

AZ91D 镁合金棒材挤压过程的数值模拟研究

陈永哲, 柴跃生, 孙钢, 陈睿, 周俊琪, 张敏刚

(太原科技大学 材料科学与工程学院, 山西省镁及镁合金工程技术研究中心, 太原 030024)

摘要: 通过 Gleeble-1500D 热模拟机获得 AZ91D 镁合金的应力应变曲线。采用刚塑性有限元法对 AZ91D 镁合金棒材挤压过程进行热力耦合数值模拟, 分析了变形温度与挤出速度对挤压力和等效应变变化情况的影响。模拟的结果表明: 在 25 : 1 的挤压比下 AZ91D 镁合金的挤压温度为 400 ℃, 挤出速度为 12.5 mm/s。

关键词: 镁合金; 挤压; 数值模拟

中图分类号: TG379 **文献标识码:** A

文章编号: 1674-6457(2011)03-0010-05

Numerical Simulation Study of the Extrusion Process of AZ91D Magnesium Alloy Bar

CHEN Yong-zhe, CHAI Yue-sheng, SUN Gang, CHEN Rui, ZHOU Jun-qi, ZHANG Min-gang

(Shanxi Provincial Engineering and Technology Research Center on Mg and Mg Alloy,

School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The stress-strain curves of AZ91D magnesium alloy were gained through Gleeble-1500D simulator. The rigid plastic finite element method was used for the couple thermal-mechanical numerical simulation of the rods and bars extrusion process of AZ91D alloy. The effects of deformation temperature and extrusion velocity on the deformation force and strain-effective were discussed. The simulation results show that the extrusion temperature is 400 ℃ and the extrusion speed is 12.5 mm/s under the extrusion ratio 25 : 1 of AZ91D magnesium alloy.

Key words: magnesium alloy; extrusion; numerical simulation

镁及镁合金具有密度小(钢的 1/4, 铝的 2/3)、比强度高、尺寸稳定性好及电磁屏蔽性良好等一系列特性, 被人们誉为“21 世纪最具发展潜力和前途的绿色工程材料”^[1-2]。它以优异的力学性能和物理性能被广泛地应用于航空航天、汽车、电子工业等领域^[3]。镁为六方结构, 滑移系少, 室温时很难发生塑性变形, 因此研究镁及其合金的塑性成形性能显得尤为重要。

有限元分析方法是目前比较实用的工程问题分析方法之一, 利用有限元分析方法对金属的挤压变

形过程进行数值模拟分析, 可大大降低研制周期和研制成本^[3-8]。文中利用 DEFORM 有限元软件对 AZ91D 镁合金进行数值模拟研究以获得最佳的变形温度和速度。为模具设计、变形温度、变形速度和挤压设备的选择提供科学依据。

1 热压缩实验及分析

实验材料成分见表 1, 采用铸造方式获得铸锭, 在 400 ℃ 下对铸锭保温 12 h 进行均匀化处理。沿

收稿日期: 2010-12-10

基金项目: 山西省科技攻关计划项目(20090322007); 山西省科技厅国际合作项目(20091050)

作者简介: 陈永哲(1984—), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要研究方向为镁及镁合金材料。

通讯作者: 张敏刚, 教授, 博导。

铸锭轴向将试样加工成 $\phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 圆柱。热压缩实验在 Gleeble-1500 热模拟机上进行。变形温度为 $200 \sim 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 应变速率为 $0.001 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 。试样

加热速度为 $5 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 。压缩前试样在变形温度下保温 3 min 。变形后立即水淬, 以保留热变形组织。

表 1 AZ91D 镁合金的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of AZ91D magnesium alloy

Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni	Be	Mg
8.85	0.626	0.278	0.033	0.008 6	0.002 5	<0.000 5	0.001 8	余量

AZ91D 镁合金在不同温度 and 不同应变速率压缩变形时的真应力-应变曲线如图 1 和图 2 所示。

2 模拟参数

2.1 应力应变曲线

DEFORM-3D 提供的应力-应变曲线输入方式主要有 2 种: 一种是以经验或半经验公式输入; 另一种是根据流变应力与应变、应变速率、温度的函数关系, 输入不同温度, 不同应变速率, 不同应变下的流变应力值, 有限元软件根据所输入的数据自动插值计算^[8]。文中采用后一种方法。

2.2 棒材挤压模拟参数

1) 材料定义。材料为 AZ91D, 挤压成形过程中单位挤压力很大, 材料发生剧烈流动, 变形过程中弹性变形很小, 可以忽略不计, 因而适合于用刚塑性模型进行模拟分析。

