

硫化异丁烯对航空钢油气润滑的影响

管文^{1,2}, 戴振东², 朱如鹏¹, 夏延秋³

(1. 南京航空航天大学机电学院, 江苏南京 210016; 2. 南京航空航天大学仿生结构与材料防护研究所, 江苏南京 210016;
3. 中国科学院兰州化学物理研究所, 甘肃兰州 730000)

摘要:直升机齿轮传动要求有 30~60 min 的干运转能力, 以免减速器润滑系统出现故障时, 造成灾难性的后果。采用油气润滑方式, 对 T321 进行不同质量分数的抗磨效果对比试验, 为降低试验成本, 以销盘摩擦磨损试验代替齿轮传动试验。不同含量的硫化异丁烯分别加入到 DOD-L-85734 航空油中, 做航空钢摩擦副 45 min 的油气润滑试验。结果表明: 抗磨效果最好的是添加量 1%, 只喷油气 4 次、用油量仅 0.02 mL, 则其 45 min 的磨痕宽度仅为 427 μm , 而干摩擦仅 50 s 的磨痕宽度却为 632 μm 。含抗磨剂的油气润滑为解决直升机传动系统干运转问题提供了一种可行方案。

关键词: 油气润滑; 硫化异丁烯; 航空油; 航空钢; 磨损

中图分类号: TE 626.3

文献标志码: A

Effect of sulfurized isobutylene on oil/air lubrication of aeronautical steel

GUAN Wen^{1,2}, DAI Zhen-dong², ZHU Ru-peng¹, XIA Yan-qiu³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, China;

2. Institute of Bio-inspired Structure and Surface Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, China;

3. Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Helicopter gear transmission requires 30~60 min dry running ability to avoid the disastrous consequences caused by lubrication system failure. In order to reduce the cost of testing, a pin-on-disc friction test was used instead of a gear transmission. Various percentages of sulfurized isobutylene were injected and mixed with DOD-L-85734 aeronautical oil, 45 min oil/air lubrication experiments were performed upon aeronautical steel tribo-pairs. The results show that the best anti-wear effect is obtained for oil/air lubrication containing 1% sulfurized isobutylene: its wear width was only 427 μm during 45 min period with four times of oil/air jetting and 0.02 mL oil consumption, compared with 632 μm wear width of dry friction for only a 50 s period. The technology of oil/air lubrication containing an anti-wear additive is a feasible way to improve the dry running ability of a helicopter transmission system.

Key words: oil/air lubrication; sulfurized isobutylene; aeronautical oil; aeronautical steel; wear

直升机减速器润滑系统出现故障, 齿轮轴承将处于无润滑油工作状态, 由于急剧升温热膨胀, 可能使齿轮失去工作间隙, 造成灾难性后果。许多国家均对直升机减速器有 30~60 min 的干运转^[1-2]能力要求。为此, Wilfredo Morales and Robert F. Handschuh^[3]一直对航空钢进行含抗磨剂的油雾润滑^[4-6]试验研究; 但笔者发现: 含抗磨剂的油气润滑^[7-8]抗

磨效果明显优于相应油雾润滑抗磨效果^[9]。油气润滑耗油量很少, 能减轻直升机的质量, 由于压缩的空气能更好地散热, 故润滑效果好。对抗磨剂的研究采用浸油等充分润滑的情况较多, 油气润滑抗磨剂的研究尚未开展。硫化异丁烯(T321)的含硫量高, 活性硫多, 将其作为极压抗磨剂^[10-12], 笔者采用油气润滑方式对 T321 进行不同质量分数的抗磨效

果对比试验,以寻找 T321 最佳的抗磨质量分数。为降低试验成本,以销盘摩擦磨损试验代替齿轮传动试验。

1 试验部分

1.1 材 料

基础油选用 DOD-L-85734 航空润滑油(简称 DOD)。将 T321 按质量分数 0.5%、1%、1.5%、2.0% 分别加入到 DOD 基础油中搅拌均匀,得到 5 种待测油样(含 DOD 基础油)。上、下试样均是 12Cr2Ni4A 航空钢,上试样是 $\Phi 10\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 的小圆柱,下试样是 $\Phi 98\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 的圆盘。上、下试样的表面热处理与直升机减速器啮合齿轮相同;渗碳深度 0.8~1.0 mm、表面硬度不低于 HRC60。试验前、后,上、下试样在丙酮中清洗 6 min,再用烘干箱烘干。试验后,用显微镜观察上试样的磨痕形貌并测量上试样的磨痕宽度。

