

工艺参数对 AZ31 镁合金往复挤压过程的影响

Influences of Processing Parameters on Reciprocating Extrusion Process of AZ31 Magnesium Alloy

刘 君¹, 郭学锋², 张忠明¹, 叶永南¹

(1 西安理工大学 材料科学与工程学院, 西安 710048;

2 河南理工大学 材料科学与工程学院, 河南 焦作 454000)

LIU Jun¹, GUO Xue-feng², ZHANG Zhong-ming¹, YE Yong-nan¹

(1 School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048, China; 2 School of Materials Science and Engineering,

Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China)

摘要: 运用刚黏塑性有限元法对不同工艺参数下的 AZ31 镁合金往复挤压过程进行了热力耦合数值模拟, 研究了不同初始坯料温度、挤压速率和摩擦因数对往复挤压过程中等效应变、等效应力及温度场的影响。结果表明: 在往复挤压过程中, 挤压速率对等效应变峰值影响不大, 随着挤压速率的增大, 工件内温度峰值直线上升, 温度分布不均匀程度增大, 应力峰值先增加后减小; 随着初始坯料温度升高, 等效应力峰值呈直线趋势减小; 摩擦因数对温度峰值的影响很小, 随着摩擦因数的增大, 等效应变峰值先增大然后趋于平稳, 等效应力峰值增大, 其增大幅度减小。

关键词: 往复挤压; 工艺参数; AZ31 镁合金; 数值模拟

中图分类号: TG376 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2012)05-0070-06

Abstract: The rigid visco-plastic finite element method was used for the study on the coupling thermal-mechanical numerical simulation of reciprocating extrusion process of AZ31 magnesium alloy. The influence of initial temperature of blank, extrusion velocity and friction factor on the equivalent strain, equivalent stress and temperature field of reciprocating extrusion process was investigated. The results show that the extrusion velocity has little effect on the peak value of equivalent strain, with the increasing of the extrusion velocity, the peak value of temperature within the workpiece ascends linearly, the temperature distribution becomes more inhomogeneous, while the peak value of stress first increases and then decreases. With the increasing of initial blank temperature, the peak value of equivalent stress decreases linearly; and the friction factor has little effect on the peak value of temperature; with the increasing of friction factor, the peak value of equivalent strain first increases and then remains stable, and the peak value of equivalent stress increases with decreasing amplitude.

Key words: reciprocating extrusion; processing parameter; AZ31 magnesium alloy; numerical simulation

镁合金密度小、比强度高, 具有优良的导电性、导热性、磁屏蔽性、减振性, 在航空、航天、电子信息产品及汽车工业等领域具有极其重要的应用价值和广泛的应用前景。但由于镁合金的层错能低, 独立滑移系少, 其塑性变形能力和协调能力较差, 在一定程度上限制了镁合金的应用, 因而迫切需要对制备集优异的强度与良好的塑韧性于一体的镁合金材料的方法展开深入研究, 促进镁合金更为广泛的应用。研究表明^[1-5], 通过往复挤压可细化晶粒, 显著提高镁合金的强度和塑

性变形能力。往复挤压作为一种大塑性变形工艺, 具有强烈的晶粒细化能力, 通过将材料进行一次或多次累积反复的塑性变形, 使其获得相当大的累积应变, 可有效细化晶粒、第二相杂质, 并使它们重新均匀分布在基体中, 从而提高材料的强度和塑性。往复挤压工艺在影响镁合金变形过程宏观场变量的同时, 进而对其组织演变和力学性能产生影响, 如何合理优化往复挤压工艺是实现晶粒细化, 获得良好组织性能的关键问题之一。为此本工作针对不同工艺参数下的 AZ31 镁

合金往复挤压变形过程进行了刚黏塑性有限元热力耦合数值模拟,研究了初始坯料温度、挤压速率和摩擦因数对往复挤压过程中工件内等效应变、等效应力、温度场的影响,为优化往复挤压工艺参数和探索镁合金往复挤压的变形机制与组织演变提供理论依据。

