

文章编号: 1001-3806(2012)06-0814-04

## 激光冲击 20CrNiMo 钢表面微造型摩擦学性能研究

李杨<sup>1</sup> 裴旭<sup>2</sup>

(1. 江苏财经职业技术学院 机械与电子工程系, 淮安 223003; 2. 淮阴工学院 江苏省数字化制造技术重点实验室, 淮安 223003)

**摘要:** 为了探索激光冲击 20CrNiMo 钢表面微造型摩擦学性能, 从表层微观结构和表面宏观形貌两个角度, 研究了激光冲击强化的方法对 20CrNiMo 钢表面摩擦磨损性能的影响。采用激光以不同搭接率搭接冲击 20CrNiMo 钢, 用透射电子显微镜观察激光搭接冲击 20CrNiMo 钢试样表层微观组织结构, 取得了试样表层晶粒状态的照片; 采用 CETR UMT 摩擦磨损试验机对其进行摩擦磨损试验, 取得了试样表面摩擦系数和磨损量的数据。结果表明, 激光冲击强化作用可以导致 20CrNiMo 钢试样表层晶粒细化, 在磨损过程中, 晶粒细化层明显抑制表面疲劳磨损的产生, 从而提高其耐磨性能; 激光冲击搭接率越高, 金属材料表面的摩擦磨损性能越好。

**关键词:** 激光技术; 摩擦磨损; 晶粒细化; 搭接率; 微凹坑

**中图分类号:** TG665 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.06.025

## Investigation on tribological behaviors of surface micro-forming 20CrNiMo steel under laser shock processing

Li Yang<sup>1</sup>, Pei Xu<sup>2</sup>

(1. Department of Electromechanical Engineering, Jiangsu Vocational and Technical College of Finance & Economics, Huaian 223003, China; 2. Jiangsu Province Key Laboratory of Digital Manufacturing Technology, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223003, China)

**Abstract:** In order to study tribological behaviors of surface micro-forming 20CrNiMo steel under laser shock processing (LSP), the effects of LSP on the friction and wear behaviors of 20CrNiMo steel were investigated through observing micro-structure and measuring the macro-surface profile. Firstly, 20CrNiMo was impacted by overlapping LSP in different overlap ratio, and then micro-structure of surface layer was observed through transmission electron microscope, finally, the pictures for surface layer grain state were obtained. Friction and wear test was conducted by CETR UMT Tribometer, surface friction coefficient and wear volume was obtained. The results indicate that grain refinement happens in the surface layer due to LSP impacting 20CrNiMo. Friction and wear can be improved obviously because fine grain in the grain refinement layer can restrain fatigue wear on lubricated sliding wear process effectively.

**Key words:** laser technique; friction and wear; grain refinement; overlap ratio; micro-dimple

### 引言

现代工业和科学技术要求机器向使用寿命长、可靠性好的方向发展。目前世界上有 1/3 ~ 1/2 的能源是以各种形式的摩擦磨损消耗在各类机械传递能量的过程中, 而各种机械零件因磨损失效的也占全部失效零件的一半以上<sup>[1]</sup>, 因此, 非常有必要通过改善摩擦

节约能源降低损耗。20CrNiMo 钢作为较为重要的钢结构件、渗碳零件、压力容器等产品的生产原料, 广泛应用于汽车和重型工程机械关键零部件的制造, 比如汽车中变速系统中的拨叉、采矿车中的采矿爪牙和轴承等。据文献记载<sup>[2-3]</sup>, 拨叉的损坏多为磨损所致。润滑摩擦的过程为钢球与金属表面形成摩擦副, 钢球与金属表面接触面之间形成的楔形间隙使轴颈在回转时产生泵油作用, 将润滑油挤入摩擦面表面之间, 建立起压力油膜, 将两个摩擦面分离开来, 形成液体摩擦支撑外载荷从而避免两个摩擦表面的直接接触和磨损<sup>[4-5]</sup>。

提高材料表面的耐磨性能的方法有很多, 比如表面形变强化、表面热处理、表面化学处理、表面电镀等<sup>[6-7]</sup>。这些方法主要是改变材料表面的微观结构, 导

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2010288); 江苏省光子制造科学与技术重点实验室资助项目 (GZ200901)

作者简介: 李杨 (1980-), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为激光表面改性技术、并联机器人设计理论及应用。

