

## 铝型材挤出速度对模具磨损程度的影响

彭必友<sup>1,2</sup>, 殷国富<sup>1</sup>, 傅建<sup>2</sup>, 蔡鹏<sup>1</sup>

- (1. 四川大学 制造科学与工程学院, 成都 610065;
2. 西华大学 材料科学与工程学院, 成都 610039)

**摘要:** 基于修正的 Archard 磨损理论, 利用数值模拟技术分析挤压成形阶段模具各个测量点的瞬时温度、压力和速度场的分布, 研究挤出速度对模具磨损程度的影响。结果表明: 随着铝型材挤出速度的增加, 模具各个测量点的磨损量都随之增加; 由于模具工作带入口的正压力和温度均较其他部位大, 使其磨损量也是最大的, 故成为模具失效的主要区域; 整个挤压过程有 5 000 个阶段, 当挤出速度为 10 m/min 时, P15 点的总磨损量为 1.45 mm, 计算结果与实际情况基本吻合, 为挤压工艺的制定提供了理论依据和参考。

**关键词:** 铝型材; 挤出速度; 磨损; Archard; 数值模拟

中图分类号: TG 376

文献标识码: A

## Effect of extrusion velocity to wear degree of aluminum profile

PENG Bi-you<sup>1,2</sup>, YIN Guo-Fu<sup>1</sup>, FU Jian<sup>2</sup>, CAI Peng<sup>1</sup>

- (1 School of Manufacturing Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
- 2 School of Materials Science and Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

**Abstract:** Based on modified Archard's wear theory, a lot of useful data were obtained by finite element software during the process of extrusion, including instantaneous temperature, pressure and velocity field of every node, and rules of wear amount under various extrusion velocities were obtained. The results indicate that with the increase of extrusion velocity, the wear amount of each measure point increases. Because normal pressure and temperature around the die land are higher, and wear amount is also higher than the other part of the die, the die land becomes main area of invalidation. If total amount of forming phase is 5 000 and the speed is 10 m/min, the total wear amount of P15 is 1.45 mm. All the results are in good agreement with actual conditions, therefore it provides theory basis and reference to make aluminum profile extrusion process.

**Key words:** aluminum profile; extrusion velocity; wear; Archard; numerical simulation

在铝型材挤压成形过程中, 挤压模具由于长时间承受高温、高压、反复循环应力等作用, 导致挤压模具极易产生磨损、疲劳破裂、塑性变形等失效形式<sup>[1-2]</sup>。其中磨损是影响模具寿命的决定性因素, 特别是高温成形过程中, 模具因磨损而失效的情况超过 70%<sup>[3]</sup>。但常规的物理实验对研究坯料的变形规律和模具的工

作状况受到诸多的限制, 故国内外众多学者采用有限元法等数值模拟方法对铝型材挤压过程的成形规律和模具的应力、应变和温度场等进行了分析<sup>[4-7]</sup>, 取得了重大进步。

在铝型材挤压成形中, 挤出速度(挤压轴的移动速度)是优化挤出工艺和模具设计的重要参数之一。

Caloska 等<sup>[8]</sup>指出不合理的挤出速度不但会影响挤出制品的质量,而且还会导致模具工作带的过早失效,如局部塌陷、裂纹、磨损和变形等。傅建等<sup>[9]</sup>分析了挤出速度对载荷—行程曲线、挤压力、模具应力场和温度场的影响。王雷刚等<sup>[10-11]</sup>对挤压模具的磨损状况进行了数值模拟,得到了某一特定工艺方案下模具某些测量点的磨损值。但挤出速度对模具各个点的磨损状况的影响目前尚不清楚,而定量了解和掌握其在挤压过程中模具磨损变化的规律,对其有效地设计模具、制定挤压工艺等都是十分重要的。为此,本文作者基于修正的 Archard 磨损理论,采用有限元方法,对挤压模具的工作状况进行数值模拟,全面获得了模具各个测量点的瞬时温度、压力和速度场的分布,并得出挤出速度对模具磨损程度的影响行为,从而为挤压工艺的制定提供了理论依据和参考。

## 1 理论依据

### 1.1 挤出速度与应力

通常,刚塑性材料的塑性变形抗力可以用流动应力表示:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}, \dot{\bar{\varepsilon}}, T) \quad (1)$$

