

某微型齿轮机构的随机振动摩擦学试验研究

余启航¹, 李严², 彭雪峰¹, 耿少寅¹, 蔡振兵¹

(1.西南交通大学 摩擦学研究所, 成都 610031;

2.东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731)

摘要: **目的** 解决微型齿轮机构在随机振动环境下服役寿命短的问题, 通过跑合优化微型齿轮机构摩擦副的界面性能, 提升其服役耐久性。**方法** 对微型齿轮机构进行跑合试验, 采用正交试验法研究振动时间以及 OX 和 OZ 方向的随机振动能量对跑合效果的影响。为验证不同参数组合的跑合效果, 设计标准工况振动载荷谱验证实验, 测试实验前后的延时时间变化, 并以此作为评判跑合效果的依据, 借助平衡摆销表面磨损面积评判微型齿轮机构的磨损程度, 通过统计学分析得到各个因素对跑合效果的影响趋势以及最优参数。**结果** 各因素对跑合效果的影响主次为振动时间>OZ 方向随机振动量值>OX 方向随机振动量值。随着振动时间和 OZ 方向振动能量的增加, 延时时间变化量出现极小值, 摆销磨损面积的增加速度呈现变缓的趋势。通过观察发现, OZ 方向的振动使表面发生磨粒磨损, 有助于表界面的跑合, 而 OX 方向的振动能量对跑合效果的影响不显著。**结论** 通过延时时间变化量极差分析得到最优的跑合参数组合, 振动时间为 450 min, OX 和 OZ 方向的随机振动等效能量分别为 6.79g 和 15.17g。

关键词: 随机振动; 跑合方法; 正交试验; 摩擦行为; 延时时间; 微型齿轮机构

中图分类号: TH132

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)03-0099-09

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2023.03.013

Random Vibration Running-in Method of a Micro-gear Mechanism

YU Qi-hang¹, LI Yan², PENG Xue-feng¹, GENG Shao-yin¹, CAI Zhen-bing¹

(1. Tribology Research Institute, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. DEC Academy of Science and Technology Co., Ltd., Chengdu 611731, China)

ABSTRACT: The work aims to optimize the interface performance of friction pair of micro-gear mechanism by running-in to improve its service durability to solve the problem of short service life of micro-gear mechanism in random vibration environment. In this work, the orthogonal experiment method was used to study the vibration time and the random vibration energy in the OX and OZ directions to carry out running-in test of the micro-gear mechanism. In order to verify the running-in effect of different parameter combinations, a vibration load spectrum verification test under standard operating conditions was designed.

收稿日期: 2022-04-08; 修订日期: 2022-05-17

Received: 2022-04-08; Revised: 2022-05-17

基金项目: 四川省科技计划项目 (2022JDJQ0019)

Fund: Sichuan Science and Technology Planning Project (2022JDJQ0019)

作者简介: 余启航 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为表面摩擦磨损。

Biography: YU Qi-hang (1996-), Male, Postgraduate, Research focus: surface friction wear.

通讯作者: 蔡振兵 (1981—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为摩擦学及表面工程。

Corresponding author: CAI Zhen-bing (1981-), Male, Doctor, Researcher, Research focus: tribology and surface engineering.

引文格式: 余启航, 李严, 彭雪峰, 等. 某微型齿轮机构的随机振动摩擦学试验研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(3): 099-107.

YU Qi-hang, LI Yan, PENG Xue-feng, et al. Random Vibration Running-in Method of a Micro-gear Mechanism[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(3): 099-107.

The delay time change before and after the test was used as the basis for judging the running-in effect, and the wear degree of the micro-gear mechanism was judged according to the surface wear area of the balance pin. Through statistical analysis, the influence trend of each factor on the running-in effect and the optimal parameters were obtained. The experimental results showed that the primary and secondary effects of various factors on the running-in effect were: vibration time > random vibration value in the OZ direction > random vibration value in the OX direction. With the increase of the vibration time and the vibration energy in the OZ direction, the variation of the delay time appeared to a minimum value and the growth rate of the wear area of the balance pin tended to slow down. By observing the surface interface, it was found that the vibration in the OZ direction caused abrasive wear on the surface, which was conducive to the running-in of the surface interface, while the vibration energy in the OX direction had no significant effect on the running-in effect. The optimal combination of running-in parameters is obtained by range analysis on change of delay time: the vibration time is 450 minutes, and the equivalent energy of random vibration in the OX and OZ directions is 6.79g and 15.17g, respectively.

KEY WORDS: random vibration; running-in method; orthogonal test; friction behavior; delay time; micro-gear mechanism

在现代机械产品的结构设计中,需要考虑在运输过程中随机振动对其性能的影响。研究发现,在随机振动环境下,通常会由于疲劳、摩擦磨损、共振以及振动冲击^[1-6]使产品出现性能衰退,甚至失效。

某微型齿轮机构长期在随机振动环境下服役,导致其关键摩擦副发生严重的摩擦磨损,使得整个轮系的摩擦力矩提升,机构的延时时间超差,严重影响了产品性能。因此需要运用跑合来减少其性能的衰退速度,提高其可靠性和使用寿命^[7-9]。微型齿轮机构在使用过程中,关键摩擦副界面间会发生一定程度的摩擦磨损现象,尤其在其轮系各级的传动力较小的情况下,摩擦磨损会导致轮系整体的阻力增大,需要通过跑合对轮系的关键摩擦副表面进行充分磨合,使其过渡到稳定期延长其服役寿命。

