

45 钢在超细 SiC 颗粒作用下的正向冲蚀行为^{*}

吉小超, 张 伟, 于鹤龙, 魏 敏, 汪 勇, 郭永明

(装甲兵工程学院 再制造技术重点试验室, 北京 100072)

摘 要: 选用超细 SiC 颗粒作为磨料, 研究了韧性材料 45 钢在正向冲击条件下的冲蚀行为并与 7075-T6 铝合金对比。使用高强度磁铁捕获了 45 钢冲蚀磨屑, 利用扫描电子显微镜 (SEM) 对冲蚀磨损后试样表面以及磨屑形貌进行观测; 采用质量分析法, 分析 45 钢在不同冲蚀条件下的失重情况与材料去除率; 利用 X 射线应力测定仪, 分析 45 钢在不同冲蚀条件下的表层及深度方向的残余压应力分布情况。结果表明, 正向冲击条件下, 韧性材料表面主要发生塑性变形, 偏向堆积脊部还存在片层剥落的材料去除形式, 超细磨料产生的材料去除率相对较小, 材料去除率随磨料量的增加呈先增加后减小的趋势; 表层应力随磨料量呈先增加后降低的趋势, 微磨料冲蚀残余压应力的影响深度约为 10 μm 。

关键词: 正向冲蚀; 45 钢; SiC 颗粒; 材料去除率; 残余应力

中图分类号: TG174.21

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2012)05-0067-06

Erosion Behaviors of 45 Steel by Ultrafine SiC Particles Under Normal Impact Condition

JI Xiao-chao, ZHANG Wei, YU He-long, WEI Min, WANG Yong, GUO Yong-ming

(Science and Technology on Remanufacturing Laboratory, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072)

Abstract: This paper studies the erosion behaviors of ductile materials such as 45 steel and 7075-T6 aluminum alloy impacted by ultrafine SiC particles. Abrasive dusts of 45 steel were captured by magnet. Abrasive dusts and the eroded surfaces of 45 steel and 7075-T6 aluminum alloy were observed by scanning electron microscopy (SEM). The weight loss of 45 steel was measured, and the variance of erosion rate under different conditions was analyzed to give a clear understanding of the solid particle erosion of ductile material. X-ray diffraction method was adopted to measure and analyze the compressive residual stress on the surface and along the depth. Results show that deformation dominates the eroded surface and deformation level is related to the hardness of the target surface. The abrasive dusts are extruded by successive impact of the particle. The erosion rate caused by ultrafine SiC particles is found to be relatively small, and the erosion rate increases with increasing SiC particles amount, and then decreases. The surface residual stress caused by ultrafine SiC increases with increasing SiC particles amount, and then decreases. The influence depth of compressive residual stress caused by ultrafine SiC particles is about 10 μm .

Key words: particle erosion; 45 steel; ultrafine SiC particles; erosion rate; residual stress

0 引 言

据统计, 粒子冲击造成的表面破坏约占工业生产中经常出现的磨损破坏总数的 8%, 冲蚀磨损已成为机械、冶金、能源、化工、航天等领域中

引起材料破坏的重要原因之一。研究固体粒子冲蚀机理, 对于有效控制、减少冲蚀磨损造成的损害, 延长设备使用寿命, 具有重要的意义。研究冲蚀机理还能用来指导磨料喷射技术进行材

收稿日期: 2012-06-28; 修回日期: 2012-08-30; 基金项目: * 国家科技支撑计划(2011BAF11B07, 2011BAC10B05); 再制造技术重点实验室基金(9140C850205100C8511)

作者简介: 吉小超(1988-), 男(土), 甘肃兰州人, 硕士生; 研究方向: 冲蚀磨损与微磨料喷射加工

网络出版日期: 2012-09-07 15:05; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20120907.1505.005.html>

引文格式: 吉小超, 张伟, 于鹤龙, 等. 45 钢在超细 SiC 颗粒作用下的正向冲蚀行为 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(5): 67-72.