2) 网格划分及再划分。有限元分析的精度和效率与单元密度和单元几何形态之间存在密切关系, 因此对于实际的挤压过程进行有限元模拟时, 必须合理划分网格。对于模拟坯料, 初始单元数目为 16 285, 节点数目为 3 792, 网格是边长约为 2 mm 的四面体单元。由于工件往往变形较大, 导致局部网格畸变过大, 计算无法进行, 必须对初始网格重新划分。再划分边长为 2 mm 。

3) 初始条件。为了研究变形温度和变形速度对挤压成形过程的影响规律, 选取 $300, 350, 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 这 3 个温度值, 挤出速度为 $2, 12.5, 20 \text{ mm/s}$ 进行模拟。为了防止挤压件与模具之间的温差而产生裂纹, 必须对模具预热, 模具温度应低于坯料温度 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。挤压比为 $25:1$ 。

2.3 模型简化

因为预成形的棒材为轴对称件, 取其 $1/4$ 进行

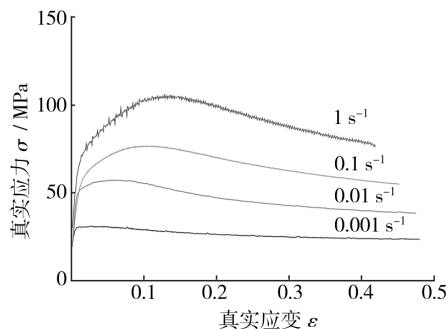


图 1 AZ91D 镁合金在在变形温度为 $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 不同应变速率时的应力-应变曲线

Fig. 1 True stress-true strain curves at $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ under various strain rates of AZ91D alloy

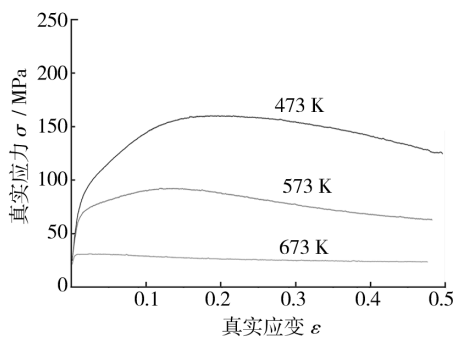


图 2 AZ91D 镁合金在应变速率为 0.001 s^{-1} 不同变形温度时的应力-应变曲线

Fig. 2 True stress-true strain curves at 0.001 s^{-1} under different temperatures of AZ91D alloy

可以看出: 当应变速率一定时, AZ91D 镁合金在高温变形时的流变应力随变形温度的升高而缓慢降低; 温度为 $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, AZ91D 镁合金的流变应力随着应变速率的升高而增大, 并且大多数应力-应变曲线均出现峰值, 因此镁合金的热变形是动态再结晶型。

