

不锈钢光纤激光毛化及其摩擦性能

符永宏, 王浩, 杨烨刚, 符昊, 华希俊

(江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: **目的** 研究光纤激光毛化应用于模具表面,改善其摩擦特性的可行性。**方法** 采用单因素变化法,研究激光功率、脉宽、频率、离焦量对毛化形貌的影响规律,分析毛化区域的显微硬度,并对不同形貌的毛化试样和光滑试样的摩擦性能进行对比。**结果** 匹配特定的参数,可获得火山口形貌或球冠状形貌。毛化区域的硬度相对基材提高显著,最大提高了近4倍。同时,在模拟冷冲压拉深模具低速重载工况的摩擦实验中,毛化试样的摩擦系数比光滑试样大,同时随着毛化点直径、间距的增大,摩擦系数相应减小。**结论** 激光毛化技术可对材料表面进行改形改性,能够用于优化模具表面摩擦特性。

关键词: 光纤激光毛化; 毛化形貌; 显微硬度; 摩擦特性

中图分类号: TG156.99; TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)01-0096-06

Experiment Research on Fiber Laser Texturing of Stainless Steel and Its Friction Properties

FU Yong-hong, WANG Hao, YANG Ye-gang, FU Hao, HUA Xi-jun

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

ABSTRACT: **Objective** To investigate the feasibility of fiber laser texturing on the mold surface and the improvement of the friction properties. **Methods** Using single factor variation method, the influencing laws of the power, pulse width, frequency, and defocus amount on different textures were investigated, and the hardness of the textured topography was also measured. Meanwhile, the friction properties of stainless steel samples with different surface textures disposed by laser texturing as well as smooth samples were comparatively investigated. **Results** It showed that textures such as crater shape and sombrero shape texture topography could be obtained by certain laser parameters and supplementary parameters. The hardness of the textured points was significantly increased, and the maximum value was nearly four times the hardness of the matrix material. During the friction experiment, compared with smooth samples, the friction coefficients of samples with different surface textures were higher under the low speed and heavy load condition to simulate drawing mold. With the increase of the diameter and spacing, the friction coefficient decreased. **Conclusion** Laser texturing could make a change to surface topography and property, and could therefore be used to optimize the surface friction properties of molds.

KEY WORDS: fiber laser texturing; textured topography; micro-hardness; friction properties

收稿日期: 2014-08-03; 修订日期: 2014-09-18

Received: 2014-08-03; Revised: 2014-09-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51175233, 51375211); 高等学校博士学科点专项科研基金(20113227110016); 国家重大科技成果转化项目(20604033)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51175233, 51375211), Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20113227110016) and the Major National Science and Technology Achievement Transformation Project (20604033)

作者简介: 符永宏(1965—), 男, 江苏人, 博士, 教授, 主要从事摩擦润滑理论及激光应用技术研究。

Biography: FU Yong-hong (1965—), Male, from Jiangsu, Ph. D., Professor, Research focus: friction lubrication theory and laser application technology.

激光毛化是利用高能量、高频率激光脉冲照射材料表面,材料吸收光能并在极短的时间内发生局部熔化、凝固、部分气化,表面形成规律的几何形貌和分布,从而达到对材料进行改形改性的目的。自 20 世纪 80 年代初以来,国内外研究人员对激光毛化的机理、工艺进行了大量研究。国外,IBM 研究发现^[1],改变激光能量可以改变毛化形貌,进而增加磁盘的储存密度;S. C. Chen^[2],T. D. Bennett^[3]等分析研究了球冠状、火山口状和 W 状毛化形貌各自的形成机理。国内,清华大学刘莹等^[4]用 YAG 脉冲激光毛化设备研究了 GCr15 钢表面粗糙度对毛化点形貌的影响;许伯强等^[5]数值模拟了激光与铝的相互作用时,熔池表面张力梯度对 Marangoni 对流的影响;张瑞华等^[6]研究了光纤激光射出头姿势和侧吹角度对毛化点形貌、毛化后轧辊表面粗糙度的影响,总结出最佳毛化工艺,并已应用到实际生产。

