

激光冲击对 AISI304 不锈钢拉伸性能和摩擦磨损性能的影响

钟金杉 鲁金忠 罗开玉 齐 晗 王志龙 韩 彬 刘 娟

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 采用高能纳秒激光对 AISI304 不锈钢表面进行冲击强化,测定激光冲击前后 AISI304 不锈钢的抗拉强度和应力-应变曲线,系统研究了激光冲击增大不锈钢抗拉强度的机理;测量冲击前后的摩擦系数和磨损性能,研究了激光冲击对 AISI304 不锈钢摩擦磨损性能的影响规律。结果表明:激光冲击纳米晶化 AISI304 不锈钢表层,从而提高不锈钢的抗拉强度;激光冲击强化提高 AISI304 不锈钢的磨损性能,略微增大 AISI304 不锈钢的摩擦系数。

关键词 激光技术;激光冲击强化;纳米晶化;AISI304 不锈钢;拉伸性能;摩擦磨损

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.0503002

Influence of Laser Shock Processing on Tensile Properties and Tribological Behaviors of AISI304 Stainless Steel

Zhong Jinshan Lu Jinzhong Luo Kaiyu Qi Han Wang Zhilong Han Bin Liu Juan

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

Abstract Tensile properties and wear behaviors of AISI304 stainless steel after laser shock processing (LSP) with different processing parameters are investigated. Ultimate tensile strength (UTS) values and stress-strain curves of all four kinds of tensile samples are measured, and the improvement mechanism of UTS generated by LSP is also revealed. Wear properties and friction coefficients of AISI304 stainless steel with and without LSP are compared, and the influence rule of LSP on wear properties and friction coefficients of AISI304 stainless steel are systematically analyzed. The results show that LSP can improve the UTS of AISI304 stainless steel, which is due to the surface nanocrystallization. In addition, LSP enhances the wear properties, and slightly increases the friction coefficients of AISI304 stainless steel.

Key words laser technique; laser shock processing; nanocrystallization; AISI304 stainless steel; tensile behavior; tribological behavior

OCIS codes 120.6660; 140.3390; 310.4925

1 引 言

AISI304 奥氏体不锈钢是一种通用的工程结构材料,具有良好的成形性及焊接性,在恶劣环境中具有优异的抗腐蚀性和抗氧化性,广泛应用于制作要求综合性能良好的设备和机件,而在工业应用中冲击载荷的解决使其得到了更广泛的应用^[1]。金属结构材料的表层微观结构及表面性能对其使用寿命有

很大影响。在大多数情况下,金属结构材料的失效通常出现在材料表层。因此,改善材料表层微观结构及其表面性能能有效改善材料的整体性能^[2]。绝大部分金属材料表面失效(如疲劳断裂、磨损疲劳、磨损和腐蚀等)都源于金属的表面结构及宏观性能,纳米金属材料具有优异的韧性与延展性,能有效增强材料的整体性能^[3],因此晶粒细化或纳米晶化金

收稿日期: 2013-01-07; **收到修改稿日期:** 2013-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(51105179, 51275220)、江苏省自然科学基金(BK2011478)、中国博士后特别资助项目(2012T50465)、高校科研成果产业化推进项目(JHB2011-38)、中国博士后科学基金(20110491349)、江苏省博士后基金(1101018B)、江苏省高校“青蓝工程”、江苏大学青年骨干教师计划和江苏大学学生科研立项(10A094)资助课题。

作者简介: 钟金杉(1986—),男,硕士研究生,主要从事激光表面改性技术方面的研究。E-mail: zjsbsheng@163.com

导师简介: 鲁金忠(1975—),男,博士,副教授,主要从事激光冲击波非传统制造技术方面的研究。

E-mail: jxscience@ujs.edu.cn(通信联系人)

属材料的表层结构、增强金属材料表层性能是目前材料科学领域的热点研究内容之一。

激光冲击强化(LSP)是一种新型的材料表面强化技术,具有高能、高压、超快、超高应变率等优异特点,是极端条件下的冲击波非传统制造加工技术,具有常规加工方法无可比拟的优点^[4]。在金属纳米材料制备过程中,许多工艺易形成气孔、夹杂物等缺陷,这些缺陷会直接导致纳米晶材料脆性增加,断裂前延伸率很小。消除气孔和夹杂物缺陷,如通过电沉积制得的纳米晶铜,其拉伸性能得到大幅提高^[5]。激光冲击强化是利用覆盖在金属材料表面的吸收层吸收高幅激光能量直接汽化形成强场冲击压缩波作用在金属材料表面,能够使金属表层晶粒细化或纳米化、压缩表层晶粒,避免表层金属材料气孔的形成和产生。

