文章编号: 1004-0609(2014)02-0358-06

7075 铝合金在 VG46 油润滑工况下的 扭转复合微动磨损特性

沈明学1,华彩虹2,蔡振兵2,彭旭东1,朱旻昊2

(1. 浙江工业大学 过程装备及其再制造教育部工程研究中心,杭州 310032;2. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,成都 610031)

摘 要:采用球/平面接触方式,考察 7075 铝合金在 VG46 油润滑工况下不同倾斜角度和角位移幅值对扭转复合 微动磨损特性的影响。利用光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)分析 7075 铝合金的磨痕表面及剖面形貌、 磨损机制,用双模式表面轮廓仪分析磨损体积。结果表明:润滑油对扭转复合微动运行和损伤机制存在显著影响, 润滑油明显改变微动运行区域,随着倾斜角度的增加,微动的混合区逐渐缩小甚至完全消失。微动运行区域对润 滑油的润滑性能也有重要影响,在部分滑移区,微滑仅发生在接触边缘,润滑油对微动的影响甚微;在混合区, 润滑油渗入表面微裂纹加速了疲劳裂纹的扩展;在滑移区,接触界面间形成了润滑油膜,显著地减缓了微动损伤。 关键词: 7075 铝合金;微动磨损;扭转复合;润滑油;损伤机制 中图分类号: TH117.3 **文献标志码:** A

Dual-rotary fretting wear behavior of 7075 aluminium alloy under VG46 oil-lubricated condition

SHEN Ming-xue¹, HUA Cai-hong², CAI Zhen-bing², PENG Xu-dong¹, ZHU Min-hao²

 Engineering Research Center of Process Equipment and Its Remanufacture, Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China;

2. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The dual-rotary fretting wear behaviors of 7075 aluminium alloy flats against GCr15 steel ball in VG46 oil were studied under various tilt angles and angular displacement amplitudes. The kinetic behaviors of the dual-rotary fretting of 7075Al/GCr15 contact pairs were analyzed. The fretting scars surface damages, cross-section morphologies and wear mechanisms were characterized through optical microscope (OM) and scanning electrical microscope (SEM), and the wear volume was measured by dual mode surface profilometer. The results show that the oil has significant effect on the fretting running characteristics and the damage mechanisms, the fretting running condition can be obviously changed by oil media. With the increase of the tilt angles, the mixed fretting regime gradually decreases or even disappears completely. In addition, the lubricating properties are also strongly dependent upon the fretting running regimes. In partial slip regime (PSR), the micro-slip only occurs in the contact edge, and the lubricating oil has a very small influence on the fretting damage. In mixed fretting regime (MFR), the oil can easily penetrate into the micro-cracks on the surface and promote the propagation of cracks. In slip regime (SR), the lubricating oil can effectively mitigate DRF damage, because the oil can penetrate into the contact interface and form a lubricant film.

Key words: 7075 aluminium alloy; fretting wear; dual-rotary; lubricating oil; damage mechanism

基金项目:国家杰出青年科学基金资助项目(51025519);国家自然科学基金资助项目(51005192,51305398);教育部创新研究团队资助项目(IRT1178) 收稿日期:2013-06-29;修订日期:2013-09-25

通信作者: 沈明学, 讲师, 博士; 电话: 0571-88320293; E-mail: shenmx@zjut.edu.cn

微动现象十分复杂,影响微动的因素很多,除受 微动的运行参数影响外还与环境、应用要求等密切相 关^[1]。但可以利用不同措施减缓微动损伤,如合理匹 配摩擦副材料、降低振动幅度、改变腐蚀性环境、使 用润滑剂或应用表面工程技术等^[2-4]。润滑油可以有效 减轻氧化、降低摩擦因数,它作为减缓微动磨损的重 要手段之一已在现代工业领域内得到广泛应用^[5]。在 基础研究领域,润滑介质环境中的微动磨损试验目前 主要集中于单一的切向微动^[5-7],而在复杂微动条件 下,润滑油对微动损伤的作用机理、破坏或减缓机制 并不十分清楚。