金属塑性成形过程中的模具与工件之间常伴随剧烈的摩擦磨损,模具磨损严重,寿命缩短。激光熔覆^[7-8]、电火花沉积^[9-10]等表面技术常被用于强化模具,这大大提高了模具的使用寿命。另外,国内外研究人员还对模具材料^[11-12]、结构设计^[13]、润滑介质^[14-15]等方面进行了研究。受激光毛化轧辊的启发,文中提出将毛化技术应用到金属塑性成形模具的改形改性中,并对不同形貌的毛化试样与光滑试样进行了摩擦特性对比。

1 实验

1.1 光纤激光毛化

采用 FLR-MH-400-2 型光纤激光毛化系统,如图 1 所示。该系统主要包括 SPI 光纤激光器及水冷系统、数控车床、侧吹气系统和激光头保护气系统等。SPI 光纤激光器特性参数为:最大平均输出功率 400

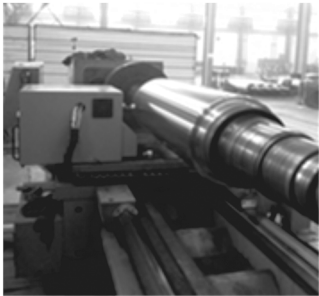


图 1 光纤激光毛化系统

Fig. 1 Fiber laser texturing system

W,准直光束直径 5.0 mm,脉冲频率范围 1 ~ 100 kHz,激光波长 1070 nm,最小脉冲宽度<10 ms,激光束发散角<0.45 mrad,功率不稳定性<3%。

试样选用直径 89 mm,长 800 mm,壁厚 4 mm,表面粗糙度 $Ra=0.1\text{ }\mu\text{m}$ 的 304 不锈钢钢管,未经其他表面热处理,硬度达 225HV,毛化前表面经过精磨处理。

为研究激光工艺参数(激光功率、频率、离焦量)及辅助工艺参数对毛化形貌的影响,采用单因素变换法,设计了改变激光功率、频率及离焦量的 12 组实验,以保证结果的准确性。激光毛化时,首先使激光射出头垂直于顺时针转动的轧辊某位置,同时保证侧吹气体方向相对于激光束夹角为 45°不变。加工工艺如下:侧吹气体和保护气体均为压缩空气,前者压力为 0.4 MPa,后者压力为 4.5 MPa,车床转速为 200 r/min,离焦量分别为-3,-2,-1,0,1,2 mm,激光功率分别为 100,150,200,240 W,脉冲频率分别为 3,4,5 kHz。每次加工的轴向距离为 5 mm,以保证后续的检测。

1.2 表征及检测

毛化结束后,将试样线切割成不同小块,经金相砂纸打磨(去除熔渣)、丙酮超声波清洗后,用基恩士 VHX-1000C 超景深显微镜检测试样表面的毛化点形貌及尺寸。检测后,选取具有代表性的形貌进行端面剖切,经过粗磨、精磨、抛光、王水腐蚀等一系列工序后,在 HXD-1000TMB/LCD 视屏显示自动转塔数显显微维氏硬度计上测量毛化点及基材的显微硬度,载荷为 100 g,加载时间为 15 s。

按表 1 参数加工出摩擦磨损试验要求的不同毛化试样,外观见图 2。采用自行设计的摩擦副进行往复运动,如图 3 所示,上试样固定不动,下试样在旋转电机的带动下做往复直线运动,往复长度为 15 mm。润滑剂采用 30#机械润滑油,室温下运动黏度为 98 mPa·s。

表 1 激光参数及毛化点分布

Tab. 1 Laser parameters and distribution of texturing points

编号	功率 /W	离焦量/mm	频率 /kHz	周向间距/ μm	轴向间距/ μm
1	200	0	3	150	100
2	200	0	3	150	200
3	200	0	3	150	400
4	200	0	3	150	150
5	200	2	3	150	150