近几年针对跑合的机理和方法,国内外学者在不同的工程领域做了大量的研究。Mario等^[10]研究发现,跑合初期接触表面的粗糙峰会逐渐磨平,并降低表面的粗糙度,同时发现温度改变了接触表界面的磨损形式,对跑合效果产生影响。Khonsari等^[11]研究了表面粗糙度、滑动速度对跑合效果的影响,研究发现,粗糙度的减小,致使微凸体所承受的载荷逐渐减小、流体膜承载逐渐增大,滚动速度的增加会致使表面生成油膜而降低磨损量。Lu等^[12]研究发现,轨道车辆制动闸片摩擦块在经过跑合后,表界面的宏观接触面积增加,使其平均接触应力减小。Li等^[13]研究发现,在润滑油中添加纳米级颗粒可以促进油膜的形成,显著提升跑合效率。Zhang等^[14]研究发现,使用魔芋葡甘聚糖溶液为润滑剂进行跑合后,可以通过水合分子层实现超低摩擦。Ding等^[15]研究发现,磨损稳定阶段摩擦系数信号的相位轨迹演化到一个特定的小空间,表明磨合吸引子的形成。收敛的跑合吸引子标志着摩擦系统的稳定性,稳定值越大,磨合吸引子的收敛性越大,摩擦系统的稳定性越好。常规的跑合研究方法应用在微型结构机械产品上具有局限性,因而需要提出特殊的跑合研究方法。正交试验法常用于很多

工程领域的多因素试验研究^[16-20],因此本文设计正交试验方案研究振动时间、OX和OZ两个不同方向随机振动能量对微型齿轮机构跑合效果的影响。

1 材料与试验方法

1.1 某微型齿轮机构

试验所用的微型齿轮机构的结构和各零部件的材料见图1和表1。机构整体由驱动轮片和3个特殊结构的齿轮一、二、三以及最后一级的平衡摆销构成。

表1 微型齿轮机构各部件材料
Tab.1 Material of each component of the micro-gear mechanism

部件名称	材料(大齿轮/小齿轮)
驱动齿轮	0Cr17Ni4Cu4Nb/0Cr17Ni4Cu4Nb
齿轮1	0Cr17Ni4Cu4Nb/0Cr17Ni4Cu4Nb
齿轮2	0Cr17Ni4Cu4Nb/0Cr17Ni4Cu4Nb
齿轮3	PEEK/0Cr17Ni4Cu4Nb
平衡摆销	0Cr17Ni4Cu4Nb

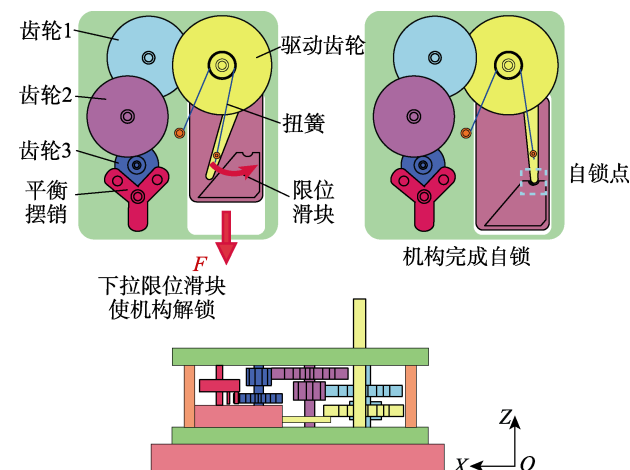


图1 微型齿轮机构的结构和运行过程
Fig.1 Schematic of the micro-gear mechanism and mechanism running process

运行时, 将驱动轮片扭转一定的角度, 使扭簧储能, 释放后根据轮系啮合的关系, 带动轮系运转, 平衡摆销与齿轮三发生滑动和间断性的碰撞, 驱动齿轮的前部伸出结构会卡入限位滑块处的凹槽中, 使机构形成自锁状态。从机构开始运行到机构完成自锁所用的时间即为机构的延时时间参数, 是工程应用中的重要参数。平衡摆销能够延缓扭簧释放能量的速度, 起到调控延时时间的作用, 其磨损程度直接影响微型齿轮机构的延时时间性能。

1.2 跑合方法和分析测试

根据前期预试验结果, 设计的正交试验因素水平见表 2。其中, 随机载荷谱的振动能量是将功率谱密度函数每个频率对应的 PSD 值放大对应的倍数, 使振动的等效能量增大。机构沿着 OX 和 OZ 方向振动的振动载荷谱见表 3 (振动方向如图 1 所示)。先进行相应的随机振动试验, 然后进行延时时间测试。随后对齿轮机构进行拆卸、清洗及润滑。清洗过程中, 先使用 120#汽油进行 15 min 超声波清洗, 然后使用 120#汽油与 4116-1 润滑油的混合液对机构零件表面进行润滑。为了检验跑合效果, 设计了跑合验证性实验。机构在正交试验完成后, 在标准工况振动载荷谱 (见表 4) 下振动相同时间, 并额外添加了 3 台没有经过跑合的机构进行对照。试验结束后, 选取部分机构拆卸, 观察关键摩擦副的微观和宏观形貌, 测试平衡摆销表面的磨损面积, 以此作为评价跑合方法的重要参数。

表 2 因素水平 Tab.2 Factors and levels			
水平	影响因素		
	A 振动时间 t (两方向组合) /min	B OX 方向等效振动能量 E_x/g	C OZ 方向等效振动能量 E_z/g
1	90+90	3.92	18.58
2	810+810	6.79	10.73
3	450+450	5.54	15.17

