

AZ31 镁合金板等应变速率挤压研究

成小乐^{1,2}, 祁志旭¹, 屈银虎¹, 时晶晶¹, 尹君¹

(1. 西安工程大学, 陕西 西安 710048)

(2. 金属挤压与锻造装备技术国家重点实验室, 陕西 西安 710032)

摘要: 设计了等应变速率模具, 将等应变速率挤压技术应用于 AZ31 镁合金板材挤压。采用有限元软件对等应变速率挤压和传统挤压分别进行模拟仿真。对比研究了镁合金挤压过程中, 分别使用等应变速率模具和传统模具时, 金属流动速度场、等效应变场、模具出口温度场、平均应力场等坯料主要场变量的变化规律。研究表明: 在设定的具体工况下, 使用等应变速率模具挤压使金属流动速度场、等效应变场、模具出口温度场和应力场分布的均匀性分别提高了 13.5%, 43.2%, 7.6% 和 13.4%。两种模具的出口处板材的等效应变均是从中心向边缘逐渐增加, 温度场均呈现中心部分基本保持稳定, 靠近板材边缘部分逐渐降低趋势, 且等应变速率模具出口处板材温增小于传统模具。等应变速率模具减小了模具出口附近板材拉应力出现的范围, 且在模具出口处等应变速率挤压板材的平均压应力大于传统挤压。

关键词: 等应变速率; AZ31 镁合金; 有限元; 模具

中图分类号: TG146.22; TG379

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)06-1852-08

镁合金的低对称性密排六方晶体结构以及较少的滑移系导致其成为典型的难变形合金, 但是因其具有优异的物理和力学性能, 在航空航天、汽车等领域被广泛应用^[1]。在镁合金被广泛需求的同时, 其难变形的特点很大程度上限制了镁合金在很多领域的开发和运用, 比如镁合金板材在生产过程中会出现边裂和表面裂纹等缺陷, 严重影响板材的质量和性能^[2,3]。现有研究表明, 大塑性变形技术 (SPD) 能够细化镁合金晶粒和弱化织构, 从而改善镁合金的综合力学性能, 提高镁合金的塑性成形能力^[4-6]。

镁合金板的塑性成形一般是通过轧制和挤压两种方法实现。目前镁合金板材轧制工艺研究虽然较多, 但大多研究是根据经验累积和借鉴轧钢工艺技术进行镁合金轧制工艺选取, 镁合金板材轧制仍然存在轧制工序繁复, 效率低, 产品性能差等问题^[7,8]。相反, 挤压法制备镁合金板材能够实现一步成型, 生产效率高, 逐渐被学者们关注^[9]。

挤压制备镁合金板材的过程中, 镁合金材料场变量分布均匀性是衡量镁合金成型质量优劣的关键, 改变挤压工艺参数和模具几何形状是改善场变量分布均匀性的有效手段。郭丽丽等^[10]通过实验证明了在连续挤压 AZ31 镁合金时将单杆进料改进为双杆进料后能够提高镁合金板材组织的均匀性, 使晶粒细化程度和

抗拉强度明显提高。杨俊英等^[11,12]通过 DEFORM-3D 模拟了 AZ31 镁合金连续挤压过程, 揭示了在挤压过程中随着挤压轮转速的增加, 镁合金流动速度的不均匀程度增加; 在改变模具型腔结构后, 增加型腔深度, 模口处流动速度差减小, 但随产品宽度的增加, 模口金属流动速度差增大, 速度场不均匀程度增加。以上研究均只讨论了挤压参数或模具形状改变对单一场变量均匀性的影响, 并没有研究挤压参数或模具形状改变对其他场变量均匀性的影响趋势。

尹振入等^[13]利用 DEFORM-3D 软件模拟了锥台剪切变形工艺制备镁合金板的过程, 总结出在锥台转角为 120° 时, 板材成型拉应力所占比例最少, 等效应变和速度场分布较为均匀, 但是等效应变却随锥台转角的增大有所降低。虽然该研究全面分析了模具形状改变对各场变量分布均匀性的影响, 但是仅通过改变模具某一尺寸进而提高场变量分布的均匀性, 其效果是有限的。

Kang^[14]曾在研究中提及使用等应变速率模具挤压颗粒增强铝基复合棒材, 能够使材料的弯曲强度和硬度获得了很大程度的提升, 延展性也会有所提高。等应变速率模具因其在挤压过程中保证材料变形的应变速率的恒定, 进而提升材料在变形过程中各场变量分布的均匀性, 导致材料成型质量的提升。但目前并

收稿日期: 2018-06-09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) (2010CB736004)

作者简介: 成小乐, 男, 1976 年生, 博士, 教授, 西安工程大学, 陕西 西安 710048, 电话: 029-62779028, E-mail: cxlcheng@sohu.com

