

· 工艺技术 ·

## 奥氏体不锈钢管热挤压过程挤压针冷却工艺的优化

王博文<sup>1</sup> 刘升<sup>2</sup> 康喜唐<sup>1</sup> 段政均<sup>1</sup> 拓雷锋<sup>1</sup> 李强<sup>1</sup>

(1 山西太钢不锈钢钢管有限公司, 太原 030008;

2 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081)

**摘要** 通过有限元软件 Ansys 对 TP304 奥氏体不锈钢管热挤压过程工模具的温度和传热进行模拟, 得出 X38CrMoV5-3 模具钢挤压针在热挤压过程温度及热流量的分布, 并计算得出生产不同规格钢管时挤压针的规格和所需水体积。Φ57.0 mm × 6.3 mm ~ Φ139.7 mm × 20.0 mm TP304 不锈钢管的生产应用, 结果表明, 冷却工艺改进后, 外径 < 100 mm 挤压针的使用寿命由 50 ~ 100 次/支增加到 100 ~ 150 次/支, 外径 ≥ 100 mm 挤压针的使用寿命由 100 ~ 200 次/支提高到 150 ~ 250 次/支, 显著降低成本和提高生产率。

**关键词** 奥氏体不锈钢管 热挤压 X38CrMoV5-3 模具钢 挤压针 冷却工艺

### Optimization of Cooling Process of Extruding Needle in Hot Extrusion of Austenite Stainless Steel Tube

Wang Bowen<sup>1</sup>, Liu Sheng<sup>2</sup>, Kang Xitang<sup>1</sup>, Duan Zhenjun<sup>1</sup>, Tuo Leifeng<sup>1</sup> and Li Qiang<sup>1</sup>

(1 Shanxi Taigang Stainless Steel Tubes & Pipes Co Ltd, Taiyuan 030008; 2 Key Lab for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

**Abstract** By finite element software Ansys the simulation on temperature and heat transfer of tool and die in hot extrusion process of TP304 austenite stainless steel tube to get the distribution of temperature and heat flux of die steel X38CrMoV5-3 extruding needle in hot extrusion process and the specification parameters and needed water volume for extruding different tube sizes are obtained by calculation. The application of Φ57.0 mm × 6.3 mm ~ Φ139.7 mm × 20.0 mm TP304 austenite stainless steel tubes show that with improvement of cooling process the service life of extruding needle with outside diameter < 100 mm increases from 50 ~ 100 times/per piece to 100 ~ 150 times/per piece, and that with outside diameter ≥ 100 mm increases from 100 ~ 200 times/per piece to 150 ~ 200 times/per piece, the production cost decreases and the production rate increases obviously.

**Material Index** Austenite Stainless Steel, Hot Extrusion, Die Steel X38CrMoV5-3, Extruding Needle, Cooling Process

挤压针是挤压生产过程中的重要模具<sup>[1]</sup>, 在不锈钢管和空心型材热挤压过程中, 挤压针在高温状态下受力状况复杂, 易产生疲劳裂纹, 随着使用次数增加在裂纹处应力集中而产生断裂, 对产品质量及生产效率产生负面影响。本文导入 Ansys 有限元软件进行温度模拟, 得出挤压针在热挤压过程中温度及热流量的分布规律, 结合实际生产经验对挤压针在挤压过程中不同阶段的温度进行控制, 以延长挤压针寿命、降低工模具成本、提高产品表面质量。

### 1 理论分析

#### 1.1 热流量分析

挤压工模具由挤压筒、挤压杆、挤压针和挤压垫组成, 如图 1。

根据傅里叶定律, 单位时间内通过某微薄层的热量, 与该处的温度变化率及平板的截面积  $A$  成正比<sup>[2]</sup>, 即  $\Phi = -\lambda A \frac{dT}{dx}$  (1)

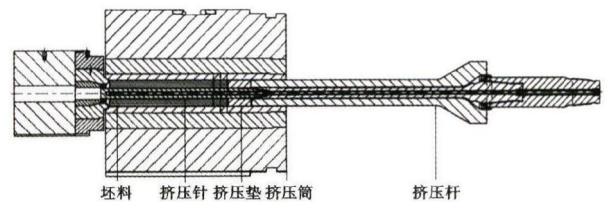


图 1 挤压工模具及坯料示意图  
Fig. 1 Schematics of Extrusion die and billet

式中:  $\Phi$ - 热流量/W;  $A$ - 截面积/ $m^2$ ;  $\lambda$ - 热导率;  $\frac{dT}{dx}$ - 温度变化率。