1 往复挤压的工作原理

往复挤压集挤压和压缩于一体,其基本原理如图 1 所示。由两个挤压筒、凹模和放置于挤压筒内的冲头组成,其中凹模型腔形成了两端圆锥形紧缩区 A 区和中间细颈区 B 区,两个挤压筒截面积相等,在同一条轴线上,通过中间的凹模连接。挤压过程中,试样在一冲头作用下到达紧缩区,发生正挤压变形,经过 B 区流出的试样在另一冲头反向作用下发生镦粗变形,金属充满凹模圆锥形紧缩区后两冲头以相同速率同时移动。然后,另一边冲头将试样按上述过程反向压回,完成一个往复挤压过程,如此循环,直到获得需要的变形量为止。往复挤压过程中,推动坯料流经凹模的冲头称为主动冲头,另一冲头则称为从动冲头,在整个往复挤压过程中主动冲头和从动冲头相互交替。坯料经过往复多次的挤压和压缩,使其获得很大的累积应变,从而达到细化材料组织的目的,其累积应变量可按式(1)计算^[6]。

$$\varphi = 2n\ln \frac{d_0^2}{d_m^2} = 4n\ln \frac{d_0}{d_m} \tag{1}$$

式中: n 为往复挤压循环次数; d_0 为挤压筒直径; d_m 为凹模细颈区直径。

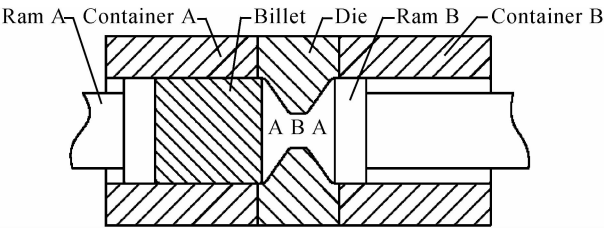


图 1 往复挤压原理示意图

Fig. 1 The schematic diagram of reciprocating extrusion

2 往复挤压过程数值模拟与可靠性验证

2.1 有限元模型与模拟条件

对于往复挤压过程,由于几何结构、载荷的对称性,为了节约计算时间,提高精度和效率,取结构的1/2建立有限元计算模型如图 2 所示。往复挤压坯料直径为 50mm,长度为 50mm,坯料作为变形体,采用四节点四边形等参单元对其进行离散化,单元数为 220。

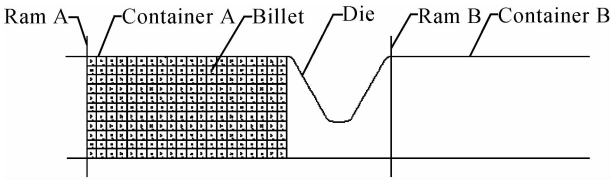


图 2 往复挤压几何模型

Fig. 2 Geometry model of reciprocating extrusion

坯料为 AZ31 镁合金,其本构关系如式(2)所示^[7]:

$$\sigma = 13703.89\epsilon^{0.0997}\dot{\epsilon}^{0.1761}\exp(-0.0077T - 0.6909\epsilon) \tag{2}$$

式中: σ 为应力; ϵ 为应变; $\dot{\epsilon}$ 为应变速率; T 为绝对温度。模拟时坯料的有关热物理参数如下^[8-11]:比热容 $c = 0.2441 + 0.000105T - 2783T^{-2}$ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$);密度 $\rho = 1.77 \times 10^3 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;导热系数 $\lambda = 96 \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;对流换热系数 $k = 2.95 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$;接触面换热系数 $h = 7.5 \times 10^3 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

模拟过程中忽略了冲头、凹模和挤压筒的变形,作为刚性接触体,采用反正切摩擦模型来描述坯料与挤压筒、凹模接触边界上的摩擦。

基于上述模型选取三组不同的工艺参数对 AZ31 镁合金往复挤压过程进行了热力耦合有限元模拟,其模拟条件和具体方案如表 1 所示,模拟过程中模具温度低于相应初始坯料温度 20℃。