对于 Al-Mg-Si 系列合金的热变形,有<sup>[12]</sup>

$$\bar{\sigma} = s_m \arcsin h \left[ \frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{A} \exp\left(\frac{\Delta H}{RT}\right)^{\frac{1}{n}} \right] \quad (2)$$

式中  $\bar{\varepsilon}$ 、 $\dot{\bar{\varepsilon}}$ 、 $T$  分别为等效应变、等效应变速率和变形温度; $s_m$ 、 $n$  为应变速率敏感参数; $A$  为与 Al-Mg-Si 系列合金中 Mg、Si 含量有关的参数; $\Delta H$  为材料塑性变形流动的表现激活能; $R$  为摩尔气体常数。

由式(2)知,当变形温度一定时,铝合金挤出成形的流动应力会随着应变速率(与挤出速度等因素有关)的增大而增大。即在其他工艺条件和模具结构不变的情况下,高的挤出速度将伴随着高的挤出压力,以克服坯料的变形抗力。施加在坯料上的挤出压力(载荷)最终将有部分传递给挤压模具。

### 1.2 挤压模具的磨损预测模型

金属成形过程的磨损预测采用 Archard 常规模型,其中的磨损系数是常量。然而,材料的特性与接触条件随温度的改变而变化。要预测挤压模具的磨损,在模具温度超过 400 °C 后,温度是主要因素且分布不均

匀。在这方面的研究中, Lee 等<sup>[13]</sup>假定 Archard 的磨损理论仍然适合于铝型材挤压,但是硬度和磨损系数不是常量,所提出的修正磨损模型为

$$W(T) = \frac{K(T)LP}{H(T)} \quad (3)$$

其中 磨损系数  $K(T)$  和硬度  $H(T)$  是温度的函数,可以从高温硬度测试和高温磨损测试中得到。

在挤压过程中,压力、温度和速度场随着挤压的行程而发生变化,如图 1 所示。因此,式(3)可修正为

$$\Delta W_{ij} = k_{ij}(T) \frac{L_{ij}P_{ij}}{H_{ij}(T)} \quad (4)$$

式中  $\Delta W_{ij}$  为  $i$  位置处在第  $j$  步的磨损深度。而滑动长度  $L_{ij}$ , 压力  $P_{ij}$  和温度可以通过有限元分析得到。

一个挤压模具  $i$  位置处的总磨损深度可以表示为

$$W_i = \sum_{j=1}^n k_{ij}(T) \frac{L_{ij}P_{ij}}{H_{ij}(T)} \quad (5)$$

式中  $n$  为挤压过程中模拟的全部步数。

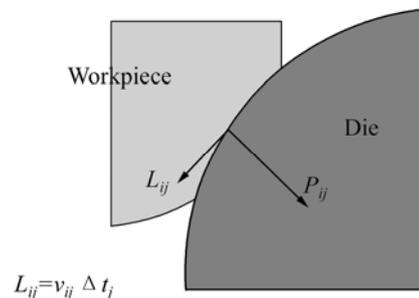


图 1 磨损机理

Fig.1 Mechanism of die wearing

从模具磨损区域的全方位追踪看,可以在一个挤压过程后预测磨损,而最终点磨损分布或者模具寿命可以通过求和法,由整个挤压过程得出。对于磨损系数  $K(T)$  和硬度  $H(T)$ , Lee 等<sup>[13]</sup>通过实验确定二者与温度的关系为

$$\begin{aligned} H(T) &= 9216.4T^{-0.505} \\ K(T) &= [29.29 \ln(T) - 168.73] \times 10^{-6} \end{aligned} \quad (6)$$

### 1.3 摩擦模型

在金属体积成形过程中,反正切函数摩擦力模型不仅可以反映摩擦力的变化情况,而且可以避免速度中性点处摩擦力换向问题,因此在挤压成形模拟过程

中采用反正切摩擦力模型<sup>[14-15]</sup>, 该模型不仅可以反映摩擦力的变化情况, 而且可以避免速度中性点处摩擦力换向问题。因此在挤压成形模拟过程中采用反正切摩擦力模型, 其具体表达式为

$$f = -mk \left[ \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{v_r}{v_0}\right) \right] \quad (7)$$

式中  $m$  为摩擦因数, 是一常数;  $k$  为材料剪切流动极限,  $k = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}}$ ;  $v_r$  为相对滑动速度;  $v_0$  为数值很小的正数。

