

文章编号: 1001-3806(2010)02-0161-03

## 激光毛化对拉延模表面摩擦学特性的影响

骆志高, 范彬彬, 郭啸栋, 陈堡磊, 庞朝利  
(江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013)

**摘要:** 为了对激光技术在拉延模表面的性能影响进行研究, 从激光毛化微凸体形貌特征及拉延成形中摩擦行为特点的角度, 研究了在拉延成形过程中, 激光毛化表面的摩擦力及由微凸体接触摩擦系数和润滑摩擦系数组成的合成摩擦系数, 建立了摩擦系数与表面微观形貌几何参量之间的映射关系模型, 讨论了激光毛化形貌参量对表面摩擦系数的影响, 并通过采用大量激光毛化摩擦学模拟实验验证该模型的准确性。结果表明, 激光毛化改善了拉延模表面摩擦学特性, 且该模型为进一步研究激光毛化在拉延成形中应用提供了理论依据。

**关键词:** 激光技术; 激光毛化; 映射关系; 摩擦系数

**中图分类号:** TG115.5<sup>+</sup>8      **文献标识码:** A      **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2010.02.005

## The effect of laser texturing on tribology characteristics of drawing die surface

LUO Zhi-gao, FAN Bin-bin, GUO Xiao-dong, CHEN Bao-lei, PANG Chao-li  
(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** In order to study the influence of laser texturing on the performance of a drawing surface, the characteristics of friction behavior and the morphology of laser texturing on the die surface were analyzed. In the view of asperity contacts of laser texturing morphology, the friction coefficient on the laser texturing surface was composed of dry friction and lubrication friction, and the relation model between the friction coefficient and the surface morphology parameters was established, the effect of laser texturing morphology on the surface coefficient of friction was discussed. At last a large number of tribology experiments on laser texturing surface were taken to verify the accuracy of the model. The result shows that laser texturing improved tribology character, and the model provides a theoretical base for further research of laser texturing on drawing mould.

**Key words:** laser technique; laser texturing; mapping relation; friction coefficient

### 引言

在板金属成形过程中, 其成形特性不仅取决于材料本身固有特性(组织、性能), 而且还与成形过程中的摩擦特性密切相关<sup>[1]</sup>。摩擦影响材料的流动, 改变材料的应力应变分布。无论是研究材料成形过程的机理, 还是研究零件的成形性, 或者对零件的成形过程进行有限元的模拟研究, 摩擦都是一个必须加以重视的因素。但是, 影响摩擦行为的因素众多, 既有钢板本身组织、性能及其表面形态的内在因素, 也有压边力、行程曲线等冲压工艺的外在因素, 其中的许多因素对其冲压过程中的影响还并不清楚<sup>[2,3]</sup>。

作者从激光毛化<sup>[4,5]</sup>形貌特征角度出发, 对板料拉

延成形过程中摩擦学特性进行了分析, 得出形成摩擦的原因, 并推导出计算摩擦应力及摩擦系数的公式, 讨论了微观形貌(凸峰几何形貌参量、数量等)对摩擦特性的影响, 最后采用实验验证了该公式的可靠性。

### 1 拉延模成型中摩擦行为特点

在板料拉延成型过程中, 模具与板料表面之间可能存在着相对滑动, 或者存在着板料的塑性流动, 因而不可避免地存在着摩擦。板料拉延成型过程中的摩擦行为存在以下特点: 板料在外载荷的作用下发生连续塑性变形, 并且经常是大塑性变形, 因此, 摩擦应力的大小与板料的变形过程紧密相关; 板料的塑性变形, 使得板料与模具表面之间的接触程度不断增加, 同时由于板料的变形使得板料表面不断产生新鲜金属接触面, 因而其摩擦状态会发生变化。此外, 为了合理控制和改善板料拉延成型时的摩擦状态, 充分利用板料的成型性能, 常常会在模具与板料接触面之间加入润滑剂。根据接触表面润滑膜厚度与粗糙度的相对大小, 可以将摩擦状态分为完全流体润滑、边界润滑和混合