1.2 设备与方法

用 UMT 试验机做销盘摩擦磨损试验,载荷为 100 N。上、下试样的接触方式为:上试样的圆柱面和下试样圆盘面的线接触。摩擦中心距旋转中心 30 mm。摩擦试验中,上试样固定而下试样以 833 r/min 的速度旋转。油气润滑装置所需气压为 0.4 MPa。试验模拟直升机减速器失油状况:在上、下试样待摩擦区域涂一层 DOD 基础油。摩擦试验开始

前,把试样的基础油擦干,以便使试样在滑动摩擦开始后尽快进入干摩擦状态。摩擦试验过程中,摩擦系数急剧升高,就在试样接触区的入口中心处喷一次油气。每次喷油气的时间为 10 s、每次喷油量为 0.005 mL。试验开始后,每隔 7 min 在上试样摩擦区域的外侧中心处测温。每次试验的时间为 45 min。

2 结果及其分析

2.1 润滑性能

图 1 为几种喷油气工况的摩擦系数曲线。图 1(a)~(c)分别对应 T321 不同含量的油气润滑,(d)对应 DOD 基础油(不含添加剂)的油气润滑。从图 1 中看出:试验刚开始,由于无润滑油的润滑,摩擦系数急剧上升。在试验开始后的第 2 s 喷一次油气后,摩擦系数迅速下降。经过一段时间后,润滑油被甩干,摩擦系数再次急剧升高。再喷一次油气后,摩擦系数又迅速下降。如此反复进行,直到 45 min 试验结束(图上较长的竖直线为喷油气引起)。5 种润滑工况 45 min 的喷油气情况见表 1。其中 1% T321+DOD、2% T321+DOD 和 DOD 各喷油气 4 次、消耗油量均为 0.02 mL,而 0.5% T321+DOD 和 1.5% T321+DOD 的喷油气次数和消耗油量均稍多,说明后二者的抗磨性稍差。

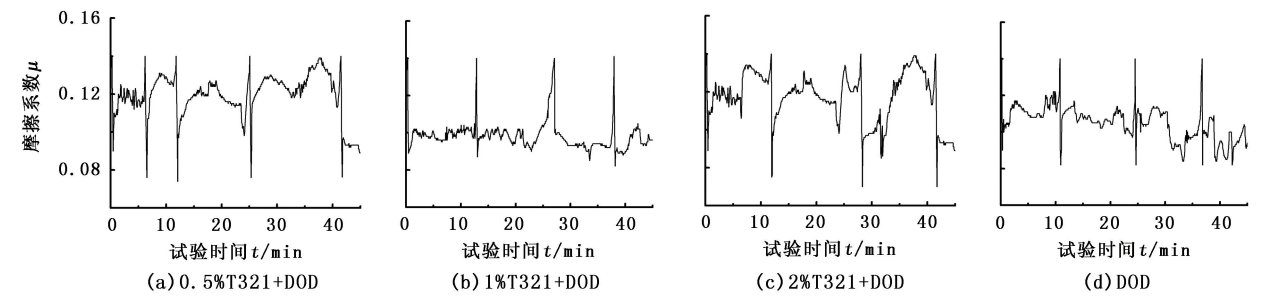


图 1 不同喷油气工况的摩擦系数

Fig.1 Friction coefficient at different oil/air jetting conditions

表 1 润滑次数、耗油量和磨痕宽度

Table 1 Lubrication times, oil quantities used for 45 min and wear widths

润滑剂	润滑次数 <i>n</i>	总耗油量/ mL	磨痕宽度/ μm
0.5% T321+DOD	5	0.025	573
1% T321+DOD	4	0.020	427
1.5% T321+DOD	5	0.025	662
2% T321+DOD	4	0.020	781
DOD	4	0.020	678