表 3 随机振动载荷谱 Tab.3 Random vibration load spectrum		
频率范围/Hz	G_{rms}/g	振动方向
1~2 000	3.92	OX
1~2 000	10.73	OZ

表 4 跑合验证性试验随机振动载荷谱 Tab.4 Random vibration load spectrum under working conditions of mechanism			
频率范围/Hz	等效能量 G_{rms}/g	振动方向	振动时间/min
1~2 000	3.92	OX	675
1~2 000	11.1	OY	1 350

微型齿轮机构专用延时时间测量设备示意图如图 2a 所示, 砝码使机构解锁, 传感器自动开始测定延时时间, 装置检测到机构停止不动后, 结束测试, 并得到延时时间的测试结果。随机振动试验使用的是航天希尔 IPA120H/1532M 随机振动试验系统 (见图 2b)。试验结束后, 使用 JSM-6610 电子显微镜进行微观形貌测试, 使用基恩士 VHX-6000 超景深显微系统在 200 倍放大倍数下对机构的平衡摆销界面进行观察。

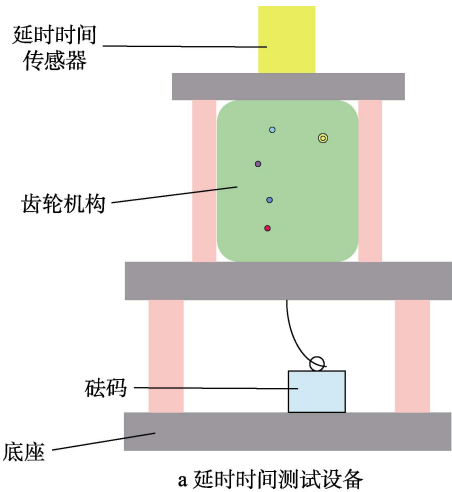


图 2 试验设备
Fig.2 Test equipment: a) delay time test equipment; b) random vibration test system (IPA120H/15323M)

2 结果及分析

2.1 正交试验结果分析

本试验研究选取的评价参数有 2 个, 第一个是延时时间变化量, 第二个是平衡摆销的磨损面积。其中, 延时时间变化量直接反映了跑合效果的好坏, 摆销磨损面积反映了微型齿轮机构的整体磨损程度^[21]。根据设计的试验因素数和水平数, 选取 3 因素 3 水平正交试验表 L9(3⁴), 设计 9 组试验, 每组分配 3 台机构, 其中 2 台用于跑合后的延时时间变化量测定, 1 台用于关键摩擦副平衡摆销磨损面积测试, 试验结果见表 5 和图 3。

表 5 正交试验方案及结果
Tab.5 Scheme and result of orthogonal test

试验号	试验方案	延时时间变化量/s		延时时间平均值/s	摆销磨损面积/(10 ⁴ μm ²)
		I	II		
1 [#]	A ₁ B ₁ C ₁	0.759	0.798	0.779	10.56
2 [#]	A ₁ B ₂ C ₂	0.561	0.602	0.582	9.70
3 [#]	A ₁ B ₃ C ₃	0.377	0.321	0.349	6.96
4 [#]	A ₂ B ₁ C ₂	0.439	0.422	0.431	6.31
5 [#]	A ₂ B ₂ C ₃	0.329	0.343	0.336	13.92
6 [#]	A ₂ B ₃ C ₁	0.541	0.528	0.535	13.84
7 [#]	A ₃ B ₁ C ₃	0.381	0.357	0.369	8.40
8 [#]	A ₃ B ₂ C ₁	0.261	0.262	0.262	7.47
9 [#]	A ₃ B ₃ C ₂	0.485	0.495	0.49	6.95
10 [#]	未跑合	3 台机构的延时时间变化量平均值为 0.408 s			—

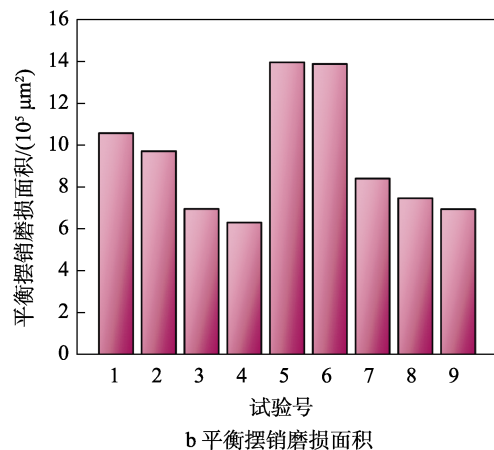
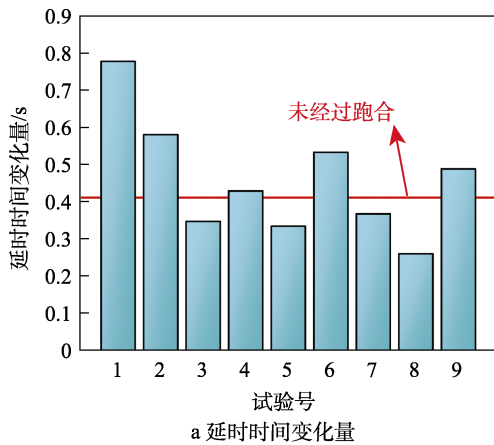


图 3 正交试验结果统计分析

Fig.3 Statistical analysis chart of orthogonal test results:
a) delay time change; b) wear area of balance pin

