

# AZ31 镁合金挤压过程的数值模拟

梁书锦<sup>1,2</sup>, 刘祖岩<sup>2</sup>, 王尔德<sup>2</sup>

(1. 西安欧中材料科技有限公司, 陕西 西安 710018)

(2. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**采用 DEFORM-2D 对 AZ31 镁合金的挤压变形过程进行了数值模拟。通过设计实验验证了所选材料应力-应变、摩擦系数和换热系数等参数的可靠性。在此基础上, 对一系列不同挤压过程进行了模拟计算分析, 得到了坯料温度场分布、应力场分布及挤压载荷等一系列数据, 并采用 Matlab 软件对不同工艺参数与形变载荷之间的关系进行了四维描述。

**关键词:** AZ31; 挤压; 数值模拟

**中图分类号:** TG379; TG146.2<sup>2</sup>

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2015)10-2471-05

镁及其合金是最轻的金属结构材料, 广泛应用于汽车和航空、航天等领域<sup>[1,2]</sup>。镁合金挤压变形是通过细化晶粒来改善镁合金力学性能的方法<sup>[3-5]</sup>。镁合金挤压后的性能和表面质量的好坏取决于挤压的速度和挤压时坯料的温度。然而, 随着挤压速度的提高, 挤压温升会变大, 特别是表面部分由于摩擦引起的热效应, 会使材料的力学性能有所下降并会造成表面微裂纹的产生<sup>[6]</sup>。同时, 挤压过程中润滑剂的选择也是十分重要的。本实验采用有限元的方法模拟计算 AZ31 镁合金的挤压过程, 研究挤压过程的参数对挤压过程以及结果的影响。

## 1 挤压模型的建立及参数的选择

### 1.1 挤压模型的建立

本实验采用 DEFORM-2D 软件平台进行 AZ31 镁合金挤压过程的模拟。DEFORM 软件是比较成熟的商用数值模拟软件, 可用于分析热力耦合和非等温变形问题, 它拥有多个成熟的材料模型, 有弹性、刚塑性、热弹塑性、热刚粘塑性、刚性材料和自定义类型等, 使用十分方便。本实验所研究的挤压过程的模型可以在 DEFORM-2D 软件前处理几何模型模块中建立。图 1 所示为 AZ31 镁合金挤压变形的二维模型网格图, 其几何尺寸为: 坯料直径  $\Phi 16$  mm, 坯料高 30 mm, 挤压比为 4:1。由图中所示的网格分布可以看出, 模具边界处网格细密, 而中心处网格划分相对稀疏, 镁合金坯料周边网格细密, 内部相对稀疏, 这样分布可以在网格总数目一定的条件下, 提高模拟的效率, 精度,

节省了模拟计算时间。

### 1.2 模型参数的选择

挤压模型建立后, 需确定挤压过程的相关参数, 主要包括: AZ31 镁合金应力-应变曲线、坯料与模具间的摩擦系数、坯料与模具间的换热系数等。上述参数的测定作者已在文献[7]中进行了详细的论述, 在这里只引用最终结果, 如表 1 所示。同时, AZ31 镁合金挤压过程中的工艺参数见表 2 所示。

### 1.3 模型参数准确性的实验验证

为了验证所选模拟参数的准确性, 在干摩擦条件下, 模具温度为 100 °C, 坯料温度为 20 °C 时, 实测了挤压后坯料的温度变化曲线, 并与数值模拟所得到的温度变化曲线相对比, 来验证所选参数和模型的准确性, 从而为以下得到的数值模拟结果的可靠性提供有力的证明, 如图 2 所示。结果表明: 这 2 条温度变

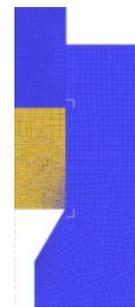


图 1 AZ31 镁合金挤压模型的示意图

Fig.1 Illustration of the extrusion model

收稿日期: 2014-09-10

作者简介: 梁书锦, 男, 1981 年生, 博士, 西安欧中材料科技有限公司, 陕西 西安 710016, 电话: 029-86261062, E-mail: liangshujin@c-nin.com