未检索到将等应变速率挤压技术应用于板材挤压领域的研究报道。

尤其是对 AZ31 镁合金板材挤压, 应变速率和温度的变化能影响其压缩成形性能, 在镁合金板材挤压过程中某一恒定的应变速率更有利于 AZ31 镁合金表现出良好的塑性^[15,16]。因此, 将等应变速率技术应用于镁合金板材挤压, 保持挤压速度恒定并配合等应变速率模具即可实现挤压过程中金属坯料的等应变速率变形。在保证 AZ31 镁合金具有良好塑性变形能力的条件下, 再进一步提升镁合金板材温度、塑性流动速度、应力等场变量分布的均匀性, 可为提升镁合金板材成型质量提供一种新思路, 具有非常重要的现实意义。

本研究将等应变速率挤压技术应用于镁合金板材挤压, 运用数值模拟的手段分别揭示等应变速率挤压模具与传统挤压模具对 AZ31 镁合金板材成型过程中速度场、温度场、应力场等模拟结果的影响, 以及各场变量分布的均匀性, 以期等为等应变速率挤压模具设计提供理论参考。

1 镁合金挤压有限元模拟

1.1 几何模型与网格设计

首先基于 Solid Works 构建了包括挤压坯料、挤压筒和其他挤压工具。图 1 为镁合金板的横截面尺寸图。根据等应变速率模具技术特征和挤压制造的镁合金板材几何尺寸特征, 本课题组设计了等应变速率模具组件的几何模型(图 2), 其中等应变速率的模具入口和出口形状均为椭圆形且长轴长度不变, 模具型腔的曲线方程为^[17]:

$$a(x) = \frac{a_0 L}{L + x(\lambda - 1)} \quad (1)$$

式中, a_0 为模具入口短半轴长, L 为模具长度, λ 为挤压比, 短半轴 $a(x)$ 随 x 的变化而变化。

AZ31 镁合金的适宜挤压温度为 300~350 °C, 挤压比为 15~30, AZ31 镁合金挤压态的平均晶粒尺寸能控制在 10~20 μm , 则更有利于镁合金的塑性变形^[18]。结合实际情况, 本研究选用挤压比为 28。使用该模具对坯料进行挤压时, 在坯料进入模具型腔以及稳态挤压过程中, 模具型腔形状保证挤压速度恒定, 沿着挤压方向坯料的应变速率基本恒定, 进而保证了在坯料挤压过程中场变量的均匀性。研究需要, 本研究将与常规模具组件的挤压结果做比较, 常规模具组件如图 3 所示。等应变速率模具与常规模具组件的主要区别在于模具型腔的几何形状, 等应变速率模具型腔内表面为曲面, 具体方程如式 (1), 常规模具型腔内表面为平面。

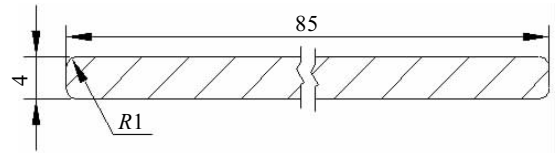


图 1 镁合金板横截面几何尺寸

Fig.1 Cross-sectional shape and dimensions of magnesium alloy

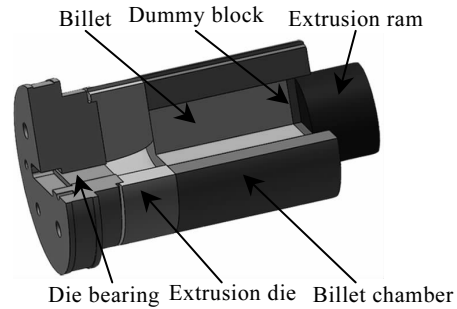


图 2 等应变速率挤压原理图

Fig.2 Constant-strain-rate extrusion principle

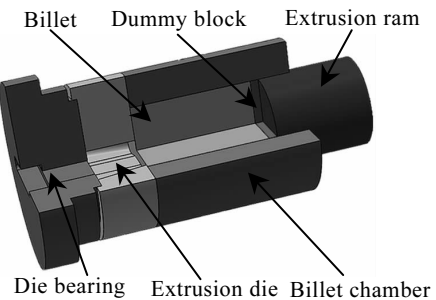


图 3 传统挤压原理图

Fig.3 Traditional extrusion principle

考虑到挤压模具组件的对称性, 本研究构建 1/4 挤压模型, 并通过 DEFORM-3D 进行挤压模拟。由于挤压杆和挤压垫具有相同的挤压速度, 所以将挤压杆和挤压垫简化为如图 4 所示的挤压轴, 另外挤压筒、模具在挤压过程中被固定且模具与挤压筒、模具相互接触, 因此将挤压筒、模具看做一个整体, 如图 4 所示。对于坯料、模具和挤压垫的网格划分采用四面体单元。为保证计算精度和效率, 对模具细小特征部分进行局部网格细化如图 4a 区域 I、II 和图 4b 区域 I。坯料、模具和挤压垫的网格数和模型部分几何尺寸如表 1 所示。