对导热物体的微元六面体作分析, 按照能量守恒定律, 微元体的热平衡式可以表示为下列形式:

$$\text{导入微元体的总热流量} + \text{微元体中内热源生成的热量} = \text{微元体内能的增量} + \text{导出微元体的总热流量} \quad (2)$$

任意方向的热流量总可以分解成为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个坐标轴方向的分量, 如图 2 所示。根据式(1)有:

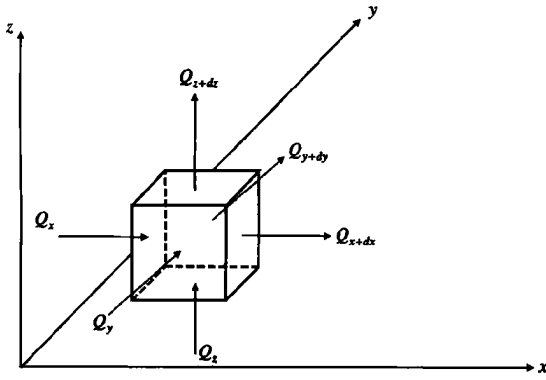


图2 微元平行六面体的导热分析

Fig. 2 Analysis of thermal conductivity of micro-element parallel hexahedron

$$\left. \begin{aligned} Q_x &= -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} dydz \\ Q_y &= -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} dx dz \\ Q_z &= -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} dx dy \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$Q_x + Q_y + Q_z$  为导入微元体的总热流量。

同理,通过  $x = x + dx$ 、 $y = y + dy$ 、 $z = z + dz$  三个表面导出微元体的热流量如式(4):

$$\left. \begin{aligned} Q_{x+dx} &= -\lambda \frac{\partial}{\partial x} \left( T + \frac{\partial T}{\partial x} dx \right) dydz \\ Q_{y+dy} &= -\lambda \frac{\partial}{\partial y} \left( T + \frac{\partial T}{\partial y} dy \right) dx dz \\ Q_{z+dz} &= -\lambda \frac{\partial}{\partial z} \left( T + \frac{\partial T}{\partial z} dz \right) dx dy \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$Q_{x+dx} + Q_{y+dy} + Q_{z+dz}$  为导出微元体的总热流量。

$$\text{微元体内能的总热流量} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (5)$$

设单位体积内热源的热能  $\bar{Q}$ , 则:

$$\text{微元体内热源的生成热} = \bar{Q} dx dy dz \quad (6)$$

将式(3)、(4)、(5)、(6)代入式(2), 可获得导热微分方程式一般形式<sup>[3]</sup>, 即:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\bar{Q}}{\rho c} \quad (7)$$

### 1.2 冷却水量计算

挤压针在挤压过程中裂纹产生与温度的关系如图3所示<sup>[4]</sup>, 其关系式为:

$$\frac{da}{dN} = C_1 (\Delta K)^n \exp \frac{Q_0 - C_2 \ln \Delta K}{RT} \quad (8)$$

式中:  $da/dN$ -疲劳裂纹扩展速率;  $\Delta K$ -应力强度因

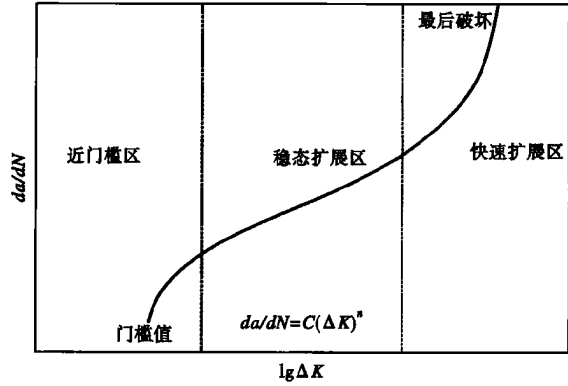


图3 疲劳裂纹扩展速率  $da/dN$  随应力强度因子幅  $\Delta K$  变化示意图

Fig. 3 Diagram of change of fatigue crack expanding speed  $da/dN$  with stress intensity factor  $\Delta K$