从试验结果可知,与未经跑合比较,经过跑合后延时时间变化量低于未跑合的试验组为 3[#]、7[#]、8[#]。延时时间变化量最小的参数为各向振动时间 450 min, OX 和 OZ 方向的振动能量分别为 6.79g 和 18.58g; 最大的振动时间为 90 min, OX 和 OZ 方向的振动能量分别为 3.92g 和 18.58g。平衡摆销的磨损面积最大时的参数为各向振动时间 810 min, OX 和 OZ

方向的振动能量分别为 6.79g 和 15.17g; 最小时为各向振动时间 810 min, OX 和 OZ 方向的振动能量分别为 3.92g 和 10.73g。

极差分析结果见表 6 和 7。极差 R 的大小代表影响试验结果的主次程度, R 越大, 表明该因素对评价指标的影响越大。由结果可知, 对于延时时间变化量, 3 个影响因素对应的 R 值分别为 0.589、0.399、0.521。可得振动时间为主要影响因素, 其次为 OZ 方向振动能量, 影响程度最小的是 OX 方向振动能量。对于平衡摆销的磨损面积, 3 个影响因素的 R 值分别为 11.25、5.82、8.91。则可得振动时间为主要影响因素, 其次为 OZ 方向振动量值, 影响程度最小的是 OX 方向振动能量。

表 6 延时时间增量的极差分析结果
Tab.6 Range analysis result of delay time increment

因素	A	B	C
K ₁	1.709	1.578	1.575
K ₂	1.301	1.179	1.502
K ₃	1.121	1.374	1.054
M ₁	0.570	0.526	0.525
M ₂	0.434	0.393	0.501
M ₃	0.374	0.458	0.351
极差 R	0.588	0.399	0.521
优水平	A ₃	B ₂	C ₃
因素主次	A>C>B		

表 7 摆销磨损面积的极差分析结果
Tab.7 Range analysis result of wear area of balance pin

因素	A	B	C
K ₁	27.22	25.27	31.87
K ₂	34.07	31.09	22.96
K ₃	22.82	27.75	29.28
k ₁	9.07	8.42	10.62
k ₂	11.35	10.36	7.65
k ₃	7.61	9.25	9.76
极差 R	11.25	5.82	8.91
因素主次	A>C>B		

2.2 跑合参数对延时时间的影响

根据正交试验的极差分析结果得到振动时间的影响趋势, 如图 4 所示。从图 4a 中可知, 振动时间为 450 min 时, 延时时间变化量达到最低 1.121 s, 并且在 90~450 min 变化较快, 在 450~810 min 变化缓慢。说明最优的跑合振动时间为 450 min, 超过 450 min 会导致微型齿轮机构的性能逐渐失效。从图 4b 中可知, 随着振动能量的增加, 延时时间变化量呈现一直减小的趋势。这是由于 OX 方向振动时, 摩擦副界面的接触形式致使其磨损进程较慢, 因而没有出现最小值。

理论上, 继续增加振动能量可以加快磨损进程, 在增加到某个较大的能量值时, 会出现拐点。从图 4c 中可知, 随着振动能量的增加, 延时时间增量出现了先减小、后增大的趋势, 振动能量为 $15.17g$ 时达到最小值。 OZ 振动方向作为微型齿轮机构的磨损敏感方向, 对摩擦副的磨损影响较为显著, 能量的增大导致各摩擦副界面的相对位移和载荷增大。当振动能量较小时, 跑合效果一般; 振动能量较大时, 导致摩擦副过度磨损, 使机构加速进入失效阶段^[22]。

2.3 跑合参数对磨损面积的影响

根据正交试验的极差分析结果得到的平衡摆销磨损面积影响趋势如图 5 所示。从图 5a 中可知, 随着振动时间的增加, 磨损面积呈现先减小、后增加的趋势, 在 $90\sim 450\text{ min}$ 变化较为缓慢, 在 $450\sim 810\text{ min}$

变化较快, 并且在振动时间为 450 min 时到达最小值。根据跑合理论, 不同工况下其最佳表面状态不同, 当达到与工况相适应的表面状态时, 其磨损速率会达到最小。因此, 最优的跑合振动时间即为磨损面积最小的振动时间 450 min 。从图 5b 中可得知, 随着振动能量的增加, 磨损面积逐渐增大, 并且在振动能量 $3.92g\sim 5.54g$ 与 $5.54g\sim 6.79g$ 这 2 个区间, 磨损面积增速有变大的趋势。由于 OX 方向的振动能量较小, 对微型齿轮机构摩擦副界面磨损的影响不显著, 因而并不能从磨损面积的变化判断其最优参数。图 5c 中, 磨损面积随着振动能量增加而呈现增加趋势, 但是在振动能量为 $15.17g\sim 18.58g$ 内的磨损速率已经开始趋于缓慢, 小于 $10.73g\sim 15.17g$ 的磨损速率, 说明振动能量为 $15.17g$ 时, 表界面的磨损速率开始趋于缓慢。