在以往的研究中,本课题组获得了多次激光冲击 LY2 铝合金残余应力和冲击次数间的定量关系,揭示了多次激光冲击 LY2 铝合金和 AISI304 奥氏体不锈钢等面心立方金属沿深度方向的微观结构演化规律及晶粒细化机制^[6,7]。目前,全世界有 30%~50% 的能源以不同形式的磨损摩擦消耗在各类机械传递能量的过程中,且各种机械零件因磨损失效的数量占全部失效零件总数的一半以上^[8]。激光冲击能够显著提高 AISI8620 中碳钢磨损性能,但在最初阶段磨损性能明显下降,当激光冲击在试样表面形成的微凹坑磨平以后,磨损性能大幅上升^[9]。奥氏体不锈钢,特别是 304 奥氏体不锈钢在摩擦过程中与其偶件极易产生粘着、转移并形成粘着磨损^[10]。毕红运等^[11]探讨了 AISI304 钢及 Cr-Mn-N 双相不锈钢在含 Cl 的酸性溶液中形变强化程度对其耐磨性的影响,认为不锈钢的体积磨损率随载荷增加呈线性增大,磨痕硬度随外加载荷增加而增大。但是截至目前,依然缺乏激光冲击奥氏体不锈钢拉伸性能和微观结构特征的关联研究,缺乏激光冲击奥氏体不锈钢工艺参数和磨损量、摩擦系数之

间的对应关系。

本文采用纳秒脉冲激光对 AISI304 不锈钢进行冲击强化,在冲击表面发现激光冲击波作用下形成纳米结构,采用电子万能试验机测定激光冲击前后 AISI304 不锈钢的抗拉强度和应力-应变曲线,结合冲击前后不锈钢的微观形貌研究了激光冲击使不锈钢抗拉强度增大的机理和激光冲击后不锈钢的塑性变形过程。采用 CETR UMT-2 型摩擦磨损试验机测量冲击前后的摩擦系数和磨损性能,并研究了不同摩擦磨损条件下激光冲击对 AISI304 奥氏体不锈钢摩擦磨损性能的影响规律。

2 试样材料与参数选择

试样材料为 AISI304 奥氏体不锈钢,化学成分(质量分数)为 C: 0.06, Mn: 1.54, Cr: 18.47, Mo: 0.30, Ni: 8.3, Cu: 小于等于 0.37, Si: 0.48, Nb: 0.027, Fe: 其余。拉伸实验试样尺寸及冲击区域如图 1 所示,磨损试样为 $\Phi 16.8 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的圆柱体。冲击实验前,依次使用 150[#]、300[#]、600[#]、800[#]、1000[#]、1200[#] 不同型号的砂纸将所有拉伸试样和磨损试样表面逐级打磨,并将打磨后的试样放入装有乙醇的烧杯中,利用超声波清洗器清洗和去除试样表面残留的油污、颗粒等杂质。激光冲击时采用厚度为 0.1 mm 的美国 3M 公司专用铝箔(其中一面为粘贴剂,与试样表面粘贴)作为激光能量吸收层,便于涂敷和清洗,采用流水作为激光冲击时的约束层,流水厚度为 1~2 mm。

激光冲击强化 AISI304 奥氏体不锈钢拉伸及磨损试样试验在江苏大学强激光实验室 Nd:YAG-GAIA R 激光冲击强化装置上进行,激光光斑直径为 3 mm,脉冲能量为 6 J,波长为 1064 nm,重复频率为 1 Hz。拉伸试样采用单面单次连续冲击、单面两次连续冲击和双面单次连续冲击,磨损试样的冲击区域为 9 mm \times 9 mm 的正方形区域,搭接率均为