1.2 材料模型与边界条件

模拟材料选用 AZ31 镁合金, 物理和力学性能参数如图 5 所示, 泊松比为 0.4^[19]。工模具材料选择为 H13 钢, 可直接在 DEFORM-3D 材料库中选择。其中

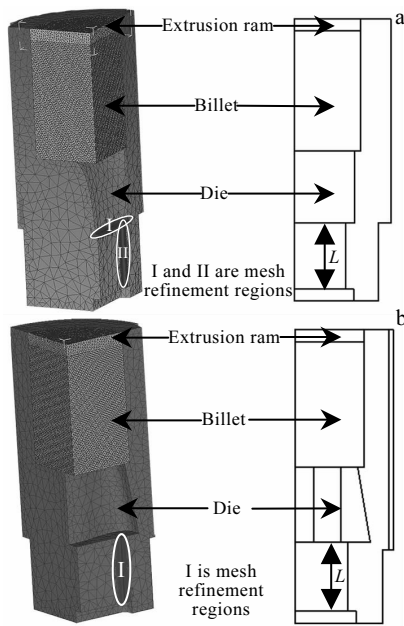


图 4 网格设计和几何模型

Fig.4 Mesh design and geometrical model: (a) constant-strain-rate extrusion model and (b) traditional extrusion model

表 1 模型几何和网格设计信息

Table 1 Information for geometrical model and mesh design

Parameter	Type	Value
Billet size/mm		$\phi 90 \times 100$
Die bear length, L /mm		55
Mesh number for billet	Absolute	Size ratio=1; max element size=1 mm
Mesh number for die	Relative	40000
Mesh number for pad	Relative	10000
Mesh number ratio of die		0.005
Extrusion ratio		28

AZ31 镁合金的本构方程如式 (2) [11]:

$$\dot{\epsilon} = 2.3 \times 10^{-8} \sigma^{8.43} \exp(-112000/RT) \quad (2)$$

式中, $\dot{\epsilon}$ 为应变速率; σ 为应力值; R 为气体常数; T 为温度。

镁合金板、模具与空气之间的热交换系数为 $0.016 \text{ N/s}\cdot\text{mm}\cdot\text{C}$, 坯料与模具之间的热交换系数为 $11 \text{ N/s}\cdot\text{mm}\cdot\text{C}$ [20]。模拟所需参数如表 2 所示。

1.3 有限元模拟准确性验证

通过挤压力经验公式计算结果与模拟得到的挤压载荷变化对比, 能够验证模拟的有效性 [21]。式 (3) 为计算挤压力的经验公式 [22]:

$$P = \beta A_0 \sigma_s \ln \lambda + \mu \sigma_s \pi D L \quad (3)$$

式中, P 为挤压力 (N); A_0 为挤压筒面积 (mm^2); σ_s 为变形抗力 (MPa); λ 为挤压比; μ 为系数; D 挤压

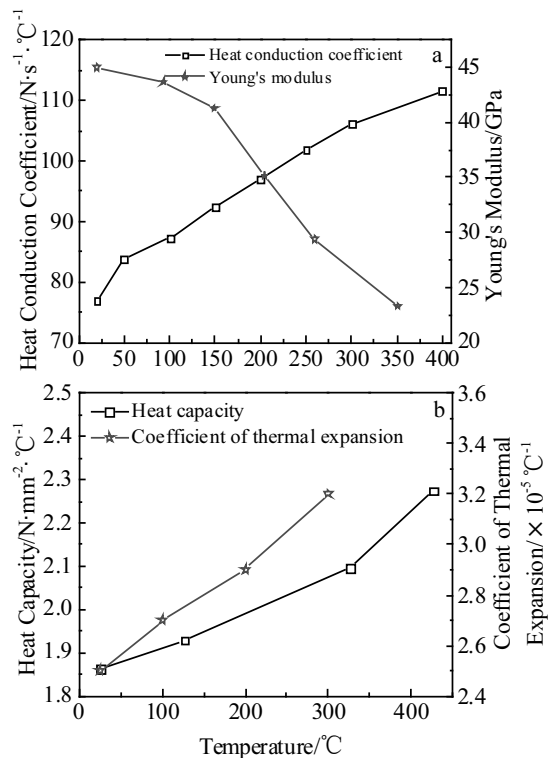


图 5 AZ31 镁合金的物理和力学性能

Fig.5 Physical and mechanical properties of AZ31 alloy: (a) heat conduction coefficient and Young's modulus; (b) heat capacity and coefficient of thermal expansion

表 2 热挤压 AZ31 镁合金边界条件

Table 2 Boundary condition information for extrusion process of AZ31 alloy

Parameter	Value
Extrusion speed, $v/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	2
Initial billet temperature, T_0/C	300
Friction coefficient	0.3
Initial temperature for die and pad/ C	400