表 1 模型参数的选择

Table 1 Parameters of the model

Model parameters	Data
Friction coefficient between billet and die	0.35 (dry friction)
	0.052 (oil-based lubricant)
Heat transfer coefficient between billet and die	11 N/s · mm · K

表 2 AZ31 镁合金挤压过程有限元数值模拟的工艺参数

Table 2 Simulation parameters of the AZ31 extrusion process

Billet temperature/°C	Die temperature/°C	Extrusion speed /mm s <sup>-1</sup>
20, 200	100, 200, 300, 400	5, 17, 50

化曲线十分接近，二者最大误差小于 5%。这说明所选用模拟参数是十分准确的，模拟结果与实际挤压过程很接近，具有很高的可信度。

## 2 模拟结果及讨论

### 2.1 挤压工艺参数对温度场分布的影响

#### 2.1.1 不同模具温度的影响

图 3 为坯料温度为 20 °C 时，不同模具温度挤压变形时挤压稳态的温度场分布。从图 3 可以发现，在挤压过程中，坯料未变形区表面的温度均高于心部温度，而且随着模具温度的升高，表面和心部的温度差增大；在坯料的变形区，当模具温度为 400 和 300 °C 时，坯料的表面温度高于心部温度；在模具温度为 200 °C 时，坯料的表面温度和心部温度趋于一致；而当模具温度为 100 °C 时，坯料的表面温度低于心部温度，坯料的这种温度分布的主要原因与塑性变形时金属的形变放热有关。当模具温度较高时，金属的形变放热降低了心部与表面的温度差，因而变形区表面与心部的温度差小于未变形区表面与心部的温度差；当模具温度较低时，金属形变放热引起的温升和金属吸热引起的温升相当，因而出现变形区心部温度接近于甚至高于表面温度的温度场分布。

#### 2.1.2 不同挤压速度的影响

图 4 和图 5 分别为挤压速度 5 和 50 mm/s 时坯料的温度场分布示意图，其中  $T_b$  代表坯料温度， $T_d$  代表模具温度。当模具温度高于坯料温度挤压时，挤压速度 5 mm/s 时未变形区的温度高于挤压速度 50 mm/s 时的温度。这是因为低速挤压时，坯料有足够的时间接受模具传导的热量。然而模具温度低于坯料温度挤压时，挤压速度 5 mm/s 时未变形区的温度却低于 50 mm/s 挤压时的温度。这是因为低速

挤压时坯料有充足的时间向模具传导热量。在变形区，5 mm/s 挤压时的温升低于 50 mm/s 挤压时的温升。坯

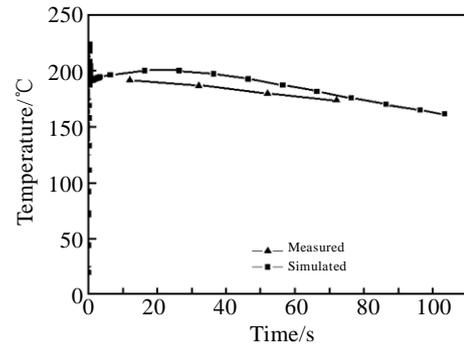


图 2 实测温度变化曲线与数值模拟得到的温度变化曲线的对比  
Fig.2 Comparison between experimental temperature curve and simulated one

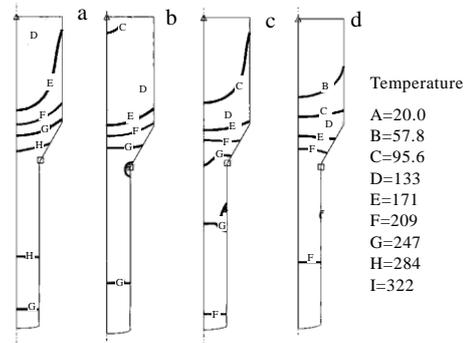


图 3 不同模具温度条件下坯料温度场的分布  
Fig.3 Temperature distributions of the billets with different die temperatures: (a) 400 °C, (b) 300 °C, (c) 200 °C, and (d) 100 °C