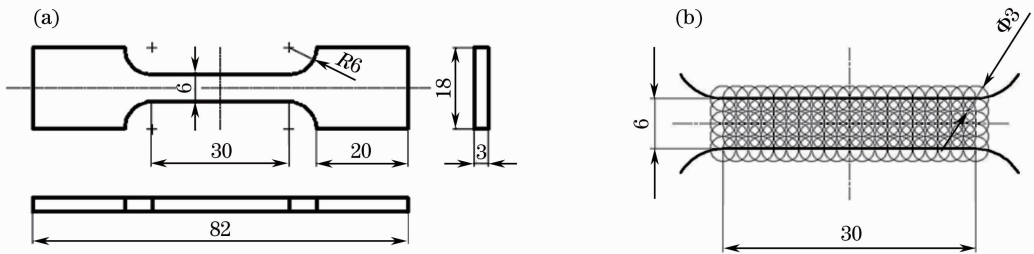


图 1 (a) AISI304 不锈钢薄板拉伸试样;(b)拉伸试样冲击区域示意图(单位: mm)

Fig. 1 (a) Tensile specimen of AISI304 stainless steel sheet; (b) diagram of tensile specimen impact area (unit: mm)

50%，激光冲击如图 1 所示。激光冲击以后，拉伸试样略微出现弯曲，弯曲程度不大。

将冲击前后拉伸试样在电子式万能试验机上进行室温拉伸实验，试验机夹头的分离速度为 3 mm/min；将冲击前后摩擦磨损试样在 CETR UMT-2 摩擦磨损试验机上进行滑动干摩擦试验，采用的磨损载荷分别为 2 kg 和 4 kg，转速分别为 100 r/min 和 200 r/min，旋转半径为 2 mm，每一段运行时间为 20 min。磨球采用型号为 440-C 的不锈钢高硬度淬火钢球，其半径为 9.5 mm。将磨损后的试样放置在丙酮容器中并进行超声波清洗，去除试样磨痕表面的磨屑和杂质。

3 试验结果与分析

3.1 拉伸性能

图 2 是 AISI304 奥氏体不锈钢未冲击、单面单次冲击、单面两次冲击和双面单次冲击试样的应力-应变曲线。从图中可以看出：所有试样在阶段 I 区域对应材料的弹性变形阶段，阶段 II 区域对应材料的形变强化阶段，阶段 III 区域对应试样的颈缩阶段。所有试样在较小的应变范围内达到屈服，然后进入塑性变形阶段，在塑性变形阶段，应力随应变的增大而增大；与未冲击试样相比，激光冲击强化处理的三种试样较晚达到屈服，三种激光冲击强化试样几乎在相同应变下达到屈服。4 种不同试样的应力-应变曲线在阶段 I 基本重合，直线斜率基本相同，说明在激光冲击以后不锈钢试样的弹性模量基本不变。在阶段 II 塑性形变强化阶段，三种激光冲击试样的变形抗力基本相当，均明显大于未冲击试样。4 种不同试样的应力-应变曲线的整体变化趋势相似。

从图 2 中可以看出不同激光冲击强化工艺参数

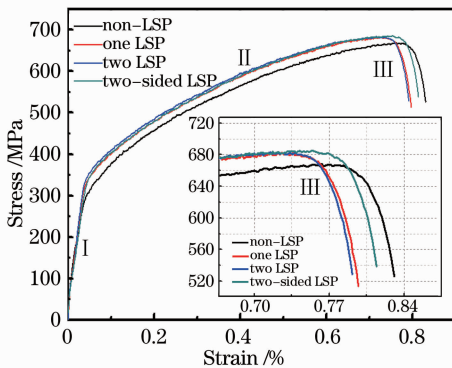


图 2 不同条件下拉伸试样的应力-应变曲线
Fig. 2 Strain-stress curves of tensile samples under different conditions

的 AISI304 不锈钢试样的抗拉强度，其中未冲击试样的抗拉强度为 667 MPa，单面单次冲击、单面两次冲击和双面单次冲击试样的抗拉强度分别为 680、683、685 MPa。从图中可以看出：三种激光冲击试样的抗拉强度均大于未冲击试样。单面激光冲击时，单次激光冲击后试样的抗拉强度大于未冲击试样，且试样抗拉强度增大幅度较大；两次激光冲击试样的抗拉强度大于单次激光冲击试样的抗拉强度，但是增大幅度较小。因此，单面激光冲击时，不锈钢的抗拉强度随冲击次数增加而增大，首次冲击增大幅度较大，第二次冲击后的强度值较首次冲击后强度值增大幅度小。双面单次激光冲击试样的抗拉强度大于单面两次激光冲击试样，双面单次冲击后的强度值较单面两次冲击后强度值增大幅度小。