图 2 摩擦磨损试样

Fig. 2 Test specimens with friction and wear

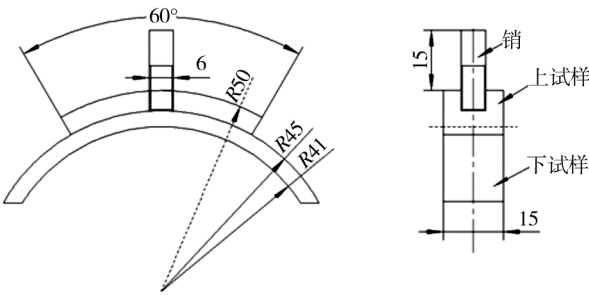


图 3 摩擦副接触方式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the contact mode of friction pairs

整个摩擦过程在室温下进行,保持富油状态。摩擦实验前,各试样均在载荷 10 N、转速 80 r/min 的工况下磨合 5 min,待摩擦系数稳定后再进行正式的摩擦实验。摩擦实验的目的在于对比低速重载工况下,不同形貌毛化试样与光滑试样的摩擦特性。

2 结果与分析

2.1 毛化形貌的形成过程及机理分析

显微镜分析发现,实验中获得了一种不同形貌的毛化点,分别是火山口毛化形貌和球冠状毛化形貌,如图 4 所示。

激光毛化是一个复杂的激光与物质相互作用的物理化学过程,毛化点形成的关键在于熔池,本试验中熔池里的液态金属同时受到了侧吹气体压力、重力、离心力及等离子体作用力。材料表面的激光照射部位会形成金属熔池,液态金属存在的表面张力能够使熔池中的金属形成 Marangoni 对流,其流速为每秒毫米级,并且表面张力是 Marangoni 对流的驱动力,而表面张力随温度的变化率决定了对流的方向。金属熔池中还有一种对流叫作自然对流。在激光毛化过