表 1 模拟条件与方案

Table 1 Simulation conditions and projects

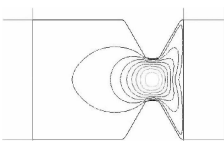
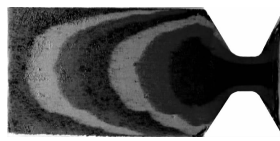
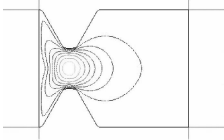
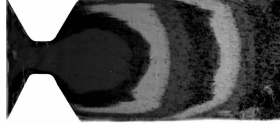
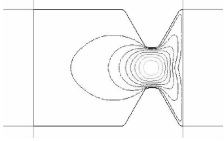

Temperature of blank /℃	Extrusion velocity /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Friction factor
250,300,350,400,420	1	0.2
350	0.5,1,2,4,6	0.2
350	1	0.1,0.2,0.3,0.4,0.5

2.2 模拟可靠性验证

物理模拟实验是一种以相似理论为基础与实验密切结合的实验科学。为了验证有限元模拟的正确性与可靠性,进行了物理模拟实验,采用彩色陶土塑泥作为模拟材料,将三种不同颜色的塑泥分层制坯后放入自制的模具中进行多道次往复挤压,挤压完成后,取出冲头,用细丝沿着成形件的轴线方向进行剖分,观察塑泥在不同区域的变形情况。将物理模拟实验获得的直观实验结果与有限元模拟结果进行对比如表 2 所示。表 2 中分别为物理模拟实验下的塑泥流动状态情况和通过有限元模拟获得的往复挤压过程中金属流动速度场分布。通过对二者的比较,可以看出材料的流动变化是一致的,即中心轴部位的金属材料的变形速度大,靠

近凹模和挤压筒内壁的金属变形速度较慢,由内向外呈圆弧层状分布。物理模拟实验结果与有限元模拟结果的良好吻合,验证了所建立的有限元模型的正确性以及往复挤压过程模拟所得结果的正确性与可靠性。

表 2 有限元模拟与物理模拟结果的对比
Table 2 Result comparison of FEM simulation and physical modeling

Pass of extrusion	Result of FEM simulation	Result of physical modeling
1		
2		
3		

3 往复挤压过程的场变量分析

图 3 所示为初始坯料温度为 350℃、模具温度为 330℃、挤压速率为 1mm/s、摩擦因数为 0.2 的工艺条件下第 2 道次变形 80% 时的场变量分布图。可以看出速度场分布以凹模细颈区 B 区中心速度最大,到凹模 B 区内壁呈层状递减,贴近挤压筒和凹模内壁处金属流动速度很小,在从动冲头一侧的挤压筒与 A 区交接处存在一流动“死区”,数值上其数量级为 10^{-4} ,该处金属几乎处于静止状态。温度场分布大致以 B 区中心为圆心,从高到低呈圆形向外扩散,在工件内形成温度梯度,高温区主要分布在 B 区中心区域。由于此区域金属变形比较剧烈,变形热效应温升作用显著,而且冲头和挤压筒对坯料冷却温降作用小,致使该区域温度较高。大变形区主要集中在 B 区靠近凹模内壁处和从动冲头一侧 A 区中靠近圆锥形紧缩区内壁的区域。由于坯料受到主动冲头作用经过 B 区流出后,受到从动冲头反向作用而发生横向流动,同时由于坯料与凹模内壁摩擦力的作用,使得该区域的变形较大。在靠近主动冲头一侧的 A 区与 B 区交接区域的应力较大。