图 3 为典型 AISI304 奥氏体不锈钢经过单次搭接冲击试样表面的透射电镜 (TEM) 形貌及相应衍射花样，从图中可以看出，单次搭接激光冲击 AISI304 奥氏体不锈钢后，在试样表面形成了大量不同衬度的等轴状微晶结构，组织均匀一致，原始组织的形貌不复存在。图 3 左上角衍射花样为微纳米晶区相应的选区电子衍射图像，该图像由许多不同半径的同心圆环组成，说明选区内为典型的大角度晶界晶粒的多晶衍射环，由大量取向杂乱无章的细小晶体颗粒组成，是典型的纳米结构。因此可以得出：激光冲击强化将 AISI304 奥氏体不锈钢表层完全纳米化。由以前的研究可知：奥氏体不锈钢受到激光冲击后，冲击波使表层材料位错运动形成孪晶界使材料表层产生明显晶粒细化^[7,12]。晶粒细化可显著提高多晶材料的强度，强化机制遵循 Hall-Petch 关系^[13]；而且，孪晶界也可以像晶界一样作为位错运动的有效障碍，从而提高材料的强度^[13]，孪晶界阻碍位错运动强化材料的机制同样遵循 Hall-Petch 关系^[12]。因此激光冲击后不锈钢抗拉强度的提高主要是激光冲击完全纳米晶化奥氏体不锈钢表层的结果，在拉伸变形过程中，激光冲击产生的孪晶界阻塞位错运动，从而提高了不锈钢的抗拉强度。虽然激光冲击奥氏体不锈钢影响层深度可达 1 mm 以上，但是两次冲击时，奥氏体不锈钢较明显晶粒细化层的深度只有 30 μm 左右^[7,12]，因此抗拉强度提高的幅度不大。单面激光冲击时，不锈钢抗拉强度随冲击次数增加而增大，这是由于激光冲击所产生的晶粒细化层深度及晶粒细化程度不同造成的，单次激光冲击晶粒细化层深度及晶粒细化程度均小于两次激光冲击^[7,12]，因此，两次激光冲击后不锈钢的

抗拉强度要大于单次激光冲击。

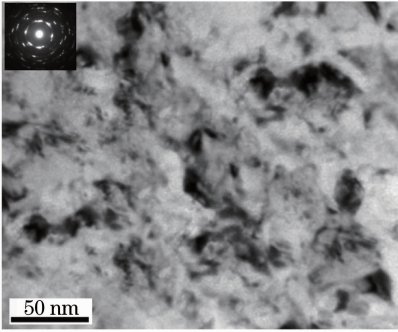


图 3 AISI304 奥氏体不锈钢经过单次搭接冲击后试样表面的 TEM 形貌及相应衍射花样

Fig. 3 Typical TEM morphology and the corresponding diffraction pattern of AISI304 stainless steel induced by LSP

3.2 摩擦磨损性能

采用 WYKO NT1100 型光学表面轮廓仪测量磨痕的深度和宽度,每点间隔 $3\ \mu\text{m}$,测量数据点数根据磨痕宽度随机生成。在计算机上使用 OriginPro 编程计算出径向磨痕宽度和深度作为磨损量的评判标准,从而计算磨损量,并在磨损实验前后用 Z13603 型电子天平称量,从而间接得到磨损量,进行比较验证。

图 4 为未冲击试样和激光冲击试样(单面单次)在不同接触载荷和不同转速下的磨损量,其中试样 1 和试样 2 分别为未冲击试样和激光冲击试样在 2 kg 接触载荷和 100 r/min 转速下的磨损量,试样 3 和试样 4 分别为未冲击试样和激光冲击试样在 2 kg 接触载荷和 200 r/min 转速下的磨损量;试样 5 和试样 6 分别为未冲击试样和激光冲击试样在 4 kg 接触载荷和 100 r/min 转速下的磨损量,试样 7 和试样 8 分别为未冲击试样和激光冲击试样在 4 kg 接触载荷和 200 r/min 转速下的磨损量。从图 4 可以看出: 1) 当

