $0.285 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, 出口金属流动速度远大于入口金属流动速度, 如图 4a 所示。由于金属流动速度差的存在使得金属材料通过转角时向上拉伸后得不到及时的填充, 导致材料在拉伸过程中截面面积下降, 从而承载能力下降, 同时材料发生加工硬化, 屈服强度上升, 当加工硬化的能力不能抵消因截面收缩而导致的承载力下降时, 材料产生缩颈。同时, 从图 3 可以看出, 大变形区横截面为椭圆形, 其小径为 $\Phi 8.58 \text{ mm}$, 大径为 $\Phi 9.56 \text{ mm}$ 。这是因为: 转角处存在剪切力, 试样在通道中向上运动时, 转角对其有一个剪切作用, 与内、外模角接触的表面剪切变形剧烈, 直径细化严重, 远离内、外模角的表面剪切变形较弱, 直径细化较小, 最终使得试样横截面呈椭圆形。

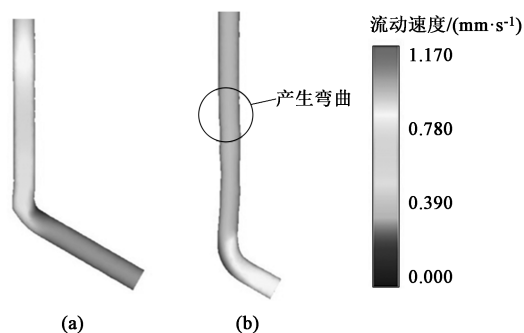


图 4 ECAD 试样金属流动速度分布图

(a) 变形开始 (b) 变形稳定

Fig. 4 Distribution diagrams of metal flow velocity for ECAD sample

(a) Start of deformation (b) Stability of deformation

经过 ECAD 变形后, 试样大变形区呈现弯曲的状态, 如图 4b 所示。这是因为: 在试样经过转角区域时, 由于金属流动速度差与剪切力分布不均发生了一定程度的缩颈, 并且横截面的圆度发生了改变, 其横截面面积减少, 使得其出口段的直径小于模具的直径, 在模具中得不到完全约束, 造成材料流动失稳, 最后试样在模具出口处向内模角靠近, 造成拉伸后的试样弯曲。

2.2 ECAD 过程中最大主应力

图 5 为 ECAD 不同阶段试样最大主应力的分布情况。从图 5 中可以看到, 变形开始时, 由于受到拉模具的拉力、摩擦力和模具内、外模角的剪切力的作用, 试样出现了 3 个明显不同区域, 分别为 P1 区、P2 区和 P3 区。P1 区受模具下通道的约束, 在模具转角提供的剪切力与夹紧模具提供的拉力的作用下, 此处试样所受的应力为负值, 即压应力^[13], 其最大值为 256 MPa。P2 区位于外模角区域, 受摩擦力的阻碍作用, 此处试样所受的应力为压应力, 最大值为 156 MPa。P3 区由于缩颈试样表面出现内凹, 与模具内侧转角产生脱离形成间隙, 主要受到拉模具的拉力作用, 此处试样所受的应力为拉应力, 最大值为 369 MPa。这种拉应力状态导致大变形区靠近内模角的表面容易产生损伤甚至裂纹^[14]; 同时, 随着变形的缩颈出现, P3 区拉应力值不断减小, 大变形区内模角表面的损伤量也在减小。这种现象在试验中得到了验证, 如图 5b 放大区域。

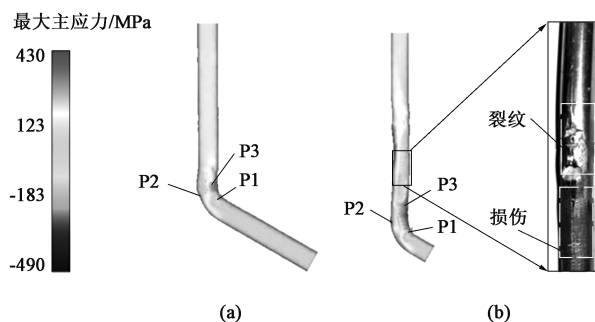


图 5 不同变形阶段试样最大主应力分布

(a) 变形开始 (b) 变形稳定

Fig. 5 Maximum principal stress distributions of samples at different deformation stages