料表面预处理、表面清洗以及一些精密微加工^[1]。1958 年, Finnie I^[2] 提出了针对韧性材料的切削模型, 这是关于冲蚀机理的第一个较为完整的理论模型。在之后的几十年中, 关于冲蚀现象的实验研究、物理模型的建立以及模拟仿真都取得了很大的进展^[3-5], 这对理解和解决实际工程中由于冲蚀磨损造成的零件失效问题, 发挥了重要的作用。

冲蚀磨损是一个复杂的过程, 冲蚀磨损是大量粒子连续冲击产生的积累效应, 冲蚀磨损不仅与冲蚀压力、角度、距离等试验参数有关, 还与冲蚀磨料的粒径、形状以及机体的脆韧性、应力状态、微观结构有关。通常情况下, 磨料粒径对冲蚀结果有很大的影响, 但现有的固体粒子冲蚀磨损机理研究大多集中在 100 μm 以上的磨料粒径范围, 关于采用超细磨料(平均粒径小于 30 μm) 的冲蚀磨损行为与相关机理研究还鲜见报道。

基于此, 文中以平均粒径为 10 μm 的 SiC 颗粒为喷射磨料, 研究了不同冲蚀压力条件下 45 钢试样的正向冲蚀行为, 并与 7075-T6 铝合金样品进行了对比试验, 综合分析了冲蚀角度、粒子速度等因素对冲蚀行为的影响。同时, 对冲蚀后表面和冲蚀磨屑进行了形貌分析, 研究了微细磨料在不同喷射条件下对 45 钢试样表层应力以及深度方向应力的影响; 探讨了韧性材料的冲蚀磨损机理。

1 试验条件及方法

1.1 试验材料

选用未经热处理的 45 钢(HV185)作为待冲蚀材料, 试样尺寸为 $\Phi 30\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, 为避免表面粗糙度对冲蚀结果的影响, 采用金相砂纸逐级打磨至 1500 号并抛光。选用硬度为 HV115 的 7075-T6 铝合金作为对比材料。磨料粒子选用平均粒径为 10 μm 的绿 SiC 颗粒(GC)(北京微纳超细磨料有限公司), 磨料形貌如图 1 所示。

1.2 试验方法

冲蚀试验在自行研制的冲蚀试验机上进行。图 2 为磨料喷射过程示意图, 试验装置主要由喷枪、供气机构、供料机构以及工作台组成。喷枪采用收缩式, 喷嘴直径为 6 mm, 工作压力范围为 0~0.8 MPa, 磨料流量由供料机构控制, 喷枪固定, 工作台可实现 $0^\circ \sim 90^\circ$ 旋转。试验过程中, 采

用高强度磁铁收集铁基磨屑。试验前后使用无水乙醇对试样进行超声波清洗(超声功率为 40 W, 时间分别为 3 min 和 10 min), 冲蚀试验结束后, 用 Nova nano SEM650 型高分辨场发射扫描电子显微镜(FEI 公司)对清洗后冲蚀试样表面及磨屑进行形貌分析。在冲蚀磨斑中心位置取点, 利用 X-350A 型 X 射线应力测定仪测量试样表面应力。采用电解剥层结合 X 射线应力测定仪测量冲蚀后试样深度方向的应力大小。

