

# 铝合金深冷挤压切削加工有限元仿真及实验研究

殷晓龙\*, 吴亚威, 王志林, 郭润宇, 王婉, 马少彬, 张素香, 徐景霞

(中原工学院 机电学院, 郑州 450007)

**摘要:** 目的 为提升大变形技术的加工效率和质量, 消除变形热带来的影响, 提出一种基于传统切削的深冷挤压切削 (Cryogenic Temperature Extrusion Machining, CT-EM) 工艺, 并通过数值模拟与实验验证了该方法的可靠性。方法 利用 DEFORM 软件中的点追踪与流动网格法对不同切削压缩比 (1.4、1.6、1.8) 条件下的等效应变、应变率及切屑成形过程进行了有限元模拟, 开展了切削实验, 并对切屑的形貌及微观组织进行了分析。结果 挤压切削分为初始切入、切屑成形以及稳定成形 3 个阶段, 第二变形区的网格畸变最严重; 等效应变随着压缩比的增大而增大, 其值在 1.2~1.6 之间, 与计算值较吻合; 等效应变率产生于第一变形区宽度为 200~250  $\mu\text{m}$  的区域, 且 CT-EM 具有更高的等效应变率; CT-EM 制备的切屑带材表面粗糙度低、裂纹少、成形能力更优, 切屑内的微观组织被强烈细化 ( $<200\text{ nm}$ ), 达到了超细晶结构, 且产生了大量的位错缠结区。结论 深冷处理可提升 7 系铝合金切削加工时的成形能力, 晶粒细化是较大的等效应变与应变率共同作用的结果, 模拟数据对实验结果有较好的支撑。

**关键词:** 深冷挤压切削; 有限元模拟; 等效应变; 应变率; 成形能力; 微观组织

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2024.08.015

**中图分类号:** TG51.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-6457(2024)08-0130-08

## Finite Element Simulation and Experimental Research on Aluminum Alloy Processed by Cryogenic Temperature Extrusion Machining

YIN Xiaolong\*, WU Yawei, WANG Zhilin, GUO Runyu, WANG Wan, MA Shaobin, ZHANG Suxiang, XU Jingxia

(School of Mechatronics Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

**ABSTRACT:** The work aims to propose a novel cryogenic temperature extrusion machining (CT-EM) process based on traditional cutting, in order to improve the processing efficiency and quality of severe plastic deformation technologies and eliminate the effect of deformation heat and verify the reliability of this method through numerical simulation and experiments. Finite element simulation was conducted on the equivalent strain, strain rate, and chip forming process under different cutting compression ratios (1.4, 1.6, 1.8) by point tracking and flow grid method in DEFORM software. Cutting experiments were conducted, and morphology and microstructure of the chips were analyzed. The extrusion machining process could be divided into

收稿日期: 2024-03-22

Received: 2024-03-22

**基金项目:** 国家自然科学基金 (52105499); 中原工学院学科青年硕导培育计划 (SD202406); 中原工学院基本科研业务费专项资金项目 (K2022YY001); 中原工学院青年骨干教师资助项目 (2024XQG09)。

**Fund:** The National Natural Science Foundation of China (52105499); Discipline Youth Master's Guidance Training Program (SD202406); Fundamental Research Funds for Zhongyuan University of Technology (K2022YY001); Youth Backbone Teacher Funding Project of Zhongyuan University of Technology (2024XQG09)

**引文格式:** 殷晓龙, 吴亚威, 王志林, 等. 铝合金深冷挤压切削加工有限元仿真及实验研究[J]. 精密成形工程, 2024, 16(8): 130-137.

YIN Xiaolong, WU Yawei, WANG Zhilin, et al. Finite Element Simulation and Experimental Research on Aluminum Alloy Processed by Cryogenic Temperature Extrusion Machining[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16(8): 130-137.

\*通信作者 (Corresponding author)

three stages of initial cutting, chip formation and stable forming. The grid distortion in the second deformation zone was the most severe. The equivalent strain increased with the increase of compression ratio, with a value between 1.2 and 1.6, which was in good agreement with the calculated value. The equivalent strain rate occurred in the first deformation zone with a width of 200-250  $\mu\text{m}$ . The CT-EM process had a higher equivalent strain rate. The surface roughness of the chip strip prepared by CT-EM was low, with fewer cracks and better formability. The microstructure inside the chip was strongly refined (<200 nm), achieving ultrafine grain structure and generating a large number of dislocation entanglement areas. Cryogenic treatment can improve the formability of 7 series aluminum alloys during machining, and grain refinement is the result of the combined effect of large equivalent strain and strain rate. Simulation data provides good support for the experimental results.