(a) Start of deformation (b) Stability of deformation

2.3 ECAD 过程中等效应力

图 6 为试样横、纵截面等效应力的分布图。从图 6a 可以看出, 经过拉伸后, 沿内模角至外模角方向, 试样的等效应力呈“V”字形分布, 内、外模角纯剪切变形区表面的等效应力大, 达到 337 MPa,

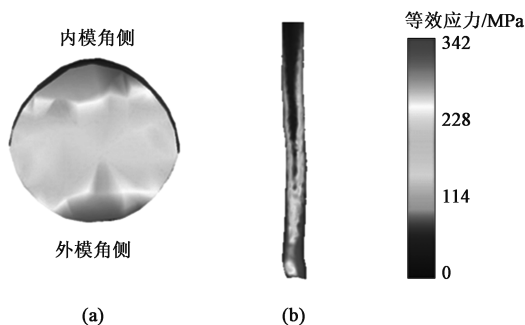


图 6 试样的等效应力分布图

(a) 横截面 (b) 纵截面

Fig. 6 Distribution diagrams of equivalent stress for samples

(a) Cross-section (b) Longitudinal section

越往内部试样的等效应力越小,表明材料内部的等效应力分布不均匀。从图 6b 可以看出,试样整体的等效应力分布也是不均匀的,由模具的转角部位至试样的两端方向,等效应力逐渐变小,靠近模具的出口时,等效应力达到最小,并在试样的尾部留下小变形区域。这是因为:变形时,由于金属流动速度差和剪切力分布不均,试样发生了一定程度的缩颈且试样直径尺寸变小造成大变形区弯曲,并在内、外模角表面与模壁相接触,在转角提供的剪切力作用和摩擦力的作用下,该部位的等效应力较大,而远离内、外模角的表面则一定程度地脱离了模壁的约束,受到的摩擦力和剪切力作用较小,所以等效应力较小。材料的应力与晶粒的大小为负相关^[15],所以在模具等效应力最大的转角处是试样最容易得到超细晶组织的区域。

2.4 ECAD 过程中等效应变

等效应变值的大小及分布的均匀性影响拉伸后试样的综合性能,在一定程度上其与材料内部晶粒

细化、组织致密与变形均匀的程度密切相关^[16]。图 7 为模拟的 7075 铝合金试样在不同变形阶段的等效应变分布图,从图 7 中可以看出,变形初期,等效应变多集中于内、外模角处。随着变形的进行,逐渐进入稳定阶段,试样在转角提供的剪切力的作用下发生连续稳定的剪切变形,等效应变明显增大,并且出现不均匀分层现象,靠近内模角的等效应变变大,靠近外模角的等效应变变小。变形结束后,试样尾部出现小变形区。

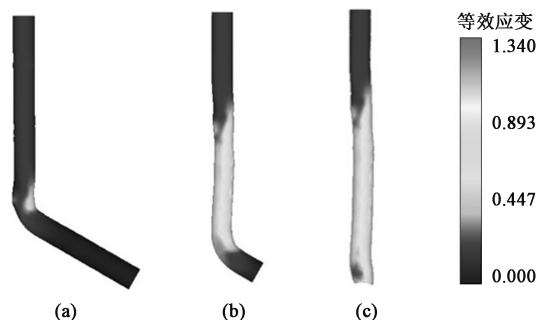


图 7 试样不同变形阶段等效应变分布

(a) 变形开始 (b) 变形稳定 (c) 变形结束

Fig. 7 Equivalent strain distributions of samples at different deformation stages