子幅;  $n$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ - 疲劳裂纹扩展性能的基本参数;  $Q_0$ - 热量/W;  $R$ - 应力比;  $T$ - 温度/K。

通过计算得出挤压针在稳态扩展区的理论温度区间; 在试验中对不同温度的挤压针进行冷却控制, 使不同尺寸规格的挤压针温度维持稳态扩展区, 从而提高挤压针使用寿命<sup>[5]</sup>。挤压针从实际温度到理想温度所释放的热量<sup>[6]</sup>  $Q_{放} = cm(t_0 - t)$  (9)

$$\text{得出需水量: } m = \frac{Q_{放}}{c(t_0 - t)} \quad (10)$$

式中:  $Q_{放}$ - 从实际温度到理想温度所释放的热量/J;  $m$ - 需水质量/kg;  $c$ - 水的比热容/[ $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$ ];  $t$ - 实际温度/K;  $t_0$ - 理论温度/K。

### 2 建立模型

热分析过程中涉及的组件包括挤压筒、挤压针、挤压杆、挤压垫和坯料等, 可对图1进行简化, 得到二维示意图, 如图4所示<sup>[7]</sup>。

以生产 TP304 奥氏体不锈钢材质,  $\Phi 60.3 \text{ mm} \times 7.1 \text{ mm}$  挤压管为例, 坯料外径为  $\Phi 220 \text{ mm}$ , 内径

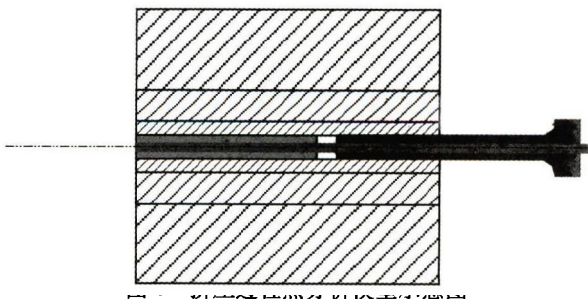


Fig. 4 Schematics of thermal analysis model in extruding process

Φ58 mm, 挤压针外径(钢管内径)Φ46.1 mm; 使用的挤压针材质为 X38CrMoV5-3 模具钢, 其化学成分、热传导性及热膨胀系数如表 1、表 2<sup>[6]</sup>、表 3 所示。

根据现场不锈钢管挤压实际生产温度相应对挤压针、挤压杆、挤压筒、挤压垫、坯料的表面施加温度载荷。

### 3 模拟结果及分析

采用有限元软件 Ansys 模拟各部件之间的热传递过程, 对各变形工模具包括挤压针进行热分析, 得出挤压针温度及热流量分布<sup>[8]</sup>, 如图 5 所示。

#### 3.1 温度分布

从图 5(a) 可看出, 当给工模具施加温度载荷时, 各部件温度分布为: 挤压针的温度在工模具中温

表 1 X38CrMoV5-3 模具钢化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of die steel X38CrMoV5-3 / %							
C	Si	Mn	P	S	V	Mo	Cr
0.35 ~ 0.40	0.30 ~ 0.50	0.30 ~ 0.60	≤ 0.025	≤ 0.015	0.40 ~ 0.70	2.70 ~ 3.30	4.70 ~ 5.20

表 2 X38CrMoV5-3 模具钢热传导性

Table 2 Thermal conductivity of die steel X38CrMoV5-3	
温度/℃	热导率/[W · (m · K) <sup>-1</sup> ]
20	36.40
350	32.20
≥700	27.50

表 3 X38CrMoV5-3 模具钢热膨胀系数

Table 3 Coefficient of thermal expansion of die steel X38CrMoV5-3	
温度/℃	热膨胀系数/(10 <sup>-6</sup> · °C <sup>-1</sup> )
20 ~ 100	11.90
20 ~ 200	12.50
20 ~ 300	12.60
20 ~ 400	12.80
20 ~ 500	13.10
20 ~ 600	13.30
20 ~ ≥700	13.50