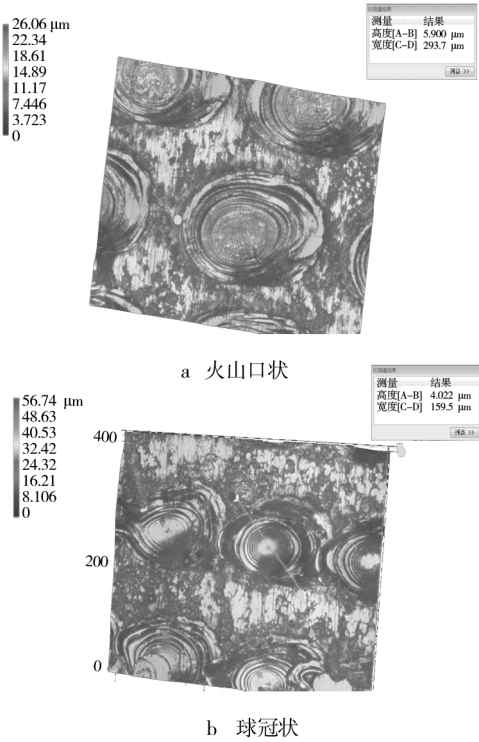


图 4 毛化形貌

Fig. 4 Laser texturing topography

程中,自然对流的驱动力为金属状态发生变化引起的惯性力,其流速为每秒毫米量级。在不考虑辅助气体时,Marangoni 对流起主要作用。

纯金属的表面张力变化率 $\psi < 0$, 并且是恒定不变的常数。当纯金属加入适当的活性元素,其符号有可能发生改变。当 $\psi < 0$ 时,液态金属从中间向边缘流动;当 $\psi > 0$ 时,金属溶液又从边缘流向中间。实验所用不锈钢试样的硫元素质量分数约为 0.03%, 磷元素质量分数约为 0.035%, 这两种元素作为表面活性元素,可以改变表面张力变化率的符号,即熔池低温处表面张力较小,而高温处表面张力较大。光纤激光的入射光是高斯光束,因此金属材料表面的温度呈高斯分布,即中间温度高,周围温度低,在表面张力的作用下,液态金属向中心流动,就形成了球冠状毛化形貌,如图 4b 所示。侧吹气体采用的是压缩空气,氧气有助燃和氧化的作用,导致在熔池表面形成了一层氧化物。这些氧化物作为表面活性剂,也能够改变熔池内流体流场,最终改变形貌。氧气的助燃效果使得熔池表面温度变高,表层氧化物发生局部流动,这就使熔池表面形成了表面活性剂浓度梯度,使得材料向相反方向流动,即由中心向四周流动。同时,温度梯度也对表面张力存在影响。温度梯度和表面活性剂浓度

梯度的共同作用决定着最终形成的毛化形貌,当表面活性剂浓度梯度占优势时,液态金属从中心往四周流动,从而形成火山口状形貌,如图 4a 所示。

2.2 加工参数对火山口形貌尺寸的影响

激光工艺参数对毛化点的形状和尺寸有着显著的影响,文中以火山口状形貌为研究对象,研究离焦量、重复频率和脉宽对其尺寸的影响,图 5 为火山口状示意图。

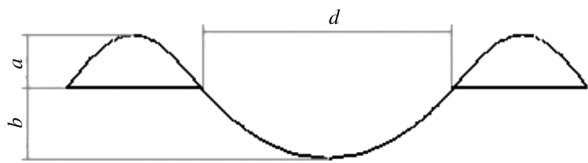
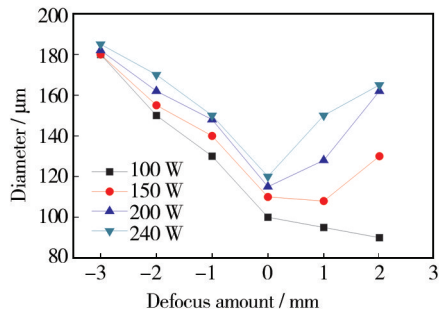


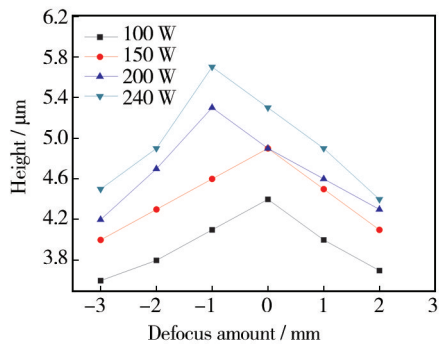
图 5 火山口状示意图

Fig. 5 Schematic diagram of crater shape texture topography

如图 6 所示,随着离焦量的增大,凹坑直径先减小,后增大,而凸起高度则是先增大,后减小。采用相同的离焦量时,凹坑直径和凸起高度都随着功率的增大而增大。凹坑直径最小值基本出现在离焦量为 0 的位置,凸起高度峰值基本出现在离焦量-1 ~ 0 mm 之间的位置,说明该激光器真正的焦平面位于-1 ~ 0



a 凹坑直径



b 凸起高度

图 6 离焦量对火山口形貌尺寸的影响

Fig. 6 Effect of defocus amount on the size of the crater shape texture

mm 之间。由此可以看出,通过优化离焦量及功率这两个参数,可以获得理想的形貌尺寸。

如图 7 所示,随着重复频率从 3 kHz 增加到 5 kHz,毛化点直径从 114 μm 减小到 98 μm,变化幅度不大。毛化点直径主要由激光单脉冲能量决定,当重复频率增加时,单脉冲能量减小,毛化点直径亦随之减小。