## 2 模拟实验

本实验的硬件平台为 HP xw6100 工作站, 模拟软件为 SFTC 公司的 DEFORM3D。挤压制品为一圆棒, 挤压比为 6.25, 建模示意图如图 2 所示。

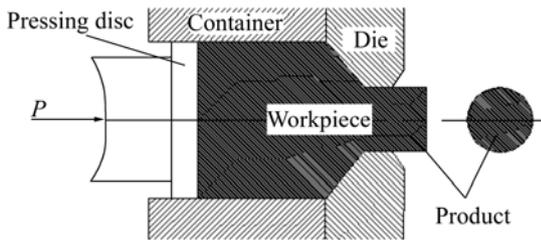


图 2 建模示意图

Fig.2 Schematic plan of model building

为了节约计算资源, 加快模拟速度, 采用了模型的 1/4 作为分析对象。工件和模具的有限元分析输入数据如表 1 所示, 坯料的流动应力如图 3 所示。

表 1 有限元分析输入数据

Table 1 Input data for finite element analysis			
Material	Elastic modulus/MPa	Poission's ratio	Heat capacity/(N·mm <sup>-2</sup> ·°C <sup>-1</sup> )
Al-6061 (LD2)	68 947.60	0.3	2.433 69
4Cr5MoV1Si (H13)	188 226.87	0.3	3.588 00
Material	Conductivity coefficient/(N·s <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	Initial temperature/°C	
Al-6061 (LD2)	180.181	500	
4Cr5MoV1Si (H13)	24.400	450	

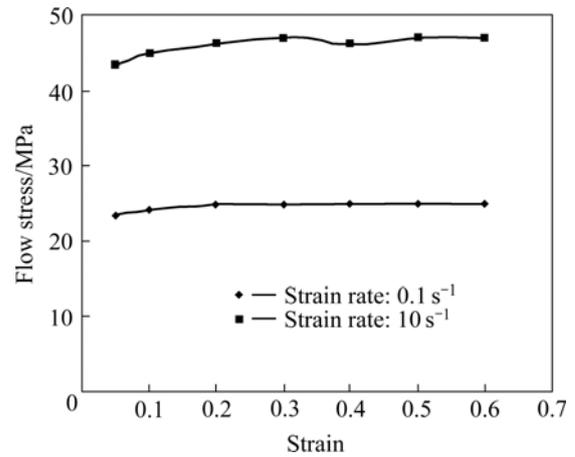


图 3 480 °C 下 AL6061 的流动应力曲线

Fig.3 Flow stress—strain curves of AL6061 at 480 °C

模具与坯料之间的摩擦因数为 0.4; 挤压速度(挤压轴的移动速度)依次设定为 5、10、12、20 m/min。

图 4 所示为模具磨损值测量点分布示意图, 共有 22 个测量点, 点 P1 到 P15 沿 1 号线分布, 各点相对于 P1 的距离值如表 2 所示; 点 P16 到 P22 沿 2 号线分布, 各点相对于 P15 的距离值如表 2 所示。

通过式(6)计算硬度和磨损系数。从每个模拟阶段各个单元节点和时间段的速度场, 可以计算材料的滑动长度, 然后通过式(4)计算每个模拟阶段节点的磨损深度, 再代入式(5)将所有阶段的磨损求和, 得到整个挤压过程每个节点的磨损总深度。

整个实验分 2 步进行:

1) 为了获得挤压过程中的载荷—行程曲线、给定行程内的坯料与模具温度场分布以及变形坯料施加给模具的作用力(边界力)等数据。将坯料(铝锭)设置为塑性体, 模具全部设置为刚性体, 模拟分析铝合金坯料在不同挤压速度下的塑性变形行为。

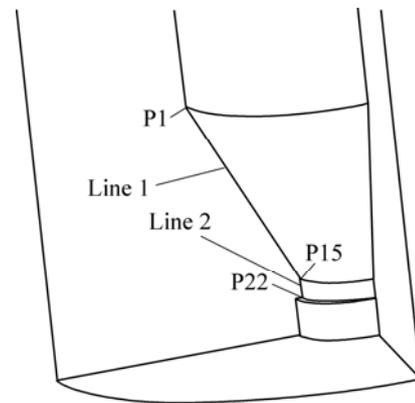


图 4 测量点示意图

Fig.4 Schematic plan of measure point

表2 测量点的相对距离

Table 2 Relative distance of measure point

Point No.	Distance/mm	Point No.	Distance/mm
P1	0	P12	47.14
P2	4.29	P13	51.43
P3	8.57	P14	55.71
P4	12.86	P15	60.00
P5	17.14	P16	0.71
P6	21.43	P17	1.43
P7	25.71	P18	2.14
P8	30.00	P19	2.86
P9	34.28	P20	3.57
P10	38.57	P21	4.29
P11	42.86	P22	5.00

