

拉拔过程全油润滑机理探讨^①

严珩志 钟 振

(中南工业大学机械系, 长沙 410083)

摘 要

建立了考虑热效应的拉拔过程全油润滑膜厚数学模型, 运用该模型定量分析了一般拉拔工况条件下的润滑状态, 并探讨了获得良好润滑的适用的润滑剂粘度条件。

关键词: 拉拔 润滑状态 膜厚

摩擦与润滑条件是影响拉拔过程产品品质、生产效率和模具耗损的关键因素之一, 对塑变区润滑机理进行探讨是产品品质分析和控制以及润滑剂研制的重要前提。

长期以来, 对拉拔过程润滑机理的解释普遍局限于定性分析, 对于不同工况条件下的真实润滑剂制的认识存在着模糊性, 已有的一些对拉拔过程油膜厚度的理论计算未能逼近摩擦真实环境, 对拉拔润滑实践缺乏指导意义, 这也是目前拉拔润滑剂普遍为经验配方型、不能够适应现代拉拔生产多方面品质要求的主要原因。

本文将在建立逼近真实摩擦环境拉拔润滑膜厚数学模型的基础上, 对拉拔润滑机理进行讨论。

1 油膜厚度数学模型及实验验证

金属塑性加工摩擦环境较复杂, 其中温度和表面粗糙度是影响摩擦和润滑的两个主要因素, 研究润滑机理时必须考虑此两因素的作用才能逼近真实, 探讨拉拔过程润滑机理同样如此。

由于拉拔工件从坯料到成品, 表面均为单纯的纵向粗糙纹, 模具由新变旧其表面也是由

光滑向单纯纵向粗糙纹过渡, 根据粗糙表面润滑平均流动模型研究结果, 单纯纵向粗糙纹对油膜厚度的影响等同于光滑表面^[1]。因此, 在对拉拔过程润滑膜厚进行分析时可忽略表面粗糙度效应, 只考虑由塑性变形热、摩擦热引起的温度效应。

塑变热和摩擦热对润滑膜厚有影响只在入口区对润滑膜厚有影响, 即通过影响进入塑变区的润滑剂总量来改变塑变区油膜厚度; 进入塑变区后, 由于塑变区为封闭状态, 工件—模具界面的润滑膜厚度主要与塑变区几何形状等因素有关。

拉拔入口区温度分布为^[2]:

$$T = T_0 = \frac{1}{\rho_b C_b} (\bar{W}_d + \beta \bar{W}_f) \times \exp\left[-\left(\rho_b C_b V_0 / K_b\right) X\right] \quad (1)$$

式中 T_0 —工件原始温度, $^{\circ}\text{C}$; ρ_b, C_b —分别为工件比重和比热 ($\text{J} \cdot \text{kg} \cdot \text{K}^{-1}$); \bar{W}_d, \bar{W}_f —分别为变形区工件单位体积平均塑变热和变形区界面单位面积平均摩擦热; β —摩擦热耗于工件温升的比例; K_b —工件热传导系数, $\text{J} \cdot (\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{C})^{-1}$; V_0 —工件拉拔入口速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; X —入口区某点距塑变开始点距离, m

由于 \bar{W}_f 只为 \bar{W}_d 的千分之几^[2], 为了简化后面的膜厚计算, 可忽略 \bar{W}_f 引起的温度效应, 将入口区温度分布近似表达为:

① 国家自然科学基金资助项目 收稿日期: 1994年8月4日

$$T = T_0 + \frac{\bar{W}_a}{\rho_b C_b} \exp[(-\rho_b C_b V_0 / K_b) X] \quad (2)$$

在建设拉拔过程润滑膜厚度数学模型时，作以下假设：

(1) 入口区温度分布为稳态分布，即

$$\frac{dT}{dt} = 0$$

(2) 油膜很薄，不影响工件几何尺寸和接触区大小

(3) 润滑剂粘压特性不随温度变化，即 α 为常数

(4) 润滑剂为牛顿流体，则有：

$$\eta = \eta_0 e^{\alpha p - \delta \Delta T} \quad (3)$$

式中 η —润滑剂动力粘度， $N \cdot s \cdot m^{-2}$ ； η_0 —润滑剂的常温常压动力粘度， $N \cdot s \cdot m^{-2}$ ； α —润滑剂的粘压系数， Pa^{-1} ； δ —润滑剂的粘温系数， $1/^\circ C$ ； ΔT —润滑剂的温升， $^\circ C$ 。