筒直径 (mm); L 为坯料长度 (mm); β 为修正系数。

图 6 显示了模拟和经验公式所计算的挤压载荷值。等应变速率挤压和传统挤压的最大载荷分别为 4.84 和 4.8 MN , 经验公式计算值为 4.48 MN 。在挤压稳态阶段等应变速率挤压和传统挤压的平均载荷与经验值的相对误差分别为 1% 和 3% 。这表明为等应变速率模具和传统模具挤压 AZ31 镁合金板材所构建的有限元模型具有一定的精度和可靠性。

2 结果与讨论

在挤压模拟过程中场变量分布的均匀性变化是评价挤压件质量优劣的重要指标, 比如: 温度场、应力-应变场、材料流动速度场等。因此, 引入均方差 SD

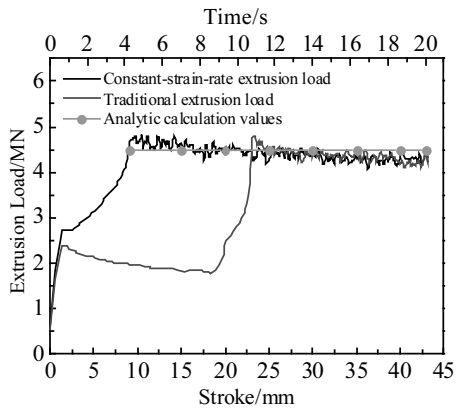


图 6 挤压力的变化曲线
Fig.6 Variation curves of the extrusion load

(式 4) 来描述场变量分布的均匀性变化, SD 值越大, 表明场变量分布的均匀性越差^[23]。

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - X_a)^2}{N - 1}}, X_a = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \quad (4)$$

其中, X_i 为在 i 节点场变量 X 的值; X_a 为所有节点上场变量 X 的平均值; N 为所选区域内节点个数。

由于模具出口处的温度、应力、金属流动速度在模具优化设计和挤压稳步控制中至关重要, 因此所有节点的选择均在模具出口处, 如图 7 所示。并且对于场变量数据的提取均在挤压进入稳定阶段进行, 提取 20 组不同步数的数据, 求其平均值。

2.1 材料流动速度和应变分布

图 8、图 9 分别为等应变速率模具和传统模具挤压在不同阶段的金属流动速度分布。采用两种模具的挤压过程中, 在坯料上均能观察到坯料与模具入口接触面的速度流动方向存在明显的分界线, 分界线右侧速度方向指向模具入口, 左侧则指向坯料边缘, 并且

随着挤压过程的进行, 分界线逐渐向坯料中心移动。主要是因为坯料与模具接触面存在摩擦力, 使坯料表面流动速度低于坯料中心的速度, 导致只有坯料中心部分对模具型腔进行填充, 在接触表面呈现明显的分界线。此外传统模具挤压过程中, 除了坯料与模具入口的速度方向分界线以外, 由于模具出口与工作带接触面的摩擦力, 使其也存在一条分界线。

由图 10 可以计算出, 等应变速率模具和传统模具出口金属流动的平均速度分别为 16.43 和 16.13 mm/s; 均方差分别为 0.45 和 0.52, 均匀性提升 13.5%。且由图 1 可以看出, 坯料边缘存在圆角使之与模具内表面

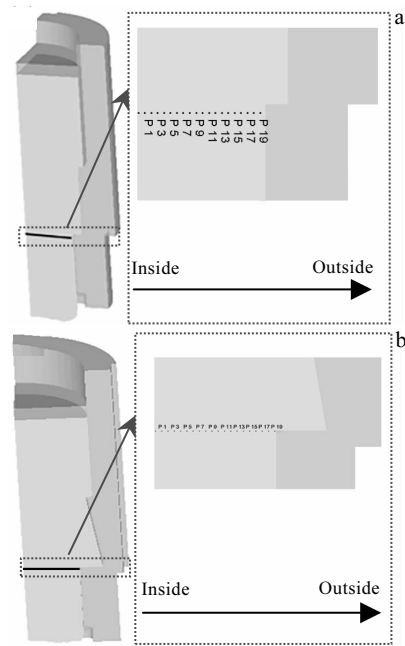


图 7 模具出口处节点选择范围
Fig.7 Selected nodes range of die exit: (a) constant-strain-rate extrusion and (b) traditional extrusion

