

基于 SPH 法的 AZ31 镁合金 BP-ECAP 过程三维数值模拟

宋婷婷 薄延强 牛晓峰 邱云基 申梦清
(太原理工大学材料科学与工程学院)

摘 要 光滑粒子流体动力学方法(Smooth Particle Hydrodynamics,SPH)在求解大变形问题方面具有优势。基于 SPH 法编写程序对 AZ31 镁合金的 BP-ECAP 过程进行三维数值模拟,并与相关研究文献进行对比,验证了编写的 SPH 法背压程序的正确性。对不同工艺参数下 AZ31 镁合金的背压-等通道挤压过程进行模拟,并从等效塑性应变及损伤值分布角度进行分析。模拟结果表明,选择恰当的回压值能有效地阻止镁合金变形过程中裂纹的萌生及扩展。

关键词 光滑粒子动力学;AZ31 镁合金;背压-等通道挤压工艺;3D 数值模拟

中图分类号 TG146.22;TP311 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.02.019 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



3D Numerical Simulation of AZ31 Magnesium Alloy during BP-ECAP Process Based on SPH

Song Tingting, Bo Yanqiang, Niu Xiaofeng, Qiu Yunji, Shen Mengqing
(School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology)

Abstract: Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) is a meshless particle method, which has advantages in solving large deformation problems. A three-dimensional numerical simulation of AZ31 magnesium alloy during BP-ECAP process was carried out based on the SPH method. The simulated results were consistent with those in the literature, which verified the correctness of the SPH method back pressure program. The back pressure-equal channel extrusion process of AZ31 magnesium alloy under different process parameters were predictively simulated and analyzed from the perspective of equivalent plastic strain and damage value distribution. The simulated results reveal that the appropriate back pressure value can prevent effectively the initiation and propagation of cracks during the deformation of magnesium alloys.

Key Words: SPH, AZ31 Magnesium Alloy, Back Pressure-Equal Channel Extrusion Process, 3D Numerical Simulation

背压-等通道挤压工艺^[1] (Equal Channel Angular Pressing with Back Pressure, BP-ECAP),即通过在等通道挤压模具出口通道处施加一定程度的背压,使变形材料在各个方向上都受到压应力的作用,可以阻止裂纹的萌生及扩展,使难变形金属能够在较低的温度下变形,从而得到晶粒细化程度较高、表面无裂纹的挤压件。目前,大多采用有网格有限元法对纯镁及其合金的挤压过程进行数值模拟,然而有网格法在模拟金属大塑性变形时易产生网格畸变,导致计算终止或计算精度下降^[2]。无网格光滑粒子动力学法不依赖网格进行计算,而是通过具有各自质量、温度、压力等物理量的粒子进行计算,避免了使用网格带来的一系列问题,得到了研究者的广泛关注。KOCICH R 等^[3]采用 Forge 有限元

软件建立了三维 BP-ECAP 模型对 Ti-6Al-4V 钛合金进行等通道挤压过程模拟,结果表明,背压可以提高应变分布的均匀性,并可以消除因模具的内外角因素影响产生的死区。ISLAM M R I 等^[4]提出了一种在全拉格朗日光滑粒子流体力学(TLSPH)框架内模拟裂纹萌生和扩展的算法,并采用该算法准确模拟了缺口梁在冲击作用下的裂纹萌生以及扩展过程,验证了 SPH 方法在固体力学中裂纹萌生及扩展模拟方面的正确性。王晨晨^[5]通过引入多核并行计算技术,并编写相关 SPH 法程序对纯镁的 ECAP 过程进行三维数值模拟,提高了 SPH 法的计算效率,而且通过与 Deform-3D 模拟结果以及试验结果进行对比,验证了 SPH 法在处理大变形问题方面的正确性和精确度。

收稿日期:2020-07-10;修改稿收到日期:2020-09-07
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874209);山西省科技重大专项基金资助项目(20191102007)
第一作者简介:宋婷婷,女,1996 年出生,硕士研究生,太原(030024),E-mail:914257066@qq.com
通信作者:牛晓峰,男,1982 年出生,教授,太原(030024),E-mail:niuxiaofeng@tyut.edu.cn
引用格式:宋婷婷,薄延强,牛晓峰,等. 基于 SPH 法的 AZ31 镁合金 BP-ECAP 过程三维数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(2):219-222.
SONG T T, BO Y Q, NIU X F, et al. 3D numerical simulation of AZ31 magnesium alloy during BP-ECAP process based on SPH[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(2):219-222.