边界条件(参照附图)：

(1) 上游油膜压强等于环境压强，表压为零，即

$$X = X_0, h = h_0 \text{ 时, } p = 0 \quad (4)$$

(2) 塑变开始点处，由屈服条件得：

$$X = X_a \text{ 处, } p = \sigma_0 - \sigma_{za} \quad (5)$$

式中 σ_{za} 为工件后拉应力， Pa ； σ_0 为工件的屈服强度， Pa 。

(3) 在 X_a 处，压强很高， $e^{\alpha p}$ 值很大，可近似认为：

$$X = X_a \text{ 处, } \frac{1}{e^{\alpha p}} = 0 \quad (6)$$

应用一维 *Reynolds* 方程于此润滑系，则有^[3]：

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{dp}{dx} \right) = -6V_0 \frac{dh}{dx} \quad (7)$$

将(3)式代入(7)式，则有：

$$\frac{d}{dx} \left[\frac{h^3}{\eta_0 e^{\alpha p - \delta \Delta T}} \frac{dp}{dx} \right] = -6V_0 \frac{dh}{dx} \quad (8)$$

对上式积分一次，并利用边界条件(6)式，得：

$$\frac{1}{e^{\alpha p - \delta \Delta T}} \frac{dp}{dx} = -\frac{6\eta V_0}{h^3} (h - h_0) \quad (9)$$

又，入口区几何形状函数为：

$$h = h_a + (X - X_a) \tan \varphi, X \geq X_a \quad (10)$$

则

$$dh = \tan \varphi dx \quad (11)$$

将(2)式应用于此坐标系，且将系数简化，

则入口区润滑剂温升为：

$$\Delta T = C_1 \exp[-C_2(X - X_a)] \quad (12)$$

式中 C_1, C_2 为工艺常数

据(10)式，(12)式可写为：

$$\Delta T = C_1 \exp[-C_2(h - h_a)/\tan \varphi] \quad (13)$$

将(11)、(13)式代入(9)式并整理得：

$$\begin{aligned} \exp(-\alpha p) dp = & \frac{6\eta_0 V_0 \exp[-\delta C_1 \exp(-C_2(\frac{h-h_a}{\tan \varphi}))]}{h^3 \tan \varphi} \\ & \times (h - h_a) dh \quad (14) \end{aligned}$$

利用边界条件(4)、(5)式对上式取定积分：

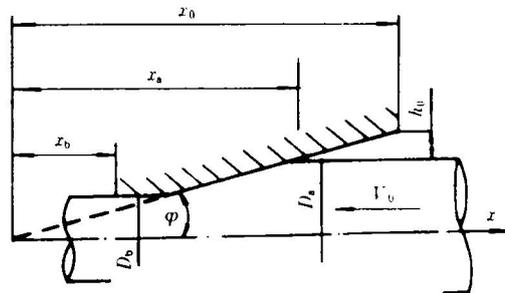
$$\begin{aligned} 1 - \exp[-\alpha(\sigma_0 - \sigma_{za})] = & \int_{h_0}^{h_a} \frac{6\alpha\eta_0 V_0 \exp[-\delta C_1 \exp(-C_2(\frac{h-h_0}{\tan \varphi}))]}{h^3 \tan \varphi} \\ & \times (h - h_a) dh \quad (15) \end{aligned}$$