接触载荷为 2 kg 时,激光冲击试样较未冲击试样的磨损量略微较低,耐磨性能提高不明显,但是当接触载荷增加到 4 kg 时,激光冲击 AISI304 不锈钢试样的磨损性能明显提高;2) 当接触载荷相同时,转速越大,磨损量越大,但是没有发现激光冲击对不同转速下的不锈钢试样耐磨性能有明显作用规律。

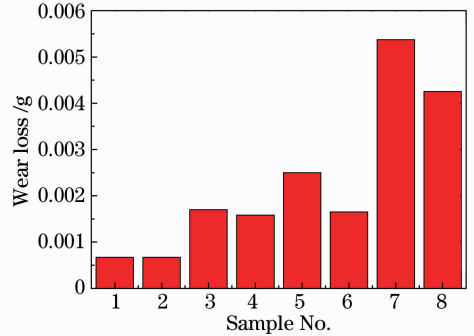


图 4 未冲击试样和激光冲击试样在不同接触载荷和转速下的磨损量

Fig. 4 Wear loss of untreated and LSP treated samples at different contact loads and rotational speeds

图 5 为未冲击试样和激光冲击试样在不同接触载荷和不同转速下随时间变化的摩擦系数,其中试样 1~8 分别对应图 4 中的测试试样。从图 5(a)可以看出,当加载载荷为 2 kg 时,激光冲击轻微增加了不锈钢试样的摩擦系数数值,并且在 1200 s 的测试时间内可以发现激光冲击不锈钢试样的摩擦系数更趋不稳定;从图 5(b)可以看出:当加载载荷为 4 kg 时,加载时间 700 s 以内,摩擦系数基本相等,但是在 700~1200 s 的测试时间内,可以看出激光冲击试样轻微增加了不锈钢试样的摩擦系数。另外还发现,当加载载荷增加时,摩擦系数减小和更趋稳定。

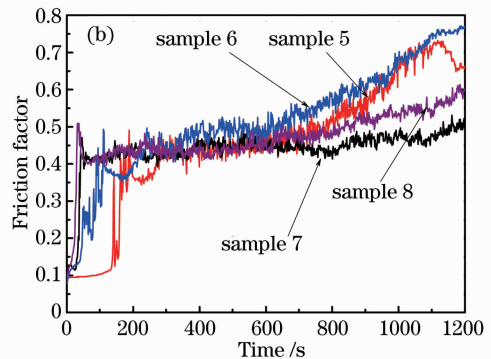
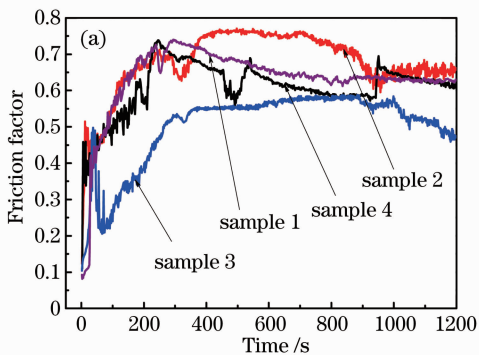


图 5 激光冲击和未冲击试样随时间变化的摩擦系数。(a) 接触载荷为 2 kg; (b) 接触载荷为 4 kg

Fig. 5 Friction coefficients of untreated and LSP treated samples vary with time.

(a) Contact load is 2 kg; (b) contact loading is 4 kg

金属材料表层的微观硬度对材料的磨损性能有着重要的影响,随着材料表层硬度值的增大,材料的耐磨性能增强^[14]。奥氏体不锈钢板在摩擦过程中与其配偶件极易产生粘着磨损。Meng Hua 等^[15]的研究也发现,AISI304 奥氏体不锈钢在与陶瓷和轴承钢的球盘摩擦过程中易发生严重的摩擦磨损和磨粒磨损。激光冲击处理以后,表层晶粒显著细化形成纳米晶层,AISI304 不锈钢表层硬度值显著增大^[12]。因此可以得出:激光冲击使不锈钢表层晶粒细化甚至纳米化从而增加表面微观硬度是 AISI304 不锈钢耐磨性能增大的主要原因,表面微观硬度增大使其塑性变形抗力提高,不锈钢表层粘性和摩擦对偶之间的分子粘附力及剪切作用下降,使不锈钢表层粘着耐磨性能增强。