本课题基于 SPH 法编写程序对 AZ31 镁合金的 BP-ECAP 过程进行三维数值模拟,对温度为 100 ℃,挤压速率为 600 mm/min 情况下,分别施加背压力为 25、50、75、100 MPa 时,AZ31 镁合金的背压-等通道挤压过程进行模拟,并从等效塑性应变及损伤值分布角度进行分析,旨在为了解其损伤行为进行参考。

1 三维数学模型

1.1 基于 SPH 方法的控制方程

SPH 法将计算域离散为一系列粒子,由于在采用 SPH 法模拟金属材料的塑性变形过程时,各个粒子的速率随时间的变化而变化,同样遵循动量守恒定律^[6]:

$$\frac{dv^a}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma^{a\beta}}{\partial x^\beta} \quad (1)$$

进行 SPH 粒子近似得:

$$\frac{dv_i^a}{dt} = \frac{1}{\rho_i} \sum_{j=1}^N m_j \frac{\sigma_j^{a\beta}}{\rho_j} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (2)$$

由于等式

$$\sum_{j=1}^N m_j \frac{\sigma_i^{a\beta}}{\rho_i \rho_j} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} = \frac{\sigma_i^{a\beta}}{\rho_i} \left(\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \right) = 0 \quad (3)$$

将式(2)与式(3)相加得

$$\frac{dv_i^a}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j \frac{\sigma_i^{a\beta} + \sigma_j^{a\beta}}{\rho_i \rho_j} \cdot \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} = \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\sigma_i^{a\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{a\beta}}{\rho_j^2} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (4)$$

式中, σ_i 、 σ_j 分别为粒子 i 、 j 的总应力张量; ρ_i 、 ρ_j 分别为粒子 i 、 j 的密度;上标 α 、 β 为坐标方向; $\partial W_{ij} / \partial x_i^\beta$ 为核函数 W 的导函数; $\sum_{j=1}^N$ 为 j 粒子对 i 粒子的影响作用之和; N 为影响域内的粒子个数。 m_j 为粒子 j 的质量; v_i^a 为粒子速度。

1.2 本构及损伤模型

采用 HS(Hensel-Spittel)本构模型与 SPH 法程序进行耦合,该模型综合考虑了应变、温度、应变速率变化对屈服应力的影响,表达如下:

$$Y = B e^{p_1 T} \epsilon^{p_2} \dot{\epsilon}^{p_3} e^{\frac{p_4}{T}} (1 + \epsilon) p_5 T e^{p_6 \epsilon} \dot{\epsilon}^{p_7 T} T^{p_8} \quad (5)$$

式中, B 、 $p_1 \sim p_8$ 为材料参数, B 为 1 129.751, $p_1 \sim p_8$ 分别为 -0.002 66、0.169、0.241 75、0、0、-13.614 92、0、0。

为了能精确地预测裂纹的形成及扩展情况,引入 Oyane 损伤模型进行粒子近似,并将其转换成适合与 SPH 法程序耦合的形式:

$$\int_0^{\epsilon_f} \left[1 + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma} \right) \right] d\epsilon = C_2 \quad (6)$$

对式(6)左侧进行离散得:

$$\int_0^{\epsilon_f} \left[1 + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma} \right) \right] d\epsilon \approx \sum_{t=0}^{t_f} \left(1 + \frac{\sigma_m}{\sigma} \right) \dot{\epsilon} \Delta t \quad (7)$$

式中, t_f 为材料损伤累积到损伤阈值所用时间; σ_m 为静

水压力,表达式为:

$$\sigma_m = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (8)$$

式中, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为最大主应力、中间主应力、最小主应力,主应力计算参照文献[7]; C_2 为损伤阈值。裂纹的扩展仿照有限元法的单元消去法^[8],对达到损伤阈值的 SPH 粒子看作失效粒子进行消除,当然这种“消除”并不意味着彻底删掉,而是使其所有应力张量为 0,即当作刚性处理^[9]。

1.3 移动边界的实现

由于 SPH 内部粒子运动时会因粒子速度过大而穿透边界造成计算中断,对此,本课题采用边界力罚函数法^[10],通过边界粒子对邻近内部粒子直接施加罚函数形式的排斥力,其表达式为:

$$f_{ij}^{bp} = \begin{cases} - \left\{ v_{\max}^2 \cdot \frac{\min[(v_i - \bar{v}_j) \cdot n_j, -1] W_{ij} H_{ij} n_j}{|x_{ij} \cdot n_j|} \right\} & (v_i - \bar{v}_j) \cdot n_j < 0 \\ 0 & (v_i - \bar{v}_j) \cdot n_j \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中, $v_{\max}$ 为粒子速度的最大值; v_i 为 i 粒子速度的计算值; $\bar{v}_j$ 为 j 粒子速度的真实值; n_j 为边界粒子的法向,其方向指向流体区域; W_{ij} 为光滑函数; $H_{ij} = h_{ij} D$, $h_{ij} = (h_i + h_j) / 2$,其中, h 为光滑长度; D 为求解问题的维数,取 $D = 3$ 。