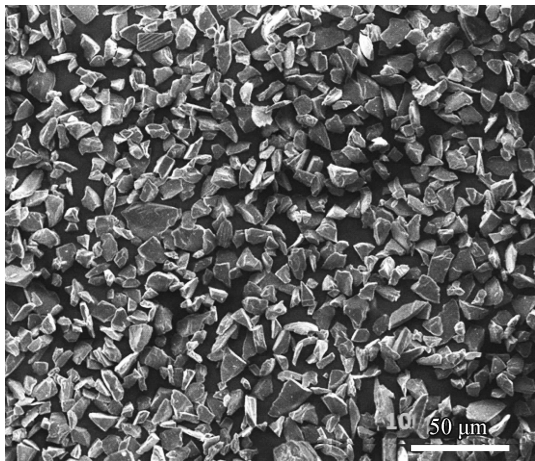


图 1 SiC 颗粒形貌的 SEM 照片

Fig. 1 SEM observation of the SiC particles

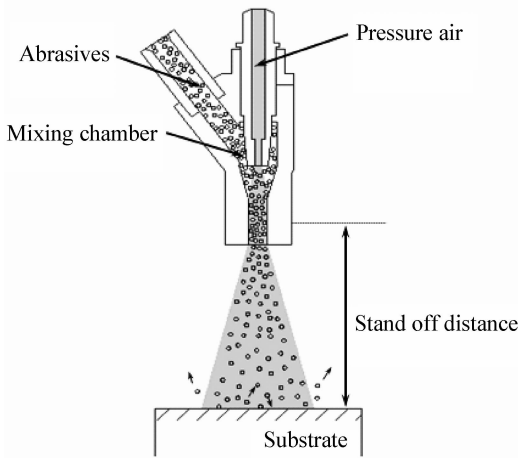


图 2 磨料喷射过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of abrasive jet process

2 试验结果与分析

2.1 材料去除率

图 3 为 45 钢试样在不同冲蚀磨料量和喷射压力条件下的材料去除情况, 可以看出, 45 钢试

样在超细 SiC 正向冲蚀条件下的失重很小, 在相同喷射压力条件下, 试样失重随冲蚀磨料量的增大而增加。在相同冲蚀磨料量条件下, 喷射压力越高, 导致材料的失重也越大。

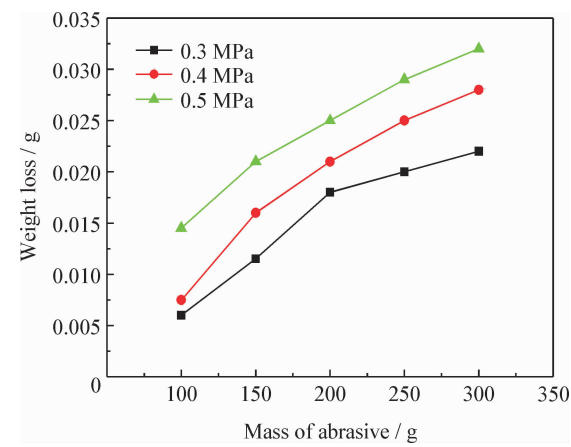


图 3 不同喷射压力条件下 45 钢失重与冲蚀磨料量之间的关系

Fig. 3 Weight loss of 45 steel as a function of abrasive mass at different pressures

材料去除率是研究冲蚀磨损的重要指标, 它是去除材料与冲蚀磨料量的质量比, 材料去除率的最大值与冲蚀角度有关, Finnie^[6]指出韧性材料材料去除率最大值一般发生在小角度冲蚀条件下, 其范围为 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$, 而脆性材料材料去除率一般发生在正向冲击条件下。Al 材料在粒径为 $120 \mu\text{m}$ 的 SiC 颗粒正向冲蚀条件下的材料去除率约为 4×10^{-4} 。

图 4 为 45 钢的材料去除率随冲蚀磨料量变

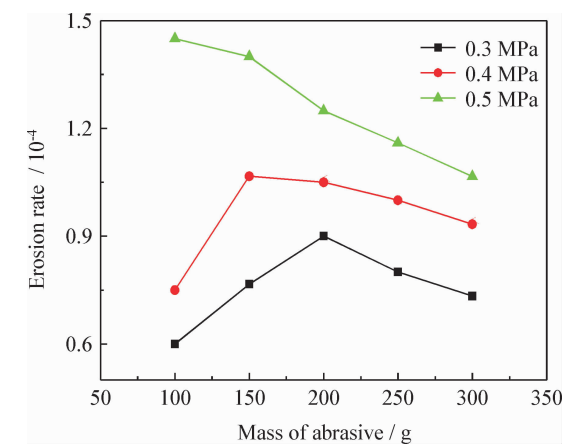


图 4 不同喷射压力条件下 45 钢材料去除率与冲蚀磨料量之间的关系

Fig. 4 Variation of erosion rate of 45 steel with abrasive mass at different pressures

化的曲线, 由于冲蚀磨料采用的是粒径 $10 \mu\text{m}$ 的超细磨料, 材料去除率的值相对较小, 在 $0.6 \times 10^{-4} \sim 1.5 \times 10^{-4}$ 之间, 这说明粒径对材料的去除率具有很大影响。可以看出冲蚀压力对材料去除率和冲蚀磨料量之间的关系影响很大, 材料去除率在不同冲蚀压力条件下, 呈先增加后减小的趋势。冲蚀压力越高, 材料去除率越早呈现下降趋势。

