

静电冷却技术对钛合金摩擦磨损性能的影响

戚宝运, 何宁, 李亮, 卞荣, 杨雷

(南京航空航天大学 机电学院, 210016 南京, qibaoyun@nuaa.edu.cn)

摘要:为了更好地将静电冷却技术应用到钛合金的车削中,在自行设计的高速摩擦磨损试验装置上,进行了YG8/Ti6Al4V摩擦副的摩擦磨损试验.结果表明:静电冷却技术可以有效地降低YG8/Ti6Al4V摩擦副间的摩擦系数,在抑制摩擦副磨损的同时还可以改善Ti6Al4V磨损表面质量.扫描电镜分析表明,硬质合金高速摩擦时的磨损机理以粘结剥落磨损为主,同时伴有微裂纹的产生.相对于干摩擦,静电冷却条件下的粘结磨损较小,减磨效果较好.静电冷却技术可以有效地抑制刀具磨损,提高刀具使用寿命.

关键词: 静电冷却;摩擦磨损;YG8;Ti6Al4V

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)05-0106-05

Effect of static cooling technology on the friction and wear properties of titanium alloy

QI Bao-yun, HE Ning, LI Liang, BIAN Rong, YANG Lei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 210016 Nanjing, China, qibaoyun@nuaa.edu.cn)

Abstract: To investigate the tribology properties of titanium alloy in static cooling condition, the friction and wear experiments of YG8/Ti6Al4V were carried out on high speed friction and wear test auxiliary device designed by ourselves. The experimental results showed that static cooling technology could effectively decrease the friction coefficient of YG8/Ti6Al4V friction pair, restrain the wear of friction pair, and improve the worn surface quality of Ti6Al4V. SEM observation indicated that in high speed friction, the main wear mechanism was adhesion wear and shedding accompanied with microcracks. Compared with that in dry condition, adhesion wear was less under static cooling condition. The turning test results demonstrated that the anti-friction effect of static cooling technology could effectively restrain tool wear and improve tool life.

Key words: static cooling; friction and wear; YG8; Ti6Al4V

钛合金以它优异的性能得到了广泛的应用,科研人员对其切削性能与摩擦学性能进行了大量的研究^[1-4]. 刀具快速磨损一直是制约钛合金加工效率的关键因素,而冷却润滑介质对改善钛合金的切削性能有重要影响^[5-9]. 静电冷却干式切削技术的基本原理是通过静电场装置将压缩空气离子化,然后经由喷嘴送至切削区,在切削区周围形成特殊气体氛围,从而实现冷却润滑作用^[10].

俄罗斯“罗士技术”科研生产公司已经开发出在30多个国家获得专利的静电冷却干式切削生态净化工艺,它可以在许多情况下取代冷却润滑液. 该技术曾在美国、德国、日本、瑞士和其他国家的著名研究中心和公司成功地通过了测试^[10]. 国内对此项技术研究较少,么炳唐^[10]和康亚琴等^[11]对此进行了试验研究.

本文拟采用常用的硬质合金刀具与钛合金作为摩擦副材料,在自行设计的安装在车床上配合测力仪使用的高速摩擦磨损试验装置上进行摩擦磨损试验,以揭示YG8/Ti6Al4V摩擦副在静电冷却条件下的摩擦磨损特性,并在车削试验中进行

收稿日期: 2010-01-05.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975141).

作者简介: 戚宝运(1982—),男,博士研究生;

何宁(1959—),男,教授,博士生导师.