上式即为入口 a 点油膜厚度 h_a 的一元方程，显然，求其分析解是不可能的，在此采用 Simpson 法则^[4] 对其进行编程数值求解。塑变区膜厚 h' 按 Dh_a/D_a 大小线性变化，塑变结束点处膜厚 h'_b 为 $\frac{D_b}{D_a} h_a$ ，出口膜厚 h_b 为^[5]：

$$h_b = \frac{h'_b}{1 + \sqrt{\bar{C}}} \quad (16)$$

式中 \bar{C} 为与工艺参数有关的常数

运用上述膜厚模型对一拉拔实例参见附图进行理论计算与实测结果(秤重法测量)对比见表1，两者吻合性很好。



附图 拉拔示意图

表1 膜厚理论计算与实测结果对比

拉拔工艺		工件(铜材)性能参数	
r_a	0.024 m	σ_0	100×10^6 Pa
r_b	0.020 m	C_b	8960 kg/m ³
V_0	0.5 m	ρ_b	393 J/(kg · °C)
φ	7°	K_b	393 J/(m · s · °C)
润 滑 剂			
38# 汽缸油		T603	
η_0	1.2 Pa · s	η_c	2.9 Pa · s
α	2.5×10^{-8} Pa ⁻¹	α	2.3×10^{-8} Pa ⁻¹
δ	0.013 °C ⁻¹	δ	0.011 °C ⁻¹
膜 厚 $h_0/\mu\text{m}$			
	38# 汽缸油	T603	
计算值	0.23	0.79	
实测值	0.22	0.77	

2 一般工况下拉拔润滑状态分析

有色金属管、棒拉拔工艺条件如表2所示^[6,7]。据此可由(15)式求得变形率为30%(各种工艺下变形率平均值)时拉拔塑变入口的油膜厚度最大和最小值,结果如表3。

表2 有色金属管棒拉拔工艺条件

拉拔速度/m · s ⁻¹		模角(2φ)/(°)		润 滑 剂 运动粘度(40°C)/cSt				
直管	盘管	棒	铝	紫铜白黄铜	直拉铜及其合金	直拉铝及其合金	盘式拉拔	盘式
0.1	0.7	0.1	11	8	6	20	500	1000
~0.8	~9.6	0.6	~32	~22	~18	~50	~1000	~4500

表3 不同工艺条件下拉拔入口膜厚 h_0 (μm)

	直 管			盘 管			棒		
	紫铜	黄铜	白铜	铝	紫铜	紫铜	黄铜	铝	
h_{0max}	0.072	0.081	0.063	1.265	61.152	0.035	0.046	1.025	
h_{0min}	<0.001	<0.001	<0.001	0.098	0.296	<0.001	<0.001	0.021	

一般拉拔过程综合表面粗糙度($\sqrt{A^2 + B^2}$, A、B分别为工件和模具表面粗糙度)均大于0.4 μm,从表3计算结果可知,在目前一般拉拔工艺条件下,直链拉拔只有在拔铝时才可能出现混合润滑(膜厚比>0.8);而对铜合金,就是在最好的条件匹配时,也是处在边界润滑状态(膜厚比<0.8),拉紫铜盘管时,由于具有两个有利条件,即高的拉拔速度和润滑剂粘度,使其出现全膜润滑($h/\delta > 3$)的可

能性很大。

3 适用混合膜润滑粘度条件探讨

使拉拔过程处于全膜润滑状态是较理想的,由此可减小拉拔能耗和模耗,提高产品质量和生产效率。

目前国外有采用静压或动压装置增强拉拔润滑成膜能力的方法,但由于增加此装置后有碍加工过程操作和膜具更换,故未能普遍推广应用,而依赖提高润滑剂粘度来增强动力成膜性是较直接的方法。

但要达到拉拔过程全膜润滑,润滑剂粘度(40°C)须大于10 000cSt以上^[2],如此高的粘度,润滑剂不能泵送,使用极不方便,在实际生产中难以推广。因而在润滑剂研制中满足拉拔过程具有混合润滑条件是较现实的目标。现以混合润滑膜厚比上限和下限的平均值1.4作为设计目标,并将拉拔工艺参数的上下限均进行平均,然后通过上述膜厚模型用计算机计算拉拔过程混合润滑所需润滑剂粘度条件,计算条件及结果见表4。