铝合金是航空航天和现代交通运输向轻量化、高速化方向发展的关键材料,也常作为高应力结构部件应用于许多领域。扭转复合微动是指在交变载荷作用下接触界面发生微幅扭转的相对运动,它是扭动与转动微动耦合的复杂微动^[8-9],广泛存在于球阀、滚珠轴承、杵臼关节、球窝接头及其他旋转紧固件中,常常是导致该类零部件失效的元凶。然而针对扭转复合微动,目前仅见英国学者 BRISCOE 等^[10-12]和沈明学所在课题组^[8-9]在干态工况下开展过少量研究。本文作者对油润滑条件下扭转复合微动在不同角位移幅值和倾斜角度下的摩擦学特性、磨痕表面形貌等进行详细分析,并对其磨损机制进行了探讨。

1 实验

本试验所用材料为 7075 铝合金平面试样和 GCr15 钢球,其主要化学成分和力学性能见表 1。平 面试样用线切割的方法切割成尺寸为 10 mm×10 mm×25 mm 的方块,样品表面逐级打磨至 1500 号 SiC 金相砂纸,并经金刚石研磨膏抛光至表面粗糙度 R_a 为 0.04 μ m,选用 7075 铝合金目的在于凸显微动损 伤、便于揭示损伤机理。对摩副选用直径为 40 mm 的 GCr15 钢球。试验前所有试样依次用丙酮和酒精进行 超声清洗 5 min,干燥备用。润滑介质选用壳牌 VG46 润滑油,其性能指标为黏度在 40 ℃时为 46 mm²/s, 闪点为 180 ℃,流点为–39 ℃。

微动磨损试验在新型扭转复合微动试验机上进

-				1.1.1.1.1.101
轰 1	试验材料的=	主要化学成	分和力学	性能回

行,采用球/平面接触方式,图1所示为试验机工作原 理图。试验时,上试样固定不动,下试样作微幅扭转 往复运动。试验参数为:回转角速度 ω 为 0.2 (°)/s; 角位移幅值 θ 为 0.25°~10°;法向载荷 *F*_n 为 50 N;循 环次数 N 为 10~1 000 次。试验环境温度为(20±3) ℃。 试验结束后,为便于磨痕表面形貌观察,将样品在丙 酮溶液中超声波清洗 5 min,去除表面附着的松散磨 屑,经干燥处理后用光学显微镜(OM)和 Quanta200 型 扫 描 电 子 显 微 镜 (SEM) 观 察 磨 痕 形 貌; 用 EDAX-7760/68ME 型电子能谱仪(EDX)分析磨损表面 主要元素成分;采用 NanoMap-D 双模式轮廓仪测定 磨痕的磨损体积。





Fig. 1 Schematic diagram of dual-rotary fretting test rig: 1— Base platform; 2—Sleeve of motor system; 3—Rotation axis; 4—Lower holder; 5—Ball specimen; 6—6-D sensor; 7— Vertical positioning system; 8—Lateral positioning system; 9— Upper holder; 10—Flat specimen; 11—Lubricant; 12— Container; 13—Low-speed reciprocating rotary motor system; 14—Locating screw

2 结果与讨论

2.1 *F*t → θ 曲线

研究表明 F_t—θ 曲线(即摩擦力—角位移幅值曲线) 的演变特性能有效表征微动的运行区域^[9]。图 2 所示 为 7075 铝合金在油润滑条件下倾斜角度 α=40°时不同

	Table 1	Chemical c	compositions	and	mechanical	properties	of test materials ^[8]
--	---------	------------	--------------	-----	------------	------------	----------------------------------

Material	Mass fraction/%							Mechanical property				
	Si	С	Fe	Mn	Mg	Cr	Zn	Cu	$\sigma_{\rm s}/{ m MPa}$	$\sigma_{\rm b}/{ m MPa}$	E/GPa	Hardness, HV
7075Al	0.4	-	0.5	0.3	2.2	0.26	6.7	1.8	502	524	72	60
GCr15	0.25	1.00	_	0.30	_	1.50	-	_	1 700	2 000	210	870



Fig. 2 $F_t - \theta$ curves under different cycle numbers (*N*) and angular displacement amplitudes at $\alpha = 20^\circ$: (a), (b), (c), (d) $\theta = 0.375^\circ$; (e), (f), (g), (h) $\theta = 0.75^\circ$; (i), (j), (k), (l) $\theta = 1.0^\circ$