粒子速度表达式为:

$$v_i^a = \frac{dx_i^a}{dt} \quad (10)$$

为了防止内部 SPH 粒子之间互相穿透,采用 XSPH 法^[11]对粒子速度进行修正:

$$\frac{dx_i^a}{dt} = v_i^a - \epsilon \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} v_{ij} W_{ij} \quad (11)$$

其中, ϵ 根据不同的研究领域而取不同的值,这里取 0.3。

为了与实际加工过程相符,需要处理匀速移动边界的问题。因此,本课题基于罚函数边界排斥力施加方法,通过在跳蛙法中对粒子进行时间积分更新,只更新上模的移动位置,不更新其速度,从而使上模实现匀速运动。背压板在初始时刻是静止的,只有当内部金属试样对背压板的作用力大于背压力时,背压板才在内部金属试样作用下运动。

2 数值模拟结果及分析

所建 SPH 法 BP-ECAP 模具模型简图见图 1,该模具模型由工件、上模、背压板、下模组成,其中工件粒子数为 40 000;上模、下模和背压板均为边界部分,边界粒子数为 19 404。工件材质为 AZ31 镁合金,设为塑性材

料;边界部分设为刚性材料。

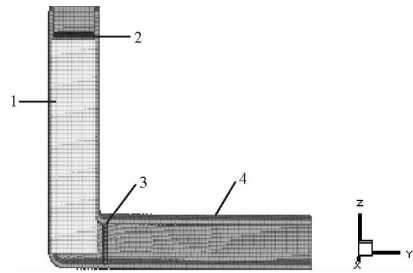


图 1 背压-等通道挤压模具简图

Fig.1 Schematic diagram of back pressure-equal channel extrusion die

1.工件 2.上模 3.背压板 4.下模

采用自主编写的 SPH 法三维程序,通过对 AZ31 镁合金在挤压速度为 600 mm/min,挤压温度为 200 ℃,背压为 50 MPa 时进行 BP-ECAP 过程的数值模拟,从等效塑性应变、损伤值角度分析了相同温度和挤压速度下,背压值大小对镁合金变形特性的影响,以优化背压-等通道挤压工艺。表 1 为 HS 本构模型参数。

表 1 AZ31 镁合金 HS 本构模型参数^[12]

Tab.1 HS constitutive model parameters of AZ31 magnesium alloy^[12]

密度/(kg·m ⁻³)	泊松比 ν	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	弹性模量/GPa
1 780	0.35	1 050	44.8

2.1 SPH 法与有限元法及试验结果对比分析

图 2 为 200 ℃下应变速率为 600 mm/min、背压为

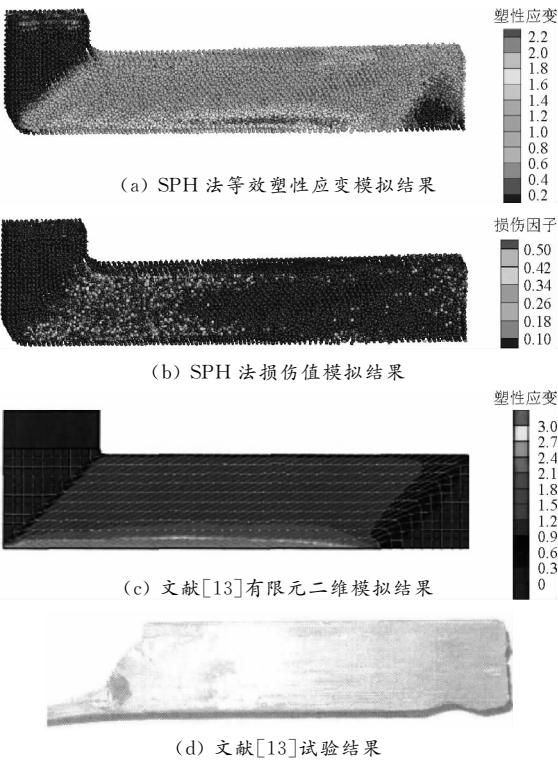


图 2 SPH 法模拟结果与文献中有限元模拟结果及试验结果对比

Fig.2 Comparison of SPH simulation results with finite element simulation results and experimental results in the literature