激光冲击奥氏体不锈钢最显著的效果是在表层诱导高幅残余压应力,表面残余压应力的存在可以抵消试样受载时表面的一部分或全部拉应力,最大拉应力从试样表面移向内部,使疲劳裂纹在表面难以形成,而可能在硬化层以下拉应力区的某一薄弱晶粒内产生。此时,疲劳源放出的位错将受到内、外晶界的阻碍,这样开动新的位错就需要更大的驱动力,而不像疲劳源在表面时放出的位错一端可以自由移出表面^[16]。也就是说,萌生内部裂纹的临界拉力高于在表面萌生疲劳裂纹的临界抗力,即残余压应力的存在可以提高疲劳寿命^[16]。AISI304 奥氏体不锈钢经激光冲击表面纳米晶化处理不仅形成强度和硬度较高的纳米晶层,还可以形成一定厚度的残余压应力层。因此,可以认为表面激光冲击纳米晶化处理试样的磨损机理主要为材料上层及磨损过程中的脱落物对试样表面造成的磨粒磨损及粘着磨损。

转速对材料的摩擦性能的影响很复杂,一方面,瞬时温度随滑动速度的增大而增大,这有利于促进在磨损表面形成富氧混合层,从而减少滑动中界面金属与金属的直接接触,从而有利于降低摩擦系数和磨损率;另一方面,较高的速度会导致较多的碎屑喷射,这对于混合层的形成是不利的,容易造成摩擦偶表面直接的金属接触导致磨损率增大^[17]。另外,摩擦表面循环应力的频率随速度的增大而增大,这样会促使裂纹的形成和扩展,从而使磨损率增大^[18]。因此,未冲击及激光冲击后 AISI304 不锈钢试样在 2 kg 和 4 kg 载荷下,磨损量都随滑动速度的增大而增大。

在滑动干摩擦试验中,试样表面和表面下材料受到变化的拉应力和压应力,这其实是一个低应力

疲劳过程^[14]。随着载荷的增加,往复交替的滑动使磨损表面产生重复的加工硬化、严重的塑性变形和剪切应变,从而使磨损表面形成分离层裂纹,裂纹传播导致表层材料破碎^[14,19]。对于未冲击及激光冲击处理后试样,随着载荷的增大,摩擦力增大,摩擦的实际接触面积增大,材料表层产生严重的塑性变形和加工硬化,从而使 AISI304 不锈钢试样在 100 r/min 和 200 r/min 的滑动速度下,磨损量都随载荷的增大而增大。

一方面,激光冲击处理后试样表面存在大量凹坑,实际承载面积减小,相同载荷下的接触应力变大,而且加工硬化使其表面材料的塑性变形能力有所降低,因此在超过断裂强度的应力作用下,更容易出现脆性特征,使 AISI304 不锈钢磨损量增大;另一方面,激光冲击强化使 AISI304 不锈钢表层硬度值显著增大,可以降低 AISI304 不锈钢磨损量。在 2 kg 载荷下,这两种作用方式的效应相互弥补;而未冲击 AISI304 不锈钢表层组织均匀,在磨损过程中具有较好的塑性变形能力和形变硬化能力,可以平稳地承受载荷并消耗摩擦功,因此,激光冲击没有使 AISI304 不锈钢的磨损量明显地改善。由于磨损量随着载荷的增大而增大,在 4 kg 载荷作用下,材料的磨损量增大;在前期阶段激光冲击处理试样表面凹坑带来的影响与硬度提高的影响相互弥补,当经过前期阶段后,激光冲击处理后试样表面凹坑被磨平,不再对磨损量产生影响,滑动磨损继续进行,激光冲击产生的硬度提高则继续带来有利影响,使磨损量下降,因此,在 4 kg 载荷作用下,激光冲击 AISI304 不锈钢试样的磨损性能明显提高。

表面纳米晶化虽然产生表面强化效果使微观硬度增大,但是硬度增大只是为提高材料耐磨性能提供了基础条件,在滑动磨损中会在一定程度上抗犁削而改善耐磨性;若因硬度提高而造成了塑性或抗疲劳性的降低则会降低耐磨性^[20]。从研究结果看,激光冲击可以提高 AISI304 不锈钢的耐磨性能,其硬度的提高并未造成塑性或抗疲劳性的降低。