作者简介: 骆志高(1953-), 男, 博士, 教授, 主要从事模具结构分析与优化设计、模具质量检测及诊断技术以及机械故障诊断等方面的研究。

E-mail: Lzg3359@163.com

收稿日期: 2009-02-18; 收到修改稿日期: 2009-03-23

润滑。

## 2 拉延模表面激光毛化表面形貌特征

采用波长为 1064nm、脉冲宽度为 4ms 的灯抽运 Nd:YAG 脉冲激光器<sup>[6]</sup>在拉延模表面进行毛化,球冠状毛化体由一个环形坑和一个半球状微凸体组成,由于微凸体上部出现了淬火效应,使得其硬度远远大于材料基体硬度;其硬度在 HV1200 左右,有利于提高表面的耐磨性。

一般来说,利用激光毛化处理的拉延模表面形貌和传统表面改型不一样,往往带有一定的规律性和周期性,图 1a 所示为激光毛化形貌在拉延模单元体表面分布,图 1b 所示为板料与激光毛化表面基础模型。其中, $L, w$  为球冠状微凸体间距, $D$  为微凸体直径, $h$  为微凸体高度, $h'$  为板料与模具之间的间距。

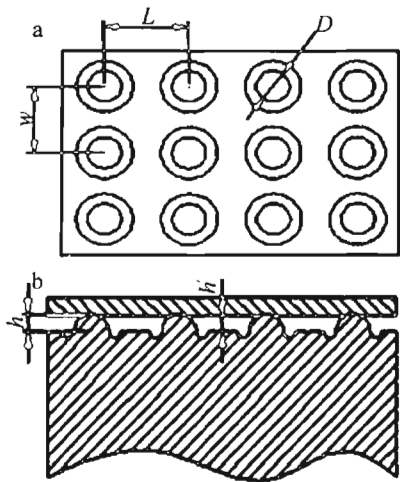


Fig. 1 The distribution and contact model of the laser texturing morphology  
a—distribution of laser texturing b—contact model between laser texturing surface and sheet

## 3 激光毛化表面摩擦学特性分析

### 3.1 激光毛化表面力学模型分析

拉延成形时,当板料与拉延模具相互接触发生摩擦时,由于激光毛化球冠状形貌的影响,在显微镜下观察,实际上两表面总是从球冠状微凸体开始接触,因此,真实接触面积是名义接触面积很小的一部分。由于激光毛化后形成的球冠状形貌具有较高的硬度,在发生塑性变形时,近似认为其是不变的,而板料则在压边力的作用下产生弹塑性变形。因此,摩擦特性不仅与摩擦体的性能和周围润滑介质的性质相关,还受摩擦体自身几何形貌特征的影响。

激光毛化表面摩擦接触模型如图 1 所示,在良好润滑条件下,施加在摩擦副上的载荷主要由发生接触的微凸体和流体膜来承担。所以,作者研究了微凸体

接触摩擦和流体剪切共同作用时各自的摩擦系数,合成摩擦系数应该等于其摩擦系数之和。那么当考虑微凸体摩擦与液体润滑摩擦的共同影响时,总的摩擦系数计算公式就变为:

$$\mu = \lambda_1 \mu_1 + \lambda_2 \mu_2 \quad (1)$$

式中, $\mu_1$  为混合摩擦中微凸体接触的摩擦系数; $\mu_2$  为混合摩擦中流体润滑的摩擦系数; $\lambda_1, \lambda_2$  分别为微凸体接触和流体润滑摩擦的加权系数。 $\lambda_1, \lambda_2$  与微凸体和润滑油各自的承载力有关,可通过下式计算得:

$$\lambda_1 = \frac{N_1}{N}, \lambda_2 = \frac{N_2}{N} \quad (2)$$

式中, $N_1$  为微凸体承载的正压力, $N_2$  为润滑油承载的正压力, $N$  为作用在摩擦副上的外载荷(即压边力)。

### 3.2 微凸体接触摩擦的摩擦力及摩擦系数计算<sup>[7]</sup>

如图 2 所示,取一个球冠状微凸体为计算研究模

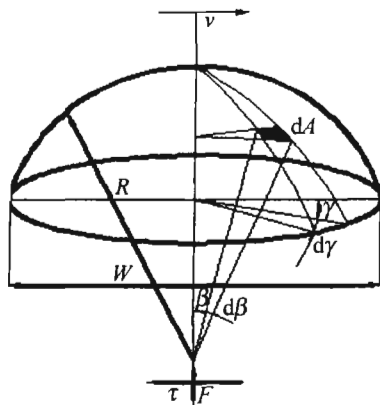


Fig. 2 Ball coronary morphology

型,对球形微凸体模型,由微元受力分析得微元摩擦面积  $dA$ ,正压力  $dF$  和切向力  $d\tau$ ,经积分可得球体部分承受的正压力  $F$  和切向力  $\tau$ 。微元面积  $dA = R^2 \sin\beta d\beta d\gamma$ ,微元正压力  $dF = p \cos\beta dA$ ,微元切向力  $d\tau = p \sin\beta \cos\gamma dA + s \cdot \sin\gamma dA$ 。 $s$  为摩擦表面剪切应力, $p$  为摩擦表面单位正压力。

由于微凸体只有前半部分参与承载和摩擦,积分时只取运动方向前半部分进行。前面分析了激光毛化表面摩擦特性由微凸体接触和润滑剪切作用共同承担,因此,微凸体接触的摩擦系数  $\mu_1$  应与载荷比例相关,可求得:

$$\mu_1 = \frac{\tau}{F} = \frac{2}{\pi} \left( \frac{W}{2R} \right)^2 \left\{ \sin^{-1} \left( \frac{W}{2R} \right) - \left( \frac{W}{2R} \right) \times \left[ 1 - \left( \frac{W}{2R} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{3} \left( \frac{s}{s_m} \right) \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{W}{2R} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \right\} \quad (3)$$

式中, $W$  为界面直径, $R$  为球面半径, $s_m$  为软材料基体剪切强度。 $s$  值取决于摩擦状态,理想干摩擦, $s = s_m$ ;理想边界摩擦, $s$  等于边界膜剪切强度;一般情况下, $s$

介于两者之间。

### 3.3 润滑油剪切的摩擦特性<sup>[8]</sup>

由流体动力润滑和牛顿粘性定律可知,流体层间摩擦应力  $\tau$  与其厚度方向速度梯度  $dv/dz$  成正比,如

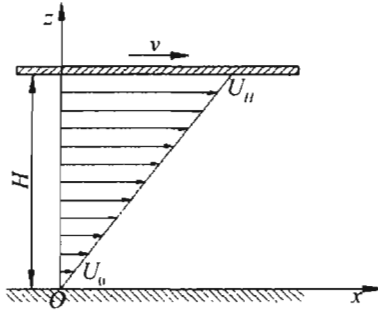


Fig. 3 Velocity model

图3所示,即:

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dz} = \rho \cdot \nu \cdot \frac{dv}{dz} \quad (4)$$

式中,  $\tau$  为内摩擦应力;  $\eta$  为油液动力粘度;  $\nu$  为油液运动粘度;  $\rho$  为油液运动密度;  $\frac{dv}{dz}$  为速度梯度。将上式进行如下假设: (1) 假设真是接触面积以外的区域充满了液体,并且油膜厚度一致,即  $\frac{dv}{dz}$  处处相等; (2)  $U_0 = 0, U_H = v$  ( $v$  表示板料运动速度); (3) 在法兰面内,  $z \ll x, y$ , 可近似  $\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial y} = 0$ , 为无限短近似。

可求得润滑摩擦系数  $\mu_2$  如下:

$$\mu_2 = \frac{F}{N_2} = \frac{U_H \eta}{H} \cdot (A - A_r) \cdot \frac{1}{N_2} \quad (5)$$

式中,  $U_H$  为板料运动速度,  $H$  为油膜厚度,  $N_2$  为润滑油承担的外载荷;  $A$  为表观接触面积;  $A_r$  为真实接触面积。

