

DOI: 10.16078/j.tribology.2018.04.002

硬质沙粒对TC4钛合金冲击磨损的 损伤行为的研究

吴松波, 蔡振兵*, 林禹, 李正阳, 朱旻昊

(西南交通大学摩擦学研究所, 四川成都610031)

摘要: 在新型冲击磨损试验机上, 以TC4钛合金作为研究对象开展了在硬质沙粒条件下的冲击试验. 考察了沙粒粒径(120~380 μm)、冲击次数对TC4钛合金冲击磨损行为的影响. 研究表明: 粒径能显著影响TC4钛合金的冲击磨损行为. 在冲击过程中硬质沙粒会不断切削、挤压试样表面, 造成较大的材料损失. 随着沙粒粒径的增加, 磨损面积增加, 冲击力峰值、磨损深度和界面的能量吸收率都呈现先增加后减小的趋势. 随着冲击次数的增加, 冲击力峰值和界面能量吸收率增加, 磨损加剧. 硬质沙粒冲击作用下TC4钛合金的磨损机制主要表现为沙粒棱角对试样表面的微观切削和挤压剥落.

关键词: 低能量冲击; 沙粒粒径; 能量吸收率; 冲击接触力; 磨损率

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2018)04-0383-08

Effect of Hard Sand on the Impact Wear Behavior of TC4 Alloy

WU Songbo, CAI Zhenbing*, LIN Yu, LI Zhengyang, ZHU Minhao

(Tribology Research Institute, Southwest Jiaotong University, Sichuan Chengdu 610031, China)

Abstract: The impact test of TC4 titanium alloy with the environment hard sand was carried out, using a new kind of impact wear test rig. The effects of particle size (120~380 μm) and impact cycle were studied. The results show that the size of sand particles significantly affected the impact wear behavior. In the process of impact, hard sand particles cut and squeezed the sample surface constantly, resulting in increasing loss of material. As the particles size was increased, the wear area increased, and the peak of impact force, the wear depth and the energy absorption rate of the interface increased firstly and then decreased. Increasing the impact cycles increased both the peak of impact force and the energy absorption rate, and the wear was severe. The wear mechanism of TC4 titanium alloy in hard sand environment mainly indicated microscopic cutting and exfoliation generated due to the edges of sand.

Key words: low-energy impact; particle size of sand; energy absorption rate; impact force; wear rate

冲击磨损是工业生产和生活中常见的一种磨损形式. 由于冲击磨损过程非常复杂, 不仅受冲击参数、对摩擦副材料的影响, 而且与服役的环境有关, 其损伤行为也较为复杂^[1].

目前对冲击磨损的研究集中于探究不同材料的

耐冲击磨损性能^[2-4]. Veinthal等^[5]用粒径小于6 mm的花岗岩冲击Fe-Cr-C涂层, 得到其磨损机理主要是犁削和微切削. Sundström等^[6]和王璋等^[7]研究了不同种类的钢材的冲击磨损行为, 均发现钢材的磨损情况不仅与硬度有关, 还与受其组织结构的影响. Lindroos

Received 28 February 2018, revised 23 March 2018, accepted 9 April 2018, available online 28 July 2018.

*Corresponding author. E-mail: caizb@home.swjtu.edu.cn, Tel: +86-28-87600601.

The project was supported by the Science and Technology Innovation Research Team of Sichuan Province (2017TD0017) and the National Natural Science Foundation of China (U1530136, 51627806).

四川省青年科技创新团队(2017TD0017)和国家自然科学基金项目(U1530136, 51627806)资助.

等^[8-9]用高速弹丸冲击铬合金高锰钢,探究了预应变、冲击速度、微观组织结构与磨损率、磨损机理之间的关系. 闻健等^[10]和王军军等^[11]研究了冲击粒子粒径和冲击次数对材料的冲击磨损体积的影响. Cai等^[12-14]研发了新型的磨损试验机,并对核电站薄壁管材料开展了详细研究,发现液体环境、支撑跨距、径厚比和夹持几何尺寸都会显著影响其冲击磨损行为. 虽然目前已经对材料的冲击磨损行为进行了一些研究,但关于服役环境(温度、湿度、沙尘和液体等)对冲击磨损动力学行为和磨损机理的研究仍然较少.

钛合金本身密度较小,并且具有良好的耐热、耐腐蚀性能,所以被广泛地应用于航空和生物工程领域^[15-16]. 固、液体微粒冲击钛合金的研究是目前研究的热点. Gujba等^[17]和李安海等^[18]对钛合金的冲击机理进行了研究. Batory等^[19]对渗氮处理后的钛合金进行水滴冲蚀试验,发现经低温渗氮处理后的材料具有更好的耐受性. 李振华等^[20]用硬质颗粒冲蚀等径角挤压后的钛合金,并对其磨损机理进行了探究. Khayatan等^[21]研究了含有SiO₂颗粒的盐溶液冲蚀纯钛的行为,得到在冲击角度为40°时材料损失率最大的结论. 但这些研究都无法对冲击过程中材料的动力学响应、能量损失与磨损量的关系进行量化分析,导致对钛合金冲击磨损机理揭露不够深刻^[22].

本研究在能量控制型的冲击磨损试验机上进行,通过在冲击界面间添加硬质沙粒来研究沙粒粒径、冲击次数对钛合金冲击磨损行为的影响.