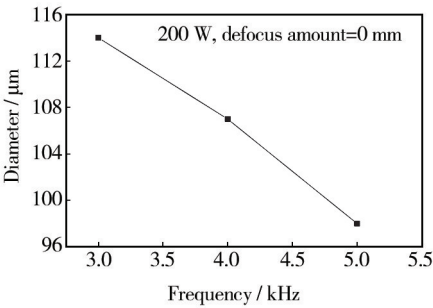


图 7 凹坑直径随频率的变化规律

Fig. 7 Variation of pit diameter with frequency

图 8 为激光频率为 3 kHz,离焦量为-3 mm 时,毛化点凹坑直径和凸起高度随脉冲宽度的变化规律,可见二者均随脉冲宽度的增大而增大。这是因为脉冲宽度增大,激光与金属材料的作用时间延长,金属材料吸收的能量相应增加,有更多的金属被熔化,从而毛化点的直径和凸起高度都有所增加。

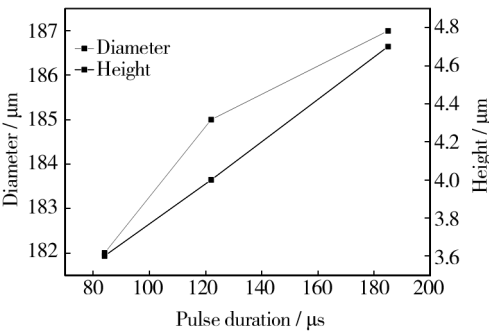


图 8 凹坑直径和凸起高度随脉宽的变化规律

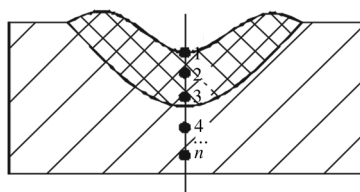
Fig. 8 Variation of pit diameter and bump height with pulse width

2.3 毛化点的硬度

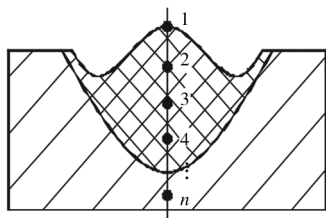
毛化点硬度的检测位置见图 9,测试结果见图 10。对于火山口形貌及球冠状形貌的毛化点,重熔区的硬度相比基材都有所提高,最大硬度提高近 4 倍。同时,随着深度的增加,硬度先增大,后逐渐减小。

分析表明,相对于基体材料,毛化点晶粒更细小,金相组织更致密,从而硬度得到大幅提高。这是因为激光毛化是熔凝造型,加热、冷却均在极短时间内完

成,形核率大。硬度最大值位于重熔区与基材分界线处^[16]。



a 火山口形貌



b 球冠状形貌

图 9 显微硬度的测量位置

Fig. 9 Testing points of micro-hardness

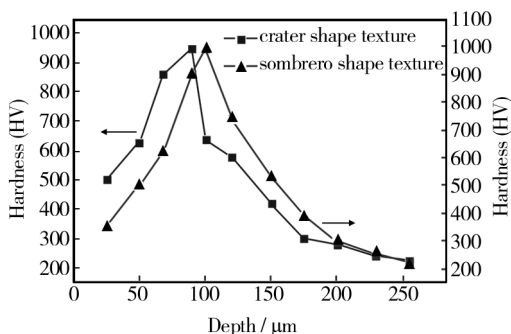


图 10 毛化点硬度变化曲线

Fig. 10 The hardness distribution of the textures along the depth direction

2.4 毛化点直径及间距对摩擦系数的影响

在载荷 30 N、速度 70 r/min 的条件下进行摩擦实验,如图 11 所示,激光毛化试样的摩擦系数明显大于光滑试样。原因在于,激光对试样表面进行处理,材料快速熔凝,不仅表面的形貌有所改变,形成了规则分布的硬化点,而且金相组织也发生了改变,剪切强度增加,形成了凸起的毛化点,犁沟效应明显。比较毛化直径不同的试样的摩擦系数可知,直径越大,摩擦系数越小。这是因为在其他条件不变的情况下,毛化点直径越大,试样表面受到激光硬化的耐磨组织越多,同时凹坑体积越大,能够储存更多的磨粒,提供更多的润滑油。