**KEY WORDS:** cryogenic temperature extrusion machining; finite element simulation; equivalent strain; strain rate; formability; microstructure

近年来, 超细晶的制备工艺引起了越来越多的关注, 而大塑性变形法 (Severe Plastic Deformation, SPD) 是公认的最具发展前景、应用最广泛的超细晶材料制备方法。常见的大塑性变形法工艺有等径角挤压 (ECAP)<sup>[1-4]</sup>、高压扭转 (HPT)<sup>[5-9]</sup>、累计轧制 (AR)<sup>[10]</sup> 以及限制模压 (CGP)<sup>[11-14]</sup> 等。对于 SPD 工艺, Iglesias 等<sup>[15]</sup> 研究发现, 通过切削法制备的超细晶纯铜与常规铜材相比具有更优良的耐磨损性能, 且摩擦磨损性能与切屑的微观结构有直接关联。Chen 等<sup>[16]</sup> 对 Al-1%Mg (质量分数) 合金进行了四道次的 ECAP 加工, 结果表明, 变形道次越多, 晶粒/亚晶的尺寸越小, 每道次大角度晶界的占比和晶粒细化的速率越高。侯陇刚等<sup>[17]</sup> 采用低温轧制的方法研究了 7050 铝合金的低温塑性变形能力以及材料的微观组织与性能, 结果表明, 与常温/热轧相比, 经低温轧制的合金可产生更高变形量、位错密度和材料强度。邓文君等<sup>[18-19]</sup> 发现 EM 制备的梯度结构铝带材晶粒细化显著, 硬度提升明显, 晶粒尺寸与硬度在厚度层上均呈明显的梯度分布规律。

传统的 SPD 工艺存在较多缺点, 如加工过程需多次重复、效率偏低、在室温下难以对某些中高强度材料进行变形加工、变形区的参数难以控制以及设备的制作成本偏高等, 这在一定程度上制约了 SPD 工艺的发展。深冷挤压切削作为一种新的 SPD 工艺, 利用液氮作为降温介质, 消除变形区的切削热, 结合切削加工的优势, 通过一步法制备出超细晶带材, 工艺简单, 成本低廉, 可以很好地克服常规 SPD 方法存在的一些弊端。目前, 有关将深冷切削引入铝合金加工的研究较少, 尤其是在有限元分析方面, 鉴于此, 本文通过建立 CT-EM 的 DEFORM-2D 有限元模型, 对切屑的成形过程、不同切削压缩比条件下等效应变以及应变率的变化展开了讨论。最后通过实验, 对切屑的形态及微观组织进行了分析, 验证了模拟结果的可靠性, 以期为后续加工参数的优化以及高效制备超细晶铝合金提供有益的指导。

## 1 模型的建立

### 1.1 挤压切削原理

挤压切削是由传统自由正交切削演变而来的一种加工方式<sup>[20]</sup>, 挤压切削剪切变形原理如图 1 所示, 通过在刀具 (Tool) 前端添加一个限制块体 (Constraining Tool), 使原本自由成形的切屑 (Chip) 进入一个预先设定好的通道, 从而形成一条形貌规则、可控的带材, 切屑同时经历剪切与挤压的双重作用。切屑内产生的剪切应变公式如式 (1) 所示<sup>[18]</sup>。

$$\varepsilon = \frac{\Delta s}{\Delta y} = \frac{\lambda}{\cos \alpha} + \frac{1}{\lambda \cos \alpha} - 2 \tan \alpha \quad (1)$$

式中:  $\Delta y$  为第一变形区宽度;  $\Delta s$  为变形量;  $\alpha$  为刀具前角;  $\lambda$  为切削厚度压缩比, 即切屑厚度  $t_{\text{ch}}$  与待切除厚度  $t_{\text{d}}$  的比值, 如式 (2) 所示。

$$\lambda = \frac{t_{\text{ch}}}{t_{\text{d}}} \quad (2)$$

第二变形区的宽度局限在一个很狭窄的范围内, 通常会被简化为一个剪切平面, 应变率是切削过程中一个极其关键的参数, 是材料相对于时间的应变变化, 应变率  $\dot{\varepsilon}$  可通过式 (3) 计算<sup>[18]</sup>。

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\cos \alpha}{\cos(\phi - \alpha)} \frac{v}{\Delta y} \quad (3)$$

式中:  $v$  为切削速度;  $\phi$  为剪切角。

### 1.2 有限元建模

本文利用 DEFORM-2D 对常温挤压切削 (Room Temperature Extrusion Machining, RT-EM) 与 CT-EM 的切削过程进行模拟。将实际中工件绕刀具的旋转运动简化为刀具沿工件的平面直线运动, 其中, 将工件类型定义为弹塑性体, 刀具为理想刚性体, 两者接触的区域变形最严重。为了保证模拟的精度和效率, 利用网格细分技术对此区域的网格细化, 内外网格尺寸比约为 1:10, 细化区域会随着刀具同步移动, 划分完成的网格如图 2 所示。现有文献研究表明<sup>[21-22]</sup>, 由于工件与刀具之间有热传递作用,

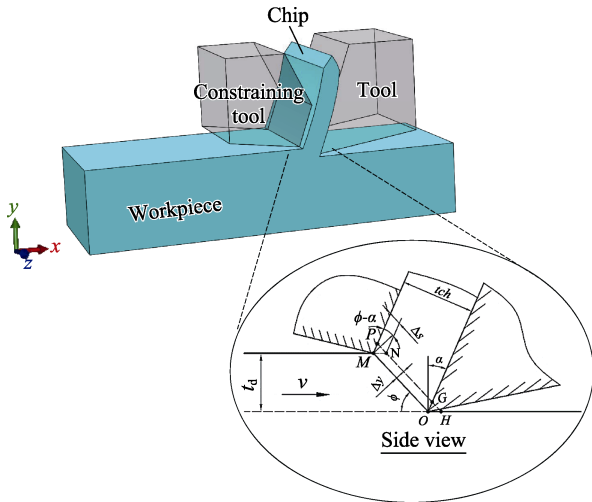


图1 挤压切削剪切变形原理图  
Fig.1 Schematic diagram of shear deformation of extrusion machining