1 试验部分

1.1 试验材料及制备

试验采用球/平面接触形式,平面试样采用TC4钛合金(HV323.5),尺寸为45 mm×24 mm×3 mm. 对试样表面进行机械抛光处理后(表面粗糙度为 $R_a=1.2\ \mu\text{m}$),用超声清洗10 min并吹干. 对磨球试样采用直径 $\phi 7.144\ \text{mm}$ 的Si₃N₄陶瓷球(HV2 273). 磨损介质选用粒径分别为120、160、212、270和380 μm 的沙粒(主要成分 $\omega\text{SiO}_2>98.5\%$).

1.2 试验设备及参数

试验机是在能量控制型冲击磨损试验机的基础上改装而成,如图1所示. 在控制系统的控制下,音圈电机以正/余弦模式作往复直线运动,当音圈电机向前运动时,通过弹簧拉杆推动动能块从初始位置向前运动;当速度达到最大速度时,动能块与弹簧拉杆分离,并以恒定的速度撞击试样后弹回;撞击结束后,音圈电机通过弹簧拉杆使动能块向后运动直至回到初始位置,从而完成整个周期的冲击动作. 在开始试验后,打开并调节流量调节阀,使漏斗中的沙粒以恒定的流量流出. 在此过程中,由位移和力传感器分别检测动能块撞击前后冲头的位移和试件的受力情况,对位移进行微分可以得到动能块的速度. 由动能定理: $E = \frac{1}{2}mv^2$,将速度代入公式,可以得到动能块在试验过程中的动能变化情况(撞击前后动能块动能的差,即为冲击过程消耗的能量).

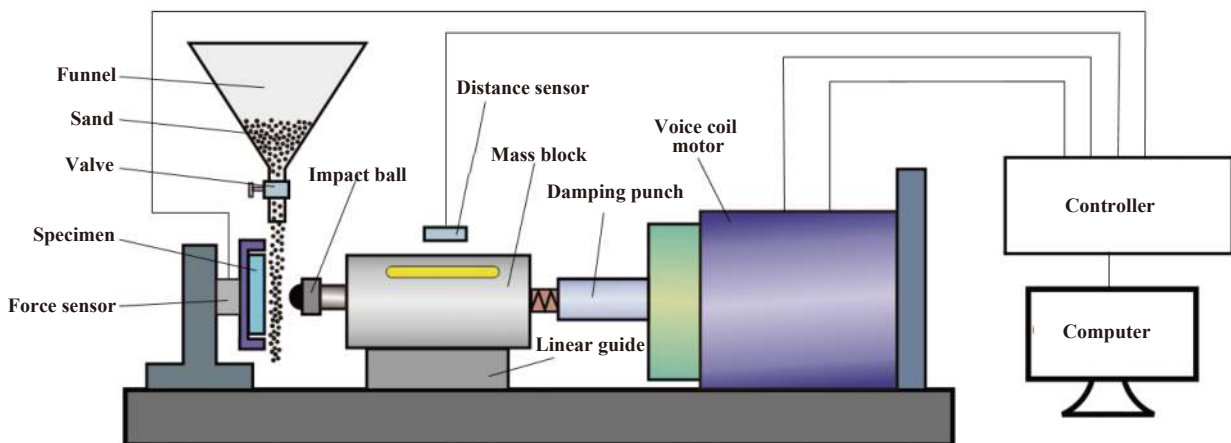


Fig. 1 The schematic diagram of impact wear tester with particles

图1 沙粒环境冲击磨损试验机示意图

本试验动能块(含冲头)总质量为463 g,设置其速度为120 mm/s,单次冲击能量为3.33 mJ,沙粒的流速为60 mL/min. 分2组进行试验:第1组考察沙粒尺寸的

影响,粒径分别为120、160、212、270和380 μm ,冲击次数均为 1×10^4 次;第2组考察损伤随时间的演变,沙粒的粒径均为212 μm ,冲击次数分别为 1.25×10^3 、

2.5×10^3 、 5×10^3 、 1×10^4 和 2×10^4 次.

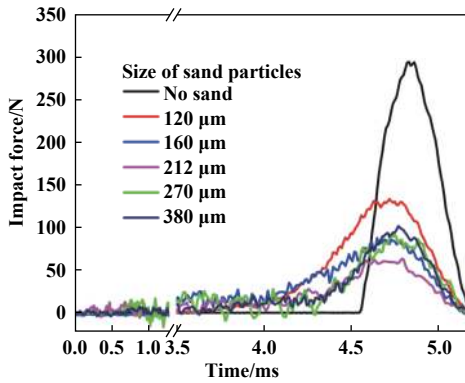
试验后, 使用Contour GT型白光干涉仪测量磨痕的轮廓, 并利用JSM6610LV型扫描电子显微镜(SEM)观察磨痕的表面形貌, 来分析钛合金的磨损机制.