度最高, 为 600 ~ 700 °C; 挤压杆的温度最低, 为 20 ~ 100 °C; 挤压垫及挤压筒温度接近, 为 200 ~ 400 °C。

#### 3.2 热流量分布

从图 5(b) 可看出, 工模具热流量数值为 395 × 10<sup>-12</sup>, 挤压针外表面热流量数值为 0.015 2。

### 4 工艺应用

通过模拟结果可以看出, 在挤压过程中, 挤压针具有过高的温度和较差的热扩散环境, 且同时受到拉力、滑动摩擦和变形金属的强烈热作用, 是产生疲劳裂纹的重要原因; 随着使用次数增加, 疲劳裂纹扩展产生断裂导致挤压针报废。改善挤压针的工作温度环境, 是延长挤压针寿命的有效方法<sup>[9]</sup>。

#### 4.1 理想温度

根据图 3 及式(8) 计算得出挤压针在稳态扩展区的理论温度区间在 190 ~ 210 °C, 所以控制挤压针在挤压过程中的表面温度在 200 °C 左右。

#### 4.2 需水量计算

选取不同规格的挤压针进行试验, 不同规格参数如表 4 所示。根据式(10) [TP304 不锈钢密度 7.9 g/cm<sup>3</sup>、比热容 500 J/(kg · K); 水的密度为 1 g/cm<sup>3</sup>、比热容 4 200 J/(kg · K)] 计算挤压针在挤压过程中从 300 °C 冷却到理想温度 200 °C 的需水质量, 并换算成水的体积, 各规格挤压针所需水体积如表 5 所示。

生产现场通过安装电磁控制阀, 使用流量计监控水流量, 根据计算结果对水流量进行控制, 并安装水温计检测水循环的温度, 保持挤压针的温度控制在 200 °C 左右的理想温度。根据水温计检测结果发现, 挤压针在无水冷却时的内外部温差 > 100 °C, 经过水冷后内外温差在 70 °C 左右, 与温度模拟结果基本一致。

#### 4.3 计算结果分析

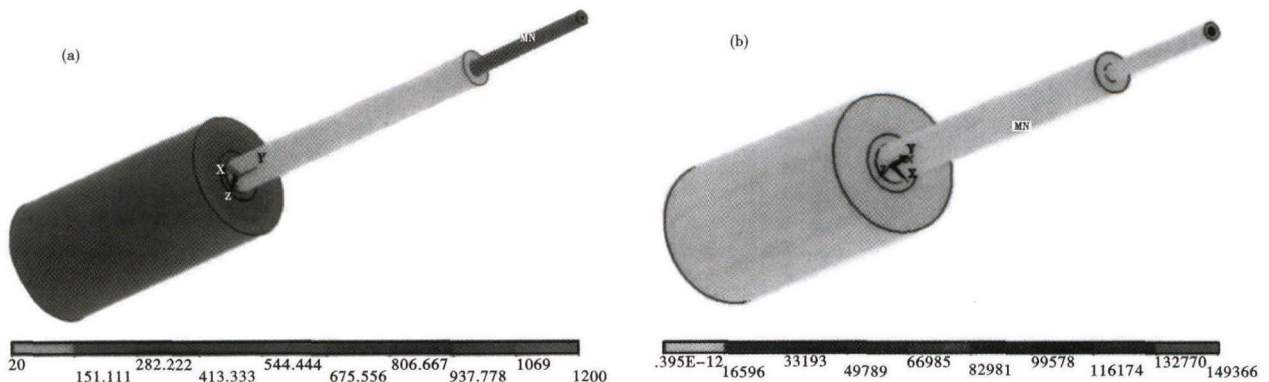


图 5 热挤压过程各部分温度分布(a)和热流量分布(b)

Fig. 5 Distribution of temperature (a) and heat flux (b) of each element in hot extruding process

表4 TP304 奥氏体不锈钢管和 X38CrMoV5-3 模具钢挤压针的规格

Table 4 Sizes of TP304 austenite stainless steel tube and die steel X38CrMoV5-3 extruding needle