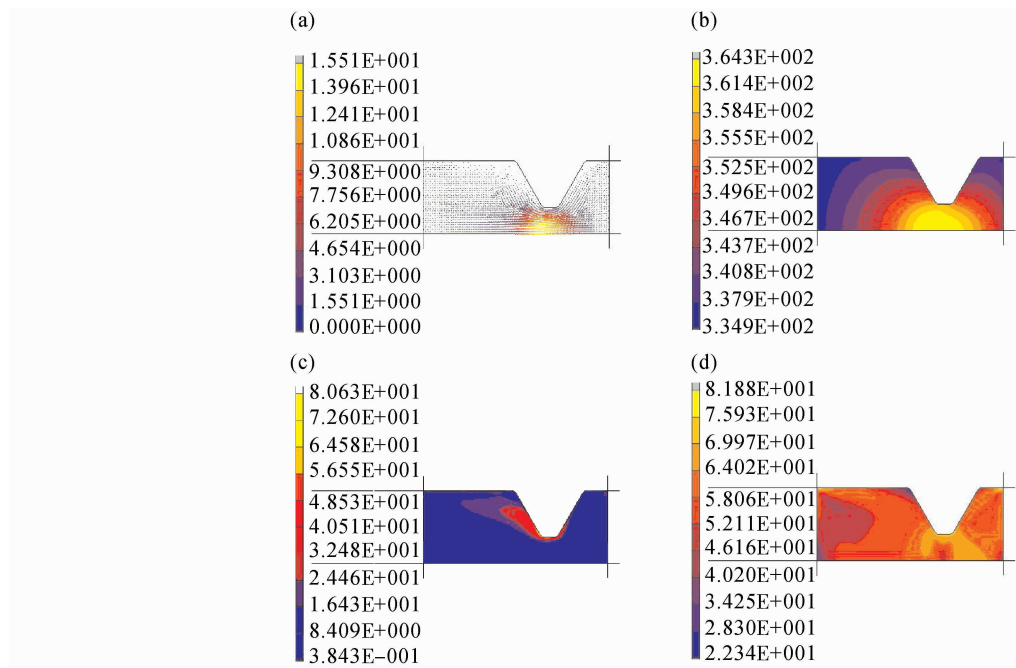


图 3 第 2 道次变形 80% 时的场变量分布

(a)速度场;(b)温度场;(c)等效应变场;(d)等效应力场

Fig. 3 Distribution of field variable at 80% deformation in the second pass

(a) velocity field; (b) temperature field; (c) equivalent strain field; (d) equivalent stress field

4 工艺参数对往复挤压过程的影响

采用表 1 所示模拟方案,针对 AZ31 镁合金在不

同工艺参数条件下的往复挤压过程进行了有限元热力耦合数值模拟,研究表明^[12],挤压速率、初始坯料温度对往复挤压过程中等效应变速率场、等效应变场分布

的影响很小;在不同摩擦条件下,等效应变速率场、等效应变场、等效应力场以及温度场的分布规律大体一致;但不同工艺参数均会影响到各场变量的大小,从而对往复挤压过程产生影响。

4.1 挤压速率的影响

图 4 所示为初始坯料温度为 350℃、摩擦因数为 0.2、不同挤压速率对各道次往复挤压变形 80% 等效应变速率、等效应变峰值的影响。从图 4 可以看出,在

各道次中,随着挤压速率的增大,等效应变速率峰值近似于呈直线增加,但等效应变峰值的变化很小。因而在往复挤压过程中,不应通过提高各道次的挤压速率来获得大的应变,而应重点考虑通过适当增加往复挤压次数,获得较大的累积应变量。