2 结果与讨论

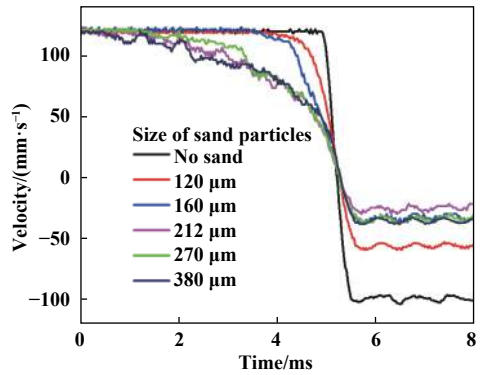
2.1 沙粒粒径的影响

在冲击次数 $N=1 \times 10^4$ 时, 不同沙粒粒径条件下的冲击界面动力学响应见图2. 如图2(a)所示, 随着沙粒粒径的增加, 冲击力的峰值呈先减小后增大的趋势.

先从120 μm 的133 N降低为212 μm 的63 N, 降幅达52%, 再增长为380 μm 时的101 N. 如图2(b)所示, 随着沙粒粒径的增加, 能量冲击返回速度先减小至212 μm 的25 mm/s, 然后增加. 这是由于随着沙粒粒径的增加, 磨损区域单位面积上沙粒个数减少, 单个沙粒具有的能量增加, 对钛合金表面的切削挤压作用增强, 所以能量吸收率增加(见图3), 返回速度减小. 但随着单个沙粒能量的继续增加, 沙粒更易发生破碎, 导致沙粒与钛合金接触面积增加, 对钛合金的切削能力减弱. 所以能量吸收率减少(见图3), 冲击返回速度增加.



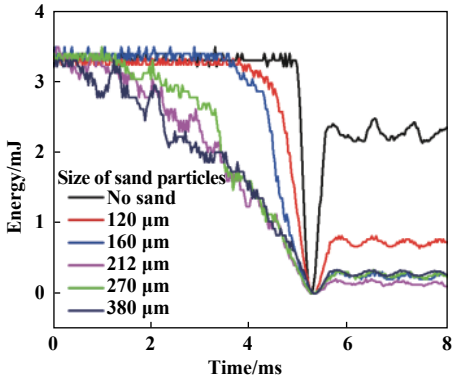
(a) Impact force vs time



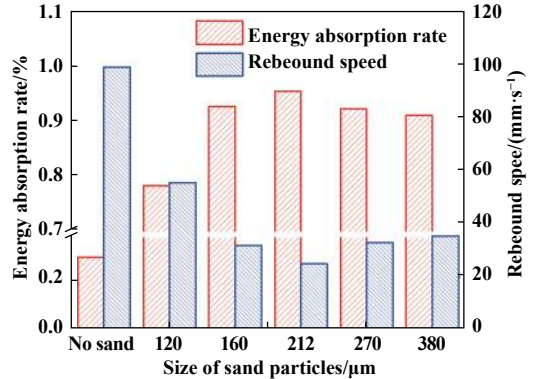
(b) Velocity vs time

Fig. 2 Effect of size of sand particles on impact kinetic response

图2 粒径变化对冲击动力学响应的影响



(a) Kinetic energy vs time



(b) Rebound velocity and energy absorption rate

Fig. 3 The kinetic energy effect by different sizes of sand particles

图3 不同粒径沙粒冲击能量变化

有沙和无沙条件对比, 冲击力峰值、能量吸收率、冲击接触时间和动能块的冲击返回速度都有明显不同. 见图3(b)无沙条件下, 能量吸收率为31.39%, 远小于沙粒粒径为120 μm 的78.40%; 返回速度为99.40 mm/s, 远大于沙粒粒径为120 μm 的55.77 mm/s. 这是因为在动能块的冲击速度变为零的过程中, 动能块的动能主要转变为试样的塑性变形和弹性势能; 在动能块反向运动直至离开试样的过程中, 试样的弹性势能转变为

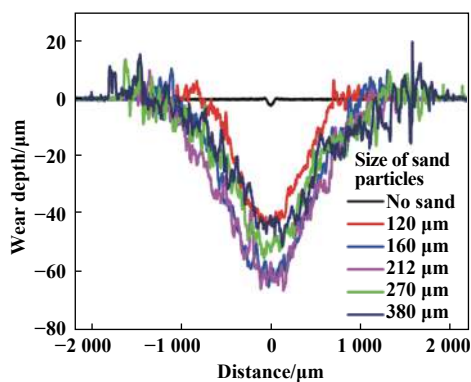
动能块的动能. 在无沙条件下, Si_3N_4 陶瓷球表面较为光滑, 且与试样的接触面积较大. 所以冲击过程中产生的塑性变形较少, 吸收的能量就较小. 但是在有沙条件下, 冲头通过沙粒撞击到试样表面. 沙粒本身具有棱角, 使其与试样接触的面积较小, 能够挤压、切削试样表面. 所以在冲击过程中能够产生较多的塑性变形(见图5), 能量吸收较多. 在有沙条件下的冲击过程中, 沙粒受挤压能够沿试样表面滑动或破碎, 这样接

触时间就会明显增加. 而且在有沙条件下的冲击返回速度较小, 即: 冲击过程中动量变化较小. 由动量定理: $Ft = m \cdot \Delta v$, 故有沙条件下冲击力峰值明显降低(见图2).