验证,为静电冷却技术在切削加工中的应用与推广提供一定的依据。

1 摩擦磨损试验

1.1 试验装置

该试验装置模拟了销-盘式摩擦磨损试验机,如图1所示。将装有销试样的辅助装置固定在三向测力仪上,测力仪安装在车床刀架托板上,以实现轴向进给移动。盘试样通过三爪卡盘夹持,实现盘试样的高速旋转。通过提高机床主轴转速或增大盘试样的摩擦半径,实现高速摩擦。试验时保证盘试样和销试样的正交,通过测力仪测得摩擦过程中的作用力,由计算机进行数据处理,得到法向力和摩擦力,摩擦力 $f = F_x$, 加载力 $N = F_z$ 。利用库伦定量 $\mu = f/N$ 便可得上述摩擦副的摩擦系数。



1—三爪卡盘; 2—盘试样; 3—销试样; 4—辅助装置;
5—测力仪; 6—静电装置

图1 摩擦磨损试验平台与原理

试验中的盘试样为工件材料,端面平整,保证一定的表面质量。销试样是刀具材料,采用现有的

机夹车刀片,将其线切割成厚2 mm的薄片,利用刀片的圆弧半径作为摩擦触头(图1)。摩擦副表面的法向载荷利用弹簧实现加载,通过调节车床轴向进给改变摩擦副的载荷。

1.2 试验条件及方法

试验在CA6140车床上进行,摩擦副中盘试样为钛合金Ti6Al4V,尺寸为 $\Phi 150 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,销试样为YG8硬质合金,尺寸为 $13 \text{ mm} \times 13 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$,刀尖圆弧半径0.5 mm,物理力学性能如表1所示。采用Kistler9265B测力仪测量摩擦力与法向载荷,与之配套的为Kistler5019电荷放大器。干式静电冷却装置(见图1)的外形尺寸为 $140 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$,质量3.5 kg,功率45 W (AC110/220 V, 50/60 Hz),输出电压4.6 kV。主要由供电单元、离子风嘴、高压电缆、压缩空气的软管组成,风嘴接头8 mm。试验中向喷嘴输送的压缩空气压力为0.4 MPa,室温 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。试验法向载荷为20 N,滑动速度分别为1、2、3、4、5 m/s,每次试验摩擦时间均为6 min。

试验中通过摩擦系数对比研究不同情况下摩擦副之间的摩擦状况,以单位时间摩擦副的磨损体积作为磨损率来评价材料的耐磨性。由于摩擦时间较长,采取分段采集摩擦力计算平均摩擦系数的方法。一般在摩擦3~5 min后可得到摩擦副的稳定摩擦曲线。试验后用美国ADE公司生产的三维白光干涉表面形貌仪MicroXAM观察Ti6Al4V摩擦表面形貌并测量表面粗糙度,用JSM-5610LV型扫描电子显微镜(SEM)观察YG8磨损表面微观特征,分析YG8摩擦磨损机理。

表1 摩擦副材料的物理和力学性能

试样	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	硬度/HV	弹性模量/GPa	抗压强度/GPa	导热系数/ $(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$
YG8	14.3	1 150 ~ 1 170	600	4.3	75.40
Ti6Al4V	4.4	295 ~ 330	109	0.88 ~ 0.93	5.44

1.3 试验结果

1.3.1 摩擦系数

图2反映了在2 m/s和4 m/s的滑动速度下YG8/Ti6Al4V摩擦副分别在干摩擦和静电冷却条件下摩擦系数随滑动时间的变化曲线。可见,摩擦系数在初期有一定的波动,随着滑动时间的增加,摩擦系数逐渐趋向平稳。图3为摩擦副在2种摩擦条件下稳定后的摩擦系数对比情况。随着滑动速度的增大,2种摩擦条件下YG8/Ti6Al4V摩擦

副的摩擦系数均有增大的趋势,原因是由于钛合金是粘塑性材料,随着速度的提高,摩擦温度升高,钛合金塑性变形增强,由于钛合金较强的韧性及刀具表面粘结物的增多,导致摩擦力增大。通过对比计算,摩擦系数在静电冷却条件下较小,相比干摩擦条件降低了20%左右。这主要是由于静电冷却条件下电离后的空气具有较高浓度的臭氧和氧离子,有利于在摩擦副表面间形成氧化膜,从而实现有效的润滑减磨作用。