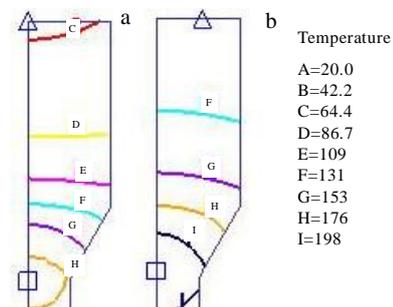


图 4 挤压速度 5 mm/s 时坯料的温度场分布  
Fig.4 Temperature evolution of the billets with 5 mm/s: (a)  $T_b=20$  °C,  $T_d=100$  °C; (b)  $T_b=200$  °C,  $T_d=100$  °C

料温度低于模具温度时的温升分别为 45 和 129 °C，而坯料温度高于模具温度时的温升分别为 22 和

65 °C。这是因为相对于高速挤压, 低速挤压时坯料向模具传导了更多的热量。

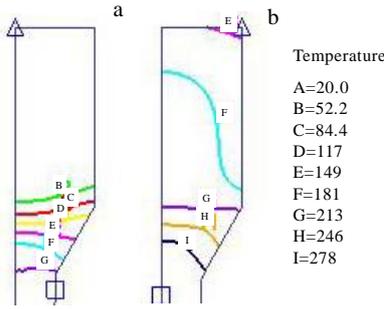


图 5 挤压速度 50 mm/s 时坯料温度场分布

Fig.5 Temperature evolution of the billets with 50 mm/s: (a)  $T_b=20\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_d=100\text{ }^\circ\text{C}$ ; (b)  $T_b=200\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_d=100\text{ }^\circ\text{C}$

### 2.1.3 不同摩擦条件影响

图 6 和图 7 分别为油基石墨润滑和干摩擦条件下, 不同温度时挤压变形稳态阶段的温度场分布示意图。图中可以看到, 无论坯料与模具温度的相对高低, 在不同的摩擦条件下, 挤压变形的温度场分布的形态均类似, 仅仅是相同部位的温度值干摩擦条件下略大。由此可见, 表面摩擦对坯料的温升有一定的作用, 但是不足以影响坯料温度场的分布。

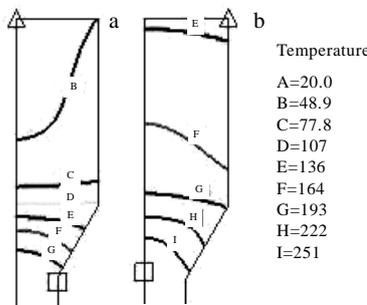


图 6 油基石墨润滑时坯料的温度场分布

Fig.6 Temperature evolution of the billets with oil-based graphite: (a)  $T_b=20\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_d=100\text{ }^\circ\text{C}$ ; (b)  $T_b=200\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_d=100\text{ }^\circ\text{C}$

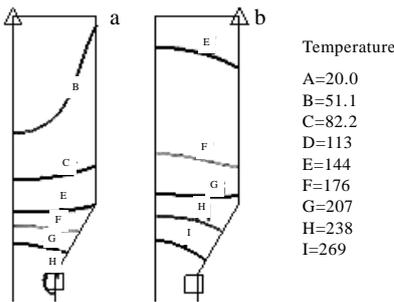


图 7 干摩擦时坯料的温度场分布

Fig.7 Temperature evolution of the billets without lubricant: (a)  $T_b=20\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_d=100\text{ }^\circ\text{C}$ ; (b)  $T_b=200\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_d=100\text{ }^\circ\text{C}$