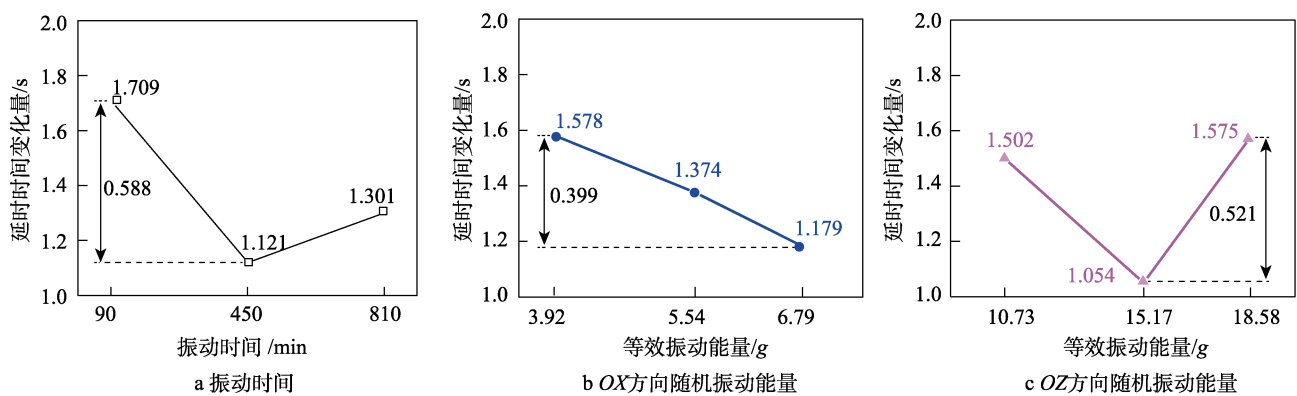


图 4 各因素对延时时间变化量的影响

Fig.4 Trend graph of effects of various factors on variation of delay time: a) vibration time; b) random vibration energy in the OX direction; c) random vibration energy in the OZ direction

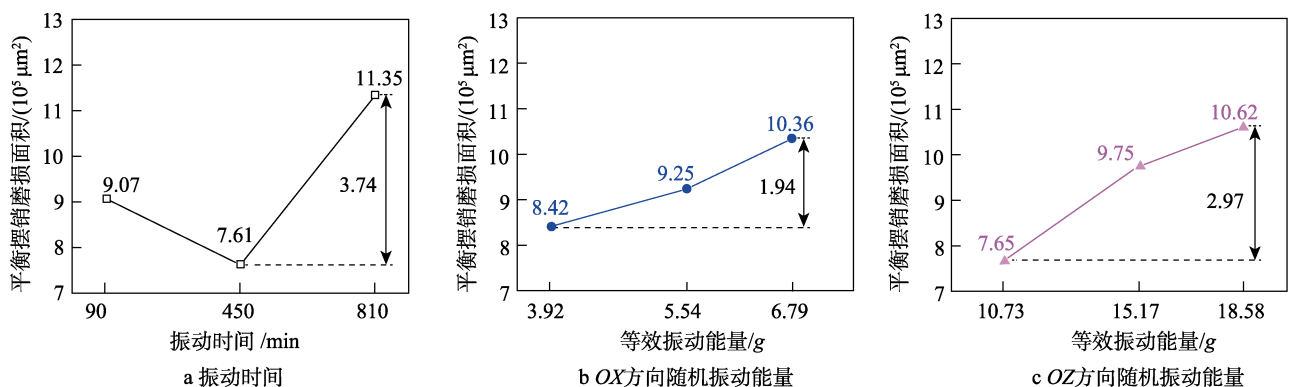


图 5 各因素对平衡摆销磨损面积的影响

Fig.5 Trend diagram of effects of various factors on wear area of balance pin: a) vibration time; b) random vibration energy in the OX direction; c) random vibration energy in the OZ direction

2.4 齿轮机构的磨损机制分析

跑合过程是表界面变化的过程, 振动时间对表界面的变化影响最大是由于机械力作用循环次数的增加, 微型齿轮机构的摩擦磨损对 OZ 方向的振动能量较敏感, 是接触形式和振动能量大小的双重作用导致的。 OX 方向的振动会导致微型齿轮机构的限位滑块

由于惯性而上下滑动, 使驱动齿轮往复转动, 各摩擦界面的摩擦磨损不充分, 因此低振动能量的 OX 方向振动对机构各摩擦副界面磨损的影响不显著。 OZ 方向振动时, 各摩擦副界面处于持续接触状态, 此时各摩擦副界面在 OZ 方向上发生了滑动摩擦磨损, 如图 6 所示。

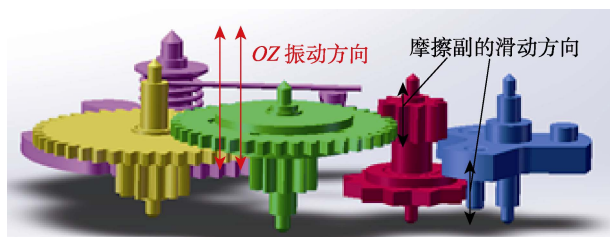
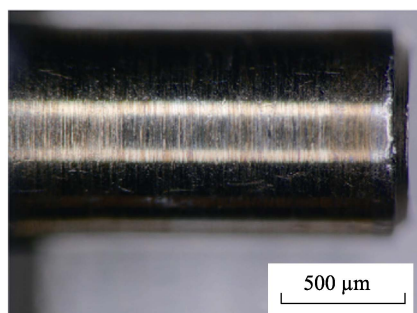