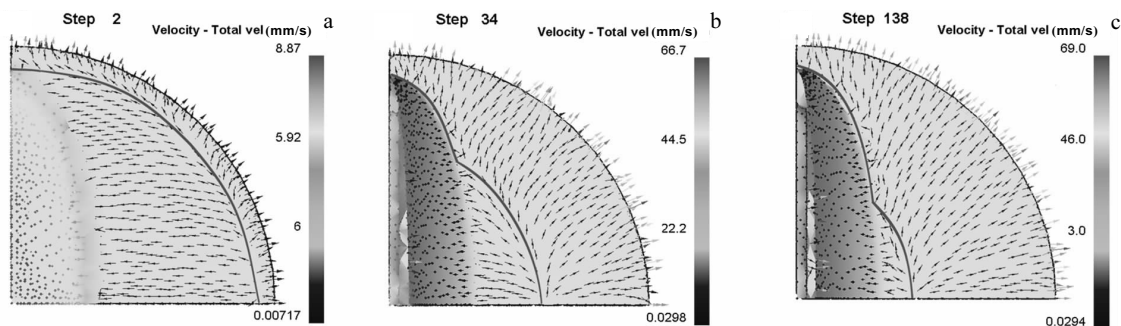


图 8 等应变速率挤压不同阶段的速度场变化
Fig.8 Evolution of velocity field at different stages during the constant-strain-rate extrusion process: (a) initial stage of extrusion, (b) breakthrough stage of extrusion, and (c) steady-state stage of extrusion

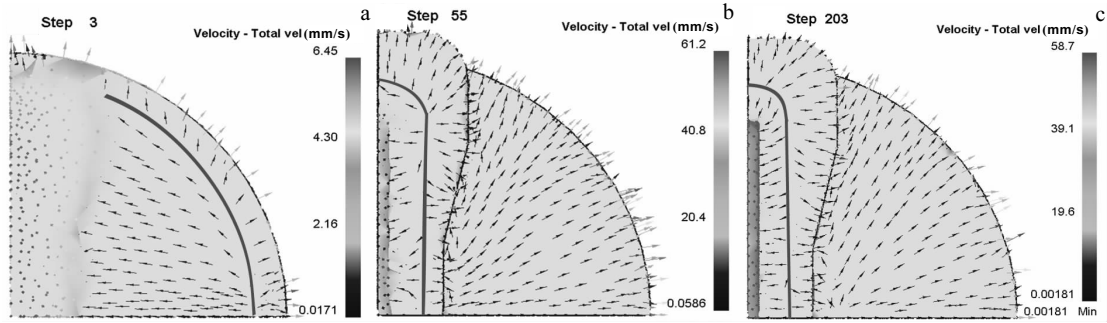


图 9 传统挤压不同阶段的速度场变化

Fig.9 Evolution of velocity field at different stages during the traditional extrusion process: (a) initial stage of extrusion, (b) breakthrough stage of extrusion, and (c) steady-state stage of extrusion

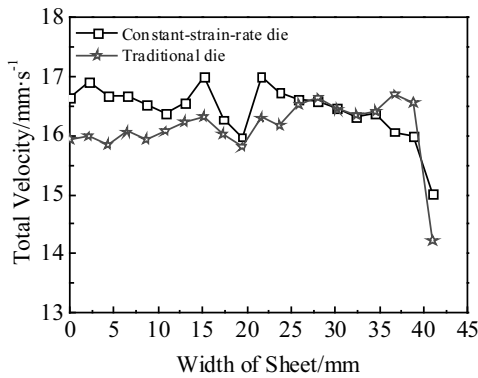


图 10 稳态挤压过程中模具出口处金属流动速度变化

Fig.10 Evolution of metal flow velocity at exit during steady extrusion process

速率模具使得出口处材料的等效应变分布的均匀性提升了 43.2%。虽然等应变速率模具出口处板材的等效应变小于传统模具，但是其分布的均匀性高于传统模

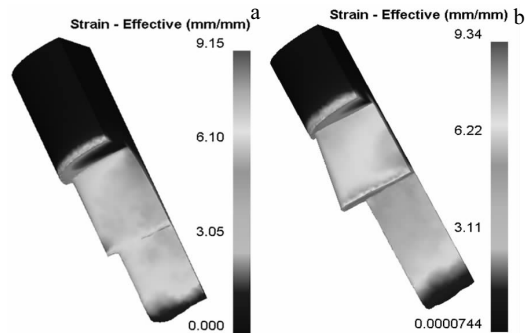


图 11 稳态挤压过程中等效应变分布

Fig.11 Distribution of effective strain during steady extrusion process: (a) constant-strain-rate extrusion process and (b) traditional extrusion process

之间的接触面积增大，摩擦变大，边缘速度均呈现降低趋势。

在挤压过程中，等效应变的分布情况直接影响着挤压板材各向异性，等效应变越大，越有利于动态再结晶，均匀程度越高，越有利于弱化板材各向异性^[13]。等应变速率模具和传统模具在稳态挤压过程中坯料等效应变分布如图 11 所示。能够看出最大等效应变均出现在坯料边缘，并且传统模具挤压坯料的等效应变整体大于等应变速率模具。

模具出口处板材的等效应变分布趋势如图 12 所示，由中心向边缘逐渐增大。此外，传统模具出口处板材的等效应变明显大于等应变速率模具。主要是由于传统模具挤压过程中坯料在模具出口处的剪切变形大于等应变速率模具。根据采集数据计算等应变速率模具和传统模具出口处板材的等效应变平均值分别为 3.76 和 4.92，均方差分别为 0.25 和 0.44，使用等应变