## 2.2 挤压工艺参数对等效应力场的影响

### 2.2.1 坯料温度对等效应力场的影响

为了分析不同坯料温度对等效应力场的影响, 分别选择坯料温度为 200 和 20 °C, 模具温度为 100 °C, 挤压速度为 17 mm/s, 采用油基石墨进行润滑, 以上述条件为挤压工艺参数进行有限元数值模拟。图 8 为挤压稳态时的等效应力场分布, 从图上可以发现不同坯料温度条件下挤压时等效应力场的分布形态较为类似, 呈均匀的梯度变化, 只是当模具温度高于坯料温度时, 其应力值远高于坯料温度较高挤压时的应力值, 这主要是因为坯料温度较高时, 材料的变形抗力较低的缘故。两种方式挤压时, 均在变形区入口处形成最大应力值, 分别为 317 和 254 MPa。在坯料的变形区, 同一位置心部的应力值低于表面部分的应力值, 这是由变形区心部温度高于表面温度所引起的, 温度场分布如图 6 所示。

### 2.2.2 模具温度对等效应力场的影响

为了研究模具温度对等效应力场分布的影响, 分别选择模具温度为 400, 300, 200 和 100 °C, 坯料温度为 20 °C, 挤压速度为 17 mm/s, 采用油基石墨润滑如上工艺参数进行挤压过程的有限元数值模拟计算。图 9 为挤压稳态时坯料的等效应力场分布, 从图中可以发现等效应力场呈均匀的梯度分布, 不同挤压条件下最大等效应力均出现在变形区的入口处, 最大应力峰值随着模具温度的升高而逐渐变小, 分别为 317, 282, 261 以及 242 MPa, 出现峰值的位置随着模具温度的升高从坯料的表面逐渐移向坯料的心部, 而造成峰值位置改变的因素主要是挤压时坯料的温度场分布, 温度场分布如图 3 所示。在模具温度为 400 和 300 °C 时, 坯料变形区心部温度明显低于表面温度, 所以心部的等效应力值较高; 当模具温度为 100 °C 时, 坯料变形区心部的温度要高于表面温度, 因而在

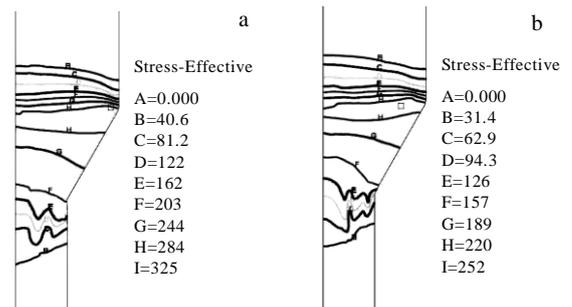


图 8 不同坯料温度条件下稳态挤压阶段的等效应力场分布

Fig.8 Evolutions of effective stress with different billet temperatures:

(a)  $T_b=20\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_d=100\text{ }^\circ\text{C}$ ; (b)  $T_b=200\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_d=100\text{ }^\circ\text{C}$

此情况下坯料表面的等效应力值较高。模具温度对等效应力场的影响，主要是通过热传导来影响坯料的温度分布，进而进一步影响坯料的等效应力场分布的，是一种间接的作用。

### 2.2.3 挤压速度对等效应力场的影响

对于挤压速度对等效应力场分布的影响，模拟了模具温度为  $100\text{ }^\circ\text{C}$ ，坯料温度为  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ，挤压速度为  $5, 17$  以及  $50\text{ mm/s}$  时挤压稳态的等效应力场分布，如图 10 所示。从模拟得到的等效应力场分布可以发现，不同挤压速度时等效应力场的分布变化不大，只是等效应力值会随着变形速度的变大而增大，应力峰值分别为  $305, 317$  和  $346\text{ MPa}$ 。当材料发生热加工塑性变形时，材料内部发生着位错塞积造成的加工硬化以及回复和再结晶造成的材料软化这样一个叠加交替的过程，当提高挤压变形的速度时，相当于提高了材料的应变速率，因而短时间内会造成大量的位错塞积，发生显著的加工硬化，此时材料的回复和再结晶来不及发生，这就造成了材料应力值的迅速升高。同时，由于提高了挤压速度，缩短了坯料吸收热量的时间，因而高速挤压时坯料的温度就会低于低速挤压时的温度，这也是造成高速挤压时较高应力值的一个原因。