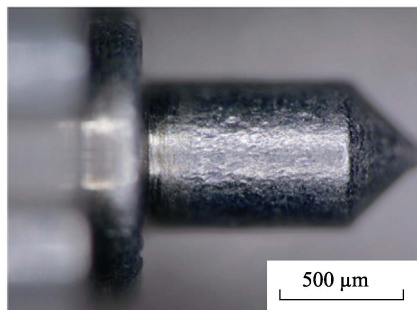
图 6 OZ 方向振动引发的滑动磨损

Fig.6 Schematic diagram of sliding wear caused by vibration in the OZ direction

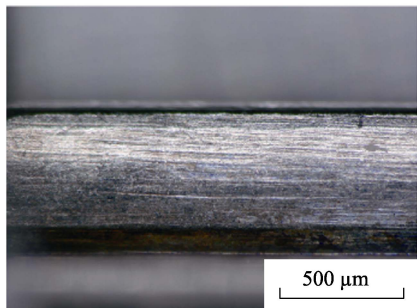
微型齿轮机构在振动时间为 270 min 时，不同振动方向和振动能量条件下所观察到的各摩擦副的磨损形貌如图 7 和图 8 所示。从图 7 和图 8 中可知，OX 方向的振动结束后，各摩擦副没有显著变化，而 OZ 方向的振动试验结束后，各摩擦副的界面发生了



a 平衡摆销



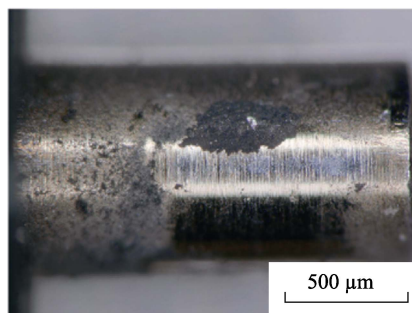
b 齿轮轴轴端



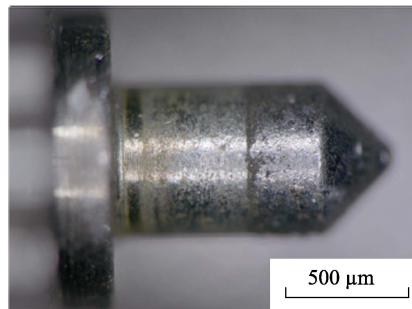
c 齿轮轴齿面

图 7 在 OX 方向振动时间为 270 min、振动能量为 6.79g 条件下摩擦副的表面形貌

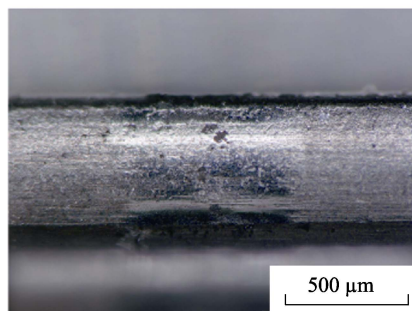
Fig.7 Surface morphology of friction pair under the condition of vibration time of 270 min in the OX direction and vibration energy of 6.79 g: a) balance pin; b) gear shaft end; c) tooth surface of gear shaft



a 平衡摆销



b 齿轮轴轴端



c 齿轮轴齿面

图 8 在 OZ 方向振动时间为 270 min、振动能量为 18.58g 条件下摩擦副的表面形貌

Fig.8 Surface morphology of friction pair under the condition of vibration time of 270 min in the OZ direction and vibration energy of 18.58 g: a) balance pin; b) gear shaft end; c) tooth surface of gear shaft

严重的磨损，并沿振动方向出现了被挤推到磨痕周围的油泥和磨屑，可见微型齿轮机构各摩擦副的磨损对 OZ 方向的振动较为敏感。随着 OZ 振动能量的增加，振动台施加的试验推力增大，以及振动过程中的最大位移增加，将间接导致接触面的载荷、滑动速度以及磨损面积的增加，从而显著影响跑合表面的磨损程度^[23]。

从延时时间变化量试验结果来看，8#参数组合下的结果最小，跑合效果最好，研究其表界面的摩擦磨损行为对工程应用具有重大意义。将 8#试验后的微型齿轮机构拆卸进行观察，齿轮副表和摆销表面的微观形貌如图 9、10 所示。在放大倍数 500 倍的条件能够观察到齿轮副表界面存在很多的犁沟，而在平衡摆销上有大量细小的磨屑堆积，两者的磨损形式都属

于磨粒磨损(如图 9 所示)。微型齿轮机构中的齿轮副的磨损是金属表面间的摩擦磨损, 接触面凹凸峰的相互切削作用相对剧烈。平衡摆销的磨损为金属

与非金属(PEEK)间的摩擦磨损, 并且 PEEK 材料本身具有自润滑性, 因而在摩擦磨损过程中没有剧烈的切削作用。

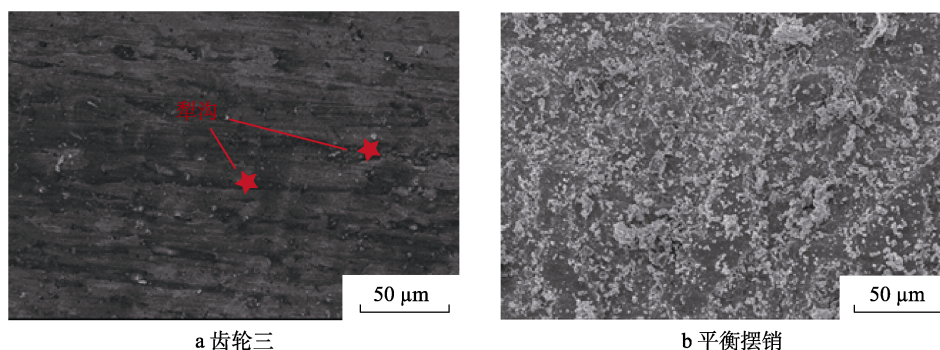


图 9 8#试验条件下的关键摩擦副 SEM(500 倍)形貌
Fig.9 SEM images of key friction pair under 8# test conditions: a) gear III; b) balance pin