因此将两者接触部分的热传递系数设置为  $40 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，其余边界参与周围环境的热交换，环境温度为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ，热传递系数为  $0.02 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。为了尽可能准确地模拟深冷加工条件，本文采用文献[23]所用的方法，即在切削区域添加一个局部温度框，设定区域内的环境温度为  $-180 \text{ }^\circ\text{C}$ ，热传递系数为  $5000 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，用来模拟实际切削中喷射在切削区的液氮，框外区域仍为常温热交换<sup>[24]</sup>。

选择材料库中的 7075 铝合金作为工件材料，它在不同温度下的流动应力-应变曲线如图 3 所示。本构模型使用 DEFORM 中的默认模型，刀具材料选用 WC 硬质合金，7075 铝合金及 WC 硬质合金的热力学常数如表 1 所示。当切削速度较小时，刀-屑间的摩擦以库伦摩擦为主，设定摩擦因数为 0.4。其余切削参数设置如下：压缩比为 1.4、1.6、1.8；刀具前角  $\alpha$ 、切削厚度  $t_d$ 、切削速度  $v$  不变，分别为  $\alpha=20^\circ$ ， $t_d=0.5 \text{ mm}$ ， $v=92 \text{ mm}/\text{s}$ 。

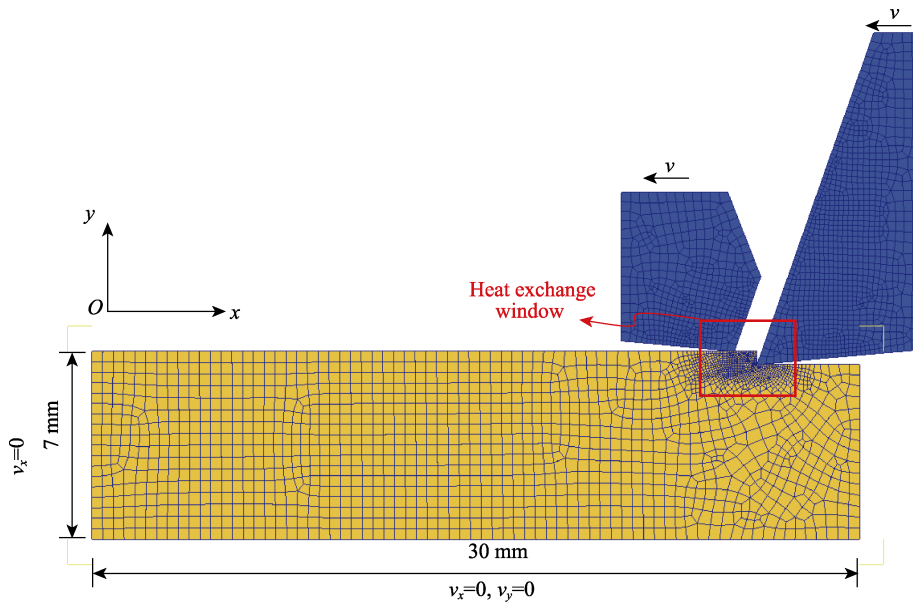


图2 挤压切削有限元模型  
Fig.2 Finite element model of extrusion machining

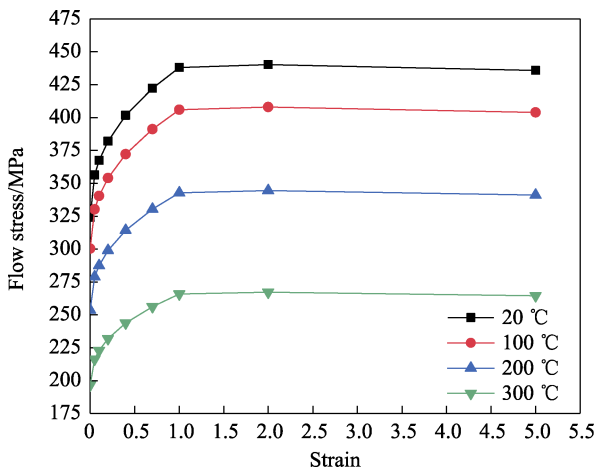


图3 7075 铝合金不同温度下的应力-应变曲线  
Fig.3 Stress-strain curves of 7075 aluminum alloy at different temperatures

## 2 结果与讨论

### 2.1 切屑成形分析

用 DEFORM 后处理模块中的流动网格可实现对切削过程中材料流动情况的实时监测。将挤压切削的过程大致分为 3 个阶段：初始切入阶段、切屑成形阶段、稳定成形阶段，如图 4 所示。在初始切入阶段，刀具与工件发生接触并开始切入，此时刀尖部分材料发生断裂，因塑性流动而进入挤压通道，与刀尖接触区域的工件网格被拉伸呈长条状，表现出有规律的流线型，第一变形区 (I) 也开始显现；随着切削的继续进行，切屑形态逐渐完整，挤压通道内进入了更多的带材，此时，限制刀具开始产生效果，切屑同时经历挤压、剪切与摩擦的三重作用，第二变形区 (II)