50 MPa 时模拟结果。可以看出,施加 50 MPa 的背压力可抑制 AZ31 镁合金 ECAP 过程中裂纹的形成和扩展。另外发现,采用 SPH 法模拟结果与有限元法模拟结果中挤压试样表面等效塑性应变分布一致,主要塑性变形区域大体呈平行四边形分布,在挤压试样底部均出现应变集中区域,只是 SPH 法在头部小变形区域面积比文献中有限元方法小,这可能是由于粒子法与网格法之间的差异造成的;从图 2a、图 2c 和图 2d 可以看出,SPH 法模拟结果与文献结果一致,验证了自主编写的 SPH 方法背压程序的正确性。

2.2 不同背压值模拟结果分析

基于 SPH 方法程序对温度为 100 ℃,挤压速度为 600 mm/min 时 AZ31 镁合金的背压-等通道挤压过程进行模拟。图 3 和图 4 为不同背压值下 AZ31 镁合金等效塑性应变及损伤值模拟结果。由图 3 可以看出,背压力为 25 MPa 时等通道挤压件裂纹明显,并且裂纹附近等效塑性应变较大,说明金属试样在上表面靠近内角处产生了应变集中,并且应变集中处变形累积的能量超过了镁合金试样所能承受的极限;可以发现,背压力为 50 MPa 时,镁合金开始萌生裂纹的区域相对背压值为 25 MPa 时距离试样头部较远,说明通过增加背压的大

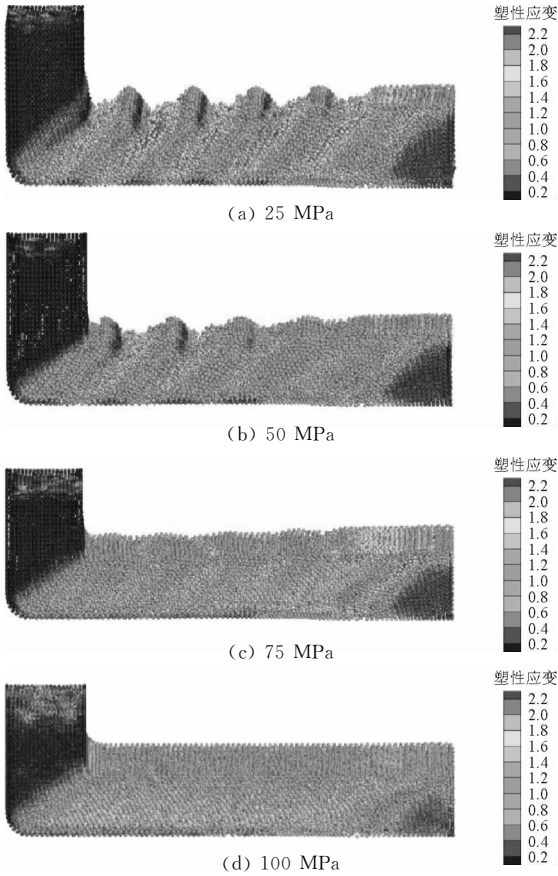


图 3 不同背压值 SPH 法等效塑性应变模拟结果

Fig.3 SPH equivalent plastic strain simulation results with different back pressure values

小可以推迟裂纹的产生时间;背压力为 75 MPa 时,试样基本无裂纹产生,头部出现应变集中区域,有产生裂纹的趋势;背压力为 100 MPa 时,试样塑性应变整体均匀,呈平行四边形分布。此外,可以发现随着背压值的增加,挤压试样头部小变形区域有减小的趋势。

图 4 为不同背压值下 SPH 法损伤值模拟结果。可以看出,背压力为 25 MPa 时,试样断裂明显,出现 5 个较深的裂纹,断口处达到损伤阈值的粒子较集中;背压力为 50 MPa 时,试样出现 4 个不同程度深浅的裂纹,其中试样头部和尾部裂纹较浅,中间裂纹较深;背压力为 75 MPa 时,试样基本无裂纹,上表面部分粒子达到损伤阈值,有产生裂纹的趋势,但损伤远低于背压力为 25 MPa 时;背压力为 100 MPa 时,挤压试样表面无裂纹产生。从损伤值的大小来看,随着背压值的增大,金属试样表面损伤值逐渐降低,导致裂纹深度逐渐变浅直至消失,裂口数目明显减少,背压力为 100 MPa 时,挤压试样表面无裂纹产生。