分析。模拟时的初始位置如图 3a 所示,挤压过程示意如图 3b 所示。

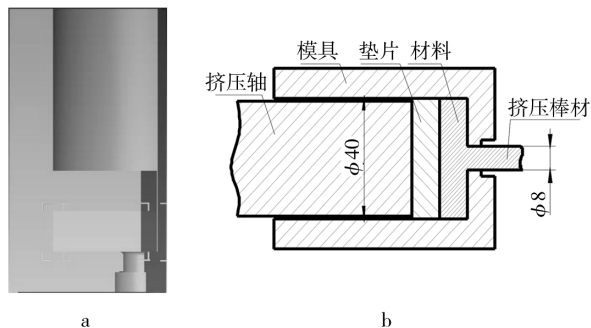


图 3 棒材挤压模型

Fig. 3 Bar extrusion model

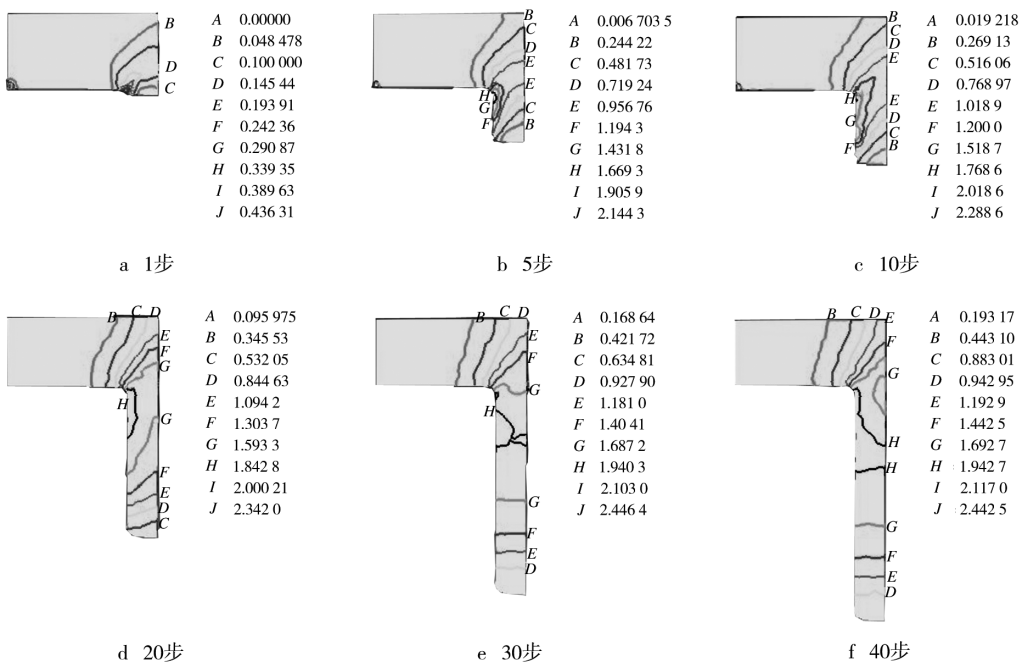


图 4 坯料在 400 ℃, 挤出速度为 12.5 mm/s 时不同挤压阶段的等效应变

Fig. 4 The equivalent strain at the extrusion speed 12.5 mm/s and the deformation temperature 400 ℃ under different steps

受到限制,开始沿着凹模向中间流动,内部金属继续沿正向流动。当金属充满型腔并流出一段时,应变值达到最大,如图 4b 所示。接下来,变形逐渐处于平稳阶段,如图 4c 所示,金属流动逐步均匀化。从图 4 中还可以看出在模口局部上,应变的多数等效线向模口处汇集。模口处的应变复杂,应变的最高值也在附近,坯料变形不均匀。到挤压的最后阶段,变形区内的金属由周围向着挤压轴线方向发生剧烈的横向流动,同时,挤压筒内金属体积减少,变形抗力增加。

3 模拟结果与分析

3.1 挤压过程的分析

坯料在 400 ℃下,挤出速度为 12.5 mm/s 时不同挤压阶段的等效应变分布情况如图 4 所示。可以看出,开始挤压时坯料先墩粗,逐渐充满凹模型腔。等效应变线从模口附近向四周分散,分布清晰、有规则,如图 2a 所示,说明最大等效应变发生在模口处,金属的流动从模口逐步向边角扩散。随着挤压的进行,等效应变的最大值迅速增大到 21.443,而后等效应变值变化微小,这说明凹模内金属的正向流动

从模拟过程中得到的凸模行程-挤压力曲线如图 5 所示。可以看出,挤压初期,坯料在模具内墩粗变形,变形力迅速增大。挤压力达到最大值,即 285 kN。随着凸模行程的增加,挤压力缓慢下降。这是因为当金属充满整个型腔时,金属的流动性改变,导致变形区体积减小,坯料与挤压筒接触面积变小,摩擦力减小,挤压力减小^[9]。另外,从应力-应变曲线可知镁合金热变形是动态再结晶型,因此当金属材料变形到一定程度时,变形区金属材料发生动态再结晶使得金属晶粒细化,塑性提高,从而降低挤压力。

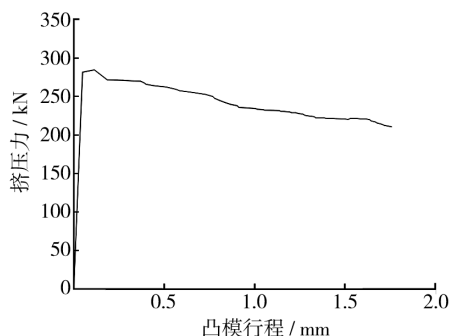


图5 坯料在挤出速度为 12.5 mm/s,变形温度为 400 °C 下的凸模行程-挤压力曲线

Fig. 5 The force-stroke curve at the extrusion speed 12.5 mm/s and the deformation temperature 400 °C