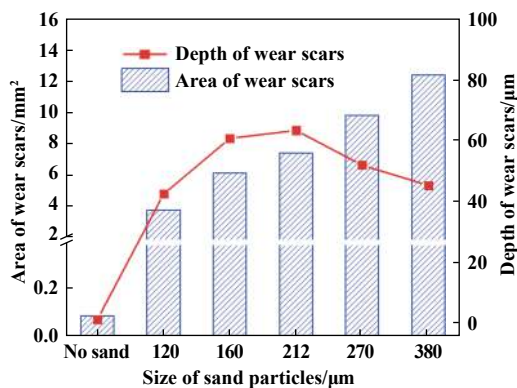
图4是冲击次数 $N=1 \times 10^4$ 时, 不同沙粒粒径条件下的磨痕参数. 随着沙粒粒径的增加, 磨损面积不断增加, 而磨痕深度先增加后减小. 因为在磨损过程中, 冲头挤压沙粒使其沿试样表面滑动, 挤压、切削试样表面, 从而产生磨痕, 且 Si_3N_4 陶瓷球的直径为恒定值, 所以当沙粒粒径增加时, 沙粒能够接触到距离磨痕中心点更远的位置, 磨损面积也就会随之增加. 对于磨痕深度的变化: 一方面, 随着沙粒粒径的增加, 单个沙粒所具备的能量就越高, 对试样表面的切削能力就越强, 磨痕也就越深. 另一方面, 随着沙粒粒径的增加,

与磨损区域接触的沙粒数量减少, 单位面积上产生切削、挤压的次数减少, 所以磨痕就越浅. 两者复合作用导致磨损深度先增加后减小. 磨损区域边缘比较粗糙, 且有明显的凸起[见图4(a)]. 这是因为沙粒的棱角犁削、挤压钛合金表面留下槽状划痕、挤压唇和挤压坑, 甚至出现破碎沙粒镶嵌到材料表面[见图5(b, d, f)].

与有沙条件相比, 无沙条件下的磨损面积和磨痕深度明显要小. 这是因为 Si_3N_4 陶瓷球表面光滑, 冲击过程中与钛合金接触面积较大. 钛合金表面发生剥层磨损, 材料去除效率较低[见图4(a)]. 而有沙条件下, 冲头通过沙粒的棱角接触试样表面, 单位接触面上的能量比较集中. 所以材料的去除效率较高, 磨损体积也就较大.



(a) Profile of wear scars



(b) The area and depth of wear scars

Fig. 4 Profile, area and depth off wear scars

图4 不同沙粒粒径时钛合金的磨痕参数

图5是不同沙粒粒径条件下磨痕形貌的扫描电镜图片. 在无沙条件下, 磨损表面存在大量的疲劳剥落. 这是由于钛合金塑性较好, 在冲头不断的冲击作用下剥层会逐渐被剥离磨损表面形成磨损坑[见图5(a)]. 在有沙条件下, 磨痕的边缘区域存在大量沙粒尖角挤压形成的凹坑、沙粒切削形成的犁沟和破碎沙粒镶嵌在试样表面; 在磨痕内部, 存在大量短的犁沟和压痕(见图5). 所以沙粒条件下的磨损机理以微观切削和挤压剥落为主.

2.2 冲击磨损的演变(不同次数的影响)

由图6可知随着冲击次数的增加冲击力的峰值和冲击返回速度都明显降低. 在1 000次之前下降显著, 从50次的128 N下降为1 000次的86 N, 下降了32.8%; 之后下降趋于平缓, 从1 000次的86 N下降为10 000次时的65 N, 下降了24.4%. 与冲击力峰值的变化相似, 冲击返回速度也是在1 000次之前下降显著, 之后下降趋于平缓. 图7所示的是随着冲击次数的增加, 能量吸

收率增加, 冲击返回速度减小. 在冲击磨损前期, 抛光后的试样表面粗糙度较低, 而且磨损区域形成的犁沟、压痕较少. 所以沙粒被挤压时容易沿试样表面滑出磨损区, 使冲头与试件直接接触. 这样沙粒对试样的挤压、切削作用较弱, 冲击返回速度较大, 能量吸收较少(见图7). 随着冲击次数的增加, 磨损区域出现大量的犁沟和压痕, 磨痕表面较为粗糙. 沙粒被挤压时会剪切、挤压磨损表面的凸起, 能够吸收较多的能量, 冲击返回速度降低. 在冲击次数 $N < 1000$ 时, 随着冲击次数的增加, 磨痕表面的粗糙度增加, 而粗糙的磨损表面能起到良好的缓冲吸能作用, 所以冲击力的峰值急剧减小[见图6(a)]. 当冲击次数 $N > 1000$ 时, 磨痕表面粗糙度变化缓慢; 但随着磨损深度的增加, 致使冲击接触面积增加. 这样也会增强磨损坑表面的缓冲吸能作用, 故冲击峰值力保持下降的趋势.