表 1 7075 铝合金及刀具材料的热力学参数  
Tab.1 Thermal-mechanical parameters of 7075 Al alloy and tool material

Parameter	Density/(kg·m <sup>-3</sup> )	Poisson ratio	Elastic modulus/GPa	Thermal conductivity/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	Specific heat capacity/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	Melting point/°C
Workpiece (7075 aluminum alloy)	2 800	0.33	68.9	130	870	640
Cutting tool (WC hard alloy)	15 600	0.25	650	100	240	2 900

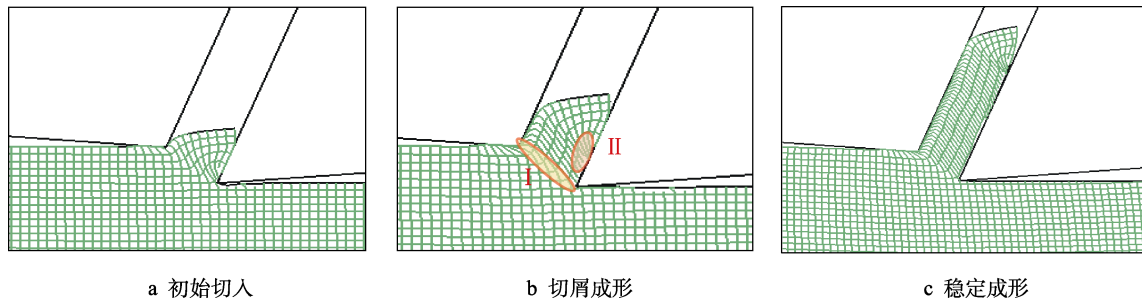


图 4 挤压切削过程的 3 个阶段  
Fig.4 Three stages of extrusion machining process: a) initial cutting; b) chip formation; c) stable formation

内的网格进一步被拉伸和撕裂, 受挤压与摩擦的作用, 工件与限制刀具接触区域内的网格也产生了一定程度的畸变, 网格沿着摩擦力的方向出现弯折, 第一、第二变形区也完全形成, 此阶段即为切屑成形阶段; 在稳定成形阶段, 材料从第一变形区流出后形成稳定的切屑形态, 切屑内大部分区域的网格被拉伸成为尺寸接近且规则的平行四边形, 可认为是材料内的等轴晶向拉长晶的转变, 也说明切屑内的晶粒尺寸和形貌在此阶段不再有大变化。在第二变形区, 网格畸变最为严重, 其尺寸也较其他区域的更细小, 充分说明在摩擦和挤压的双重作用下, 刀-屑接触区域的变形更大。

### 2.2 等效应变

等效应变是切削变形中关键的物理量之一, 可以用来表征切屑的变形程度。利用点追踪功能在挤削区内设定参考轨迹 ABC, 用来观测切屑内等效应变的变

化情况, 如图 5a 所示。随着切削的进行, 基材内的参考点先后由工件内的 A 点穿过第一变形区的 B 点, 并最终进入切屑内的 C 点。等效应变沿轨迹 ABC 的变化情况如图 5b~c 所示, 可见, 进入第一变形区前, 等效应变基本为 0, 进入第一变形区后, 其值迅速增加, 在离开第一变形区进入切屑内后, 逐渐趋于稳定, 在第一变形区内, 材料会发生严重的剪切变形, 因此等效应变主要在这一区域内产生。可认为 A~B 为切屑成形的前 2 个阶段, B~C 为切屑稳定成形阶段。整体看, RT-EM 与 CT-EM 等效应变的变化趋势接近, 都随着压缩比的增大而增大, 其值处于 1.2~1.6 之间, 与计算值 (1.24~1.65) 较吻合。观察发现, 当压缩比为 1.8 时, CT-EM 的稳态应变值要高于 RT-EM 的, 说明在低温条件下, CT-EM 切屑的成形更为充分。