序号	钢管/mm		挤压针/mm	
	外径	壁厚	外径	长度
1	57.0	6.3	44.4	800
2	57.0	7.1	42.8	800
3	60.3	6.3	47.7	800
4	60.3	7.1	46.1	800
5	76.1	4.5	67.1	1 100
6	76.1	5.0	66.1	1 100
7	88.9	4.0	80.9	1 200
8	88.9	4.5	79.9	1 200
9	101.6	4.0	93.6	1 400
10	101.6	4.5	92.6	1 400
11	114.3	4.5	105.3	1 500
12	114.3	5.0	104.3	1 500
13	127.0	11.0	105.0	1 500
14	127.0	12.5	102.0	1 500
15	139.7	17.5	104.7	1 500
16	139.7	20.0	99.7	1 500

表5 不同规格挤压针冷却所需水体积

Table 5 Needed water volume for different size extruding needles cooling

挤压针型号	需水体积/m <sup>3</sup>
1	85.71
2	75.27
3	101.22
4	89.83
5	318.24
6	303.10
7	523.90
8	503.66
9	829.77
10	802.22
11	1 125.20
12	1 091.96
13	978.51
14	887.06
15	842.05
16	703.43

(1) 挤压针直径与冷却水流量的关系。由表4

和表5看出,规格相同的挤压针长度相同,但内外径不同时,规格较薄的挤压针需水量较少;不同规格挤压针长度相同,内径相同时,但外径较大的挤压针需水量更大;这也与生产经验一致。

(2) 挤压针长度与冷却水流量的关系。由表4和表5看出,规格相同的挤压针长度不同时,较长的挤压针需水量更大。

同时,对比较厚但较短的挤压针,长度较长但较薄的挤压针需水量更小,在实际生产中采用较长的挤压针有利于提高挤压成材率,提高生产效率,同时有利于延长挤压针寿命,节约生产用水量。

经过冷却方式改进后,统计生产过程中的工模具消耗,小规格挤压针(外径 < 100 mm)使用寿命由 50 ~ 100 次/支增加到 100 ~ 150 次/支,大规格挤压针(外径 ≥ 100 mm)使用寿命由 100 ~ 200 次/支增加到 150 ~ 200 次/支;总体来说每支挤压针可延长使用寿命 50 ~ 100 次,按每支挤压针 3 000 ~ 20 000 元计算,可降低吨钢挤压成本 150 ~ 300 元;同时降低挤压针更换频率,提高了生产效率。

## 5 结论

(1) 在挤压过程中,挤压针具有过高的温度和较差的热扩散环境,且同时受到拉力、滑动摩擦和变形金属的强烈热作用,是产生疲劳裂纹,导致挤压针报废的重要原因。

(2) 通过改进冷却方法,改善挤压针的工作温度环境,可有效延长挤压针的使用寿命;挤压针在稳态扩展区的理论温度区间为 190 ~ 210 °C,控制挤压针在挤压过程中的表面温度在 200 °C 左右是较为适宜的。

(3) 采用长度较长但较薄的挤压针有利于延长挤压针寿命,提高生产效率,节约生产用水量。

## 参考文献

- [1] 中国特钢企业协会不锈钢分会. 不锈钢实用手册[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003: 31-33.
- [2] 赵明娟, 陆建生, 瑚琦, 等. 挤压穿孔优化设计的计算机仿真模拟[J]. 金属成形工艺, 2004, 22(1): 17-18, 79.
- [3] 周树森. 材料加工冶金传输原理[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2008: 98-99, 103-104.
- [4] 伍颖. 断裂与疲劳[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 103-104.
- [5] 屠传经, 沈璐婵, 吴子静. 热传导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992: 22-44.
- [6] 戴锅生. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998: 4-7, 318.
- [7] 陈火红, 于军泉, 席源山. MSC. Marc/Mentat 2003 基础与应用实例[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 51-59.
- [8] Cetinel H, Toparlak M, Ozsoyeller L. A Finite Element Evolution of

Steels Subjected to the Temperature Based Prediction of the Process [J]. Mechanics of Materials, 2000, 32(2): 330-339.

- [9] 马怀宪. 金属塑性加工学: 挤压、拉拔与管材冷轧[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1991: 24-45.

王伯文(1984-), 男, 硕士(2009年武汉科技大学), 工程师, 2005年武汉科技大学(本科)毕业, 不锈钢及镍铁合金管材、型材的产品开发和控制。E-mail: wangbw@tisco.com.cn

收稿日期: 2016-04-20