图8所示的是不同次数条件下, 白光干涉仪获得的三维轮廓. 磨损区域的面积随着冲击次数的增加显

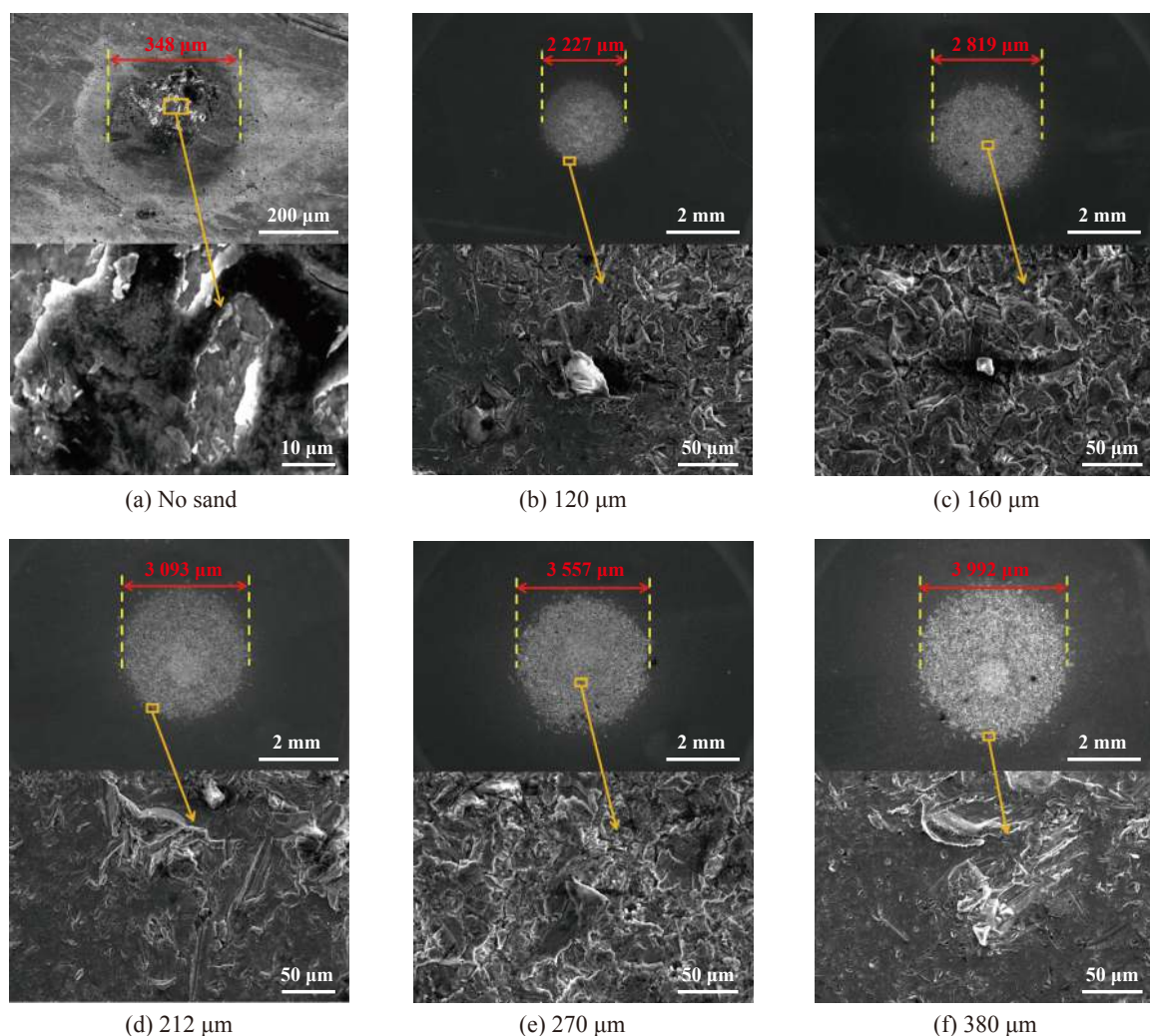


Fig. 5 SEM micrographs of wear scar produced by of different size of sand particles

图 5 不同沙粒粒径时磨痕形貌的SEM照片

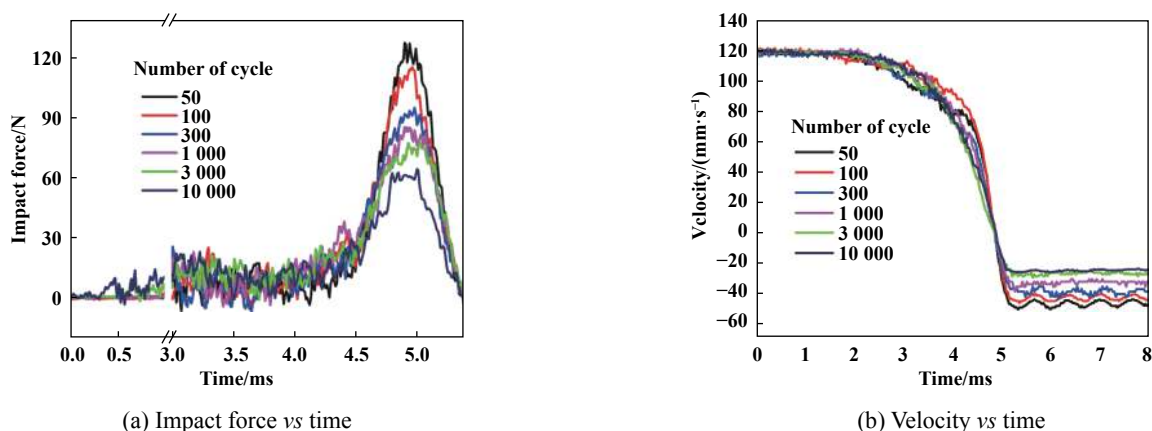
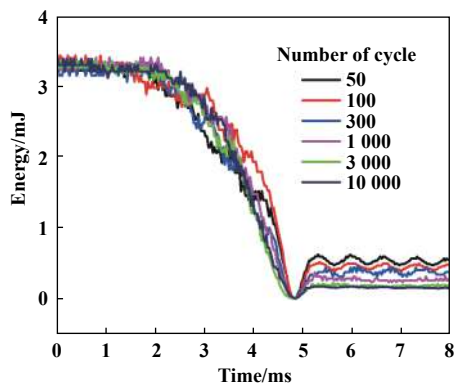