循环次数和角位移幅值的 F_t — θ 曲线。

从图 2 可以看出,当 θ =0.375°时,不同循环次数 下的 F_t — θ 曲线均呈近似闭合的椭圆型,此时接触界 面的相对运动主要由弹塑性变形协调完成,微动运行 于部分滑移区(Partial slip regime, PSR)。当 θ =0.75°时, 在约 100 次微动循环前后 F_t — θ 曲线由平行四边形向 椭圆型转变,根据微动图理论^[13-14],此时微动运行于 混合区(Mixed fretting regime, MFR)。

随着角位移幅值增加至 θ =1.0°后,所有 $F_t - \theta$ 曲 线均呈平行四边形型,接触界面处于完全滑移状 态,此时微动运行于滑移区(Slip regime, SR)。但在干 态下^[8],相同试验参数下的微动仍运行于混合区,这 表明润滑油能明显地改变微动的运行区域。

2.2 微动运行工况图

根据上述分析可以得到油润滑状态下扭转复合微动运行工况微动图(见图 3)。如图 3 所示,与干态相比油润滑工况显著缩小了微动的混合区;在较小的倾斜角度下,PSR/MFR 和 MFR/SR 的边界均向 MFR 侧移动;在较大的倾斜角度下,PSR/MFR 和 MFR/SR 的边界均向小角位移幅值方向移动。这主要是由于在较小的倾斜角度和角位移幅值下,微动主要受扭动分量控制,润滑油难以侵入接触区内且在接触区周围形成油

^{罩[5]},进一步减少了空气与摩擦面的接触,从而增强 了金属间的黏着、加剧了接触表面间的冷焊作用,因 此摩擦力比干态时的更大。而在较大的倾斜角度或角 位移幅值下,微动主要受转动分量控制,一旦润滑油 进入接触界面就容易形成稳定的润滑油膜,从而有效 降低了表面剪应力,相对运动更加容易进入完全滑移 状态。值得指出的是,当微动主要受转动分量控制时, 混合区显著减小,甚至当倾斜角度在 α=60°以上时在 油润滑条件下混合区完全消失。





Fig. 3 Running condition fretting map under dual-rotary fretting

第24卷第2期

2.3 等效摩擦因数

扭转复合微动中的等效摩擦因数(F_t/F_n)相当于切 向微动中的摩擦因数^[9]。图 4 所示为倾斜角度 a=20° 时不同角位移幅值下等效摩擦因数的演变曲线。在部 分滑移区(θ=0.375°), 微动主要由弹塑性变形协调完 成,摩擦因数始终保持较低的稳定值。与干态相比, 润滑油的黏附和油罩作用^[5]增强了接触表面的黏着和 实际接触面积[14],导致摩擦因数略微高于干态;在混 合区(θ =0.750°), F_t — θ 曲线由平行四边形逐渐转变为 椭圆型,塑性变形加剧,摩擦因数在数百次微动循环 前始终保持爬升趋势;在滑移区(θ≥1.000°),摩擦因 数可大致分为3个阶段:爬升、迅速下降、趋于稳定 阶段。不同于干态^[8],在约10次微动循环前后,润滑 油开始进入接触表面,有效降低了接触表面摩擦力, 摩擦因数迅速下降。此外,对比 θ=1.000°和 θ=2.000° 时的情况可以发现,后者先进入下滑阶段,表明角位 移幅值越大润滑油更易被快速地带入接触表面;随着 微动循环的进行,稳定的润滑油膜形成,摩擦因数逐 渐趋于稳定。



图 4 不同角位移幅值下等效摩擦因数随循环次数的演变 曲线

Fig. 4 Evolution curves of F_t/F_n as function of cycle number under varied angular displacement amplitudes

2.4 磨损形貌分析

在部分滑移区,磨痕呈中心黏着、四周微滑的特征(见图 5),其损伤形貌与干态时的大致相似,表明在部分滑移区润滑介质很难进入接触表面内,润滑油对微动损伤的影响甚微。

在混合区,当微动主要受扭动分量控制时,润滑 油很难进入整个接触区;而接触区外的润滑油阻碍了 氧气进入接触区,减缓了接触区新鲜金属表面和磨屑 的氧化。这样,干态下没有充当固体润滑层的氧化磨