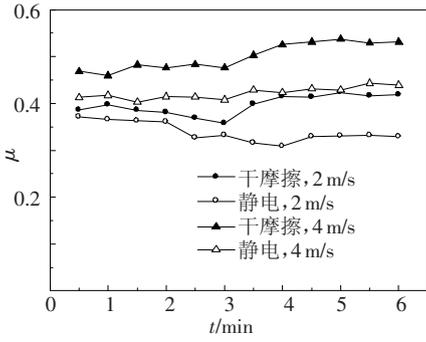


图 2 摩擦系数 μ 随摩擦时间的变化曲线

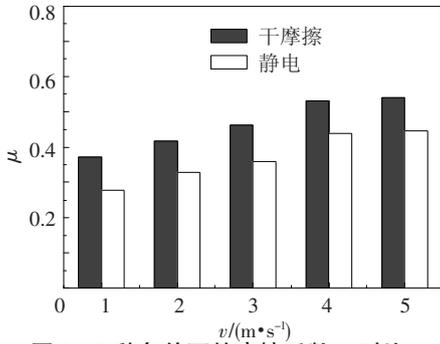


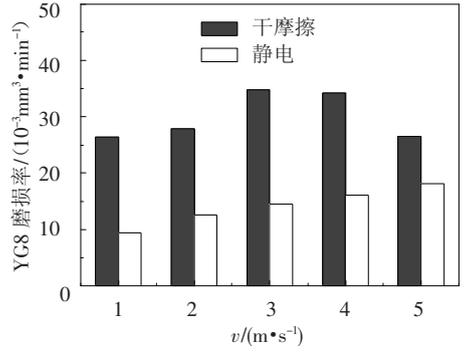
图 3 2 种条件下的摩擦系数 μ 对比

1.3.2 磨损率

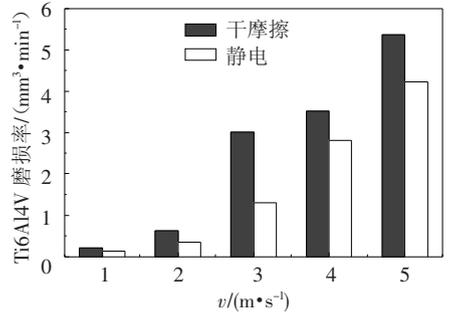
图 4 所示为 2 种摩擦条件下摩擦副的磨损率对比情况. 随着滑动速度的提高, 在 2 种摩擦条件下 Ti6Al4V 与 YG8 的磨损率均有所增大, 但增加程度不同, 刀具材料 YG8 增加较为缓慢, 而工件材料 Ti6Al4V 磨损较快. 同时发现, 在干摩擦条件下, YG8 的磨损率在高速滑动下有减小的趋势, 原因主要是由于高速下较高的摩擦温度导致钛合金粘结现象严重, 刀具表面被大量的钛合金粘结物所覆盖, 在一定程度上阻碍了刀具材料的磨损. 相比之下, 静电冷却条件下摩擦副的磨损率较小, 尤其在抑制 YG8 磨损的作用更加显著. 可见, 静电冷却环境可以有效地降低摩擦副的磨损.

1.3.3 Ti6Al4V 的磨损表面

图 5 为 Ti6Al4V 磨损后的三维表面形貌. 可见, 在 2 种摩擦条件下, 钛合金 Ti6Al4V 磨损表面均出现明显的磨痕, 同时还伴有部分犁沟, 主要是由于部分磨屑、表面新生的硬质相或是脱落的硬质合金颗粒等在摩擦副接触区形成较硬的磨粒, 从而在钛合金表面划伤所致. 2 种条件下表面形貌对比可以看出, 静电冷却条件下 Ti6Al4V 摩擦磨损后的表面更加平整. 图 6 反映了 Ti6Al4V 磨损后表面粗糙度随滑动速度的变化曲线. 在 2 种摩擦条件下, 随着滑动速度的增加, 表面粗糙度均逐渐减小, 而静电冷却条件下 Ti6Al4V 磨损表面的表面粗糙度相对较小. 由此可见, 静电冷却条件不仅可以有效地减低摩擦副的摩擦系数, 还可以改善工件材料的磨损表面粗糙度.