### 2.3 应变率

应变率的大小会直接影响切屑的成形效果及微

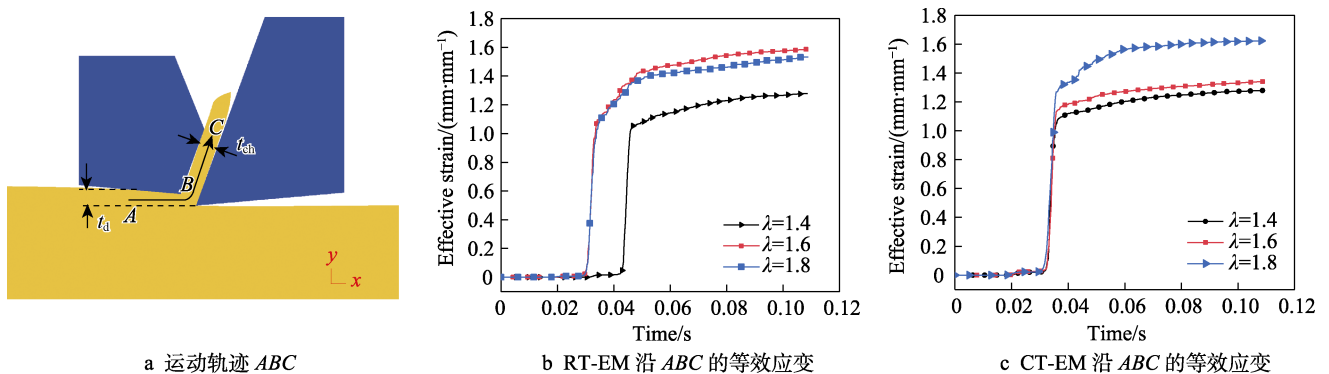


图 5 等效应变的运动轨迹及相应的变化曲线

Fig.5 Motion trajectory of equivalent strain and corresponding change curve: a) motion trajectory ABC; b) equivalent strain of RT-EM along ABC; c) equivalent strain of CT-EM along ABC

观组织的细化程度<sup>[25]</sup>,因此对等效应变率变化的研究很有必要。等效应变率沿着轨迹 ABC 的变化曲线如图 6 所示,可知,当参考点进入第一变形区 (PDZ) 后,等效应变率迅速升高至峰值,都能达到  $400\text{ s}^{-1}$  以上,随后急速降低至最小值,可见,等效应变率产生于 PDZ,且呈带状分布。参考点通过 PDZ 所耗费的时间为  $\Delta t$ ,如图 6a 所示, $\Delta t$  通过此狭窄区域的位移可认为是 PDZ 的宽度  $\Delta y$ ,通过测算可知, $\Delta y$  为  $200\sim 250\text{ }\mu\text{m}$ 。

不同压缩比下的模拟最大应变率与计算应变率的对比如图 7 所示,应变率的计算公式如式 (3) 所示,可见模拟结果与计算结果相差不大,随着压缩比的增大,应变率总体上呈减小的趋势,因为压缩比越大,切屑经受的静水压越小,剪切变形的区域越分散,应变率

的值就越小。各参数下应变率的值都达到了很高的水平,远高于一般 SPD 工艺中产生的应变率 ( $<10^2\text{ s}^{-1}$ )。CT-EM 各压缩比下的最大等效应变率都要高于其他 2 组的,这是由于低温使材料属性发生了改变。

### 3 实验验证

切削实验在 CA6140A 卧式车床上进行,实验装置如图 8 所示,切削参数设置如下: $\alpha=20^\circ, t_d=0.5\text{ mm}, v=92\text{ mm/s}, \lambda=1.8$ ,工件材料选用固溶态的 7075 铝合金。切屑的微观组织通过透射电镜进行观测,首先将样品沿着切屑厚度方向磨薄至  $100\text{ }\mu\text{m}$  左右,其次进行电解双喷减薄处理,电镜型号为 FEI Tecani F20,加速电压为  $200\text{ kV}$ 。

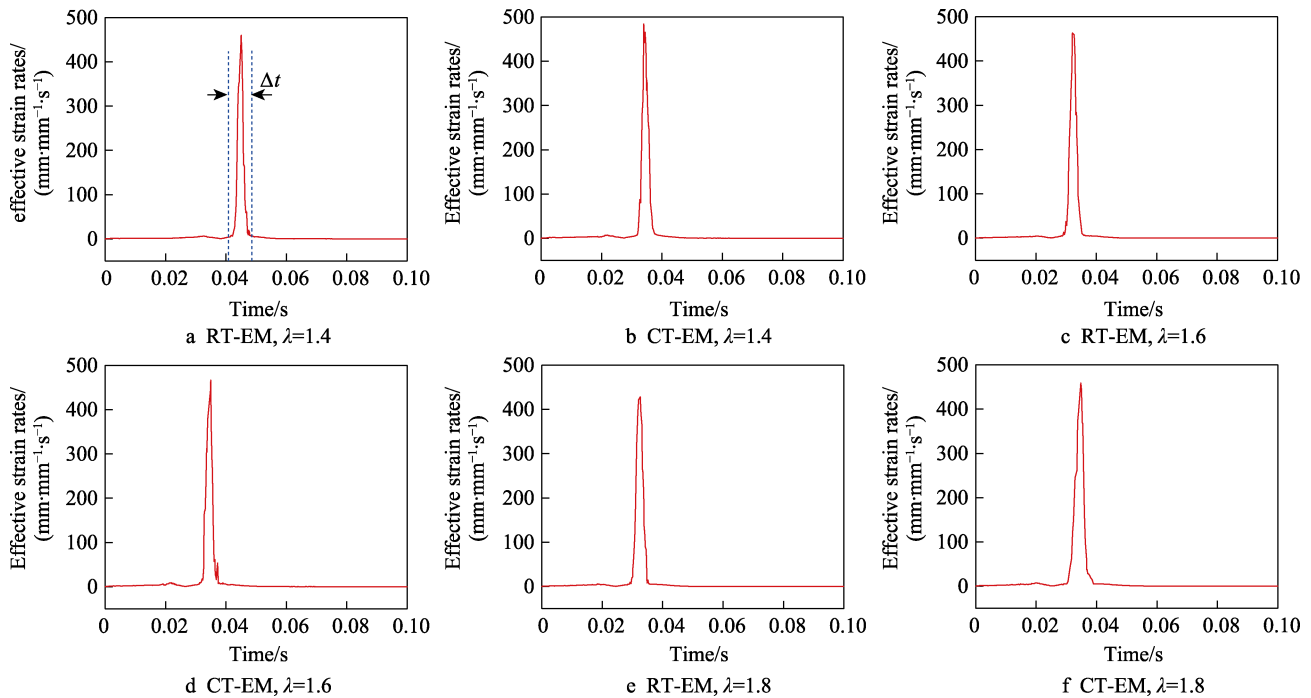


图 6 等效应变率沿轨迹 ABC 的变化曲线  
Fig.6 Change curve of equivalent strain rate along trajectory ABC