E-mail: zjw1033@126.com

收稿日期: 2012-03-19; 收到修改稿日期: 2012-03-26

致表面产生耐磨性能。通过改变材料表面的形状来提高其磨损性能,比如,目前主要是通过激光表面纹理(laser surface texturing, LST)技术对发动机气缸内壁进行微造型处理,可以使活塞与气缸壁的接触更加紧密,提高润滑效果和汽油的燃烧值,充分地利用汽油的能量,减少有害废气的产生<sup>[8-10]</sup>。这种技术主要是激光直接烧蚀材料表面,以去除材料的方式,在表面加工出特定的形状,其优点在于,制造出的表面形状比较规则;不足之处在于,这种处理方式容易造成破坏表面的微观结构,并且在表面产生拉应力,拉应力会降低材料抗疲劳和耐磨损性能。

近年来激光冲击强化(laser shock processing, LSP)结构金属提高结构件的疲劳性能得到了大量的研究和广泛的应用,主要集中在铝合金、不锈钢、钛合金以及镍基高温合金的强化处理,但是很少有人对激光冲击 20CrNiMo 钢的耐磨损性能进行深入的研究。激光冲击金属导致表层晶粒细可以提高金属表面抗摩擦性能,除了微观分析金属的抗摩擦性能之外,改变其表面形貌也可以促进激光试样抗摩擦的性能。

## 1 试验方法

试样材料为 20CrNiMo 钢,化学成分的质量分数为  $w(C): 0.0018 \sim 0.0023$ ,  $w(Mn): 0.0015 \sim 0.0035$ ,  $w(Si): 0.0070 \sim 0.0090$ ,  $w(S):$  不大于 0.00035,  $w(P):$  不大于 0.00035,  $w(Cr): 0.0040 \sim 0.0060$ ,  $w(Ni): 0.0040 \sim 0.0070$ ,  $w(Cu):$  不大于 0.00030,  $w(Mo): 0.0015 \sim 0.0025$ , 其余为 Fe。试样是直径为 20mm、厚度为 3mm 的圆柱体,并将试样抛光洗净。激光冲击前,将抛光后的试样放入装有乙醇的烧杯中,利用超声波清洗器清洗,除去表面残留的油污、颗粒等杂质;采用厚度为 0.1mm 的专用铝箔(美国 3M 公司)粘贴在试样的抛光面上,作为激光能量的吸收层,利用流水作为激光冲击时的约束层,流水厚度控制在 1mm ~ 2mm 之间。

采用高能脉冲 Nd:YAG 激光器对试样上表面进行搭接冲击,激光光斑直径为 3mm,激光波长为 1064nm,脉宽为 10ns,重复率为 1Hz,冲击区域为正方形冲击区,搭接率和激光冲击路径如图 1 所示。根据以往经验,采用 6J 能量的激光冲击金属材料表面,可以导致微凹坑深度最大化。

试样分为 5 组,分别为激光冲击试样,抛光激光冲击试样 0%、50% 和 75% 搭接率激光冲击试样。抛光激光冲击试样采用砂纸打磨直至试样表面激光冲击产生的微凹坑消失,并使激光冲击面抛光至粗糙度  $R_a <$

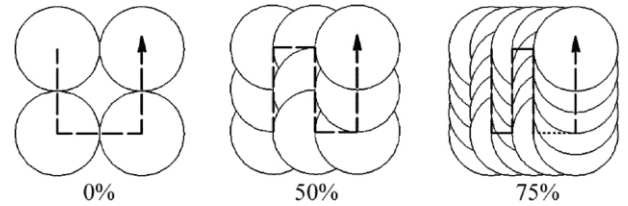


Fig. 1 Schematic diagram of different overlapping rate states and LSP swept direction

0.05 $\mu\text{m}$ 。将 5 组试样在 CETR UMT-2 摩擦磨损试验机上进行滑动摩擦试验,磨损条件如表 1 所示。将磨损后的试样放置丙酮容器中并用超声波清洗,采用透射电子显微镜观察金属表层微观结构,采用 Veeco 表面轮廓仪测量激光搭接冲击试样的微凹坑尺寸。

Table 1 Conditions of friction and wear test

test parameters	values
normal force	40N
rotational speed	200r/min
sliding time	20min
testing track radius	15mm
oil lubrication	base oil HVI750
grinding balls radius	9.5mm