### 3.4 合成摩擦系数计算公式

当外载荷由微凸体和流体膜共同承担时,研究了微凸体和流体剪切共同作用时各自的摩擦系数,合成摩擦系数应该等于其摩擦系数之和。那么,当考虑微凸体摩擦与液体润滑摩擦的共同影响时,总摩擦系数计算公式就变为:

$$\mu = \lambda_1 \mu_1 + \lambda_2 \mu_2 = \frac{N_1}{N} \cdot \frac{2}{\pi} \left( \frac{2R}{W} \right)^2 \left\{ \sin^{-1} \left( \frac{W}{2R} \right) - \left( \frac{W}{2R} \right) \left[ 1 - \left( \frac{W}{2R} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{3} \left( \frac{s}{s_m} \right) \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{W}{2R} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \right\} + \frac{U_H \eta}{H} \cdot (A - A_r) \cdot \frac{1}{N} \quad (6)$$

由上式可以看出,当板料与拉延模具相对静止时,摩擦系数同微凸体接触摩擦时摩擦系数计算结果;当相对滑动速度足够大时,两摩擦面被油膜完全隔离时,摩擦主要来自液体摩擦,摩擦系数就等于流体膜剪应力除

以表观接触压力。

摩擦系数的大小取决与受很多因素,激光毛化表面形貌几何参量、润滑油的粘度、边界膜剪切强度等都对摩擦系数有重要的影响。

## 4 实验验证

摩擦磨损试验在销-盘摩擦试验机上进行,采用 D-180 铁质金属成型润滑油,上试样为 45# 钢圆柱销 (其硬度为 5500MPa, 尺寸  $\varnothing 6\text{mm} \times 10\text{mm}$ ), 下试样为具有激光毛化微凸体表面的单元体 (尺寸  $50\text{mm} \times 30\text{mm}$ ), 固定在下方试样夹持器上。摩擦系数由贴应变片构成的电桥测得的摩擦力信号, 经计算机自动记录并除以正压力而得。实验已知数据为:  $v = 0.28\text{m/s}$ ,  $\eta = 1.030 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

Table 1 The parameters of morphology on laser texturing surface

test number	1	2	3	4	5	6	7	8	9
radius/ $\mu\text{m}$	150	150	150	250	250	250	350	350	350
distance/ $\mu\text{m}$	150	250	350	150	250	350	150	250	350
height/ $\mu\text{m}$	20	30	10	20	30	10	20	30	10

实验中测得的摩擦系数结果及由合成摩擦系数 (6) 式中计算的数值结果如表 2 所示。可见: (1) 拉延

Table 2 The friction of experiment result and calculation

test number	1	2	3	4	5	6	7	8	9
test results	1.11	1.08	1.02	1.1	1.01	0.98	1.24	1.18	1.06
calculation results	1.15	1.10	1.05	1.12	1.04	1	1.28	1.21	1.08

模塑性成型过程中,激光毛化后的模具与板料的真是接触面积是很小的,产生滑动的摩擦力与投影面积无关; (2) 良好的润滑剂可以减少真实的接触面积,这主要取决于外力的大小、材料的机械性能及润滑状况等。

## 5 结论

(1) 数值计算及实验结果表明,激光毛化表面形貌参量对摩擦特性有重要影响,微凸体减小了表面形貌接触面积及改善了表面润滑作用,为表面提供了较好的油膜作用,从而改善了摩擦特性。

(2) 通过实验与计算结果对比,计算与实验结果取得了较好的吻合,表明本文中所采用的计算模型可以对不同工况下激光毛化表面形貌的摩擦阻力进行预测。

(3) 通过对激光毛化表面形貌的分析以及对摩擦过程中微观变化的了解,得出摩擦力由微凸体接触摩擦剪切阻力 (粘附力、犁沟力、润滑膜) 及润滑剂的流动阻力组成,并通过实验验证了该数学模型的准确性。

(下转第 209 页)