Fig. 6 Effect of impact cycle on impact kinetic response (particle size 212 μm)

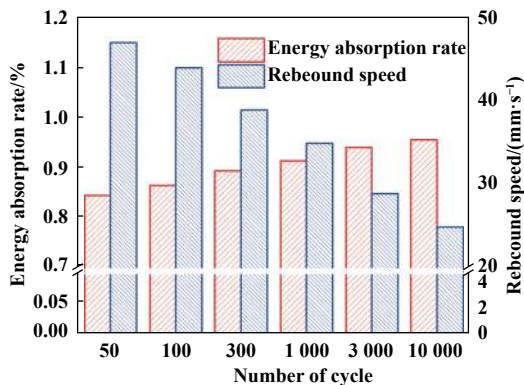
图 6 不同冲击次数条件下动力学响应(沙粒粒径212 μm)

著增加, 且增长趋于平缓[见图9(b)]. 一方面, 由于上试样为球面, 所以离磨损区域中心越远, 被沙粒撞击的概率就越小. 随着冲击次数的增加, 距磨损区域中

心的较远的区域被沙粒撞击到的概率增加, 磨损面积增加. 另一方面, 随着冲击次数的增加, 磨损深度缓慢增加[见图9(a)], 这样沙粒就能够接触到距磨损中心更



(a) Energy vs time



(b) Rebound velocity and energy absorption rate

Fig. 7 The kinetic energy effect by different size of sand particles (particle size 212 μm)

图7 不同冲击次数条件下能量变化(沙粒粒径212 μm)

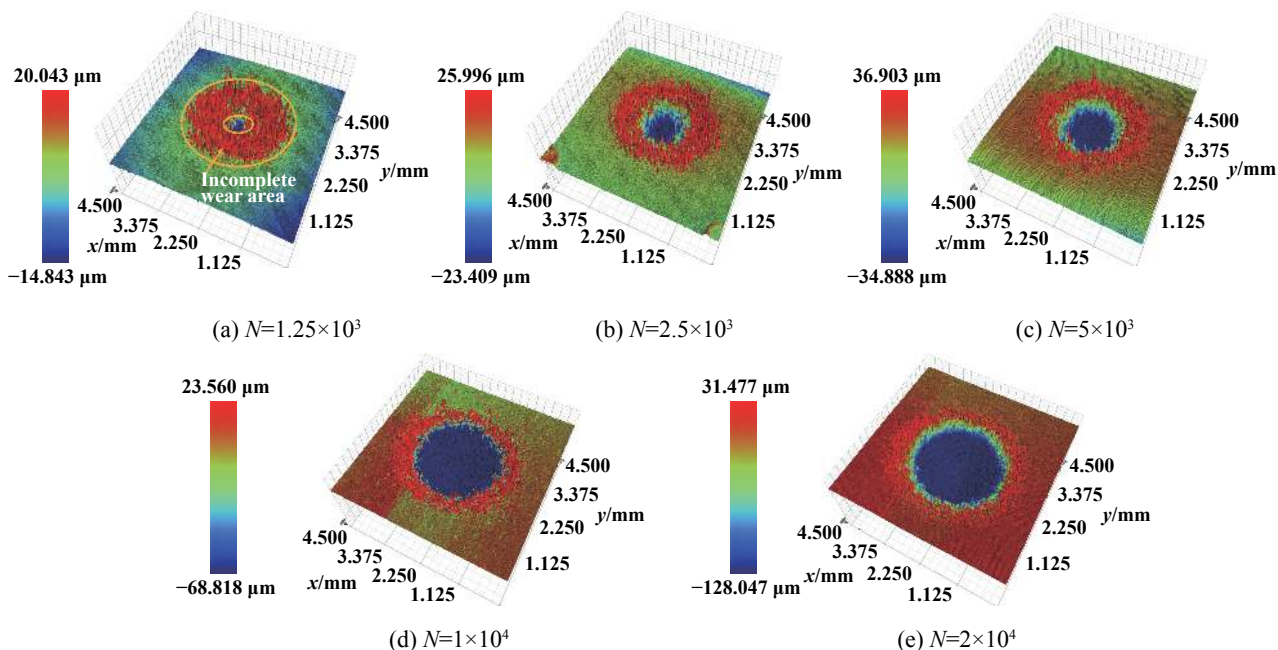


Fig. 8 Wear scars with different impact cycles (particle size 212 μm)

图8 不同冲击次数下的磨痕形貌(沙粒粒径212 μm)

远的区域. 两者协同作用, 使得磨损面积随冲击次数不断增加. 在磨损坑外形成了由挤压坑、犁沟和沙粒的镶嵌组成的环状的不完全磨损区[见图8(a)]. 随着冲击次数的增加, 环状不完全磨损区的宽度减小. 这是由于随着冲击次数的增加, 切削、挤压形成的凸起被后面的沙粒反复切削、挤压形成磨损坑. 磨损坑半径增长比磨损半径快, 所以磨损区域的宽度不断减小.