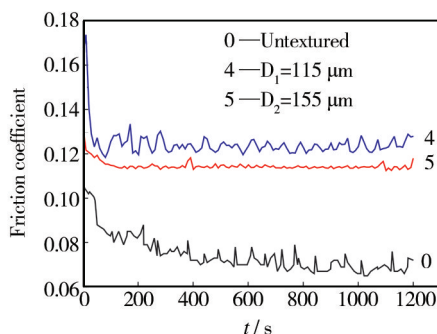


图 11 毛化点直径与摩擦系数的关系

Fig. 11 Relationship between diameter of texturing point and coefficient friction

如图 12 所示,随着毛化点间距的增加,摩擦系数逐渐减小。这是由于间距增大,光滑面积与毛化面积比增大,力矩变小的缘故。毛化表面摩擦系数高于未毛化试样,同时毛化区域硬度显著提高,这证明激光毛化可以应用到模具表面需要提高摩擦性能的区域,对提高模具的寿命及改善成形件性能是有益的。

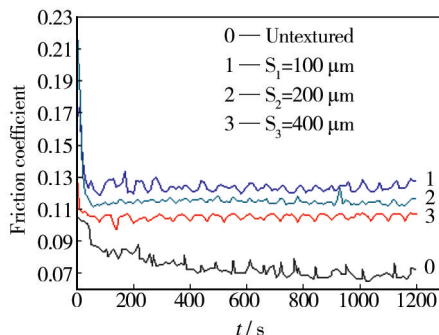


图 12 毛化点间距与摩擦系数的关系

Fig. 12 Relationship between spacing of texturing points and friction coefficient

3 结论

1) 温度梯度和表面活性剂浓度梯度决定了最终的毛化形貌。对于 304 不锈钢而言,当表面活性剂浓度梯度占主导因素时,形成火山口状形貌;当温度梯度占主导因素时,形成球冠状形貌。

2) 激光参数对毛化形貌的影响显著。随着离焦量的增大,凹坑直径先减小后增大,凸起高度则先增大后减小;随着重复频率的增大,凹坑直径减小;随着脉宽的增大,凹坑直径及凸起高度都呈现增大趋势。