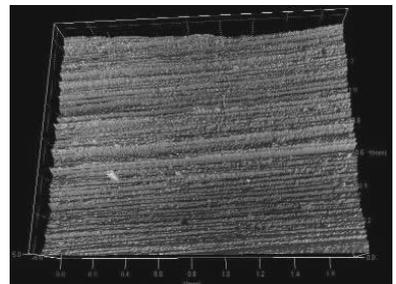


(a) YG8

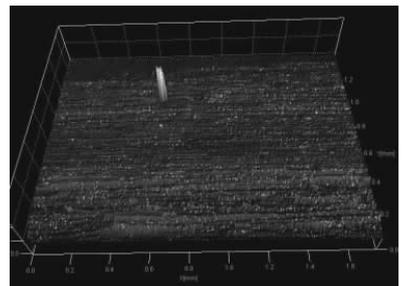


(b) Ti6Al4V

图 4 摩擦副的磨损率对比



(a) 干摩擦



(b) 静电

图 5 Ti6Al4V 的磨损表面形貌 (5 m/s)

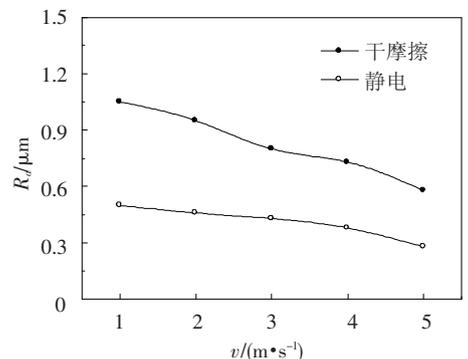
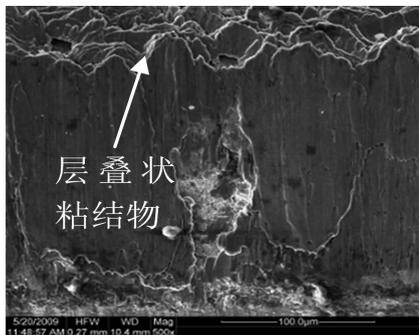


图 6 表面粗糙度随滑动速度的变化曲线

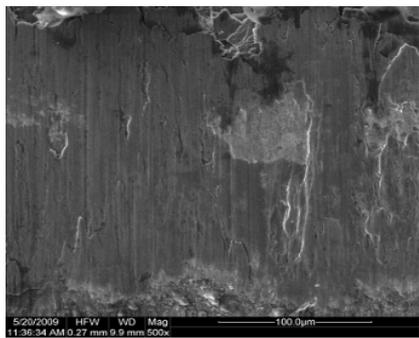
1.3.4 YG8 的磨损机理

由于钛合金为粘塑性材料,在摩擦过程中大量钛合金粘结在硬质合金的接触表面,在不同摩擦速度下钛合金粘结现象各不相同.低速时,硬质合金表面粘结现象较少,高速摩擦时,高温使材料发生软化,加剧表面塑性变形,刀具表面粘结现象较为严重,如图7(a)所示.从图中可以明显地看到大量的层叠状粘结物,基本上完全覆盖了硬质合金表面,其在摩擦过程中会代替硬质合金端面与钛合金盘面相接触,从而使硬质合金磨损量有所降低.

相对于干摩擦条件下,静电冷却条件下刀具表面粘结物较少,如图7(b)所示,原因可能是静电冷却条件下列宾捷尔效应导致钛合金力学性能发生变化,带电粒子的润滑作用减小了摩擦副表面之间的摩擦,冷却作用降低了摩擦副之间的摩擦温度,从而降低了钛合金粘结能力.同时静电冷却条件下摩擦副之间形成的氧化膜可以有效地防止摩擦接触表面粘结磨损的发生,氧化膜能起到保护摩擦副的作用.



(a) 干摩擦



(b) 静电

图7 YG8 磨损表面形貌 SEM 照片(5 m/s)

而高速摩擦下形成的脆性氧化膜与刀具表面的结合强度较低,在机械应力和热应力等综合作用下产生微裂纹,如图8所示,在后续的摩擦剪切与冲击作用下,很容易从硬质合金表面脱落,形成片状磨屑.脱落的钛合金粘结层还会从硬质合金表面带走部分硬质合金颗粒,造成硬质合金表层强度的降低,产生粘结剥落磨损,加速硬质合金磨

损.因此,YG8 在高速摩擦时主要是粘结磨损与氧化磨损.