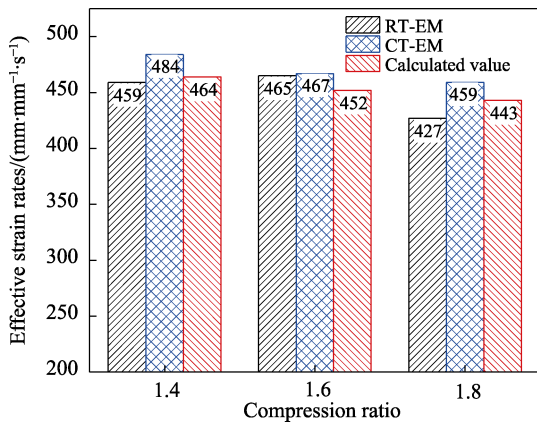


图 7 不同切削压缩比下最大等效应变率的模拟值与计算值  
Fig.7 Simulated and calculated values of the maximum equivalent strain rate under different cutting compression ratios

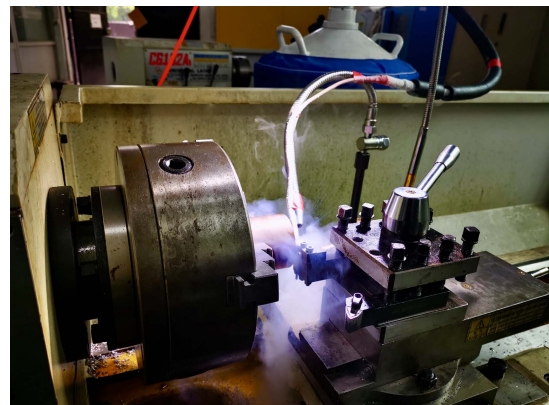


图 8 挤压切削实验装置  
Fig.8 Experimental device of extrusion machining

常温与深冷 2 种加工条件下的切屑形态对比如图 9 所示, 可以看到, CT-EM 可在一个切削周期内形成完整的带材, 且其形貌规整, 表面光滑, 只在两侧出现了极细小的裂纹, 推测这主要是由切削过程中工件壁厚方向上受力不均造成的。而 RT-EM 切屑则表面粗糙, 有较多且大的裂纹出现, 呈现出较差的成形效果。由此证明 7 系铝合金的切屑成形具有温度依赖性, 与有限元分析结果相一致。分析认为, 7 系铝合金属于典型的面心立方晶格金属, 材料内部有很多

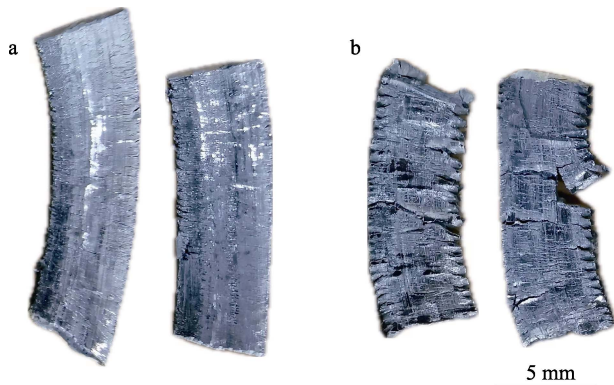


图 9 CT-EM (a) 与 RT-EM (b) 切屑形貌  
Fig.9 Chip morphologies of CT-EM (a) and RT-EM (b)

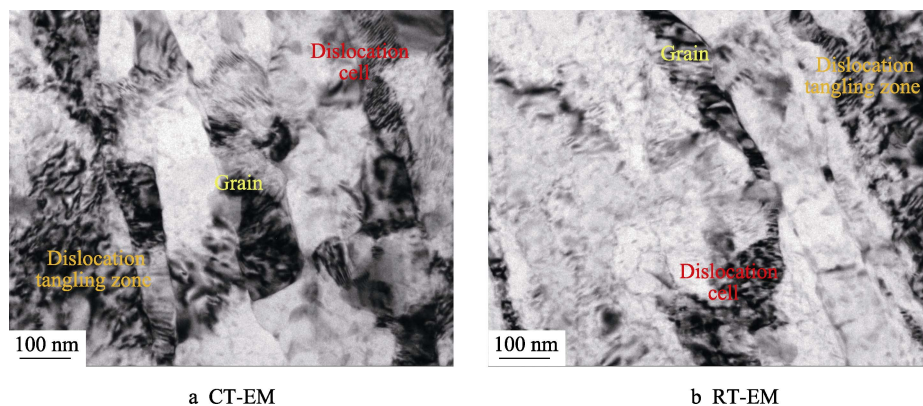


图 10 切屑微观组织的 TEM 图像  
Fig.10 TEM images of chip microstructure

## 4 结论

通过建立挤压切削的有限元模型, 研究了不同压缩比对切屑成形、等效应变及应变率的影响, 并进行了实验验证, 主要结论如下:

1) 挤压切削的过程可分为初始切入、切屑成形以及稳定成形 3 个阶段, 在第二变形区, 网格畸变最严重, 尺寸更细小。

2) 随着切削压缩比的增大, 切屑中的等效应变总体呈现上升的趋势, 当  $\lambda=1.8$  时, CT-EM 切屑可得到更充分的变形, 等效应变有一定幅度的增加。

3) 等效应变率集中在第一变形区很窄的一个区域内, 宽度为 200~250  $\mu\text{m}$ , CT-EM 具有更高的等效

的滑移系, 且在低温下容易产生多系滑移, 位错沿着滑移系运动, 具有较好的塑性变形特性, 不容易发生断裂, 断裂应变会随着温度的降低而升高, 断裂效应会进一步延迟, 因而 CT-EM 切屑的成形能力更好。

CT-EM 与 RT-EM 切屑的 TEM 图像如图 10 所示。可知, 切屑组织内都发生了严重的变形, 晶粒破碎、细化, 并沿着材料挤出的方向拉伸, 大量位错缠结在一起形成了位错缠结区 (Dislocation Tangling Zones), 继而转化为位错胞 (Dislocation Cell) 和位错墙, 产生了较高的位错密度, 晶界大部分为模糊与非平衡的状态, 晶粒 (Grain) 尺寸多数在 200 nm 以下。不同的是, RT-EM 切屑组织内位错缠结区相对较少, 因为常温切削产生的热量触发了材料内的动态回复, 使位错消失, 位错密度降低, 而在深冷切削过程中, 铝合金的动态回复被抑制, 位错的攀附和滑移机制受阻, 更多的形核位置得以积累, 为位错缺陷的增加提供了有利条件。由前文模拟结果可知, 切屑内的稳态应变在 1.6 左右, 切屑被施加了很大的变形量, 此外, CT-EM 产生的应变率更高, 这会导致材料变形过程中的流动应力更大, 同样会增加位错生成的驱动力, 使切屑组织内生成更小尺寸的晶粒, 从而形成细晶强化, 使 CT-EM 制备的超细晶带材具备更优异的力学性能。

应变率。

4) CT-EM 切屑带材具有更好的成形能力, 在微观组织内产生了大量的位错缠结区, 晶粒被剧烈细化, 模拟数据与实验结果有较好的一致性。

## 参考文献:

- [1] YIN S Y, ZHOU Q S, XIAO Y S, et al. Influence of Equal Channel Angular Extrusion and Heat Treatment on High Temperature Oxidation Resistance of Ti555 Alloy[J]. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 2023, 59(5): 964-976.
- [2] LIU Y J, HENG Z H, HE Y P, et al. A Study of Microstructure Evolution for Mg Alloy Subjecting to