不同挤压速率对往复挤压过程温度场分布及大小均有一定的影响如图 5 所示。随着挤压速率的增大,温度分布越不均匀,位于细颈区 B 区的高温区向从动

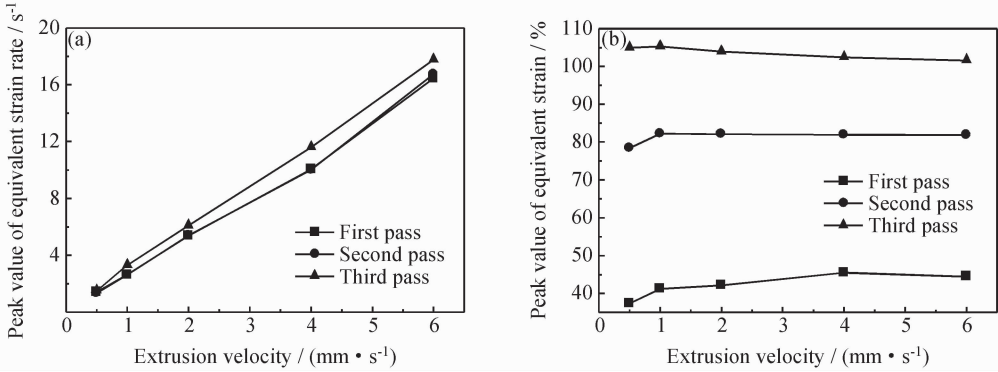


图 4 挤压速率对等效应变速率峰值(a)和等效应变峰值(b)的影响
Fig. 4 Influence of extrusion velocity on the peak value of equivalent strain rate (a) and strain (b)