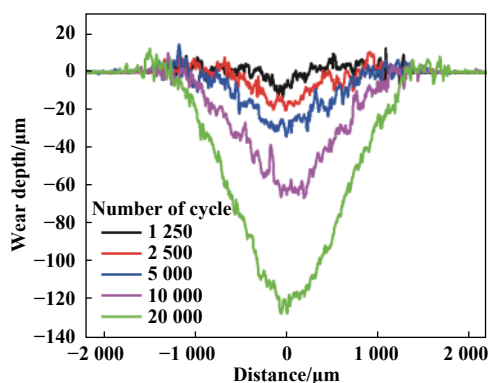
由图9(b)可见, 当冲击次数为 1.25×10^3 、 2.5×10^3 、 5×10^3 、 1×10^4 、 2×10^4 次时, 其对应的磨痕深度分别为10.10、17.35、29.79、62.86和120.70 μm. 当冲击次数 $N < 2.5 \times 10^3$ 时, 磨损坑深度增加较快; 在冲击次数 $N > 2.5 \times 10^3$ 时, 每 1.25×10^3 次使磨损深度增加约7.50 μm.

因为随着冲击次数的增加, 试样表面变得粗糙, 使得磨损加剧; 但同时冲击接触面积增加, 单个沙粒具有的能量减少、材料去除能力下降, 使得磨损速度降低. 在冲击次数较高时, 两者复合作用使得磨损深度增加均匀. 在冲击次数较少时, 粗糙区域面积较小, 所以磨损深度增长较快.

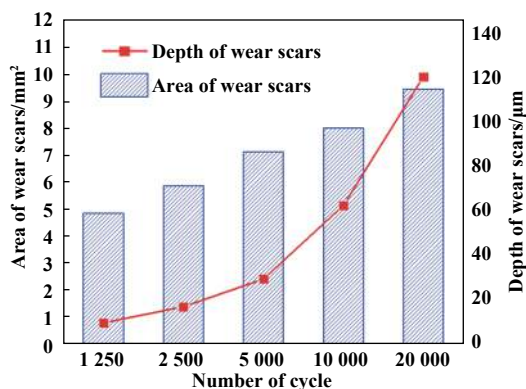
3 结论

a. 随着沙粒粒径的增加, 磨损区域面积增加; 冲击力峰值、能量吸收率、磨损深度先增加后减小. 沙粒环境下的磨损机制主要表现为微观切削、挤压剥落.

b. 在冲击界面间加入硬质沙粒使冲击接触时间、



(a) Profile of wear scars



(b) Area and depth of wear scars

Fig. 9 Analysis of the impact wear scar with different impact cycles (particle size 212 μm)图9 不同冲击次数条件下磨痕参数(沙粒粒径212 μm)

能量吸收率、磨损体积显著增加,冲击力峰值下降。

c. 随着冲击次数的增加,冲击力峰值下降显著,能量吸收率增加,磨损加剧。

d. 冲击磨损的损伤主要由于材料压缩变形后与摩擦副的作用引起的,其对界面的主要作用能量来自动能块的动能,与冲击动能、次数相关。切向磨损的材料去除主要诱因是切向力,其磨损率与总位移、正压力相关。材料在两种摩擦形式下的摩擦能消耗模式是不同的,因此影响两种摩擦形式的磨损率主要因素不一样。冲击磨损中沙粒的加入充当了磨粒的作用,沙粒能犁削接触界面使得材料去除,因此本研究的摩擦形式属于一种复合摩擦磨损形式。

参考文献

- [1] Zhou Zhongrong, Lei Yuanzhong, Zhang Siwei. *Frontiers of tribology*[M]. Beijing: Science Press, 2006(in Chinese) [周仲荣, 雷源忠, 张嗣伟. 摩擦学发展前沿[M]. 北京: 科学出版社, 2006].
- [2] Liu R, Yao J H, Zhang Q L, et al. Sliding wear and solid-particle erosion resistance of a novel high-tungsten Stellite alloy[J]. *Wear*, 2015, 322-323: 41-50. doi: 10.1016/j.wear.2014.10.012.
- [3] Antonov M, Veinthal R, Yung D L, et al. Mapping of impact-abrasive wear performance of WC-Co cemented carbides[J]. *Wear*, 2015, 332-333: 971-978. doi: 10.1016/j.wear.2015.02.031.
- [4] Hua Chen, Xu Ying, Cheng Xianhua. Effects of Microstructure and morphology on slurry erosion performance of low-carbon bainitic steels[J]. *Tribology*, 2015, 32(2): 121-130 (in Chinese) [华晨, 徐颖, 程先华. 低碳贝氏体微观组织形态对冲蚀磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2015, 32(2): 121-130]. doi: 10.16078/j.tribology.2015.02.001.
- [5] Veinthal R, Sergejev F, Zikin A, et al. Abrasive impact wear and surface fatigue wear behaviour of Fe-Cr-C PTA overlays[J]. *Wear*, 2013, 301(1-2): 102-108. doi: 10.1016/j.wear.2013.01.077.
- [6] Sundström A, Rendón J, Olsson M. Wear behaviour of some low

alloyed steels under combined impact/abrasion contact conditions[J]. *Wear*, 2001, 250(1-12): 744-754. doi: 10.1016/S0043-1648(01)00712-8.