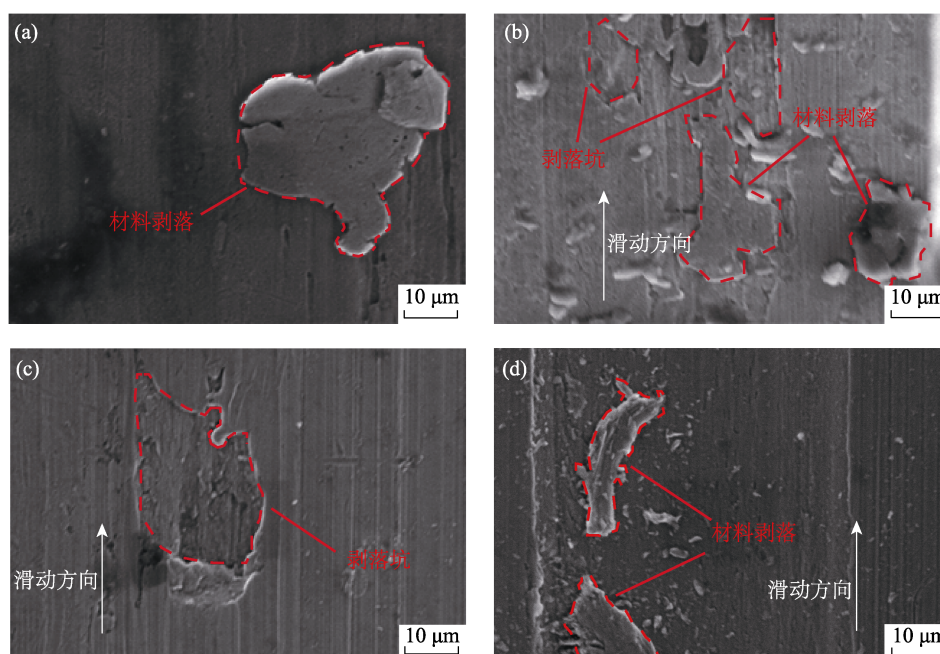


图 10 8#试验条件下齿轮三齿面的 SEM(1 500 倍)形貌
Fig.10 SEM images (1 500 times) of gear three tooth surface under 8# test conditions

在 1 500 倍下观察可以发现, 齿轮副轮齿表面存在大量的剥落坑和剥落物, 并且剥落碎片的形状以及剥落坑的形成方向与 OZ 振动方向一致(如图 10 所示), 进一步证明了 OX 方向的振动对表界面的影响不显著。跑合过程初期, 表界面一般伴随着较为剧烈的机械作用, 接触表面的凹凸体会由于剪切力的作用产生大量的剥落和犁沟, 形成一定量的磨屑以及脱落物。磨屑进入接触区, 增加了接触表面的切向力, 不断产生新的表面, 进一步对表界面进行跑合^[24-26]。

3 结论

本文基于随机振动设备, 通过正交试验研究了振

动时间、 OX 和 OZ 方向的振动能量对微型齿轮机构跑合效果以及磨损程度的影响规律, 并通过极差分析得到最优的跑合方法, 主要结论如下:

1) 正交试验结果表明, 3 个因素对微型齿轮机构的跑合影响主次为振动时间> OZ 方向振动能量> OX 方向振动能量。

2) 根据延时时间变化量以及平衡摆销磨损面积, 综合选取的最优跑合方法参数为振动时间 450 min, OX 方向振动能量 6.79g, OZ 方向振动能量 15.17g。

3) 微型齿轮机构的磨损对 OZ 方向的振动较敏感, 原因是 OZ 方向的振动有利于摩擦副界面充分持续地进行滑动摩擦磨损过程, 并且 OZ 方向的随机振动会促进表面材料的剥落, 进一步对新鲜表面进行跑合, 达到较好的跑合效果。

参考文献:

- [1] 王建, 沙云东, 杜英杰, 等. 高温环境下薄壁试件随机振动疲劳研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(8): 28-32.
WANG Jian, SHA Yun-dong, DU Ying-jie, et al. Random Vibration Fatigue of Thin-Walled Test Piece at High Temperature[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(8): 28-32.
- [2] 王崇哲, 刘杰, 程皓月. 某电子设备随机振动故障分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(10): 110-116.
WANG Chong-zhe, LIU Jie, CHENG Hao-yue. Random Vibration Failure Analysis of an Electronic Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(10): 110-116.
- [3] 杜尚勇, 何文灿, 张云翔. 某电子设备振动环境功能失效分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(6): 115-118.
DU Shang-yong, HE Wen-can, ZHANG Yun-xiang. Failure Analysis of Vibration Environment Test Function of an Electronic Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(6): 115-118.
- [4] 蒋瑜, 陶俊勇. 结构振动疲劳加速试验技术研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(5): 30-35.
JIANG Yu, TAO Jun-yong. Accelerated Vibration Fatigue Testing of Structures[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(5): 30-35.
- [5] WU Shao-dong, SHANG De-guang, ZUO Lin-xuan, et al. Notch Fatigue Behavior of Needled C/SiC Composite under Random Vibration Loading[J]. Ceramics International, 2022, 48(6): 8349-8358.
- [6] MANOUCHEHRYNIA R, ABDULLAH S, SINGH S S K. Fatigue-Based Reliability in Assessing the Failure of an Automobile Coil Spring under Random Vibration Loadings[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 131: 105808.
- [7] YAN Wen-meng, GONG Jian, YU Bing-jun, et al. Self-Lubrication of Si/SiO₂ Interface Achieved through Running-in at Low Sliding Speed[J]. Wear, 2019, 426-427: 828-834.
- [8] HOLMBERG K, ERDEMIR A. Global Impact of Friction on Energy Consumption, Economy and Environment[J]. FME Transactions, 2015, 43(3): 181-185.
- [9] HOLMBERG K, ERDEMIR A. Influence of Tribology on Global Energy Consumption, Costs and Emissions[J]. Friction, 2017, 5(3): 263-284.
- [10] SOSA M, BJÖRKLUND S, SELLGREN U, et al. In Situ Surface Characterization of Running-in of Involute Gears[J]. Wear, 2015, 340-341: 41-46.
- [11] AKBARZADEH S, KHONSARI M M. On the Prediction of Running-in Behavior in Mixed-Lubrication Line Contact[J]. Journal of Tribology, 2010, 132(3): 149-156.
- [12] 卢纯, 尹家宝, 张庆贺, 等. 轨道车辆制动闸片摩擦块跑合阶段磨损分析[J]. 表面技术, 2022, 51(12): 63-71.
- LU Chun, YIN Jia-bao, ZHANG Qing-he, et al. Research on Wear Degradation of Railway Vehicle Brake Pad Friction Block in Running-in Stage[J]. Surface Technology, 2022, 51(12): 63-71.
- [13] LI Li-chao, DING Mei, LIN Bin, et al. Influence of Silica Nanoparticles on Running-in Performance of Aqueous Lubricated Si₃N₄ Ceramics[J]. Tribology International, 2021, 159: 106968.
- [14] 张会臣, 漆雪莲. 跑合过程引发钛合金水基润滑的超低摩擦特性[J]. 材料研究学报, 2021, 35(5): 349-356.
ZHANG Hui-chen, QI Xue-lian. Super Low Friction Characteristics Initiated by Running-in Process in Water-Based Lubricant for Ti-Alloy[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2021, 35(5): 349-356.
- [15] DING Cong, SUN Guo-dong, ZHOU Zhen-yu, et al. Investigation of the Optimum Surface Roughness of AISI 5120 Steel by Using a Running-in Attractor[J]. Journal of Tribology, 2021, 143(9): 094501.
- [16] ZHENG Gang, HUANG Jian-you, DIAO Yu, et al. Formulation and Performance of Slow-Setting Cement-Based Grouting Paste (SCGP) for Capsule Grouting Technology Using Orthogonal Test[J]. Construction and Building Materials, 2021, 302: 124204.
- [17] ZHANG Li-feng, ZHANG Meng-han. Image Reconstruction of Electrical Capacitance Tomography Based on Optimal Simulated Annealing Algorithm Using Orthogonal Test Method[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2021, 80: 101996.
- [18] WU Yi-fei, ZHAO Hong-xia, ZHANG Cun-quan, et al. Optimization Analysis of Structure Parameters of Steam Ejector Based on CFD and Orthogonal Test[J]. Energy, 2018, 151: 79-93.
- [19] QUAN Hui, GUO Ying, LI Ren-nian, et al. Optimization Design and Experimental Study of Vortex Pump Based on Orthogonal Test[J]. Science Progress, 2020, 103(1): 36850419881883.
- [20] TANG Zhi-guo, ZHAO Zhi-jian, YIN Chao, et al. Orthogonal Optimization of a Liquid Cooling Structure with Straight Microtubes and Variable Heat Conduction Blocks for Battery Module[J]. Journal of Energy Engineering, 2022, 148(3): 04022017.
- [21] BLAU P J. On the Nature of Running-in[J]. Tribology International, 2005, 38(11/12): 1007-1012.
- [22] KHONSARI M M, GHATREHSAMANI S, AKBARZADEH S. On the Running-in Nature of Metallic Tribo-Components: A Review[J]. Wear, 2021, 474-475: 203871.
- [23] NUGRAHA R D, CHEN Shi, YIN Nian, et al. Running-in Real-Time Wear Generation under Vary Working Condition Based on Gaussian Process Regression Approximation[J]. Measurement, 2021, 181: 109599.
- [24] 张建阁, 刘少军, 方特. 混合润滑下齿面磨损预测研究

- 及试验验证[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018, 46(2): 22-30.
- ZHANG Jian-ge, LIU Shao-jun, FANG Te. Prediction of Gear Wear Rate in Mixed Lubrication and Experimental Verification[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(2): 22-30.
- [25] 李和言, 马成男, 吴健鹏, 等. 铜基粉末冶金干式摩擦副磨合过程摩擦性能研究[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(2): 153-160.
- LI He-yan, MA Cheng-nan, WU Jian-peng, et al. Friction Performance of Cu-Based Powder Metallurgy Dry Friction Pairs in Running-in Process[J]. Tribology, 2018, 38(2): 153-160.
- [26] 江俊佑, 李秀艳. SUS304 奥氏体不锈钢摩擦跑合阶段的摩擦表面层演变及其对摩擦行为的影响[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(1): 37-43.
- JIANG Jun-you, LI Xiu-yan. The Microstructure Evolution in Early Running-in Stage and Its Effect on the Friction Behavior in 304 Stainless Steel[J]. Tribology, 2018, 38(1): 37-43.

责任编辑: 刘世忠