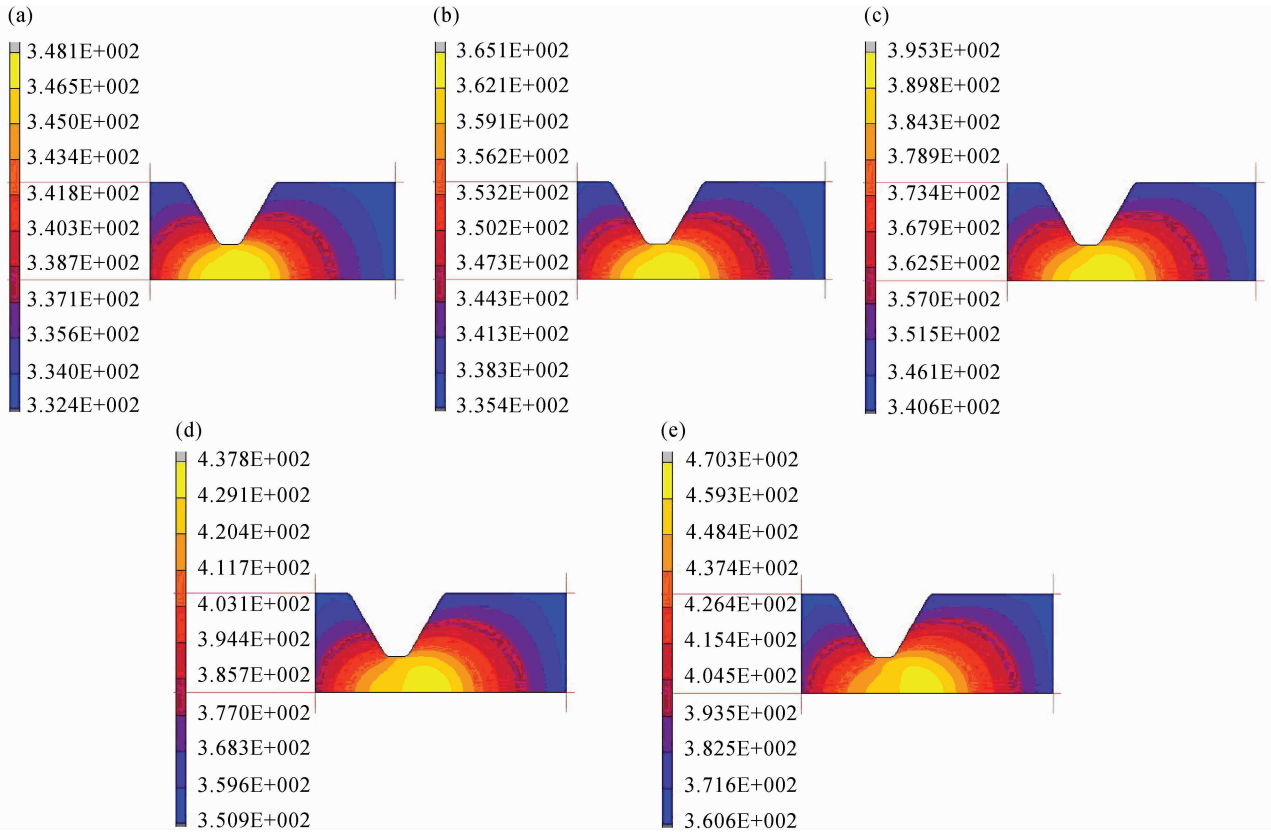


图 5 不同挤压速率下第 3 道次变形 80% 时的温度分布
(a) 挤压速率 0.5 mm/s; (b) 挤压速率 1 mm/s; (c) 挤压速率 2 mm/s; (d) 挤压速率 4 mm/s; (e) 挤压速率 6 mm/s
Fig. 5 Distribution of temperature at 80% deformation in third pass under different extrusion velocity
(a) 0.5 mm/s of extrusion velocity; (b) 1 mm/s of extrusion velocity; (c) 2 mm/s of extrusion velocity; (d) 4 mm/s of extrusion velocity; (e) 6 mm/s of extrusion velocity

冲头方向偏移,且挤压速率越高,偏移程度越大。其原因主要是由于挤压速率增大,与挤压筒相接触的低温区因受模具冷却作用较小,且材料与挤压筒的摩擦引起热效应致使低温区最小温度变化很小;但随着挤压速率的增大,高温区材料变形剧烈,产生大量的变形热,且来不及通过模具向外传递热量,导致高温区最高温度近似于呈直线上升趋势如图 6 所示,从而造成温度场分布不均匀程度增大,同时高温区向从动冲头方向偏移。

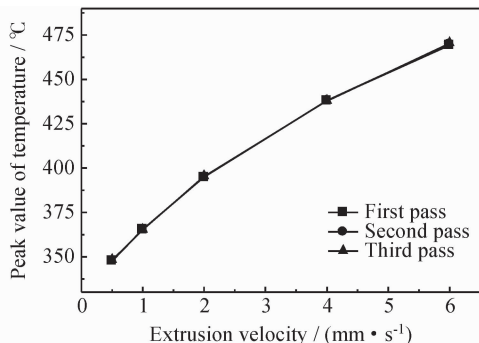


图 6 挤压速率对温度峰值的影响

Fig. 6 Influence of extrusion velocity on the peak value of temperature

图 7 所示为不同挤压速率对各道次往复挤压变形 80% 等效应力峰值的影响。随着挤压速率的增大,等效应力峰值先升后降。其原因是变形热效应引起的软化机制与变形加工硬化机制综合作用的结果,挤压速率较小时,由于塑性变形引起加工硬化效应使得应力峰值较高;随着挤压速率增大,变形热效应增强,工件内温度升高明显,而较高的变形温度有利于软化机制的进行,致使动态再结晶等引起的软化效应更为显著,应力峰值有所下降,但仍高于挤压速率最小时所对应