(a) Start of deformation (b) Stability of deformation (c) End of deformation

为了进一步描述整个变形过程中试样内部等效应变的分布情况,选取了横截面上 H1~H5 的 5 个跟踪点,如图 8a 所示,图 8a 为原始试样内部不同位置的跟踪点分布示意图。跟踪点开始时只作刚性位移,其应变值基本保持不变,当进入通道的拐角处时发生剧烈的剪切变形,其等效应变急速增加至最大值,而后则保持基本不变,跟踪点仍作刚性位

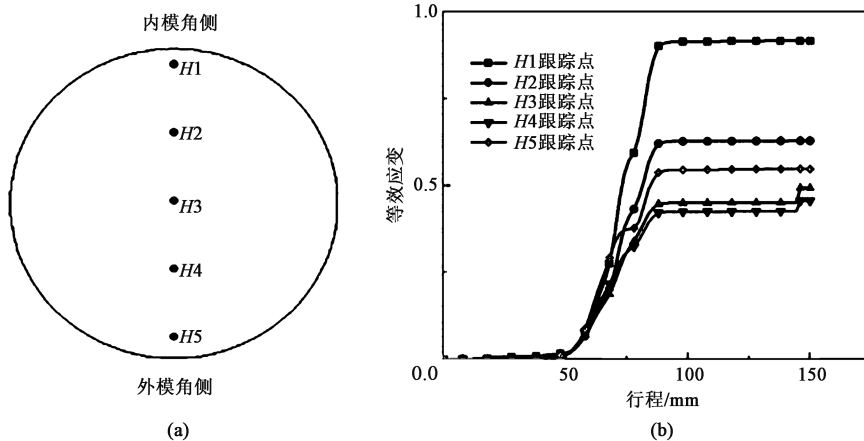


图 8 试样内部跟踪点分布示意图 (a) 和其等效应变变化曲线 (b)

Fig. 8 Schematic diagram of distribution for tracking points inside sample (a) and its equivalent strain variation curves (b)

移, 由图 8b 可以明显看出, 等效应变值存在差异。沿内模角至外模角方向, 试样 $H1 \sim H4$ 跟踪点的等效应变依次逐渐减少, 位于外模角表面的 $H5$ 跟踪点的等效应变高于位于试样中部的 $H3$ 跟踪点。这是由于: 在拉伸过程中, 材料经过模具转角时, 位于内、外模角处的金属流动速度存在差异, 靠近内模角处的端面的金属流动速度较低, 等效应力集中, 最终导致此处的等效应变值较大, 而位于外模角表面的 $H5$ 跟踪点由于缩颈和摩擦力的作用使得此处的材料受到压应力的作用, 变形效果好于中心跟踪点处的材料。

对变形行为分析除了分析等效应变值的变化外, 还应分析等效应变分布的不均匀性, 因此, 需要通过计算不均匀度系数来分析变形的不均匀程度。为了更加直观地说明等效应变的不均匀性变化, 可以使用式 (1) 计算等效应变的不均匀度系数:

$$\alpha = \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}}{\varepsilon_{\text{avg}}} \quad (1)$$

式中: α 为等效应变的不均匀度系数; ε_{\max} 为等效应变的最大值; ε_{\min} 为等效应变的最小值; ε_{avg} 为等效应变的平均值。

同变形条件下, ECAD 和 ECAP 的等效应变参数模拟结果如表 1 所示, 代入式 (1) 计算可得 ECAD 以及 ECAP 试样的大变形区等效应变的不均匀度系数分别为 0.85 和 1.46, 说明 ECAD 工艺的变形均匀性优于 ECAP 工艺。

表 1 大变形区的等效应变参数
Table 1 Equivalent strain parameters in large deformation zone

工艺	ε_{\max}	ε_{\min}	ε_{avg}	α
ECAD	0.82	0.37	0.53	0.85
ECAP	1.25	0.39	0.59	1.46

3 试验验证

进一步验证模拟结果的准确性, 对 7075 铝合金进行 ECAD 变形试验验证。利用 DK7735 锥度电火花将退火后的 7075-T6 铝合金棒加工为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 340 \text{ mm}$ 的试样。在型号为 Y160T 的四柱液压机上, 对试样进行 ECAD 试验, 如图 9 所示, 各工艺参数与模拟设置相同。