在干摩擦的初始阶段,所有试样的摩擦系数均明显增大,这是由于加工硬化或者磨损碎屑的积聚造成的^[14]。转速对材料的摩擦性能的影响很复杂,其中包括瞬时温度随滑动速度的增大而增大,这有利于促进在磨损表面形成富氧混合层,从而减少滑动中界面的金属与金属的直接接触,从而有利于降低摩擦系数^[17]。从图 5 中可看出,在接触载荷分别为 2 kg 和 4 kg 的情况下,未冲击及激光冲击处理

后试样的摩擦系数在经过开始阶段的短暂快速增大后,均随滑动速度的增大而减小。

摩擦系数是由实际的接触区域、接触状态及磨屑的润滑作用所决定的^[14]。对于低滑动速度下材料产生的变形,摩擦接触温度随法向应力的增大而增大,会使材料软化从而降低表层下材料的剪切强度;摩擦系数随载荷增大而降低可能是由于载荷增大使摩擦偶的实际接触区域增大了^[14]。由于奥氏体相的亚稳定性,AISI304 不锈钢在摩擦过程中受应力/应变的作用而诱发其表层产生相变马氏体,从而影响到材料的摩擦行为,而且马氏体的量随载荷的增大及变形量的增加而增加,表层较高的马氏体含量决定了较低的摩擦系数,最终表现出其摩擦系数随载荷增加而减小的现象^[21],因此,AISI304 不锈钢试样在 100 r/min 和 200 r/min 的转速下,当加载载荷增加时,摩擦系数减小和更趋稳定可能是由于:1) 不锈钢表层马氏体含量随载荷的增大及变形量的增加而增加;2) 载荷增大使摩擦偶的实际接触区域增大。

摩擦过程是磨损量不断增加的过程,一方面,随着摩擦的进程,磨痕表面摩擦诱发奥氏体转变为马氏体,提高了表面硬度,改善了瞬时粘着磨损能力;另一方面,随着磨损的进程,强化的表面又不断被磨削,重新出现新的奥氏体表面,使得其粘着磨损趋势增加^[10],未冲击及激光冲击处理试样摩擦系数曲线的显著波动可能与上述过程有关。此外,不锈钢表层马氏体含量随载荷的增大及变形量的增加而增加^[21],也可能是 AISI304 不锈钢试样在 100 r/min 和 200 r/min 的转速下磨损量随载荷的增大而增大的因素之一。

4 结 论

1) 激光冲击明显提高 AISI304 不锈钢的抗拉强度,从未冲击试样的 667 MPa 提高到三种不同冲击工艺拉伸试样的 680、683、685 MPa,并且随着激光冲击次数的增加,不锈钢拉伸试样的抗拉强度逐渐增大,其主要原因是激光冲击强化完全纳米晶化 AISI304 不锈钢表面,在拉伸变形过程中,激光冲击产生的孪晶界阻塞位错运动,从而提高了 AISI304 不锈钢的抗拉强度。

2) 在 4 kg 接触载荷下,激光冲击 AISI304 不锈钢试样的磨损性能明显提高,但激光冲击强化对不同转速下的不锈钢试样耐磨性能没有明显作用规律;激光冲击轻微增加了不锈钢试样的摩擦系数,并且使摩擦系数更趋不稳定。