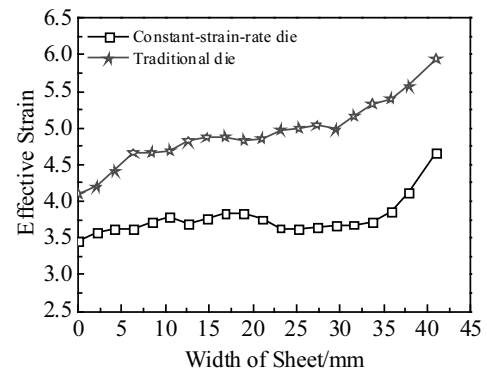


图 12 稳态挤压过程中模具出口处等效应变分布

Fig.12 Distribution of effective strain at exit during steady extrusion process

具, 更有利于弱化板材各向异性。

2.2 挤压过程温度分布

图 13 为在稳态挤压下等应变速率模具和传统模具的出口处温度变化趋势。可以看出, 在稳态挤压阶段等应变速率模具出口处温度明显低于传统模具出口处温度, 而且两种模具挤压的板料, 其温度分布均呈现中心部分保持稳定, 靠近边缘部分逐渐降低趋势。根据图 2、图 3 可以看出, 等应变速率模具出口的面积小于传统模具出口的面积, 在稳态挤压过程中, 坯料在等应变速率模具出口处的剪切变形小于传统模具, 所产生的的变形热量也小于传统模具, 导致等应变速率模具出口温度明显低于传统模具出口温度。另外, 坯料边缘温度逐渐降低。这是由于坯料边缘速度低于其他区域, 使板料与模具之间有更多的时间进行热传递。

根据布置的标记点采集的温度数据, 计算等应变速率模具和传统模具在稳态挤压时出口的平均温度分别为 426.0 和 436.5 °C, 平均温增分别为: 126 和 136.5 °C; 均方差分别为 1.67 和 1.75。使用等应变速率模具使稳态挤压时出口处材料温增降低了 7.6%, 均匀性提升了 4.6%。这表明, 等应变速率模具对模具出口温度的均匀性分布与传统模具相比具有一定的优势。

图 14 显示了稳态挤压过程中坯料的温度分布情况以及在挤压过程中坯料的最高温度随时间的变化趋势。在稳态挤压过程中等应变速率挤压和传统挤压的最高温度的平均值分别为 448.3 和 445.4 °C。从图中可以看出, 坯料中心温度低于坯料未变形区边缘温度。另外, 坯料的最高温度均出现在坯料的边缘, 从图 8、图 9 可以看出, 与模具入口接触的坯料向边缘流动, 造成边缘材料之间发生剪切摩擦, 导致坯料边缘温度高于其他区域。

2.3 平均应力分布

在金属板材挤压的过程中, 金属板材表面质量的优势取决于最大挤压温度、挤压通道内材料的应力状态、工作带长度等, 其中工作带内材料的应力状态对板材表面质量的影响最为显著^[24]。模具出口附近拉应力的存在, 使得当应变和拉应力的综合作用超过材料本身的断裂强度时, 会导致材料产生裂纹、断裂等缺陷^[25-27]。根据图 15 所示的挤压过程中的平均应力分布能够看出, 挤压坯料平均应力呈梯度分布, 两种模具的拉应力均出现在模具出口附近, 等应变速率模具明显减小了模具出口附近拉应力出现的范围。

根据提取模具出口平均应力值计算出板材平均应力分布如图 16 所示。可看出, 在模具出口平均应力均表现为压应力。计算出等应变速率模具和传统模具出口应力的平均值分别为-81.4 和-53.8 MPa; 均方差分别为 10.39 和 12.00。使用等应变速率模具使模具出口处材料平均应力分布的均匀性提升 13.4%。