2.2 应力分布

图 5 为 45 钢试样在不同冲蚀条件下磨斑中心表层应力情况, 可以看出, 45 钢试样在超细 SiC 正向冲蚀条件下表面为压应力, 在相同喷射压力条件下, 表面残余压应力随冲蚀磨料量的增大有先增加后降低的趋势。在相同冲蚀磨料量条件下, 喷射压力越高, 表面残余压应力的值越小。

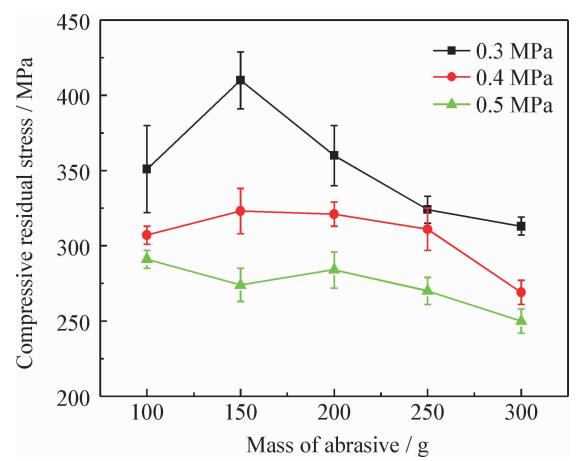


图 5 不同喷射压力条件下 45 钢表面残余压应力与冲蚀磨料量之间的关系

Fig. 5 Variation of residual stress of 45 steel with abrasive mass at different pressures

图 6 为 45 钢试样以不同喷射条件处理后, 残余压应力沿深度方向的分布曲线图。图中可以看出, 残余压应力沿深度方向逐渐减小, 不同冲蚀压强条件下的得到的残余压应力曲线相差不大。深度 $0 \sim 10 \mu\text{m}$ 时, 经冲蚀试样的残余压应力大于未经冲蚀试样的残余压应力, 随着深度的加深, 冲蚀与未冲蚀试样的沿深度方向的残余压应力值趋势一致。

2.3 冲蚀表面形貌

材料冲蚀的表面形貌与冲蚀角度有很大关系, 对于韧性材料, 通常在小角度冲蚀条件下 ($15^{\circ} \sim$

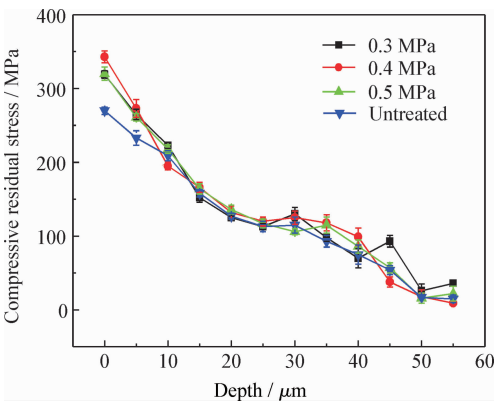
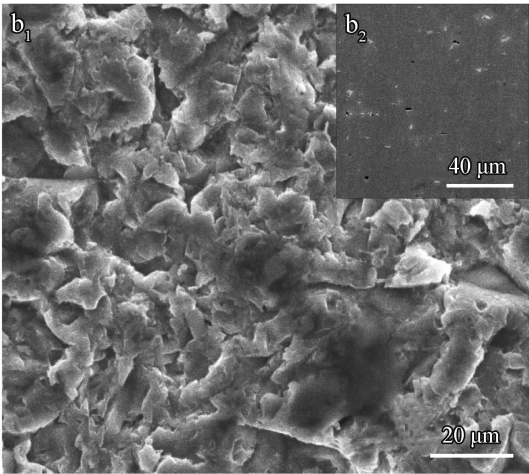
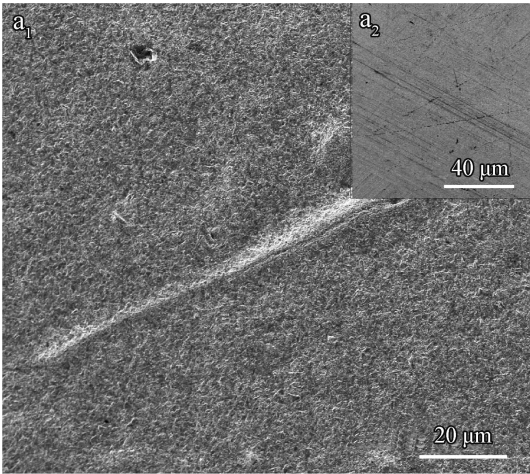