2) 从实验第一步的结果中提取一系列的边界力、温度等数据(由 DEFORM 自动完成),并将模具设置为

弹性体,施加必要的边界条件后,模拟计算挤压模具的受力情况。

### 3 分析与讨论

表3列出了挤出速度为 10 m/min,挤压行程为 80.1 mm 时,各个测量点在该阶段的参数值和磨损值。

#### 3.1 挤出速度对硬度和磨损系数 $W$ 的影响

由于铝型材的挤压通常是在近似于绝热的条件下进行,加之变形功转变成热以及摩擦生热的作用,所以挤出速度越快,坯料温度上升就越快(见图5)。与之相反,模具温度的上升速度却随着挤出速度的增加而减慢,这是因为变形坯料向模具传递热量需要一定时间,在相同的挤压行程处(本文为 80.1 mm),低速挤出的模具和坯料接触到时间要长一些,所以温度上升反

表3 各测量点的参数值和磨损量

Table 3 Parameter and wear amount of each measure point

Point No.	Temperature/ K	Exit velocity/ (mm·s <sup>-1</sup> )	Pressure/ MPa	Hardness	Wear coefficient/ 10 <sup>-6</sup>	Sliding length/ mm	Wear/ 10 <sup>-6</sup> mm
P1	737.23	140.64	130.17	328.41	24.67	12.52	122.39
P2	744.80	144.67	162.14	326.72	24.97	12.88	159.54
P3	755.26	161.26	147.83	324.43	25.38	14.35	165.95
P4	754.50	178.95	141.22	324.60	25.35	15.93	175.63
P5	754.47	195.15	130.11	324.60	25.35	17.37	176.45
P6	756.73	211.66	122.03	324.11	25.43	18.84	180.38
P7	757.84	228.99	115.58	323.87	25.48	20.38	185.29
P8	754.11	248.22	113.65	324.68	25.33	22.09	195.89
P9	751.41	270.31	110.17	325.27	25.23	24.06	205.56
P10	753.49	298.42	99.31	324.82	25.31	26.56	205.51
P11	755.65	331.95	91.18	324.35	25.39	29.54	210.88
P12	757.87	367.23	85.30	323.87	25.48	32.68	219.33
P13	762.34	402.39	106.31	322.91	25.65	35.81	302.42
P14	756.64	499.99	100.83	324.13	25.43	44.50	352.02
P15	738.03	723.86	59.94	328.23	24.70	64.42	290.62
P16	735.68	762.56	51.38	328.76	24.61	67.87	261.01
P17	733.33	805.11	42.82	329.29	24.51	67.87	216.34
P18	730.99	847.65	34.26	329.83	24.42	71.65	181.75
P19	728.64	890.20	25.70	330.36	24.33	75.44	142.75
P20	726.29	932.75	17.14	330.90	24.23	79.23	99.42
P21	723.94	975.30	8.57	331.44	24.14	83.01	51.83
P22	721.59	1011.35	0.01	331.99	24.04	86.80	0.07

而较快。其中温度最大值为模具工作带入口处, 这是由于此处是铝型材挤出的瓶颈, 坯料变形剧烈, 坯料在此处的流动受到阻碍, 增加了与模具热交换时间, 故温度最高出现在 P13 到 P15 这段区域(见图 6)。由于硬度和磨损系数  $W$  和温度存在式(6)中的关系, 故挤出速度对硬度和磨损系数  $K$  的影响如图 7 和图 8 所示。

### 3.2 挤出速度对模具正压力的影响

施加在坯料上的挤压力最终将有一部分传递给挤压模具, 图 9 所示为挤压行程为 80.1 mm 处, 不同的挤出速度下挤压力的曲线图。可以看出, 随着挤压速度的增加, 挤压轴受到的挤压力也逐渐增加。但随着挤出速度的继续增大, 挤压轴受力反而降低。这是由于挤出速度增加, 变形和摩擦所产生的热也会随之增加, 坯料的塑性大大增强, 因此所需的挤压力反而降低, 模具所受到的法向压力反而减小, 如图 10 所示。从 P1 到 P22, 模具所受到的正压力也不相同, 基本是一个下降的趋势, 不过在模具工作带入口处, 由于金