3) 相对于基材,毛化区域材料更加致密,硬度大幅提高。毛化区域的硬度在深度方向上逐渐提高,最大提高接近 4 倍。

4) 毛化后的摩擦系数较毛化前有所提高,同时随着毛化点直径和间距的增大,摩擦系数减小。激光毛化可以用来优化模具表面的摩擦特性,提高模具使用寿命,改善成形性能。

参考文献

- [1] LEE S, NIAZI S, YEO C D. The Change in Surface Properties of Magnetic Recording Media under Pulsed Laser Application[J]. Tribology Letters, 2012, 47(1): 57—65.
- [2] CHEN S C, CAHILL D G, GRIGOROPOULOS C P. Melting and Surface Deformation in Pulsed Laser Surface Micromodification of Ni-P Disks[J]. Journal of Heat Transfer, 2000, 122: 107—112.
- [3] BENNETT T D, KRAJNOVICH D J, GRIGOROPOULOS C P. Marangoni Mechanism in Pulsed Laser Texturing of Magnetic Disk Substrates[J]. Journal of Heat Transfer, 1997, 119: 589—596.
- [4] 刘莹, 陈大融, 杨文言. 轧辊表面微凸体形貌激光毛化技术的试验研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(7): 107—110.
LIU Ying, CHEN Da-rong, YANG Wen-yan. Experimental Investigation of Laser-textured on Roller with Micro-convex Topography[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(7): 107—110.
- [5] 许伯强, 汪昊, 徐桂东, 等. 金属材料中激光产生熔池的数值模拟及应用[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2010(3): 358—362.
XU Bai-qiang, WANG Hao, XU Gui-dong, et al. Numerical Modeling of Laser-induced Molten Pool for Laser Interaction with Metal Material[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2010, 31(3): 358—362.
- [6] 张瑞华, 韩帅, 梁海蛟, 等. 轧辊表面光纤激光毛化工艺研究[J]. 应用激光, 2011(6): 451—455.
ZHANG Rui-hua, HAN Shuai, LIANG Hai-jiao, et al. Study on Fiber Laser Surface Texturing Technology for the Roller[J]. Applied Laser, 2011(6): 451—455.
- [7] 程虎, 方志刚, 赵先锐, 等. NAK80 模具钢表面激光熔覆 Ni 基碳化钨合金涂层的组织和性能[J]. 表面技术, 2011, 40(1): 5—7.
CHENG Hu, FANG Zhi-gang, ZHAO Xian-rui, et al. Microstructure and Properties of Laser Cladding Ni-based Tungsten Carbide Alloy Coating on NAK80 Mold Steel[J]. Surface Technology, 2011, 40(1): 5—7.
- [8] 黄伟容, 肖泽辉. 激光熔覆陶瓷涂层的研究现状[J]. 表面技术, 2009, 38(4): 57—59, 65.
HUANG Wei-rong, XIAO Ze-hui. Current Status of Laser Cladding about Ceramic Coating[J]. Surface Technology, 2009, 38(4): 57—59, 65.
- [9] 罗成, 董仕节, 熊翔, 等. 电火花沉积表面处理技术的应用进展[J]. 表面技术, 2009, 38(4): 53—56.
LUO Cheng, DONG Shi-jie, XIONG Xiang, et al. Application Progress of Electrospark Deposition Surfacing Technology[J]. Surface Technology, 2009, 38(4): 53—56.
- [10] 金君, 董晨竹, 徐东, 等. 电火花沉积 Ni 基金属涂层的摩擦磨损特性[J]. 表面技术, 2011, 40(6): 32—34.
JIN Jun, DONG Chen-zhu, XU Dong, et al. Tribological Properties of Ni-based Coating Prepared by Electrospark Deposition[J]. Surface Technology, 2011, 40(6): 32—34.
- [11] RAMEZANI M, RIPIN Z M, AHMAD R. Numerical Simulation of Sheet Stamping Process Using Flexible Punch[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2009, 223(7): 829—840.
- [12] RAMEZANI M, RIPIN Z M, AHMAD R. Sheet Metal Forming with the Aid of Flexible Punch, Numerical Approach and Experimental Validation[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2010, 3(3): 196—203.
- [13] ZEIN H, EL SHERBINY M, ABD-RABOU M. Thinning and Spring Back Prediction of Sheet Metal in the Deep Drawing Process[J]. Materials & Design, 2014, 53: 797—808.
- [14] BASAVARAJ V, SHEKHAWAT S K, NARASIMHAN K, et al. Constrained Tensile Stretching of Steel Strips under Different Lubrication: Predicting Macroscopic Strain Distributions with Microstructural Inputs[J]. International Journal of Material Forming, 2014, 7(32): 1—13.
- [15] TOMALA A, HERNANDEZ S, RODRIGUEZ RIPOLL M, et al. Tribological Performance of Some Solid Lubricants for Hot Forming through Laboratory Simulative Tests[J]. Tribology International, 2014, 74: 164—173.
- [16] 张春华, 李春彦, 张松, 等. H13 模具钢激光熔凝层的组织及性能[J]. 金属热处理, 2004, 29(10): 14—17.
ZHANG Chun-hua, LI Chun-yan, ZHANG Song, et al. Microstructure and Property of Laser Surface Melt-solidifying for H13 Die Steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2004, 29(10): 14—17.