- [7] Wang Zhang, Cai Zhenbing, Sun Yang, et al. Impact fretting wear behavior of pure iron under ball-to-flat contact[J]. *Tribology*, 2017, 37(2): 225-232 (in Chinese) [王璋, 蔡振兵, 孙阳, 等. 纯铁在球/面接触下的冲击微动磨损行为研究[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(2): 225-232]. doi: 10.16078/j.tribology.2017.02.012.
- [8] Lindroos M, Ratia V, Apostol M, et al. The effect of impact conditions on the wear and deformation behavior of wear resistant steels[J]. *Wear*, 2015, 328-329: 197-205. doi: 10.1016/j.wear.2015.02.032.
- [9] Lindroos M, Apostol M, Heino V, et al. The deformation, Strain hardening, and wear behavior of chromium-alloyed had field steel in abrasive and impact conditions[J]. *Tribology Letters*, 2015, 57(3): 1-11.
- [10] Wen Jian, Zheng Jing, Zheng Liang, et al. In vitro study on the impact wear behavior of human teeth[J]. *Tribology*, 2014, 34(5): 538-542 (in Chinese) [闻健, 郑靖, 郑良, 等. 冲击接触加载下人体天然牙的磨损行为研究[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(5): 538-542]. doi: 10.16078/j.tribology.2014.05.009.
- [11] Wang Junjun, Li Junzhi, Huang Weijiu. Effect of particle size and electrochemical potential on erosion behavior of brass in liquid-solid solution[J]. *Tribology*, 2016, 36(4): 406-412 (in Chinese) [王军军, 李志均, 黄伟九. 沙粒粒径和外电位对铜黄铜腐蚀磨损的影响[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(4): 406-412]. doi: 10.16078/j.tribology.2016.04.002.
- [12] Lin Y W, Cai Z B, Chen Z Q, et al. Influence of diameter-thickness ratio on alloy Zr-4 tube under low-energy impact fretting wear[J]. *Materials Today Communications*, 2016, 8: 79-90. doi: 10.1016/j.mtcomm.2016.06.003.
- [13] Yang Rong, Cai Zhenbing, Lin Yingwu, et al. Investigation on impact fretting wear behavior of alloy 690 tube at dry and room temperature[J]. *Tribology*, 2015, 35(5): 525-530 (in Chinese) [阳荣,

- 蔡振兵, 林映武, 等. 690合金管在室温干态下的冲击微动磨损特性研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(5): 525–530. doi: [10.16078/j.tribology.2015.05.002](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2015.05.002).
- [14] Sun Y, Cai Z B, Chen Z Q, et al. Impact fretting wear of Inconel 690 tube with different supporting structure under cycling low kinetic energy[J]. Wear, 2017, 376-377: 625–633. doi: [10.1016/j.wear.2017.01.011](https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.011).
- [15] Jin Hexi, Wei Kexiang, Li Jianming, et al. Research development of titanium alloy in aerospace industry[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(2): 280–292 (in Chinese) [金和喜, 魏克湘, 李建明, 等. 航空用钛合金研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(2): 280–292].
- [16] Bertol L S, Júnior W K, Silva F P D, et al. Medical design: Direct metal laser sintering of Ti-6Al-4V[J]. Materials & Design, 2010, 31(8): 3982–3988.
- [17] Gujba A K, Hackel L, Kevorkov D, et al. Water droplet erosion behavior of Ti-6Al-4V and mechanisms of material damage at the early and advanced stages[J]. Wear, 2016, 358-359: 109–122. doi: [10.1016/j.wear.2016.04.008](https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.04.008).
- [18] Li Anhai, Zhao Jun, Luo Hanbing, et al. Wear mechanisms of coated carbide tools in high-speed dry milling of titanium alloy[J]. Tribology, 2012, 32(1): 40–46 (in Chinese) [李安海, 赵军, 罗汉兵, 等. 高速干铣削钛合金时涂层硬质合金刀具磨损机理研究[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(1): 40–46]. doi: [10.16078/j.tribology.2012.01.007](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2012.01.007).
- [19] Batory D, Szymanski W, Panjan M, et al. Plasma nitriding of Ti6Al4V alloy for improved water erosion resistance[J]. Wear, 2017, 374-375: 120–127. doi: [10.1016/j.wear.2017.01.041](https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.041).
- [20] Li Zhenhua, Hua Chen, Cheng Xianhua. Erosion mechanism evolution of Ti5553 treated by equal channel angular extrusion[J]. Tribology, 2015, 35(1): 45–52 (in Chinese) [李振华, 华晨, 程先华. 等径角挤压后Ti5553钛合金的冲蚀磨损机理演变[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(1): 45–52]. doi: [10.16078/j.tribology.2015.01.007](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2015.01.007).
- [21] Khayatan N, Ghasemi H M, Abedini M. Synergistic erosion-corrosion behavior of commercially pure titanium at various impingement angles[J]. Wear, 2017, 380-381: 154–162. doi: [10.1016/j.wear.2017.03.016](https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.03.016).
- [22] Cai Zhenbing, Wang Zhang, Zhu Minghao. Review on impact and erosion wear research of hard coatings[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(24): 12–24 (in Chinese) [蔡振兵, 王璋, 朱旻昊. 硬质涂层冲击、冲蚀性能的研究进展[J]. 机械工程学报, 2017, 53(24): 12–24].