参 考 文 献

- Zhang Qunli, Zhou Mingzhao, Chen Zhijun *et al.*. Technique of non-penetration laser lap welding on galvanized steel and AISI 304 stainless steel[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603012
- 张群莉,周明召,陈智君等. 镀锌钢-AISI 304 不锈钢非熔透型激光叠焊工艺[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0603012
- G. Liu, S. C. Wang, X. F. Lou *et al.*. Low carbon steel with nanostructured surface layer induced by high-energy shot peening [J]. *Scripta Materialia*, 2001, **44**(8-9): 1791~1795
- Ming Wen, Gang Liu, Jianfeng Gu *et al.*. The tensile properties of titanium processed by surface mechanical attrition treatment [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2008, **202** (19): 4728~4733
- Charles S. Montross, Tao Wei, Lin Ye *et al.*. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys; a review[J]. *International Journal of Fatigue*, 2002, **24**(10): 1021~1036
- L. Lu, S. X. Li, K. Lu. An abnormal strain rate effect on tensile behavior in nanocrystalline copper [J]. *Scripta Materialia*, 2001, **45**(10): 1163~1169
- J. Z. Lu, K. Y. Luo, Y. K. Zhang *et al.*. Grain refinement of LY2 aluminum alloy induced by ultra-high plastic strain during multiple laser shock processing impacts [J]. *Acta Materialia*, 2010, **58**(11): 3984~3994
- J. Z. Lu, K. Y. Luo, Y. K. Zhang *et al.*. Grain refinement mechanism of multiple laser shock processing impacts on ANSI 304 stainless steel [J]. *Acta Materialia*, 2010, **58** (16): 5354~5362
- K. Kato. Wear in relation to friction: a review[J]. *Wear*, 2000, **241**(2): 151~157
- J. Z. Lu, K. Y. Luo, F. Z. Dai *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 A*, 2012, **536**: 57~63
- Li Xiaochun, Wei Xicheng, Hua Meng *et al.*. Friction-induced deformation layer of SUS 304 austenitic stainless steel [J]. *Tribology*, 2007, **27**(4): 341~345
- 李晓春, 韦习成, 华萌. SUS 304 奥氏体不锈钢的摩擦变形层研究[J]. *摩擦学学报*, 2007, **27**(4): 341~345
- Bi Hongyun, Li Shizhuo, Jiang Xiaoxia. The effect deformation strengthening on wear resistance of stainless steel in dry sliding and corrosive environment [J]. *Tribology*, 1998, **18** (4): 327~331
- 毕红运, 李诗卓, 姜晓霞. 不锈钢腐蚀磨损过程中形变强化能力的研究[J]. *摩擦学学报*, 1998, **18**(4): 327~331
- K. Y. Luo, J. Z. Lu, Y. K. Zhang *et al.*. Effects of laser shock processing on mechanical properties and micro-structure of ANSI304 austenitic stainless steel [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2011, **528**(13-14): 4783~4788
- X. H. Chen, L. Lu, K. Lu. Grain size dependence of tensile properties in ultrafine-grained Cu with nanoscale twins [J]. *Scripta Materialia*, 2011, **64**(4): 311~314
- Y. S. Zhang, Z. Han, K. Wang. Friction and wear behaviors of nanocrystalline surface layer of pure copper [J]. *Wear*, 2006, **260**(9-10): 942~948
- Meng Hua, Xicheng Wei, Jian Li. Friction and wear behavior of SUS 304 austenitic stainless steel against Al₂O₃ ceramic ball under relative high load [J]. *Wear*, 2008, **265**: 799~810
- Li Guobin, Guan Delin, Zhang Minxing. Friction and wear properties of medium carbon steel by means of surface nanocrystallization in dry sliding [J]. *Tribology*, 2008, **28**(1): 39~43
- 李国宾, 关德林, 张明星. 表面纳米化中碳钢在干摩擦条件下的摩擦磨损性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2008, **28**(1): 39~43
- Y. S. Zhang, K. Wang, Z. Han *et al.*. Dry sliding wear

- behavior of copper with nano-scaled twins [J]. *Wear*, 2007, **262**(11-12): 1463~1470
- 18 Jun Yang, Peiqing La, Weimin Liu *et al.*. Tribological properties of FeAl intermetallics under dry sliding [J]. *Wear*, 2004, **257**(1-2): 104~109
- 19 Z. B. Wang, N. R. Tao, S. Li *et al.*. Effect of surface nanocrystallization on friction and wear properties in low carbon steel[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, **352**(1-2): 144~149
- 20 Liu Yang, Lü Xiaoren, Liu Gang *et al.*. Wear behaviors of nanocrystallization surface of Q235 steel by high energy peening [J]. *Tribology*, 2010, **30**(5): 472~478
- 刘 阳, 吕晓仁, 刘 刚 等. Q235 钢高能喷丸纳米化表面的摩擦磨损行为[J]. *摩擦学学报*, 2010, **30**(5): 472~478
- 21 Xue Zongyu, Zhou Sheng, Wei Xicheng. Tribological properties of austenitic stainless steel under the condition of friction coupling deformation[J]. *Tribology*, 2009, **29**(5): 405~411
- 薛宗玉, 周 升, 韦习成. 摩擦耦合变形条件下奥氏体不锈钢的摩擦学性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2009, **29**(5): 405~411

栏目编辑: 韩 峰