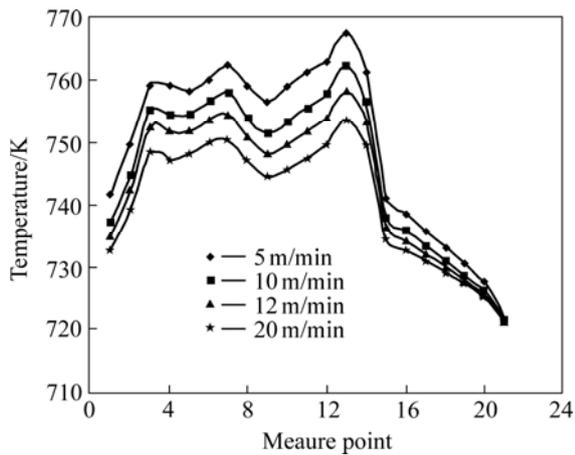


图 5 挤出速度对模具温度场的影响  
Fig.5 Effects of extrusion velocity on temperature of die

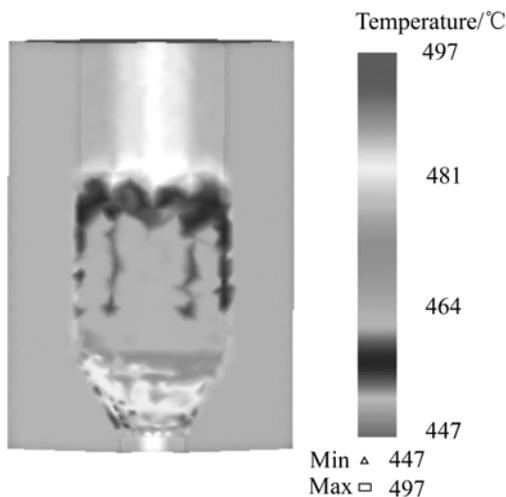


图 6 模具温度场  
Fig.6 Temperature field of die

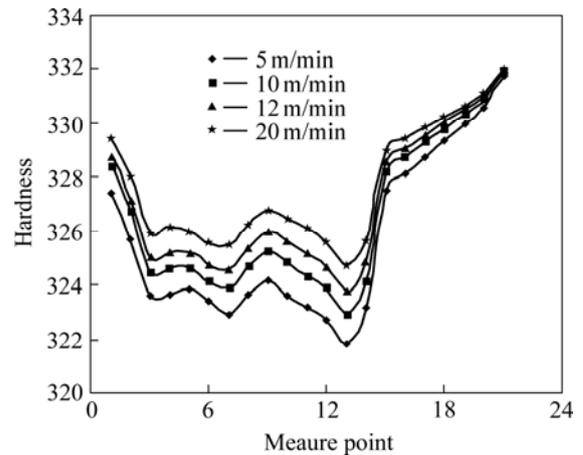


图 7 挤出速度对硬度的影响  
Fig.7 Effects of extrusion velocity on hardness

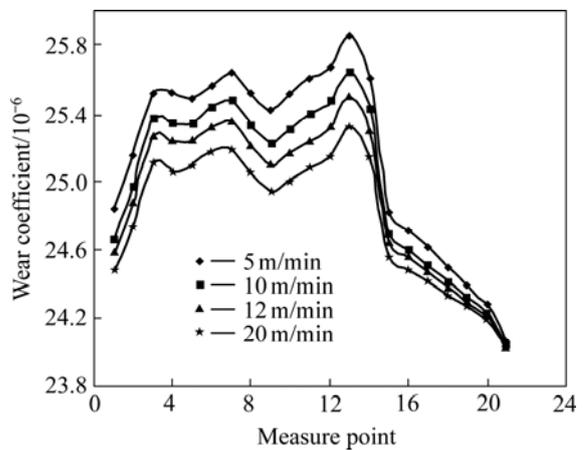


图 8 挤出速度对磨损系数  $K$  的影响  
Fig.8 Effects of extrusion velocity on wear coefficient