图 6 不同喷射条件下 45 钢深度方向残余应力
Fig. 6 Distribution of compressive residual stress along the depth

30°)主要发生剪切变形,在大角度冲蚀条件下(接近 90°)主要发生挤压变形。45 钢和 7075-T6 铝合金都属于韧性材料,在正向冲击条件下,表面产生塑性变形,使表面发生粗化。图 7(a)和 7(b)分别为 45 钢和 7075-T6 铝合金试样在 200 g SiC 颗粒冲击后得到的表面形貌,其中右上角为冲蚀前试样表面形貌。可以看出,45 钢样品表面变形较小,相对较平整,而 7075-T6 铝合金样品表面发生严重变形,表面形貌十分不规则。45 钢试样表面硬度约为 7075-T6 铝合金试样表面硬度的 1.6 倍,这说明试样表面的硬度影响着冲蚀形貌的结果,表面硬度越小,塑性变形越严重,冲蚀后表面冲蚀所得的形貌越不规则。



(a₁) Treated and fresh (a₂) 45 steel

(b₁) Treated and fresh (b₂) 7075-T6 aluminum alloy

图 7 45 钢与 7075-T6 铝合金冲蚀表面形貌

Fig. 7 SEM morphologies of the eroded surfaces

粒子连续冲击 45 钢试样,会在试样表面形成如山脉状的形貌(如图 8 所示),主要由尺寸不一的压坑和凸起组成。可以推断,连续粒子冲击光滑的试样表面,使试样表面发生塑性变形,受冲击的区域产生压坑,坑内的材料并不是直接被去除的,而是通过挤压作用,将压坑中材料挤向压坑周围产生唇形偏向堆积,原理如图 9 所示。偏向堆积在反复的冲击挤压下最终呈块状剥落,这是冲蚀磨损材料去除的主要形式^[7]。这种偏向堆积过程受到较大的阻碍,在凸起顶部因应力集中产生的塑性变形最大,根据位错理论,由于滑移受阻,在凸起顶部就会产生位错塞积,使塞积处局部的应力集中达到最大,最终在位错塞积处萌生疲劳裂纹,使得该处的高应力得到释放^[8]。

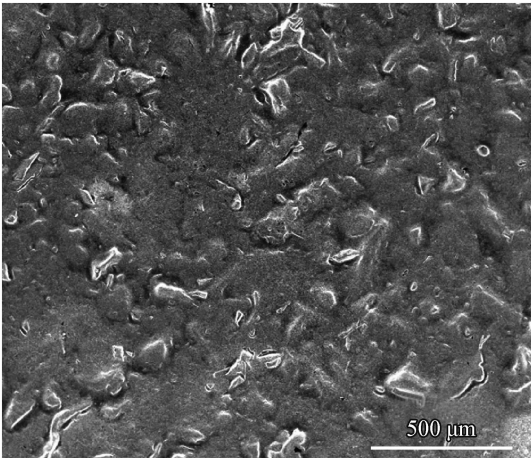


图 8 45 钢冲蚀表面形貌

Fig. 8 SEM observation of the eroded surface

疲劳裂纹进一步扩展,产生片层磨屑。由于片层磨屑与机体的结合力较小,很容易被超声清洗去除,使用 SEM 观测的时候很容易被忽视,通过缩短超声清洗的时间,得到了片层磨屑的形貌图。图 10 为磨料冲蚀材料片层剥落的形貌图,可以看出,片层磨屑主要产生在偏向堆积的脊部,并沿脊部不断扩展,剥落区域呈椭圆形,片状磨屑沿椭圆四周开裂,露出新鲜的机体。