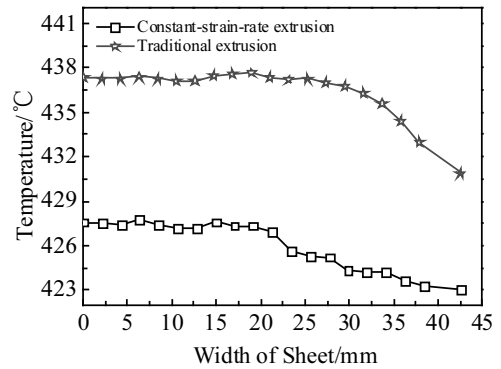


图 13 稳态挤压阶段模具出口处温度变化

Fig.13 Evolution of temperature at exit during steady extrusion stage

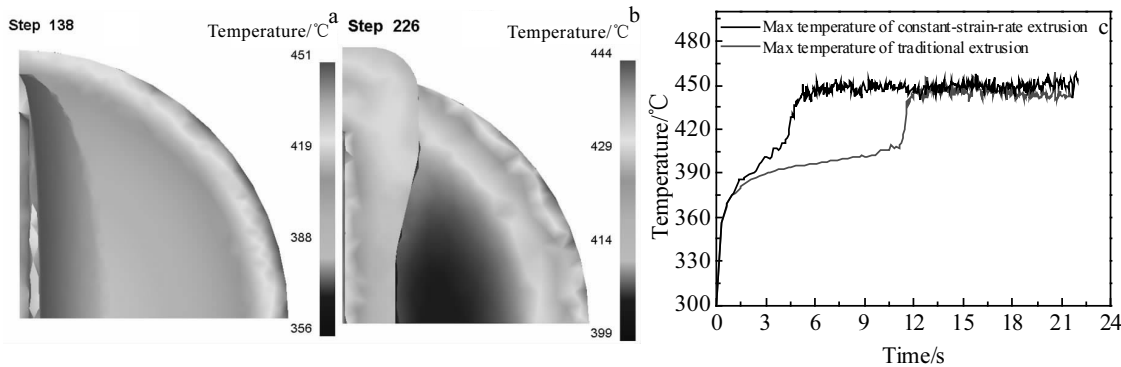


图 14 稳态挤压过程中坯料的温度分布及挤压过程中最高温度变化曲线

Fig.14 Temperature distribution of workpiece during steady extrusion and maximum temperature variation curve of workpiece during extrusion process: (a) steady extrusion process of constant-strain-rate model, (b) steady extrusion process of traditional model, and (c) maximum temperature curves

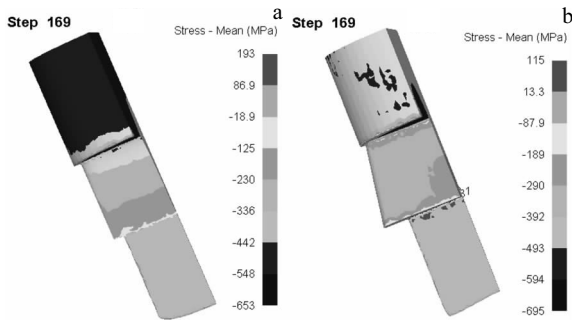


图 15 挤压过程中平均应力分布

Fig.15 Distributions of mean stress during extrusion process: (a) constant-strain-rate extrusion process and (b) traditional extrusion process

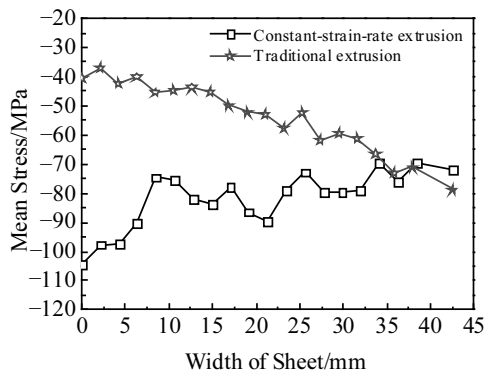


图 16 稳态挤压阶段模具出口处平均应力变化

Fig.16 Evolution of mean stress at exit during steady extrusion stage

3 结 论

1) 使用等应变速率模具挤压镁合金板材, 模具出口处材料的速度场、等效应变、温度场、平均应力分布的均匀性均高于传统模具。

2) 两种模具的出口处板材等效应变均是由中心向边缘逐渐增大, 但传统模具挤压板材的等效应变整体大于等应变速率模具。

3) 稳态挤压阶段等应变速率模具出口处板材温度明显低于传统模具出口温度, 而且两种模具挤压的板材, 其温度分布均呈现出中心部分保持稳定, 靠近边缘部分逐渐降低趋势。

4) 挤压坯料平均应力呈梯度分布, 两种模具挤压坯料的拉应力均出现在模具出口附近, 等应变速率模具明显减小了模具出口附近拉应力出现的范围, 两模具出口处板材的平均应力表现为压应力, 且等应变速率挤压坯料的压应力大于传统挤压。

5) 等应变速率挤压模具与传统模具相比具有一定的优势, 同时也存在不足, 等应变速率挤压坯料的局部温度略高于传统挤压坯料, 整体的等效应变也小于传统模具挤压坯料。

参考文献 References

[1] Song Guangsheng(宋广胜), Jiang Jingqian(姜敬前), Xu Yong (徐 勇) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2016, 26(12): 2469

[2] Ma Lifeng(马立峰), Pang Zhining(庞志宁), Huang Qingxue (黄庆学) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(S1): 387

[3] Cao Miaoyan(曹秒艳), Li Jianchao(李建超), Yuan Yanning(苑亚宁) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2017, 27(4): 675

[4] Asgari M, Fereshteh-Saniee F, Mahmoud Pezeshki S *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2016, 678: 320

[5] Wang Q H, Jiang B, Chai Y F *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2016, 673: 606