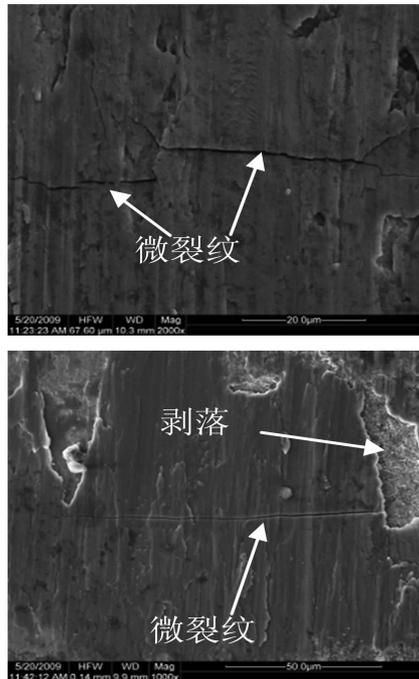


图8 YG8 磨损表面的微裂纹

2 车削试验

2.1 试验条件与方法

车削试验在 CA6140 车床上进行,工件材料、刀具材料、测力装置以及静电冷却装置与摩擦磨损试验相同.试验参数为:切削速度 $v_c = 120 \text{ m/min}$,进给量 $f = 0.1 \text{ mm/r}$,切深 $a_p = 0.5 \text{ mm}$.切削过程中采集切削力并测量刀具磨损.

切削过程中前刀面的摩擦对切屑、切削力、切削温度以及刀具磨损等均有很大影响.通过2种润滑条件下的刀具前刀面摩擦系数对比,分析静电冷却技术对高速车削钛合金摩擦状况的影响.切削时刀具前刀面摩擦系数可采用文献[12]中的公式进行近似计算,即

$$\mu = \tan \left[\tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{F_x^2 + F_y^2}{F_z}} \right) + \gamma_0 \right]. \quad (1)$$

其中 γ_0 为刀具前角.

2.2 试验结果

通过测力仪测得切削过程中的三向力,根据式(1)计算刀具前刀面的摩擦系数.图9为2种润滑条件下硬质合金车刀前刀面摩擦系数随切削路程的变化曲线.从图中可以看出,前刀面的摩擦系数在2种条件下均随着切削路程基本呈上升趋势,而静电冷却条件下前刀面摩擦系数相对较小,增加较为缓慢.这表明,静电冷却技术可以有效地改善前刀面摩擦状况,减小刀具与切屑之间的剧

烈摩擦. 这与摩擦磨损试验的结果相一致.

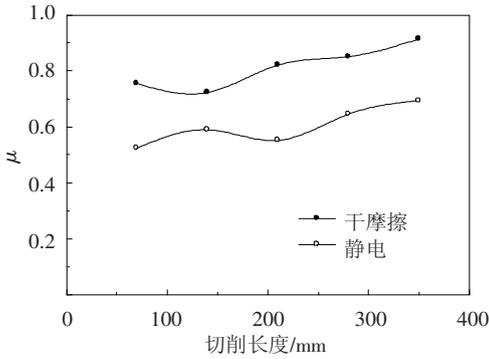


图 9 刀具前刀面的摩擦系数

硬质合金切削钛合金时, 刀具磨损主要发生在前、后刀面. 由于前刀面月牙洼磨损严重削弱切削刃, 会促使后刀面磨损加剧, 且导致刀具破损, 在此之前, 后刀面磨损一般较为稳定, 而前刀面的剧烈摩擦是产生月牙洼磨损的主要原因. 图 10 反映了前刀面月牙洼磨损宽度与后刀面平均磨损随切削路程的变化曲线. 从图中可以看出, 静电冷却条件下前刀面月牙洼磨损较为缓慢, 一直处于稳定上升状态, 这正是由于静电冷却条件对前刀面有效地减磨作用. 而干切削时刀具在切削路程 200 mm 后就出现了月牙洼磨损加剧, 同时后刀面平均磨损也出现突变. 可见, 静电冷却条件可以有效地抑制前刀面月牙洼磨损, 保证后刀面磨损稳定, 从而提高刀具使用寿命.