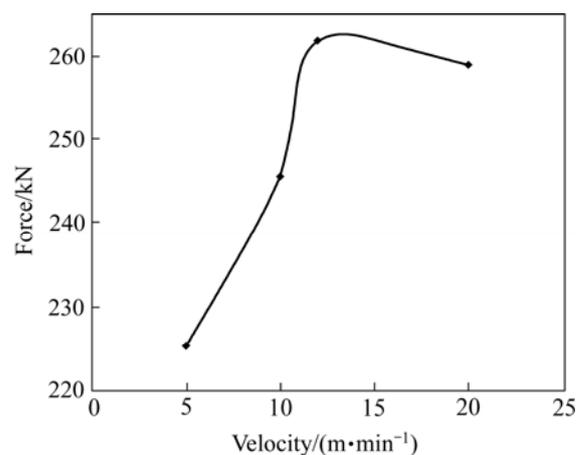


图 9 挤出速度对挤压力的影响  
Fig.9 Effect of extrusion velocity on force

属的流动受到阻碍, 故正压力又有所增加。在 P15 到 P22 点是模具的工作带, 这段区域坯料是一个定径的过程, 对侧壁的压力大大减少, 到 P22 时, 压力几乎降低为零。

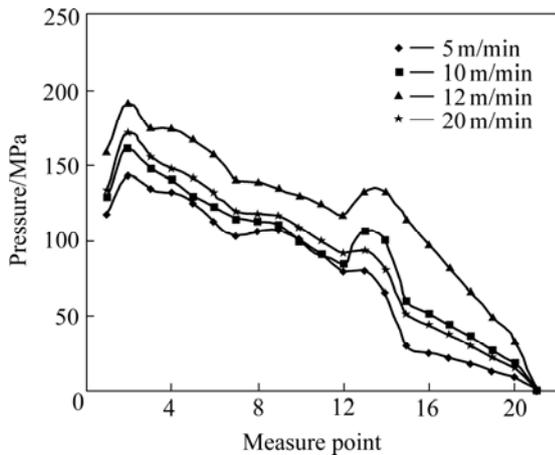


图10 挤出速度对正压力的影响

Fig.10 Effects of extrusion velocity on normal pressure

### 3.3 挤出速度对模具磨损程度的影响

由式(4)可以得到不同挤出速度下模具各个测量点的磨损值。从图11可知,随着挤出速度的增加,各个测量点的磨损量都随之增加,但增幅程度也不尽不同,其中P15点左右磨损量最大,也就是模具工作带的入口。这是由于坯料在入口处正压力和温度均较其他部位大,使其磨损也是最大的,故成为模具失效的主要区域。

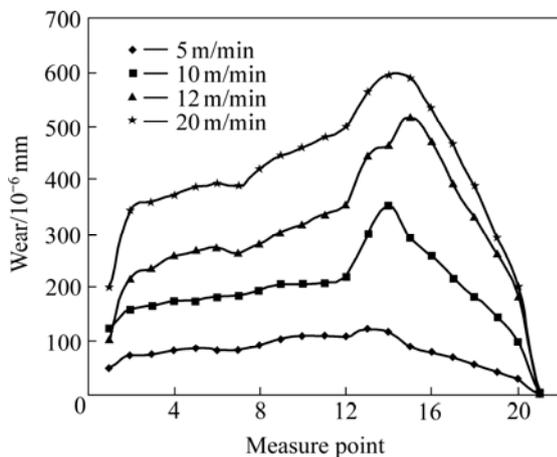


图11 挤出速度对磨损量的影响

Fig.11 Effects of extrusion velocity on wear amount

## 4 结论

1) 基于修正的 Archard 模型,采用有限元分析软件计算挤压模具型腔的磨损,可以预测模具寿命,也为模具型腔等磨损设计提供了依据。

2) 随着铝型材挤出速度的增加,模具各个测量点

的磨损量都随之增加,为挤压工艺的制定提供了理论依据和参考。

3) 模具工作带入口的正压力和温度均较其他部位大,其磨损也是最大的,故成为模具失效的主要区域。

4) 本数值模拟结果为某一阶段的磨损量,如果整个挤压过程有5000个阶段,那么挤出速度在10 m/min时,P15点的总磨损值为1.45 mm,实际生产中该处测出为1.5 mm,与实际情况基本吻合。