## 2 结果与分析

从图 2 中可以看出,激光搭接冲击 20CrNiMo 在不同搭接率下对于表面摩擦系数的变化,0% 搭接率激光冲击试样的摩擦系数波动较大,摩擦系数变化不平稳,并且这种变化呈现出周期性,摩擦系数在 0.18 ~ 0.193 范围内波动。50% 搭接率激光冲击试样的摩擦系数相对较为平稳,但是任然有较大幅度的波动,在 0.089 ~ 0.102 范围内波动。75% 搭接率激光冲击试样的摩擦系数波动较小,波动范围为 0.071 ~ 0.08。

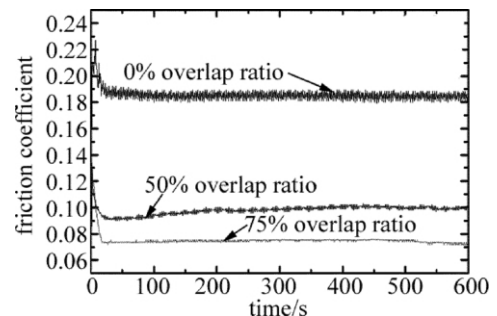


Fig. 2 Friction coefficient of overlap LSP specimen

5 组试样的平均摩擦系数如图 3 所示。未冲击试样和抛光激光冲击试样的摩擦系数分别为 0.162 和 0.161,平均摩擦系数相差较小。0%、50%、75% 搭接率激光冲击试样的平均摩擦系数分别为 0.187、0.095、0.074。可以看出,激光冲击搭接率越高,摩擦系数越低,表面的摩擦性能越好。0% 和 50% 搭接率激光冲击试样的摩擦系数相差较大,而 50% 和 75% 搭

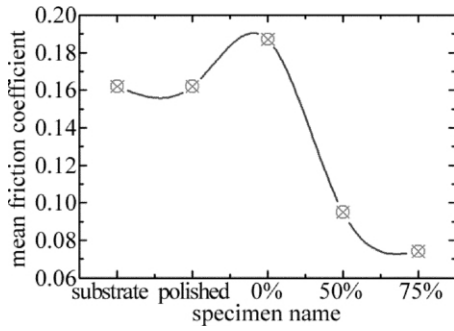


Fig. 3 Mean friction coefficient of specimens processed by LSP or not  
 接率激光冲击试样的摩擦系数相差不多。抛光激光冲击试样的摩擦系数小于0% 搭接率激光冲击试样, 0% 搭接激光冲击降低了20CrNiMo的磨损性能。

从图4中可以看出5组试样磨损体积的对比关系。未冲击试样、抛光激光冲击试样的磨损体积分别为 $0.052\text{mm}^{-3}$ 、 $0.035\text{mm}^{-3}$ 。0%、50%、75% 搭接率激光的磨损体积分别为 $0.049\text{mm}^{-3}$ 、 $0.018\text{mm}^{-3}$ 、 $0.01\text{mm}^{-3}$ 。激光冲击搭接率越高, 磨损体积越小, 表面的抗磨损性能越好。0%和50% 搭接率激光冲击试样的磨损体积相差不多, 而50%和75% 搭接率激光冲击试样的磨损体积相差不多。抛光激光冲击试样的摩擦系数小于0% 搭接率激光冲击试样, 0% 搭接激光冲击降低了20CrNiMo的耐磨损性能。

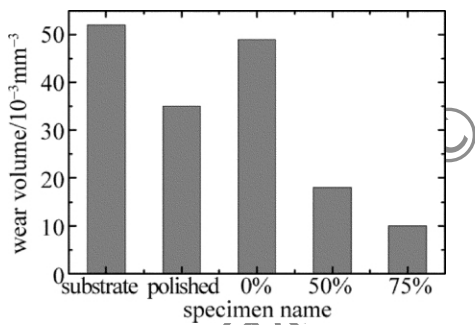


Fig. 4 Wear volume of specimens processed by LSP or not

图5为激光冲击20CrNiMo钢表层微观组织透射电子显微镜照片。激光冲击强化导致微观细化的过程为: 在激光冲击金属表层, 强大的脉冲能量导致金属表层产生位错运动, 导致了金属表层晶粒内部位错密度增加<sup>[11]</sup>。这些位错组织结构把原始粗晶细分成更小的不同尺寸的晶胞, 当位错墙和位错缠绕结构内的位错密度达到一定值时, 就会把原始粗晶细分成各个不同的亚晶, 形成细化的晶粒<sup>[12]</sup>。图6为激光冲击20CrNiMo导致表层晶粒细化的示意图。在距离表面 $20\mu\text{m}$ 区域为剧烈塑性变形区, 此区域的晶粒尺寸最小; 距离表面 $200\mu\text{m}$ 区域为轻微塑性变形区, 此区域的晶粒也经过了细化的作用, 但是由于距离表面较远, 激光冲击的作用传递到此区域的能量和超塑性应变衰减, 导致此区域的晶粒细化不完全, 晶粒的尺寸要稍大