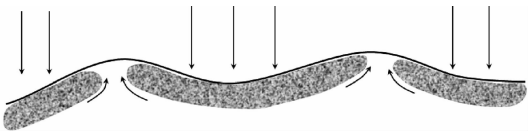
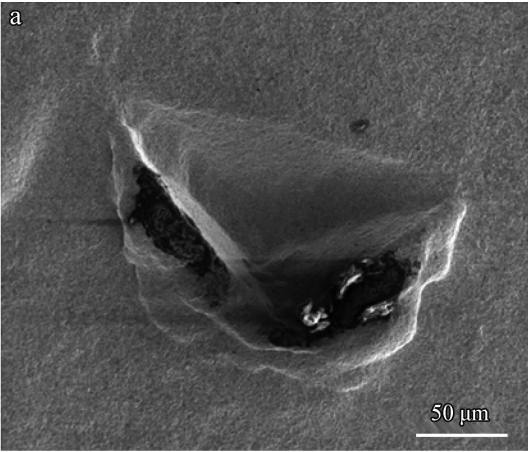
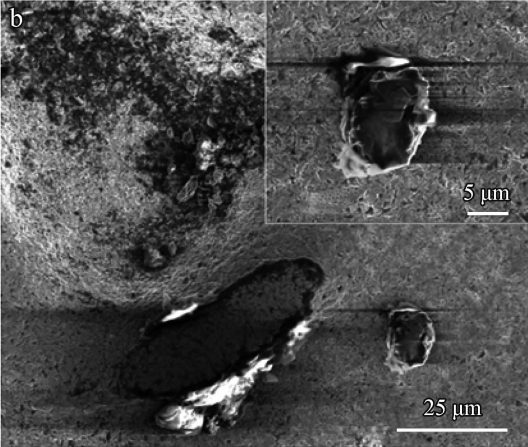


图 9 冲蚀挤压原理图

Fig. 9 Schematic diagram of surface extrusion by solid particles



(a) Extruded lips



(b) Plated dusts

图 10 偏向堆积脊部片层磨屑形貌

Fig. 10 Platelets on the ridge of the extruded lips

2.4 磨屑形貌

利用磁铁捕获的磨屑以块状磨屑为主,片状

磨屑由于尺寸较小,难以捕获。从得到磨屑的形貌分析,可以认为 45 钢试样在正向冲蚀条件下材料去除主要有两种形式,块状剥落和片状剥落,图 11 为典型的块状磨屑与片状磨屑的形貌图。片层磨屑的产生先于块状磨屑,如图 10(b)所示,片状磨屑产生于材料偏向堆积的脊部,沿椭圆区域向四周开裂,片层磨屑呈多层,剥落后片状散落,整体剥落的片状磨屑其边缘呈阶梯状,片状磨屑由表及里其大小呈减小趋势。块状剥落主要由于粒子反复冲击产生压坑,并在压坑边缘产生偏向堆积。

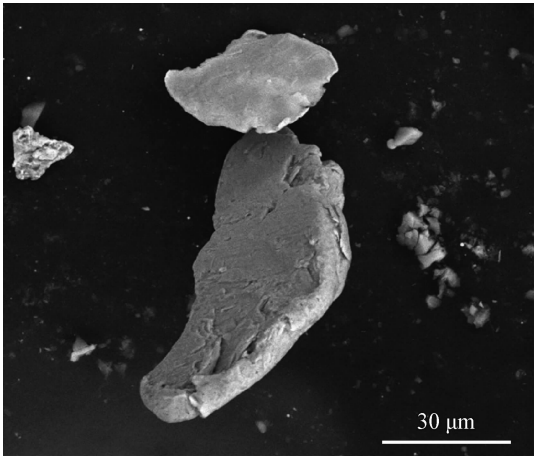


图 11 45 钢冲蚀磨屑形貌

Fig. 11 SEM observation of abrasive dust of 45 steel

2.5 冲蚀机理

45 钢受到磨粒的连续冲击,在反复的塑性变形中发生材料的剥落,材料去除主要与作用在表面上的冲击能量有关,去除材料质量 $W \propto \sum E$,单个粒子所携带的能量 $E \propto v^2$,冲蚀速度 $v \propto P$, P 为冲蚀压力。由此可知,冲蚀磨损结果是粒子连续冲击产生的积累效应,冲蚀粒子的数量越多,喷射压力越大,去除的材料就越多。