## REFERENCES

- [1] 黄光法,林高用,蒋杰,王芳,杨立斌,彭大暑.大挤压比铝型材挤压过程的数值模拟[J].中国有色金属学报,2006,16(5):887-893.  
HUANG Guang-fa, LIN Gao-yong, JIANG Jie, WANG Fang, YANG Li-bin, PENG Da-shu. Numerical simulation of extrusion process of aluminum profile with large extrusion ratio[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(5): 887-893.
- [2] 庞祖高,苏广才,夏薇,黄尚猛.影响温挤压模具的寿命因素及对策探讨,锻压技术,2006,2:52-55.  
PANG Zu-gao, SU Guang-cai, XIA Wei, HUANG Shang-meng. Discussion of factors influencing warm extrusion die life and countermeasures[J]. Forging and Stamping Technology, 2006, 2: 52-55.
- [3] Kang J H, Park I W, Jae J S, Kang S S. A study on a die wear model considering thermal softening (I): Construction of the wear model[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 96: 53-58.
- [4] 周飞,苏丹,彭颖红,阮雪榆.有限体积法模拟铝型材挤压成形过程[J].中国有色金属学报,2003,13(11):65-70.  
ZHOU Fei, SU Dan, PENG Ying-hong, RUAN Xue-yu. Simulation of aluminum material extrusion process with finite volume method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(11): 65-70.
- [5] 闫洪,包忠诩,柳和生,罗忠民.角铝型材挤压过程的数值模拟[J].中国有色金属学报,2001,11(2):202-205.  
YAN Hong, BAO Zhong-xu, LIU He-sheng, LUO Zhong-min. Numerical simulation of angle aluminum profile extrusion processes[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(2): 202-205.
- [6] 罗超,李大勇,尹纪龙,周飞,彭颖红.薄壁铝型材挤压成形的一种有效模拟方法[J].上海交通大学学报,2004,38(7):1134-1137.  
LUO Chao, LI Da-yong, YIN Ji-long, ZHOU Fei, PENG Ying-hong. An effective simulation method for aluminum profile extrusion process[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(7): 1134-1137.
- [7] 周飞,彭颖红,阮雪榆.铝型材挤压过程有限元数值模

- 拟[J]. 中国有色金属学报, 1998, 8(4): 637-642.
- ZHOU Fei, PENG Ying-hong, RUAN Xue-yu. Numerical simulation of aluminum material extrusion process by finite element method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1998, 8(4): 637-642.
- [8] Caloska J, Lazarev J, Nospal A, Atojkovski V. Exit velocity profile at the extrusion process of aluminum square pipe[C]// Southeastern Europe Fluent Users Group Meeting 2002, Thessaloniki, Greece, 2002: 322-325.
- [9] 傅建, 彭必友, 李军. 铝型材挤出速度对模具工作带的影响[J]. 塑性工程学报, 2005, 12(8): 27-30.
- FU Jian, PENG Bi-you, LI Jun. Influence of exit velocity at the aluminum profile extrusion on the die land[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2005, 12(8): 27-30.
- [10] 王雷刚, 黄瑶, 孙宪萍, 刘全坤. 基于修正 Archard 磨损理论的挤压模具磨损分析[J]. 润滑与密封, 2006, 3: 10-12.
- WANG Lei-gang, HUANG Yao, SUN Xian-ping, LIU Quan-kun. Wear analysis of extrusion die based on Archard's theory[J]. Lubrication Engineering, 2006, 3: 10-12.
- [11] 黄瑶, 孙宪平, 王雷刚, 刘全坤. 基于 BP 神经网络的挤压模具磨损预测[J]. 塑性工程学报, 2006, 13(2): 64-66.
- HUANG Yao, SUN Xian-ping, WANG Lei-gang, LIU Quan-kun. Wear prediction of extrusion die based on BP neural networks[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2006, 13(2): 64-66.
- [12] Langkruis J, Koo W H, van der Zwaag S. Assessment of constitutive equation in modeling the hot deformability of some overaged Al-Mg-Si alloys with varying solute content[J]. Mater Sci Eng A, 1999, 266: 135-145.
- [13] Lee R S, Jou J L. Application of numerical simulation for wear analysis of warm forging die[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140: 43-48.
- [14] Snape G, Clift S, Bramley A. Parametric sensitivity analyses for FEA of hot steel forging[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002(125/126): 353-360.
- [15] Yang D Y, Lee N K, Yoon J H. A three-dimensional rigid-plastic finite element analysis of spur gear forging using the modular remeshing technique[J]. Proc Instn Mech Engrs, 1991, 205: 111-121.

(编辑 李向群)