### 2.3 挤压速度对挤压载荷的影响

挤压载荷是金属挤压变形过程中的一个十分重要的参数，直接关系到生产和实验过程中挤压设备的选择。影响挤压载荷的因素很多，如：模具温度、坯料温度、挤压速度以及摩擦系数(不同的润滑条件)等。

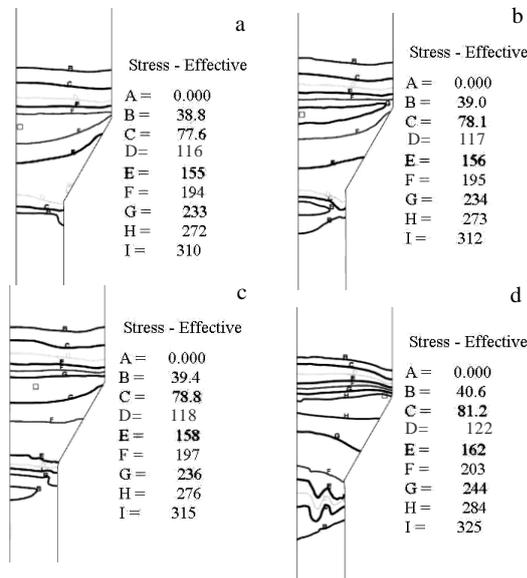


图 9 挤压速度  $17\text{ mm/s}$  时不同模具温度条件下的等效应力场分布

Fig.9 Evolutions of effective stress with different die temperatures:

(a)  $400\text{ }^\circ\text{C}$ , (b)  $300\text{ }^\circ\text{C}$ , (c)  $200\text{ }^\circ\text{C}$ , and (d)  $100\text{ }^\circ\text{C}$

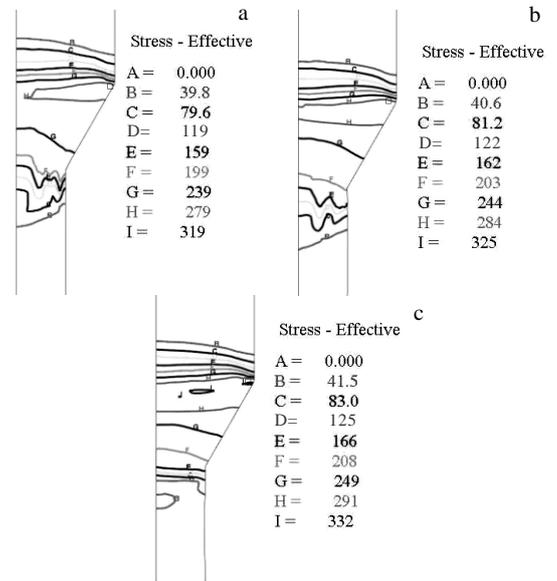


图 10 不同挤压速度时等效应力场的分布

Fig.10 Evolutions of effective stress with different extrusion speeds: (a)  $5\text{ mm/s}$ , (b)  $17\text{ mm/s}$ , and (c)  $50\text{ mm/s}$

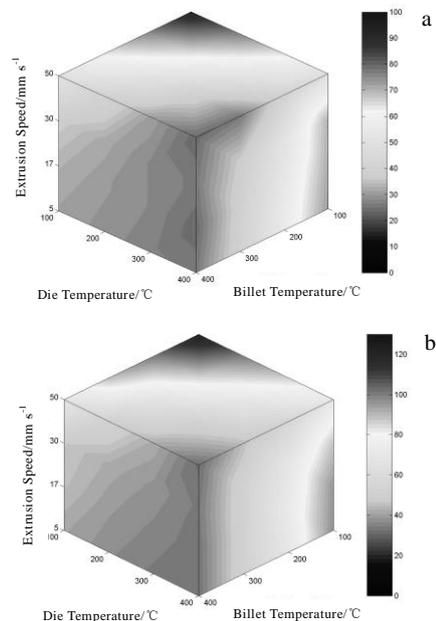


图 11 模具温度、坯料温度、挤压速度及挤压载荷四者之间的关系

Fig.11 Relationship among die temperature, billet temperature, extrusion speed and extrusion load: (a) oil-based