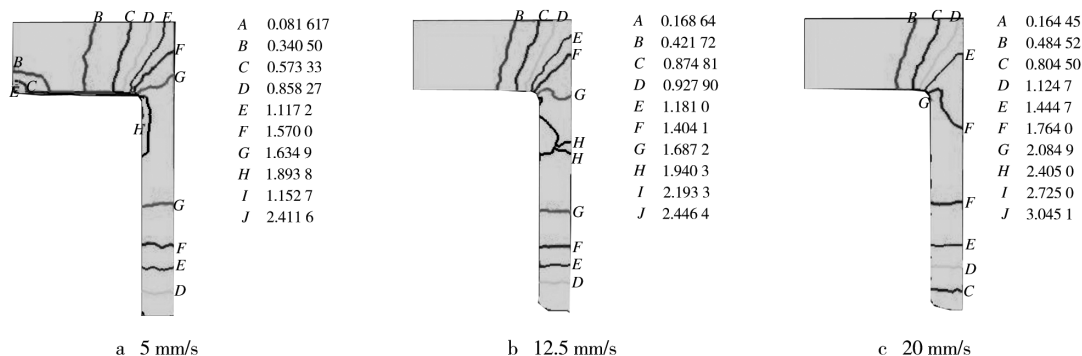


图6 坯料在 400 °C,不同挤出速度下的等效应变分布

Fig. 6 The equivalent strain at the deformation temperature 400 °C under various extrusion speeds

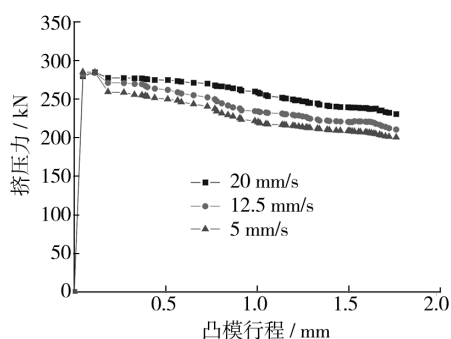


图7 坯料在变形温度为 400 °C 时不同挤出速度下的凸模行程-挤压力曲线

Fig. 7 The force-stroke curves at the deformation temperature 400 °C under various extrusion speeds

晶的存在使得凸模所受的挤压力慢慢降低。在相同的挤压温度下,当挤出速度增大时,材料的加工硬化现象加剧,凸模所受的挤压力变大。如果挤出速度过大,热效应使模具表面的温升加大,从而模具的强

3.2 速度对挤压过程的影响

坯料在 400 °C,不同挤出速度下的等效应变分布情况如图 6 所示。可以看出,当变形温度为 400 °C,挤出速度为 5,12.5,20 mm/s 时最大等效应变分别是 2.411 6,2.446 4 和 3.046 1,最小等效应变变化不大。随着变形速度的增大,最大等效应变变大,等效应变差值相应减小。这说明当挤出速度增大时,金属变形的不均匀程度会增大。

从模拟过程中得到不同挤出速度下的凸模行程-挤压力曲线如图 7 所示。可以看出当坯料开始挤压时凸模所受的挤压力迅速增大到最大值 285 kN,随着挤压的进行,由于变形热效应和动态再结

度和抗疲劳性能下降。综合考虑以上因素,选取 12.5 mm/s 为最佳挤出速度。

3.3 温度对挤压过程的影响

坯料的挤出速度为 12.5 mm/s,不同挤压温度下的等效应变分布情况如图 8 所示。可以看出,随着变形温度的升高,最小等效应变增大,最大等效应变减小,等效应变的差值相应减小,等效应变的分布也趋于均匀化。这说明金属的挤压温度增大时,材料变形均匀,总变形力相应减小。

从模拟过程中得到不同变形温度下的凸模行程-挤压力曲线如图 9 所示。可以看出,当坯料开始挤压时凸模所受的挤压力迅速增大到最大值,最大挤压力分别为 377,339,285 kN。随着挤压的进行,凸模所受的挤压力慢慢降低。在同等条件下挤压温度越低,材料的变形抗力越大,凸模所受的挤压力也就越大。因此在热加工过程中,挤压温度的选择至关重要。温度