图 10 为 ECAD 后模拟与试验结果对比图, 可以

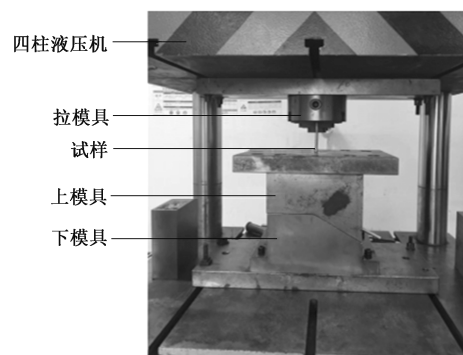


图 9 试验模具与液压机

Fig. 9 Experimental dies and hydraulic press

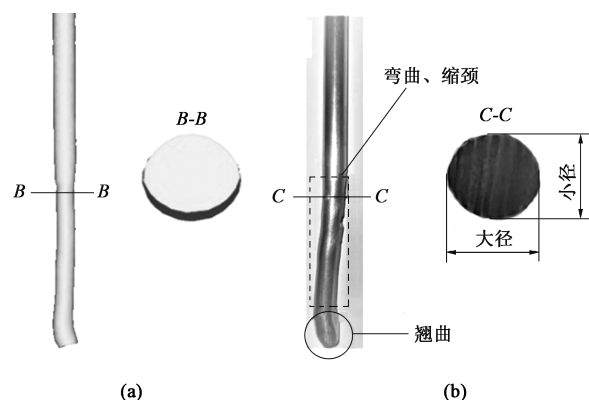


图 10 ECAD 模拟 (a) 与试验 (b) 结果对比

Fig. 10 Comparison of results between ECAD simulation (a) and experiment (b)

发现, 试样无明显的飞边和毛刺, 说明 ECAD 工艺的成形性较好; 从图 10 中还可以看出, 试样尾部出现明显的翘曲, 大变形区呈现弯曲和缩颈, 这与模拟结果吻合。为进一步研究 ECAD 试样的圆度, 分别在模拟与试验试样上截取 $B-B$ 和 $C-C$ 截面, 如图 10 所示, 可以看出, 试样的横截面为椭圆状, 其大径尺寸为 $\Phi 9.55 \text{ mm}$, 小径尺寸为 $\Phi 8.62 \text{ mm}$, 断面收缩率为 17.49%, 这与模拟结果的 $\Phi 9.56 \text{ mm}$ 、 $\Phi 8.58 \text{ mm}$ 和 17.97% 的误差均不超过 3%。以上均充分表明了 7075 铝合金 ECAD 成形模拟的准确性和可靠性。

4 结论

(1) 模具出、入口的金属流动速度差使试样金属得不到及时填充, 在大变形区出现一定程度的缩颈。内、外模角区域剪切力分布不均引起横截面呈椭圆形。在金属流动速度差和剪切力分布不均的共同作用下, 最终引起大变形区弯曲。

(2) 变形开始时, 靠近模具内模角和外模角表面处的试样应力较大, 应力状态复杂, 表现出 3 个状态明显不同的区域, 同时试样转角区域所产生的拉应力最大, 导致在难变形区与大变形区的交界处最容易产生裂纹并发生断裂, 同时在大变形区靠近内模角的表面容易产生损伤。

(3) 变形过程中, 试样等效应力分布不均匀, 引起其等效应变分布不均匀, 试样横截面等效应变出现分层现象, 其大变形区变形均匀性优于 ECAP 工艺。

(4) 试验结果和模拟结果吻合良好, ECAD 试样成形性好, 无明显飞边和毛刺, 是一种适于实现 7075 铝合金超细晶材料连续生产的工艺。

参考文献:

- [1] 凡晓波. 2195 铝锂合金板材热变形-淬火复合成形规律与强化机制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
Fan X B. Forming Behavior and Strengthening Mechanism for Integrated Process of Hot Deformation-Quenching of 2195 Al-Li Alloy Sheet [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [2] Jia D S, He T, Song M, et al. Effects of equal channel angular pressing and further cold upsetting process to the kinetics of precipitation during aging of 7050 aluminum alloy [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26 (1): 5126-5140.
- [3] Rokni M R, Zarei H A, Roostaei A A, et al. An investigation into the hot deformation characteristics of 7075 aluminum alloy [J]. Materials & Design, 2011, 32 (4): 2339-2344.
- [4] Segal V M. Materials processing by simple shear [J]. Materials Science and Engineering: A, 1995, 197 (2): 157-164.
- [5] Zisman A A, Rybin V V, Boxel S V, et al. Equal channel angular drawing of aluminium sheet [J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 427 (1-2): 123-129.
- [6] Chakkingal U, Suriadi A B, Thomson P F. Microstructure development during equal channel angular drawing of Al at room temperature [J]. Scripta Materialia, 1998, 39 (6): 677-684.
- [7] Chakkingal U, Suriadi A B, Thomson P F. The development of microstructure and the influence of processing route during equal channel angular drawing of pure aluminum [J]. Materials Science and Engineering: A, 1999, 266 (1-2): 241-249.
- [8] León J, Luis-Pérez C J. Analysis of stress and strain in the equal channel angular drawing process [J]. Materials Science Forum, 2006, 526: 19-24.
- [9] Volokitina I E, Volokitin A V, Naizabekov A B, et al. Change in structure and mechanical properties of grade A0 aluminum during implementation of a combined method of ECAE-drawing deformation [J]. Metallurgist, 2020, 63 (9-10): 978-983.
- [10] Naizabekov A, Lezhnev S, Volokitin A, et al. Analysis of the influence of new combined process "equal channel angular pressing-drawing" on the microstructure and properties of deformed wire [J]. Civil Engineering and Construction, 2016, (5): 24-28.
- [11] Naizabekov A, Volokitina I, Panin E, et al. Computer simulation of combined deformation method "ECA-pressing-drawing" [J]. Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 2020, 55 (3): 91-94, 129.
- [12] 孙安娜, 何涛, 霍元明, 等. 不同路径下等通道转角挤压变形规律研究 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (6): 16-21.
Sun A N, He T, Huo Y M, et al. Study on deformation law of equal channel angular pressing under different paths [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (6): 16-21.
- [13] 张苏鹏, 王军丽, 章震威, 等. 复合挤压法制备超细晶 1060 铝合金的有限元模拟 [J]. 材料热处理学报, 2020, 41 (5): 168-176.
Zhang S P, Wang J L, Zhang Z W, et al. Finite element simulation for preparation of ultra-fine grain 1060 aluminum alloy by cyclic equal channel compression [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2020, 41 (5): 168-176.
- [14] Gao J Y, He T, Huo Y M, et al. Comparison of modified Mohr-coulomb model and Bai-Wierzbicki model for constructing 3D ductile fracture envelope of AA6063 [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34 (2): 233-245.
- [15] 赵小莲, 陈娜, 赵宁宁. 大尺寸纯铝棒材等径角挤压计算机模拟 [J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2013, 38 (2): 461-466.
Zhao X L, Chen N, Zhao N N. Computer simulation of equal channel angular pressing for large-sized pure aluminum bar [J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2013, 38 (2): 461-466.
- [16] 蒋汶恒, 杨欢, 温良英, 等. 挤压速度对 Ti6Al4V 钛合金等通道转角挤压过程影响的数值模拟 [J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2019, 42 (10): 31-41.
Jiang W H, Yang H, Wen L Y, et al. Numerical simulation of equal-channel angular pressing process of Ti6Al4V titanium alloy at a right angle and different extrusion speed [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2019, 42 (10): 31-41.