屑,在润滑油中不能及时形成,所以表面切向力仍维 持较高值(见图 4),而润滑油易进入表面微裂纹,使得 该状态下疲劳裂纹更易形成。图 6 所示为 a=10°、 θ=0.5°、N=100 000 时的磨痕表面及剖面 SEM 像。从 图 6 可以看出, 磨损表面的剥层现象明显, 剖面分析 显示磨痕两侧的疲劳裂纹呈不对称分布、最长的裂纹 长度近 200 um。初始裂纹扩展角约为 30°,并且若干 条裂纹向基体内扩展后相交后又继续沿两个不同方向 扩展。一旦构件承受外界疲劳载荷作用,疲劳裂纹可 能迅速向基体内扩展,从而进一步导致构件的过早失 效。此时,材料的失效形式主要表现为疲劳裂纹的萌 生与扩展,并伴随着因疲劳磨损所致的片状剥落。当 微动主要受转动分量控制时,随着微动的进行润滑油 相对容易进入接触区内并能有效降低表面切应力、缩 小混合区范围,材料的磨损占主导地位。以 α=40°为 例,此时混合区仅出现在角位移幅值 θ 为 0.4°~0.5°附 近,磨损机制主要以轻微的磨粒磨损为主(见图 7(a)), 剖面分析未发现疲劳裂纹存在。

在滑移区,随着微动的进行润滑油极易被带入接 触区内并形成稳定的润滑油膜,大大降低了接触表面 的剪应力(油润滑条件下滑移区摩擦力甚至低于部分 滑移状态,见图 4)。润滑油膜的存在可以使微动提早 进入滑移区,并且润滑油显著减缓了接触表面的微动 损伤,其损伤形貌与图 7 所示相似,磨痕截面呈"U" 型,在整个微动过程中其损伤机制主要为轻微的磨粒 磨损。图 8 所示为 θ=2.0°和 N=1 000 时,不同倾斜角 度下润滑油和干态工况中的磨损体积及其体积比(V_{oil}/ V_{dry}×100%)演变。从图 8 可以看出,润滑油有效地减 缓了滑移区的微动磨损,其磨损体积仅为干态下的 0.8%~1.2%。此外,从体积比随倾斜角度的变化可以 发现:随着倾斜角度的增加磨损体积先增加后逐渐趋



图 6 α=10°, θ=0.5°和 N=100 000 条件下混合区的磨痕表面及剖面 SEM 像 **Fig. 6** SEM images of wear scar in MFR at α=10°, θ=0.5° and N=100 000



图 7 α=40°, θ=0.5°和 N=100 000 条件下混合区的磨痕表面及剖面 SEM 像

Fig. 7 SEM images of wear scar in MFR at α =40°, θ =0.5° and N=100 000





于稳定,这与文献[8]所述的随着倾斜角度的增加微动 损伤从受扭动分量控制逐渐转变为受转动分量控制有 关,即在体积比上升阶段控制微动损伤的扭动分量减 弱转动分量逐渐增强并在最终微动损伤主要由转动分 量控制;而在倾斜角度达到 α=40°后,微动磨损几乎 完全受转动分量支配,于是磨损体积比趋于稳定。

3 结论

 润滑油明显地改变了扭转复合微动的运行区域,在不同倾斜角度下润滑油均可不同程度地缩小混 合区范围。但微动受转动分量控制时,润滑油的抗微 动损伤性能更加明显,并且随着倾斜角度的增加混合 第24卷第2期

区逐渐减小直至消失。

2) 在部分滑移区,接触界面的相对运动主要由弹 塑性变形协调完成,因而润滑油不能进入接触区内, 而金属黏附和油罩作用使得微动在润滑油中的摩擦因 数反而高于干态,润滑油对微动的影响甚微。