lubricant and (b) no lubricant

首先利用 DEFORM-2D 软件模拟得到了一些不同工艺参数条件下的挤压载荷, 然后采用 Matlab 软件, 在固定摩擦条件的前提下(石墨油润滑和干摩擦), 利用三维空间描述模具温度、坯料温度、挤压速度以及挤压载荷四者的关系。其中三维空间的 X、Y、Z 3 个坐标分别代表模具温度、坯料温度和挤压速度, 而挤压载荷的大小则通过定义不同颜色来区分。图 11a 和 11b 分别为采用油基石墨润滑和干摩擦条件下, 不同挤压速度、模具温度以及坯料温度时的挤压载荷。图中每一点都代表具体的模具温度, 坯料温度, 轧制速度和挤压载荷, 用任何线、面去截这个正方体, 都能通过颜色的改变而清楚地观察到挤压载荷的变化。从图中可以发现, 坯料和模具温度越低, 挤压速度越高, 则挤压载荷越大, 反之则挤压载荷迅速降低。

### 3 结 论

- 1) 设计一系列实验得到了数值模拟所需的参数, 并用实际实验验证了上述参数的可靠性。
- 2) 在挤压过程中, 当模具温度高于坯料温度时, 坯料未变形区表层的温度高于心部温度, 模具温度 400 和 300 °C 时, 坯料变形区的表层温度高于心部温度, 模具温度 200 和 100 °C 时, 坯料变形区的表层温度接

近于或低于心部温度。当模具温度低于坯料温度时, 坯料未变形区和变形区的表层温度均低于心部温度。

3) 挤压过程中坯料应力场的分布与坯料温度场的分布息息相关, 无论模具温度和坯料温度的相对高低, 应力的峰值均出现在变形区入口的位置。

4) 利用 DEFORM-2D 软件对挤压过程中的变形载荷进行了计算, 并采用 Matlab 软件将不同工艺参数与形变载荷之间的关系进行了四维描述, 这对实验及工业生产中设备吨位的选择具有指导意义。

#### 参考文献 References

- [1] Kaneko T, Suzuki M. *Mater Sci Forum*[J], 2003, 419-422: 67
- [2] Stalmann A, Sebastian W, Friedrich H *et al. Adv Eng Mater*[J], 2001, 3(12): 969
- [3] Mohri T, Mabuchi M, Saito N *et al. Mater Sci Eng A*[J], 1998, 257: 287
- [4] Chandrasekaran M, Shyan John Y M. *Mater Sci Eng A*[J], 2004, 381: 308
- [5] Hsiang S H, Kuo J L. *J Mater Process Technol*[J], 2003, 140: 6
- [6] Lapovok R, Barnett M R, Davies C H J. *J Mat Sci Techn*[J], 2004, 146: 408
- [7] Liang S J, Liu Z Y, Wang E D. *Mater Sci Eng A*[J], 2009, 499: 221

## Extrusion Process Simulation of AZ31 Magnesium Alloy

Liang Shujin<sup>1,2</sup>, Liu Zuyan<sup>2</sup>, Wang Erde<sup>2</sup>

(1. Sino-Euro Materials Technologies of Xi'an Co. Ltd, Xi'an 710018, China)

(2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The extrusion process of AZ31 magnesium alloy has been simulated. An actual experiment was also carried out and simulated by DEFORM-2D. The result shows that the simulated temperature-time curve agrees well with the measured one, indicating the good accuracy of the simulation parameters. And then a series of simulations of AZ31 extrusion were analyzed. The temperature distributions, stress distributions and extrusion loads were obtained. Matlab were used to describe the relationship among them in four-dimensional space.

**Key words:** AZ31; extrusion; simulation

Corresponding author: Liang Shujin, Ph. D., Sino-Euro Materials Technologies of Xi'an Co. Ltd, Xi'an 710018, P. R. China, Tel: 0086-29-86261062, E-mail: liangshujin@c-nin.com