的应力峰值。

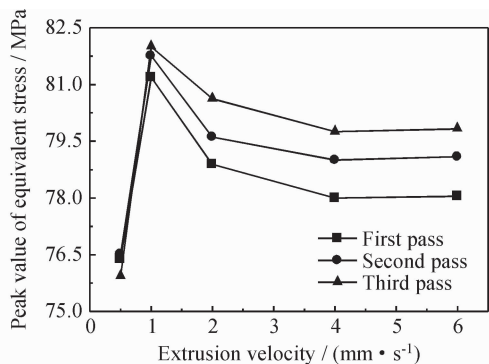


图 7 挤压速率对等效应力峰值的影响

Fig. 7 Influence of extrusion velocity on the peak value of equivalent stress

4.2 初始坯料温度的影响

图 8 所示为摩擦因数为 0.2、挤压速率为 1mm/s、不同初始坯料温度对各道次往复挤压变形 80% 等效应变与等效应力峰值的影响。不同道次下初始坯料温度对等效应变峰值的影响有所不同,第 1 道次中等等效应变峰值随初始坯料温度升高而增大,而第 2,3 道次中等等效应变峰值先增大随后则变化不大,甚至有所下降。因而在往复挤压过程中,通过提高初始坯料温度获取变形材料较大应变的效果并不显著。等效应力峰值随初始坯料温度的升高呈直线趋势迅速减小。这是因为随着初始坯料温度的升高,金属原子动能增加,原子热振动加剧,位错的活动能力提高,晶间切变抗力降低,晶界的强度下降,晶界的滑移易于进行,滑移系增多,金属容易流动;同时变形所需的激活能降低,回复和再结晶软化机制容易进行,使得变形金属的加工硬化得到一定程度的消除,金属塑性较好,等效应力峰值下降。

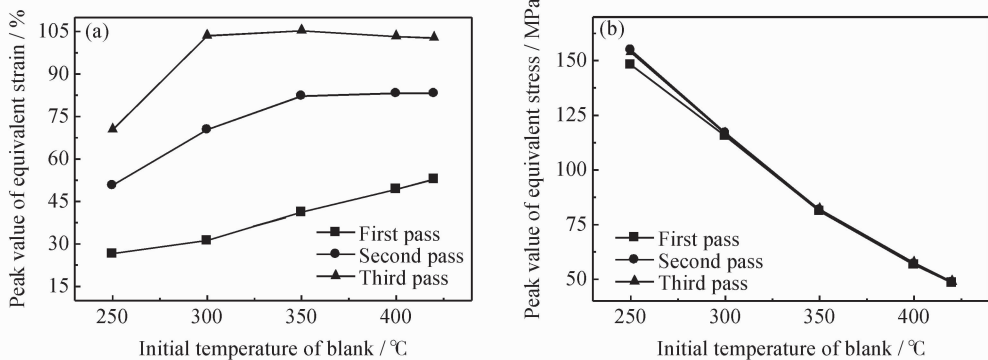


图 8 初始坯料温度对等效应变峰值(a)和等效应力峰值(b)的影响

Fig. 8 Influence of initial temperature of blank on the peak value of equivalent strain (a) and stress (b)