[6] Zhou H, Wang Q D, Guo W *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2015, 225: 310

[7] Liu Zhimin(刘志民), Wang Hongge(王红阁), Xing Shuming (邢书明) *et al.* *Materials Review*(材料导报)[J], 2008, 22(7): 96

[8] Cheng Yongqi(程永奇), Chen Zhenhua(陈振华), Xia Weijun (夏伟军) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2005, 15(9): 1369

[9] Shi Lei, Yang He, Guo Lianggang *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2014, 24(5): 1521

[10] Guo Lili(郭丽丽), Fu Rong(符 蓉), Pei Jiuyang(裴久杨) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(6): 1626

[11] Yang Junying(杨俊英), Gao Fei(高 飞), Wan Mengmeng(万萌萌) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2014, 24(11): 2711

[12] Yang Junying(杨俊英), Yun Xinbing(运新兵), Zhao Ying(赵颖) *et al.* *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2015, 40(4): 307

[13] Yin Zhenru(尹振入), Lu Liwei(卢立伟), Sheng Kun(盛 坤) *et al.* *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2018, 42(5): 470

[14] Kang C G, Kim N H, Kim B M. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2000, 100(1-3): 53

[15] Wang Kuan(王 宽). *Study on Pretreatment and Compression Superplasticity under High Strain Rate of Commercial AZ31*

- Magnesium Alloy-Extruded*(工业挤压态 AZ31 镁合金的预处理及高应变速率条件下的压缩超塑性研究)[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010: 43
- [16] Wang Chao(王超). *Study on Pretreatment and Compression Superplasticity under Constant Strain Rate of AZ31 Mg Alloy* (挤压态 AZ31 镁合金的预处理及恒应变速率下的压缩超塑性研究)[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2009: 10
- [17] Cheng Xiaole(成小乐), Yin Jun(尹君), Fu Hanguang(符寒光) *et al. Chinese Patent*(中国专利), CN201710344641.2[P], 2017
- [18] Wang Lingyun(汪凌云), Huang Guangsheng(黄光胜), Fan Yongge(范永革) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2003, 13(3): 594
- [19] Wang Lumeng(王露萌). *Study on Numerical Simulation of Rolling Process of AZ31 Magnesium Alloy Sheet*(AZ31 镁合金板材轧制工艺的数值模拟研究)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008: 11
- [20] Liang S J, Liu Z Y, Wang E D. *Materials Science and Engineering A*[J], 2009, 499(1-2): 211
- [21] Guo Lianggang, Dong Keke, Yang He *et al. Applied Mechanics and Materials*[J], 2012, 217: 1734
- [22] Wen Jinglin(温景林), Ding Hua(丁桦), Cao Furong(曹富荣) *et al. Non-ferrous Metal Extrusion and Drawing Technology*(有色金属挤压与拉拔技术)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 89
- [23] Dang Li, Yang He, Guo Lianggang *et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2015, 76(5-8): 1421
- [24] Shi Lei, Yang He, Guo Lianggang *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2014, 24(5): 1521
- [25] He Youfeng, Xie Shuisheng. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2010, 20(6): 1067
- [26] Zhou J, Li L, Duszczuk J. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2004, 146(2): 203
- [27] Hsiang S H, Lin Y W. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2008, 201(1-3): 138

Constant-Strain-Rate Extrusion of AZ31 Magnesium Alloy Plate

Cheng Xiaole^{1,2}, Qi Zhixu¹, Qu Yinhu¹, Shi Jingjing¹, Yin Jun¹

(1. Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

(2. State Key Laboratory of Metal Equipment Technology, Xi'an 710032, China)

Abstract: To extrude AZ31 magnesium alloy plate by the constant-strain-rate extrusion techniques, a new constant-strain-rate die was designed. Constant-strain-rate and traditional extrusion were investigated by finite element software Deform-3D separately. Key field variables, metal flow velocity, effective strain, exit temperature and mean stress were studied using the two types' dies during the extrusion processing. Results show that the uniformity of metal flow velocity, effective strain, exit temperature and mean stress are increased by 13.5%, 43.2%, 7.6% and 13.4%, respectively, by the constant-strain-rate extrusion. The effective strain of the plates at the exit of two kinds of dies exhibits a gradually increasing trend from the center to the edge and the exit temperature field shows a trend that the center keeps stable and the edge gradually decreases. Moreover, the plate at the exit of constant-strain-rate die exhibits a lower temperature increment than that at the exit of the traditional die. The range of tensile stress of the plate near the die exit is decreased by constant-strain-rate die and the plate at the exit of constant-strain-rate die exhibits larger compressive stress than that at the exit of the traditional die.

Key words: constant-strain-rate; magnesium alloy; finite element; die

Corresponding author: Cheng Xiaole, Ph. D., Professor, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, P. R. China, Tel: 0086-29-62779028, E-mail: cxlcheng@sohu.com