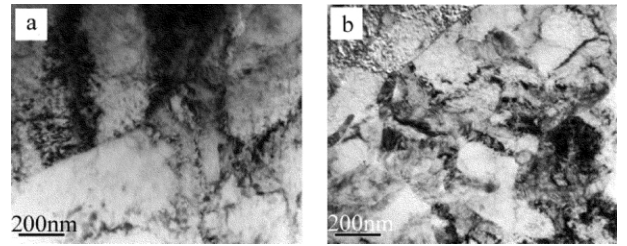


Fig. 5 Typical TEM images of different layers of 20CrNiMo steel subjected to overlap LSP impact  
 a—the plastic deformation region at the depth of  $200\mu\text{m}$  from the treated surface b—the plastic deformation region at the depth of  $20\mu\text{m}$  from the treated surface

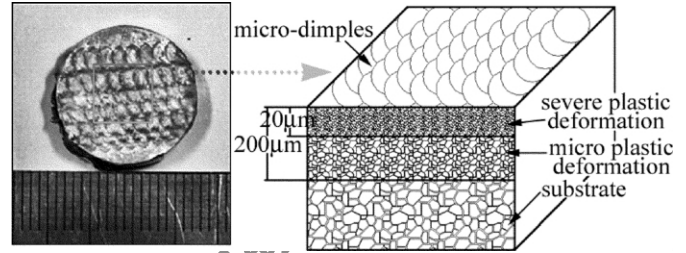


Fig. 6 Real product photo of LSP specimen and schematic diagram of surface layer micro structure

于剧烈塑性变形区的晶粒。从4组试样摩擦系数和磨损量的对比图可以看出, 50%和75% 搭接率激光冲击试样表面的摩擦性能和耐磨性能明显提高, 而0% 搭接率激光冲击试样的摩擦系数明显高于未冲击试样的摩擦系数, 其磨损量与未冲击试样的磨损量大致相同。在磨损过程中, 晶粒细化层可以抑制表层疲劳裂纹的产生, 从而增加金属表层的耐磨性能<sup>[13-14]</sup>。

0% 搭接率激光冲击试样的摩擦系数较高, 波动范围较大, 主要是由于激光冲击强化并没有作用到整个金属表面, 从激光搭接图1中可以看出, 0% 激光冲击试样表面部分区域未接受激光冲击作用。采用 Veeco 表面轮廓仪测得激光冲击20CrNiMo表面凹坑的深度为 $12\mu\text{m}$ , 凹坑的直径为 $3\text{mm}$ , 所以表面粗糙度较高, 导致其摩擦系数高。整个表面的硬度、残余压应力和金属表层晶粒细化的程度不同, 导致表面的屈服强度也不相同, 在磨损过程中, 激光冲击区域和未冲击区域的抗磨损性能也就不相同, 屈服强度较低的区域会容易产生疲劳, 导致表面裂纹产生, 最后会出现大块颗粒剥落, 形成疲劳磨损, 所以磨损量较大。

图7为50%和75% 搭接率激光冲击试样3-D示意图。采用 Veeco 表面轮廓仪测试得出0% 搭接率激光冲击试样的微凹坑的深度约为 $12\mu\text{m}$ , 直径为 $3\text{mm}$ ; 50% 搭接后坑深为 $2.99\mu\text{m}$ , 直径约为 $0.75\text{mm}$ ; 75% 搭接后坑深为 $0.74\mu\text{m}$ , 直径约为 $0.37\text{mm}$ , 可见搭接率越高, 金属表面微凹坑尺寸越小。