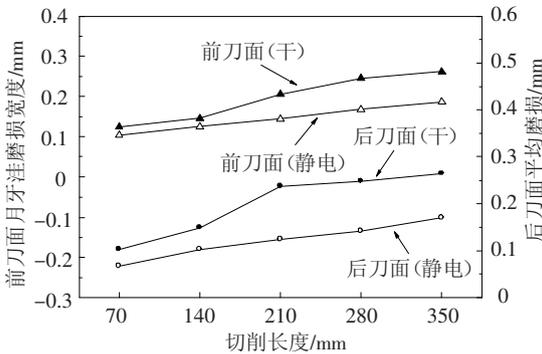


图 10 前刀面月牙洼磨损宽度及后刀面平均磨损变化曲线

3 结 论

1) 静电冷却的润滑作用可以有效地降低 YG8/Ti6Al4V 摩擦副的摩擦系数, 并改善 Ti6Al4V 摩擦磨损后的表面粗糙度;

2) 相对于干摩擦, 静电冷却技术可以有效地抑制摩擦副的磨损, 尤其是对于 YG8;

3) 静电冷却技术可以降低钛合金的粘结能力, 减小 YG8 粘结磨损; YG8 在高速滑动下主要以粘结磨损、氧化磨损为主, 微裂纹的产生加剧了 YG8 的磨损.

4) 静电冷却技术可以改善刀具切削区的摩擦状况, 从而有效抑制刀具磨损, 提高刀具使用寿命.

参考文献:

[1] EZUGWU E O, WANG Z M. Titanium alloys and their machinability: a review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 68(3): 262 - 274.

[2] 赵威, 何宁, 李亮. 在氮气介质中 WC - Co/Ti6Al4V 摩擦副的摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2006, 26(5): 439 - 442.

[3] MOLINARI A, STRAFFELINI G, TESI B, et al. Dry sliding wear mechanisms of the Ti6Al4V alloy [J]. Wear, 1997, (208): 105 - 112.

[4] STRAFFELINI G, MOLINARI A. Dry sliding wear of Ti6Al4V alloy as influenced by the counter face and sliding conditions[J]. Wear, 1999, 236: 328 - 338.

[5] YAMAZAKI T, MIKI K, SATO U, et al. Cooling air cutting of Ti - 6Al - 4V alloy[J]. Journal of Japan Institute of Light Metals, 2003, 53(10): 416 - 420.

[6] HASSAN A, YAO Zhenqiang. Minimum lubrication milling of titanium alloys[J]. Materials Science Forum, 2004, 471 - 472: 87 - 91.

[7] SU Yu, HE Ning, LI Liang, et al. An experimental investigation of effects of cooling-lubrication conditions on tool wear in high - speed end milling of Ti - 6Al - 4V [J]. Wear, 2006 (261): 760 - 766.

[8] HONG S Y, DING Yucheng, JEONG W C. Friction and cutting forces in cryogenic machining of Ti - 6Al - 4V [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41: 2271 - 2285.

[9] ZHAO Wei, HE Ning, LI Liang, et al. Tool wear characteristics in high-speed milling of Ti6Al4V alloy with nitrogen gas medium[J]. Key Engineering Materials, 2006, 315/316: 588 - 592.

[10] 么炳唐. 静电冷却干切技术[J]. 制造技术与机床, 2003 (1): 66 - 68.

[11] 康亚琴, 高霁. 静电冷却干式切削装置的设计研究 [D]. 沈阳: 沈阳航空工业学院, 2007.

[12] 庞思勤, 于启勋. 稀土硬质合金刀具的切削性能与机理研究[J]. 兵工学报, 1994 (3): 66 - 70.

(编辑 杨 波)