干涉信号才是明显的;(4)激光波长为532nm时,补偿镜的幅值反射率应在目标镜反射率的0.3倍~0.6倍之间。

总之,通过在自混合干涉系统中加入补偿镜,克服了原来自混合干涉系统的诸多缺点,对的自混合干涉实验是一个极大的帮助,也为自混合干涉测量的实用化提供了有益的参考。

#### 参 考 文 献

- [1] ZHANG Y, YAO J Q, WANG P, *et al.* Study on self-mixing interference effects in the LD pumped multi-mode solid-state laser[J]. Transactions of Tianjin University, 2003, 9(4):261-263 (in Chinese).
- [2] ZHANG Y, YAO J Q, WANG P, *et al.* Study on self-mixing interference effects in LD pumped single-mode green laser [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2003, 14(7):679-682 (in Chinese).
- [3] PAONE N, SCALISE L. Advances in self-mixing vibrometry [J]. Proc SPIE, 2001, 4204:103-114.
- [4] YU Y G, YE H Y, YAO J Q. Self-mixing interference effects in a multi-mode LD: experimental observation and theoretical analysis [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2002, 13(11):1190-1193 (in Chinese).
- [5] SHIMIZU E T. Directional discrimination in the self-mixing type laser doppler velocimeter[J]. Appl Opt, 1987, 26(2): 4541-4544.
- [6] ZHANG Y, YU Y G, YAO J Q, *et al.* Analysis of self-mixing interference signals in LD pumped solid-state lasers using fast Fourier transform technique[J]. Proc SPIE, 2002, 4919:488-492.
- [7] ZHANG Y, YAO J Q, XU K X, *et al.* New study on self-mixing interference effects in LD pumped laser[J]. Proc SPIE, 2005, 5628: 263-270.
- [8] WANG W M, BOYLE W J, GRATAN K T V, *et al.* Self-mixing interference in a diode laser: experimental observations and theoretical analysis[J]. Appl Opt, 1993, 32(9): 1551-1558.
- [9] LI Sh Y, YU Y G, YE H Y, *et al.* The estimation of the parameters in the model of the selfmixing effect in semiconductor lasers[J]. Laser Technology, 2005, 29(5): 519-521 (in Chinese).
- [10] YU Y G, GUO Ch Y, YE H Y, *et al.* Pre-processing for the optical feedback self-mixing interferometric signal, feedback [J]. Laser Technology, 2008, 32(3): 265-268 (in Chinese).
- [11] YAN Y X, YU Y G. An improved algorithm for estimating parameters of semiconductor lasers [J]. Laser Technology, 2008, 32(4): 353-356 (in Chinese).

(上接第163页)

#### 参 考 文 献

- [1] JANG J H, KIM W T, VAN TYNE C J, *et al.* Experimental analysis on the frictional behaviour of drawbeads in sheet metal forming [J]. Steel Research International, 2007, 78(12):884-889.
- [2] PETEK A L, PODGORNİK B, KUZMAN K, *et al.* The analysis of complex tribological system of single point incremental sheet metal forming—SPIF [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 54(4): 266-273.
- [3] WANG Zh J, LIU J G. Frictional contact problems in sectional finite element analysis of sheet metal flexible-die forming process [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(5): 155-159 (in Chinese).
- [4] BARBER G C, GAO H, TUNG S C. Experimental study on the friction characteristics of lasertex steel sheets during metal forming process [J]. Tribology Transactions, 2005, 48(2):245-249.
- [5] DONG G N, ZHANG J F, YANG H B, *et al.* The performance of friction on super-elastic TiNi alloy surface by laser texturing [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(3): 444-447 (in Chinese).
- [6] HE Y F, DU D, LIU Y, *et al.* Parametric analysis of pulsed Nd:YAG laser texturing process [J]. Laser Technology, 2003, 27(1):8-13 (in Chinese).
- [7] LI B H. Influence and mechanism of surface topography on friction characteristics of wet clutches [D]. Beijing: Mechanical Institute of Science and Technology, 2006:72-93 (in Chinese).
- [8] ZHANG Zh H, HE Zh, ZHAO Zh D, *et al.* Study on mechanical model of friction in metal forming [J]. Lubrication Engineering, 2004(1):4-7 (in Chinese).