表4 拉拔平均工艺参数及混合润滑粘度条件

	紫 铜	黄、白铜	铝及其合金
$\bar{\sigma}_0 / 10^6$ Pa	65	120	80
$\bar{2\varphi} / (^\circ)$	15	12	21
$\bar{V}_{0管} / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.45	0.45	0.45
$\bar{V}_{0棒} / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.35	0.35	0.35
$\bar{v}_{拉管} (40^\circ\text{C}) / \text{cSt}$	1386	2904	4210
$\bar{v}_{拉棒} (40^\circ\text{C}) / \text{cSt}$	1723	3689	5225

从计算结果可知,对有色金属拉拔,满足混合润滑的润滑剂粘度均较高,但仍可以泵送。上述计算结果也与进口油粘度指标相符,如牌号为Masterdeaw 566的拉拔油:英国油粘度为4 298 cSt,日本油粘度为1 685 cSt(40°C)^[8]。因此在研制拉拔润滑剂时,润滑剂粘度根据工艺条件不同一般在1 000 cSt~5 000 cSt范围内为宜,这样既可以满足较好的润滑,又可保证使用方便。

4 结 论

(1) 考虑热效应所建立的拉拔润滑膜厚度计算模型逼近于真实润滑状态。

(2) 一般条件下的拉拔过程,除盘管拉拔和铝材拉拔可能出现混合或全膜润滑外,大部分情况均处于边界润滑状态。

(3) 满足拉拔过程处于全膜润滑的润滑剂粘度在 10 000 cSt(40 ℃)以上,工业应用极不方便,适用的润滑剂粘度是使拉拔处于混合膜润滑状态,不同工艺条件下满足混合膜润滑的粘度值(40 ℃)一般在 1 000 cSt~5 000 cSt 范围内。

参考文献

- 1 谭建平. 博士学位论文,中南工业大学,1993.
- 2 严宏志. 博士学位论文,中南工业大学,1994.
- 3 温诗铸. 摩擦学,北京:清华大学出版社,1990.
- 4 Philip J. Pavis. 数值积分法. 北京:高等教育出版社,1986, 33.
- 5 孙大成. 润滑力学讲义. 北京:中国友谊出版社,1991, 413.
- 6 马怀宪. 金属塑性加工学. 北京:冶金工业出版社,1991, 174.
- 7 埃尔马诺克 M·3, 亚特鲁中 π·C. 有色金属拉伸,北京:冶金工业出版社,1988.
- 8 陈声强. 铜加工,1991,(4): 163.

· 会议消息 ·

国际岩石力学与工程新进展

学术会议最近在东北大学成功召开

由中国岩石力学与工程学会东北分会和东北大学联合发起,由东北大学和沈阳市科协联合主办的国际岩石力学与工程新进展学术会议(简称 NDRM'94)于 1994 年 10 月 10—12 日在东北大学举行。从 1993 年 10 月发出第一轮通知以来,会议组委会得到了十多个国家论文作者的热烈响应,并收到了 200 多篇论文,经二轮审查后,录用了 130 篇,由东北大学出版社出版了英文论文集。

参加会议的国内代表 112 人,国外代表 14 人,共计 126 人,分别来自美国、英国、法国、日本、波兰、挪威、瑞士、南非、香港、中国等国家和地区。

会议内容涉及岩石工程稳定性分析、支护与施工;人工智能、系统科学在岩石力学中的应用;数值分析与计算机仿真;实验与现场测试技术;岩石力学基础理论研究等五个方面。

这次会议表明,世界各国的岩石力学与工程研究有了很大的发展,新进展主要表现为:提供了新颖的以近代数学为依据的岩石分类方法;数值模型由确定性向非确定性转化;神经网络、专家系统、自适应分析、系统识别等现代化研究方法熔入学科;损伤、分形、突变等理论应用于失稳研究初见成效;岩石具有记忆性,开挖结构具有自组织、自稳定能力等新概念更加明确;地震层析方法、集成矿震系统等先进的测试手段揭开了岩体内部的缺陷与差异,一种新的位移理论解丰富了岩石力学理论,岩体稳定性分析与大量的施工经验展示了岩石力学学科广阔的应用前景。

(何学锋)