冲击磨损过程中,材料去除并不是被一次冲击产生的,从磨屑的块状形貌可以看出,冲蚀磨损是反复冲击的积累效应,所以试样表面材料的去除有一个孕育期,此时的材料去除率相对较小,随着冲蚀时间的增加,冲蚀磨料量的上升,材料去除率也呈上升趋势。粒子的连续冲击导致表层下方形成一个加工硬化层,随着冲蚀的继续,材料去除率呈下降趋势。

经抛光 45 钢试样表面具有残余压应力且沿深度方向逐渐减小。磨料粒子冲蚀 45 钢表面,

粒子冲击能量作用于工件表面,不仅会提升工件表面的残余压应力,还会去除试样表面的材料。因此,冲蚀后试样表面的残余压应力并不随着冲蚀压力、磨料使用量的增大而提高,冲蚀压力越高,表层去除材料越多,反而造成表面的残余压应力越低。在相同冲蚀压力条件下,残余压应力与磨料使用量呈先增大后减小的趋势。

3 结 论

(1) 正向冲击条件下,韧性材料表面的磨损形貌主要表现为变形、压坑和挤压唇,材料偏向堆积产生的挤压唇在粒子的反复冲击下,最终呈块状剥落。偏向堆积的脊部由于位错塞积产生的应力集中,导致疲劳裂纹的萌生,并最终导致片状磨屑剥落。

(2) 在正向冲蚀条件下,45 钢的冲蚀失重随着冲蚀磨料量的增加以及粒子喷射压力的增大而增加;材料去除率在正向冲击条件下相对较小,随着冲蚀磨料量的增加,材料去除率呈下降趋势。

(3) 微磨料冲蚀能够提高 45 钢表层的残余压应力,然而磨料冲蚀会去除表层材料,致使在喷射压力相同条件下,表面残余压应力随冲蚀磨料量的增大先增加后降低的趋势。在相同冲蚀磨料量条件下,喷射压力越高,表面残余压应

力的值越小。

参考文献

- [1] 杨震晓,刘敏,邓春明,等. 热喷涂基体表面前处理技术的研究进展 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(2): 8-14.
- [2] Finnie I. Erosion of surface by solid particles [J]. Wear, 1960(3): 87-103.
- [3] Bahadur S, Badruddin R. Erodent particle characterization and the effect of particle size and shape on erosion [J]. Wear, 1990(138): 189-208.
- [4] Shipway P, Hutchings I. The role of particle properties in the erosion of brittle materials [J]. Wear, 1996(193): 105-113.
- [5] Wang Y F, Yang Z G. Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials [J]. Wear, 2008 (265): 871-878.
- [6] Finnie I. Some reflections on the past and future of erosion [J]. Wear, 1995 (186/187): 1-10.
- [7] Liebhaf M, Levy A. The effect of erodent particle characteristics erosion of metals [J]. Wear, 1991(151): 381-390.
- [8] 王习术. 材料力学行为试验与分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007, 9: 162-172.

作者地址: 北京市丰台区杜家坎 21 号

100072

Tel: (010) 6671 8580

E-mail: zhangwei18@hotmail.com

• 本刊讯 •

2012 年中国机械工程学会年会

2012 年中国机械工程学会年会将于 11 月 19 日~22 日在福建省福州市举行,年会主题为“发展高端装备制造产业,促进海西实现跨越性发展”。

会议主要内容包括开幕式及主旨报告会,颁奖仪式,特邀主题报告等。会议还设有 6 大专题活动,分别为“《机械工程学科发展研究(微纳制造和特种加工)》专题研讨会”,“第二届‘上银优秀机械博士论文奖’颁奖仪式”,“工业设计专题研讨会”,“青年学术论坛”,“2012 国际机械工程教育峰会(2012. 12. 10-12, 北京)”以及“2012 增量制造技术国际论坛暨第六届全国快速成形与制造学术会议(2012. 12. 13-16, 武汉)”。后两个专题为本届年会重要的国际性学术交流活动的,将与年会主会期错时分地召开。

此外,本届年会将同期召开中国机械工程学会十届二次理事(扩大)会及十届三次常务理事(扩大)会。

(摘自中国机械工程学会表面工程分会网)