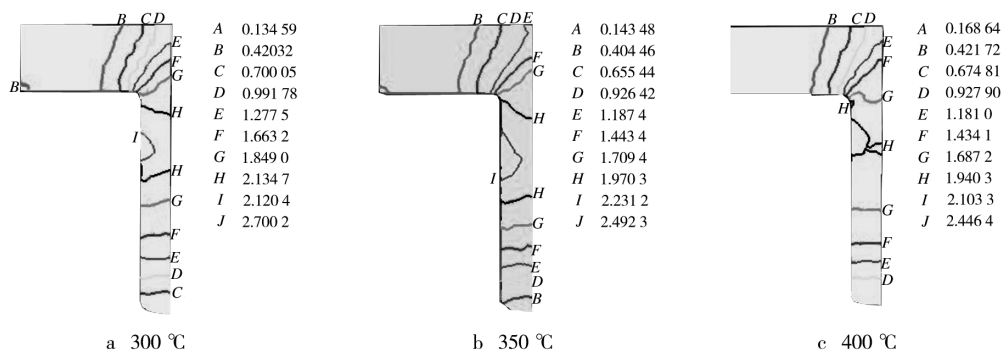


图8 坯料在挤出速度为12.5 mm/s,不同挤压温度下的等效应变分布

Fig. 8 The equivalent strain at the extrusion speed 12.5 mm/s under various deformation temperatures

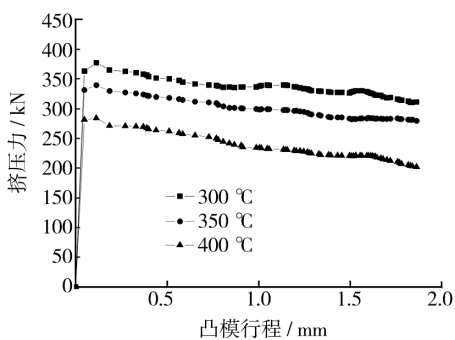


图9 坯料在挤出速度12.5 mm/s,不同变形温度下的凸模行程-挤压力曲线

Fig. 9 The force-stroke curves at the extrusion speeds 12.5 mm/s under various deformation temperatures

过低,坯料的变形抗力大,使模具寿命降低;温度过高,坯料表层氧化加剧,成形后工件表面质量下降^[10]。挤压时凸模温度升高,也会引起凸模寿命的降低。在制定挤压温度时应综合考虑挤压力和模具寿命2方面的因素,拟选取400 °C为最佳变形温度。

4 结语

1) AZ91D镁合金在高温变形时的流变应力取决于变形温度和变形速率。应变速率一定时,随变形温度的升高而降低;温度一定时,流变应力随着应变速率的升高而增大。

2) 挤压变形过程中挤压力在坯料未充满凹模型腔时逐渐增大,当坯料流出凹模一段时挤压力达到峰值,在此后的稳态阶段,挤压力缓慢减小。

3) 在AZ91D镁合金棒材的挤压过程中,当挤压温度不变时,挤压力随着变形速度的增大而增大;当

挤出速度不变时,最大挤压力随着变形温度的升高明显减小,其等效应变的分布也趋于均匀化。因此拟采用适中的挤出速度12.5 mm/s和变形温度400 °C。

参考文献:

- [1] 柴跃生,孙钢,梁爱生. 镁及镁合金生产知识问答[M]. 北京:冶金工业出版社,2005:24—36.
- [2] 陈振华,夏伟军,严红革,等. 变形镁合金[M]. 北京:化学工业出版社,2005:3—6.
- [3] 吉泽升. 日本镁合金研究进展及新技术[J]. 中国有色金属学报,2004,14(12):1977—1984.
- [4] DUAN Xin-jian, SHEPPARD Terry. Simulation and Control of Microstructure Evolution During Hot Extrusion of Hard Aluminum Alloys[J]. Materials Science and Engineering,2003,A351(1—2):282—292.
- [5] 罗永新,胡文俊,李落星. AZ31 镁合金挤压模拟与实验研究[J]. 热加工工艺,2007,36(1):69—73.
- [6] 李庆波,周海涛,刘志超,等. AZ80 镁合金变形特性及管材挤压数值模拟研究[J]. 热加工工艺,2010,39(5):31—34.
- [7] 夏巨谟,程俊伟. AZ31 镁合金管材挤压过程的数值模拟[J]. 锻压技术,2005,30(2):49—52.
- [8] LI Yong-bing, CHEN Yun-bo, CUI Hua, et al. Hot Deformation Behavior of a Spray-deposited AZ31 Magnesium Alloy[J]. Rare Metals,2009,28(1):91—96.
- [9] ZHOU J, LI L, DUSZCZYK J. Computer Simulated and Experimentally Verified Isothermal Extrusion of 7075 Aluminum Through Continuous Ram Speed Variation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004,146(2):203—212.
- [10] 杨忠旺,陈振华,夏伟军,等. AZ91 镁合金型材挤压工艺研究[J]. 矿冶工程,2008,28(3):99—101.