50% 搭接率的微凹坑, 由于微凹坑周围的凸起高度较高, 屈服强度小于剪切强度, 开始磨损的时候, 凸

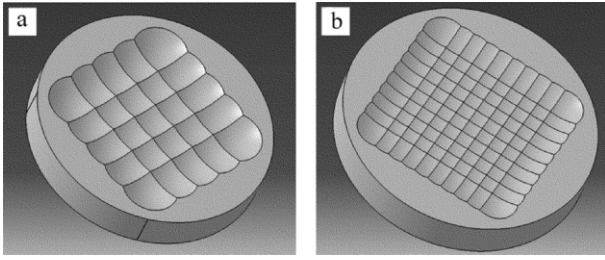


Fig. 7 3-D Schematic diagram of LSP specimen surface

a—50% overlap ratio LSP specimen b—75% overlap ratio LSP specimen

起会从根部断裂,形成大块的磨粒,由于微凹坑深度较小,无法储存大块的磨粒,造成摩擦副表面形成磨粒磨损。75%搭接率的微凹坑,凸起高度较小,在润滑磨损条件下,凸起不容易断裂,即使断裂,也是形成较小的磨粒,磨损过程中,磨粒进入微凹坑中不再与摩擦副接触,表面不易发生磨粒磨损。所以,激光冲击搭接率越高,金属表面耐磨性能越高。

### 3 结 论

试验结果和理论分析表明,激光冲击强化 20CrNiMo 钢对其耐磨性能的提高有着显著的影响,主要体现在以下两个方面:(1)激光搭接冲击 20CrNiMo,会导致表层发生塑性变形,在剧烈塑性变形区和轻微塑性变形区都发生了晶粒细化的作用。不同搭接率激光冲击 20CrNiMo 表面会产生不同的表面形貌,0%搭接率激光冲击试样的摩擦磨损性能降低,所以较低搭接率激光冲击试样反而会降低摩擦磨损性能。(2)搭接率越高,微凹坑的尺寸越小,对摩擦学性能有较大影响。激光冲击搭接率越高,20CrNiMo 表面的摩擦系数越低,磨损体积越小,摩擦学性能越好。

#### 参 考 文 献

[1] KATO K. Wear in relation to friction—a review[J]. *Wear* 2000,

241(2): 151-157.

- [2] XIA Z B. Experiment on heat treatment process of 20CrNiMo steel shifting fork[J]. *Heat Treatment of Metals* 2011 36(10): 65-67( in Chinese) .
- [3] DING Y H, HUANG H Y. Effect of forging defect of 20CrNiMo cone and jaw to mechanical properties[J]. *Forging & Stamping Technology* 2006 31(3): 13-15( in Chinese) .
- [4] FLANNERY M, JONES E, BIRKINSHAW C. Analysis of wear and friction of total knee replacements( part II ): friction and lubrication as a function of wear[J]. *Wear* 2008 265(7/8): 1009-1016.
- [5] HORNG J H. Studies of tribological behavior and separation between surfaces at initial boundary lubrication[J]. *Wear* 1998 216(1): 8-14.
- [6] WEN S Z. Existing state and development of tribology research in China[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(11): 1-6( in Chinese) .
- [7] LU J Z, LUO K Y, DAI F Z, *et al.* Effects of multiple laser shock processing( LSP) impacts on mechanical properties and wear behaviors of AISI 8620 steel[J]. *Materials Science and Engineering*, 2012, A536: 57-63.
- [8] ETSION I. State of the art in laser surface texturing[J]. *Journal of Tribology* 2005 127(4): 248-253.
- [9] FU Y H, YE X, ZHANG Y K, *et al.* Study on the technology of laser honing applied in machining the cylinder bore of engine[J]. *Laser Technology* 2002 26(5): 379-381( in Chinese) .
- [10] WANG X, CHEN Y X, LIU H X, *et al.* Numerical simulation of the ablation thermal field and crater in the laser micro-texture sculpt[J]. *Laser Technology* 2007, 31(6): 565-580( in Chinese) .
- [11] FAN Y, WANG S B, WU H X, *et al.* Experimental research of laser shock processing on aerial aluminum alloy[J]. *Laser Technology* 2003, 27(4): 273-275( in Chinese) .
- [12] LU J Z, LUO K Y, FENG A X, *et al.* Micro-structural enhancement mechanism of LY2 aluminum alloy by means of a single laser shock processing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(10): 2662-2666( in Chinese) .
- [13] ZHONG J W, LU J Z, LUO K Y, *et al.* Investigation on tribological behaviors of laser shock processing AISI 8620[J]. *Chinese Journal of Lasers* 2012 39(1): 103001( in Chinese) .
- [14] ZHANG Y K, LU J Z, REN X D, *et al.* Effect of laser shock processing on the mechanical properties and fatigue lives of the turbojet engine blades manufactured by LY2 aluminum alloy[J]. *Materials and Design* 2009 30(5): 1697-1703.