4.3 摩擦因数的影响

图 9 所示为初始坯料温度为 350℃、挤压速率为

1mm/s、不同摩擦因数对各道次往复挤压变形 80% 温度、等效应变以及等效应力峰值的影响,摩擦因数

对温度峰值几乎没有影响。在第 2,3 道次挤压过程中,当摩擦因数大于 0.2 后,等效应变峰值随摩擦因数增大变化很小。等效应力峰值随摩擦因数的增大

而增大,这是由于工件与模具接触表面的摩擦条件恶化,导致工件表层金属的流动性下降,致使变形力增大。

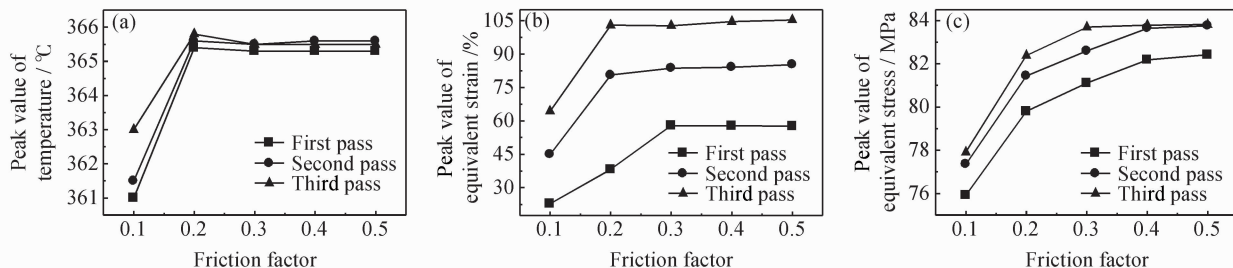


图9 摩擦因数对场变量峰值的影响

(a)摩擦因数对温度峰值的影响;(b)摩擦因数对等效应变峰值的影响;(c)摩擦因数对等效应力峰值的影响

Fig. 9 Influence of friction factor on the peak value of field variable

(a)influence of friction factor on the peak value of temperature;(b)influence of friction factor on the peak value of equivalent strain;(c)influence of friction factor on the peak value of equivalent stress

5 结论

(1)在往复挤压过程中,挤压速率对等效应变峰值影响不大;随着挤压速率的增大,工件内温度峰值直线上升,温度分布不均匀程度增大,应力峰值先增大后有所下降。

(2)随初始坯料温度升高,等效应力峰值呈直线趋势减小。在往复挤压第1道次中等等效应变峰值随初始坯料温度升高而增大,而第2,3道次中等等效应变峰值先增大随后则变化不大。

(3)摩擦因数对温度峰值的影响很小,随着摩擦因数的增大,等效应变峰值先上升然后趋于平稳,等效应力峰值增大,且增大幅度随摩擦因数增大而减小。

(4)在往复挤压过程中,初始坯料温度的提高对获取变形材料较大应变的作用不明显,通过提高各道次的挤压速率来获得大的应变非但不显著,还会造成坯料内温度分布不均匀且应力较大,影响所制备材料的组织均匀性。应重点考虑通过适当增加往复挤压次数,来获得较大的累积应变,有效消除材料初始组织的各种缺陷,从而获得细小、等轴的细晶材料。

参考文献

- [1] 郭学锋,杨文朋,宋佩维. 往复挤压 Mg-4Al-2Si 合金的高温拉伸性能[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(6): 1032—1038.
- [2] 郭学锋. 细晶镁合金制备方法及其组织与性能[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [3] 王渠东,林金保,彭立明,等. 往复挤压变形对 ZK60 镁合金力学性能的影响[J]. 金属学报, 2008, 44(1): 55—58.

- [4] LEE S W, WANG H Y, CHEN Y L, et al. An Mg-Al-Zn alloy with very high specific strength and superior high-strain-rate superplasticity processed by reciprocating extrusion[J]. Advanced Engineering Materials, 2004, 6(12): 948—952.
- [5] 陆勇军,王渠东,李德江,等. 往复挤压工艺制备超细晶材料的研究与发展[J]. 材料科学与工程学报, 2006, 24(1): 152—155.
- [6] RICHERT J, MARIA RICHERT, KRAKÓW. A new method for unlimited deformation of metals and alloys[J]. Aluminum, 1986, 62(8): 604—607.
- [7] 张先宏,崔振山,阮雪榆. 镁合金塑性成形技术—AZ31B 成形性能及流变应力[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(12): 1874—1877.
- [8] 轻金属材料加工手册编写组. 轻金属材料加工手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1979.
- [9] 曾正明. 实用工程材料技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [10] 张家荣,赵廷元. 工程常用物质的热物理性质手册[M]. 北京: 新时代出版社, 1987.
- [11] 美国金属学会. 金属手册: 第二卷[M]. 9 版. 北京: 机械工业出版社, 1979.
- [12] 叶永南. AZ31 镁合金往复挤压成形热力耦合模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.

基金项目: 教育部博士点基金(20070700003); 河南省科技攻关项目(102102210031); 陕西省科技计划项目(2010K10-08); 河南省教育厅自然科学基金项目(2010A430008)

收稿日期: 2011-03-29; 修订日期: 2011-11-15

作者简介: 刘君(1976—), 女, 博士研究生, 讲师, 从事塑性成形技术及数值模拟研究工作, 联系地址: 陕西省西安市金花南路 5 号西安理工大学材料学院(710048), E-mail: xixyu@163.com