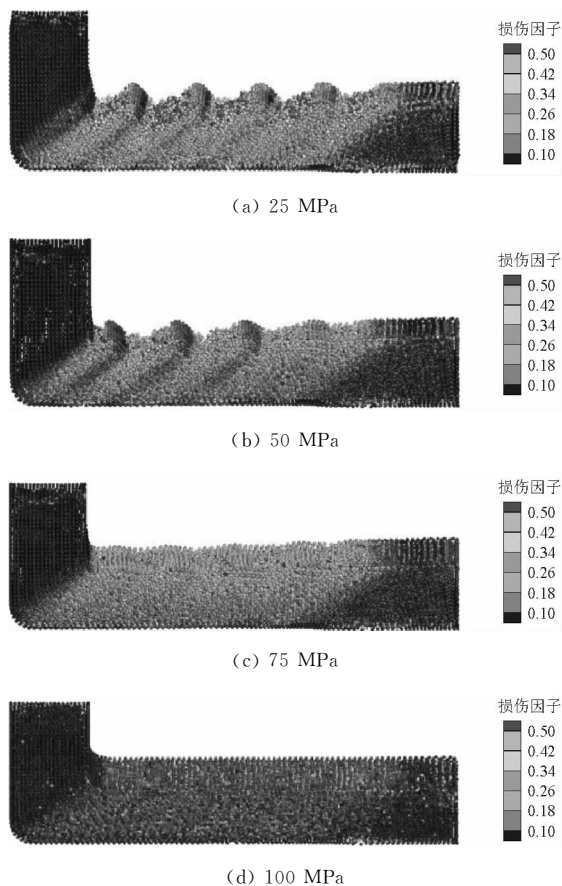


图 4 不同背压值 SPH 法损伤值模拟结果
Fig.4 SPH damage value simulation results with different back pressure values

3 结 论

采用自主编写的 SPH 法程序,对 AZ31 镁合金的

BP-ECAP 过程进行三维数值模拟,模拟结果与试验结果一致,验证了编写的 SPH 法背压程序的正确性,为背压-等通道挤压过程提供了一种新的基于 SPH 法的数值模拟方法。在温度为 100 ℃,挤压速度为 600 mm/min 时,施加背压力分别为 25、50、75、100 MPa 时,AZ31 镁合金的背压-等通道挤压过程进行模拟,并从等效塑性应变及损伤值分布角度进行分析。当背压力为 100 MPa 时,试样变形均匀且无裂纹产生,模拟结果表明,选择合适的背压能有效地阻止镁合金变形过程中裂纹的萌生及扩展。

参 考 文 献

- [1] LAPOVOK R. The positive role of back-pressure in equal channel angular extrusion[J]. Journal of Materials Science, 2006, 40(2): 341-346.
- [2] 薄延强,王晨晨,王涵,等.基于 SPH 法纯镁包套等通道挤压三维数值模拟[J].特种铸造及有色合金,2019,39(11):1 198-1 201.
- [3] KOCICH R, MACHČKOV A, ANDREYACHSHENKO V. A study of plastic deformation behaviour of Ti alloy during equal channel angular pressing with partial back pressure[J]. Computational Materials Science, 2015, 101(2): 233-241.
- [4] ISLAM M R I, PENG C. A total lagrangian SPH method for modelling damage and failure in solids[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 59(3): 157-158.
- [5] 王晨晨.基于光滑粒子动力学法的镁及镁合金 ECAP 过程 3D 数值模拟研究[D].太原:太原理工大学,2019.
- [6] 强洪夫.光滑粒子流体动力学新方法及应用[M].北京:科学出版社,2017.
- [7] 王凯.主应力的计算公式[J].力学与实践,2014,36(6):783-785.
- [8] 王涵.基于光滑粒子流体动力学方法的镁及镁合金 ECAP 过程数值模拟研究[D].太原:太原理工大学,2017.
- [9] KHAN S M A, KHRAISHEH M K. Analysis of mixed mode crack initiation angles under various loading conditions[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2000, 67(5): 397-419.
- [10] 韩亚伟,强洪夫,赵玖玲,等.光滑粒子流体动力学方法固壁处理的一种新型排斥力模型[J].物理学报,2013(4): 334-344.
- [11] MONAGHAN J J. SPH compressible turbulence[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2002, 335(3): 843-852.
- [12] 薛翠鹤.AZ31 镁合金板材温态高速率本构关系研究[D].武汉:武汉理工大学,2010.
- [13] 康锋.背压对镁合金等径角变形的作用[D].南京:南京理工大学,2010.

(编辑:刘晨辉)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com