- Multi-Pass Equal Channel Angular Extrusion[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2023, 76(1): 165-173.
- [3] 程桑, 张永峰, 杨川, 等. 等径角挤压道次对纯锡显微组织与力学性能的影响[J]. 机械工程材料, 2023, 47(3): 7-11.  
CHENG S, ZHANG Y H, YANG C, et al. Effect of Equal Channel Angular Pressing Pass on Microstructure and Mechanical Properties of Pure Tin[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2023, 47(3): 7-11.
- [4] 李诗谦, 何涛, 霍元明, 等. 6063 铝合金航空铆钉等径角挤压-冷锻复合成形实验研究[J]. 锻压技术, 2022, 47(8): 138-145.  
LI S Q, HE T, HUO Y M, et al. Experimental Study on Equal Channel Angular Pressing and Cold Upsetting Composite Forming for 6063 Aluminum Alloy Aviation Rivets[J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47(8): 138-145.
- [5] 豆朋, 张瀚, 邱灿树, 等. 在高压扭转大塑性变形及时效过程中 6201 铝合金组织和硬度的变化规律[J]. 机械工程材料, 2023, 47(11): 1-5.  
DOU P, ZHANG H, QIU C S, et al. Evolution of Microstructure and Hardness of 6201 Aluminum Alloy during High-Pressure Torsion Severe Plastic Deformation and Aging[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2023, 47(11): 1-5.
- [6] CHEN C, HUA A P, YU J J, et al. Mechanical Alloying and Phase Transition of Immiscible Al/Zn System during High-Pressure Torsion[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33(12): 3612-3624.
- [7] LUO J T, YU W L, XI C Y, et al. Preparation of Ultrafine-Grained GH4169 Superalloy by High-Pressure Torsion and Analysis of Grain Refinement Mechanism[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 777: 157-164.
- [8] AAL M L A E. Wear and Mechanical Properties of Al Chips and Al Chips Composites Recycled by High-Pressure Torsion[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 14: 407-427.
- [9] TOPOLSKI K. Relationship of Microstructure and Properties of High-Purity Titanium Manufactured by Unconventional Method of Chips Recycling[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 77: 426-438.
- [10] RAHMATABADI D, SHAHMIRZALOO A, HASHEMI R, et al. Using Digital Image Correlation for Characterizing the Elastic and Plastic Parameters of Ultrafine-Grained Al1050 Strips Fabricated via Accumulative Roll Bonding Process[J]. Materials Research Express, 2019, 6(8): 086542.
- [11] 甘宛妮, 东栋, 李建伟, 等. 热处理状态对限制模压-轧制 2A97 铝锂合金板材晶粒细化的影响[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(3): 142-149.  
GAN W N, DONG D, LI J W, et al. Effects of Heat Treatment State on Grain Refinement of Constrained Groove Pressed-Rolled 2A97 Al-Li Alloy Sheet[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29(3): 142-149.
- [12] 张翠翠, 吴化, 于晓丰. 搅拌摩擦加工制备 Al6061/SiC 复合材料的耐蚀性研究[J]. 表面技术, 2021, 50(5): 315-320.  
ZHANG C C, WU H, YU X F. Investigation on Corrosion Resistance of Al6061/SiC Composite Prepared with Friction Stir Processing[J]. Surface Technology, 2021, 50(5): 315-320.
- [13] 许兵. 喷射成形 7034 铝合金往复挤压及热处理工艺研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021: 5-13.  
XU B. Study on Cyclic Extrusion Compression and Heat Treatment Process of 7034 Aluminum Alloy by Spray Forming[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021: 5-13.
- [14] WANG Z S, WANG T, GUAN Y J, et al. Effects of Lubrication and Strain Path on Constrained Groove Pressing of Commercially Pure Aluminum Sheets[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(1): 511-527.
- [15] IGLESIAS P, BERMÚDEZ M D, MOSCOSO W, et al. Influence of Processing Parameters on Wear Resistance of Nanostructured OFHC Copper Manufactured by Large Strain Extrusion Machining[J]. Wear, 2010, 268(1/2): 178-184.
- [16] CHEN Y J, ROVEN H J, GIREESH S S, et al. Quantitative Study of Grain Refinement in Al-Mg Alloy Processed by Equal Channel Angular Pressing at Cryogenic Temperature[J]. Materials Letters, 2011, 65(23/24): 3472-3475.
- [17] 侯陇刚, 刘明荔, 王新东, 等. 高强 7050 铝合金超低温大变形加工与组织、性能调控[J]. 金属学报, 2017, 53(9): 1075-1090.  
HOU L G, LIU M L, WANG X D, et al. Cryogenic Processing High-Strength 7050 Aluminum Alloy and Controlling of the Microstructures and Mechanical Properties[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53(9): 1075-1090.
- [18] 邓文君, 曾俞宁, 周子涵. 挤出切削制备梯度结构铝带材的新工艺及机理[J]. 机械工程学报, 2022, 58(5): 278-288.  
DENG W J, ZENG Y N, ZHOU Z H. New Process and Mechanism for Preparing Gradient Structural Aluminum Strip by Extrusion-Machining[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(5): 278-288.
- [19] 殷晓龙, 邓文君, 张嘉阳, 等. 超低温挤出切削 7075 铝合金的组织与性能[J]. 华南理工大学学报, 2019, 47(5): 89-95.  
YIN X L, DENG W J, ZHANG J Y, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Al7075 Alloy Prepared by Cryogenic-Temperature Extrusion Machining[J]. Journal of South China University of Technology, 2019, 47(5): 89-95.
- [20] 殷晓龙, 王志林, 王婉, 等. 深冷挤出切削制备超细晶 7075 铝合金的组织、性能及时效行为研究[J]. 材料导报, 2023, 37(22): 186-191.  
YIN X L, WANG Z L, WANG W, et al. Research on

- Microstructure, Mechanical Properties and Ageing Behaviors of Ultra-Fine Grained 7075 Aluminum Alloy Fabricated by Cryogenic Temperature Extrusion Machining[J]. *Materials Reports*, 2023, 37(22): 186-191.
- [21] 谢梓淳. 大应变挤出切削制备铝合金纳米晶材料及其热稳定性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013: 11-13.
- XIE Z C. Formation Process and Thermal Stability of Nanostructured Material of Aluminum Alloy by Large Strain Extrusion Machining[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013: 11-13.
- [22] YIN X L, WANG Z L, GUO R Y, et al. FEM Simulation of Surface Micro-Groove Structure Fins Produced by Cryogenic-Temperature Extrusion Machining[J]. *Processes*, 2023, 11(2): 560.
- [23] PU Z, OUTEIRO J C, BATISTA A C, et al. Enhanced Surface Integrity of AZ31B Mg Alloy by Cryogenic Machining towards Improved Functional Performance of Machined Components[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 56: 17-27.
- [24] MOHEBBI M S, AKBARZADEH A. Constitutive Equation and FEM Analysis of Incremental Cryo-Rolling of UFG AA 1050 and AA 5052[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 255: 35-46.
- [25] 林平. 大应变挤出切削制备超细晶纯铜带材的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013: 27-28.
- LIN P. Preparation of Ultra-fine Grain Copper Strip by Large Strain Extrusion Machining[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013: 27-28.