3) 在混合区,当微动主要受扭动分量控制时,润 滑油很难进入整个接触区,而润滑油又阻碍了氧气进 入接触区,接触界面间充当固体润滑层的氧化磨屑未 能及时形成,使得表面切向力维持较高值,而润滑油 易进入表面微裂纹,使得该状态下疲劳裂纹更易形成, 材料的失效形式主要表现为疲劳裂纹的产生并伴随着 局部的片状剥落;当微动主要受转动分量支配时,润 滑油容易进入接触区,从而有效减缓了微动损伤,此 时磨损机制主要为轻微的磨粒磨损。

4) 在滑移区,随着微动的进行润滑油极易被带入 接触区内并在能接触界面形成稳定的润滑油膜,从而 大大降低了接触表面的剪应力,在降低摩擦因数的同 时润滑油有效减缓了微动磨损,并且润滑油膜的存在 可以使微动提早进入滑移区。

REFERENCES

- [1] ATTIA M H, WATERHOUSE R B. Symposium on standardization of fretting fatigue tests methods and equipment[C]// ASTM STP 1159, Philadephia, USA: ASTM, 1990.
- [2] MCCOLL I R, WATERHOUSE R B, HARRIS S J, TSUJIKAWA M. Lubricated fretting wear of a high-strength eutectoid steel rope wire[J]. Wear, 1995, 185(1/2): 203–212.
- [3] FU Y Q, WEI J, BATCHELOR A W. Some considerations on mitigation of fretting damage by the application of surface-modification technologies[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 99(1/3): 231–245.
- [4] 周仲荣,朱旻昊.复合微动磨损[M].上海:上海交通大学出版社,2004.
 ZHOU Zhong-rong, ZHU Min-hao. Composite fretting wear[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2004.
- [5] 王泽爱,周仲荣. 润滑剂减缓微动磨损研究进展[J]. 润滑与 密封,2009,34(8):100-104.

WANG Ze-ai, ZHOU Zhong-rong. The research progress on palliation of fretting wear with lubricants[J]. Lubrication Engineering, 2009, 34(8): 100–104.

- [6] SHMIA M, SUETAKE H, MCCOLL I R, WATERHOUSE R B, TAKEUCHIC M. On the behaviour of an oil lubricated fretting contact[J]. Wear, 1997, 210(1/2): 304–310.
- [7] 刘启跃,朱旻昊,周仲荣,陈光雄.油润滑对微动摩擦特性影响的研究[J]. 机械工程学报,2000,36(12):1-4.
 LIU Qi-yue, ZHU Min-hao, ZHOU Zhong-rong, CHEN Guang-xiong. Effect of the oil-lubricated fretting characteristics[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(12): 1-4.
- [8] SHEN M X, ZHU M H, CAI Z B, XIE X Y, ZUO K C. Dual-rotary fretting wear behavior of 7075 aluminum alloy[J]. Tribology International, 2012, 48: 162–171.
- [9] 沈明学,杨 莎,周 琰,蔡振兵,朱旻昊. 接触载荷对 7075 铝合金扭转复合微动磨损行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(12): 3327-3333.
 SHEN Ming-xue, YANG Sha, ZHOU Yan, CAI Zhen-bing, ZHU Min-hao. Effect of contact load on the dual-rotary fretting tribological behavior of 7075 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(12): 3327-3333.
- [10] BRISCOE B J, CHATEAUMINOIS A, LINDLEY T C, PARSONAGEA D. Fretting wear behavior polymethymethacrylate under linear motions and torsional contact conditions[J]. Tribology International, 1998, 31(11): 701-711.
- [11] BRISCOE B J, CHATEAUMINOIS A, LINDLEY T C, PARSONAGEA D. Contact damage of poly(methylmethacrylate) during complex micro-displacements[J]. Wear, 2000, 240: 27–39.
- [12] BRISCOE B J, CHATEAUMINOIS A. Measurements of friction-induced surface strains in a steel/polymer contact[J]. Tribology International, 2002, 35: 245-254.
- [13] ZHOU Z R, NAKAZAWA K, ZHU M H, MARUYAMA N, KAPSA Ph, VINCENT L. Progress in fretting maps[J]. Tribology International, 2006, 39(10): 1068–1073.
- [14] ZHU M H, ZHOU Z R. On the mechanisms of various fretting wear modes[J]. Tribology International, 2011, 44(11): 1378–1388.

(编辑 何学锋)