2.2 磨损性能

2.2.1 油气润滑

不同含量 T321 油气润滑 45 min 的上试样平均磨痕宽度见表 1 和图 2。磨痕宽度较小的是 0.5% T321+DOD 和 1% T321+DOD,二者的磨痕宽度均比 DOD 基础油的磨痕宽度小;磨痕宽度较大的是 1.5% T321+DOD 与 2% T321+DOD。1.5% T321+DOD 与 DOD 基础油的磨痕宽度接近,而 2% T321+DOD 的磨痕宽度却比 DOD 基础油的大很多。可见,

过多的 T321 不但不减磨,反而增加了磨损,这是由于 T321 含量大,则基体表面发生的腐蚀磨损也大。

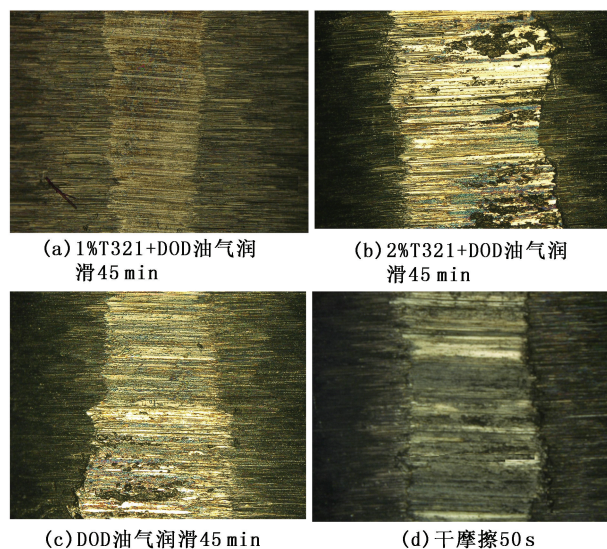


图2 上试样磨痕宽度和磨痕形貌($\times 200$)

Fig. 2 Upper specimen's wear widths and surface topography($\times 200$)

下试样的磨损量与上试样的磨损量相对应,磨损量大的上试样对应的下试样磨损量也大。1.5% T321+DOD 的下试样比 1% T321+DOD 的下试样磨损严重(图3)。

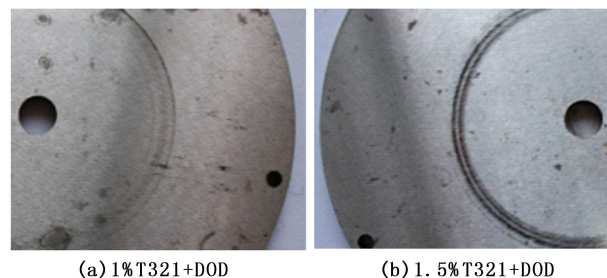


图3 下试样磨痕

Fig. 3 The lower specimen's wear topography

2.2.2 干摩擦

干摩擦试验过程中,摩擦温度和摩擦系数迅速上升。干摩擦进行 50 s 时,摩擦系数超过 0.30、上试样的磨痕宽度达到 632 μm 。

可见,抗磨剂有最佳的抗磨质量分数。抗磨剂含量过高,则腐蚀磨损严重,导致磨损量增大。对于 DOD 基础油, T321 的最佳抗磨质量分数为 1% ;只喷油气 4 次、用油量仅 0.02 mL, 则 45 min 的磨痕宽度仅为 427 μm ,而干摩擦仅 50 s 的磨痕宽度却为 632 μm 。

2.3 表面质量

上、下试样的磨痕形貌见图 2、3。表面质量最好

的是 1% T321+DOD,而 1.5% T321+DOD 和 2% T321+DOD 均出现了严重的腐蚀磨损,表面质量不好。

2.4 抗磨机制

在磨损表面上, T321 分子中的活性硫元素与金属表面发生摩擦化学反应,生成有利于改善减摩、抗磨性能的硫化铁化合物及硫化铁的氧化物硫酸铁保护膜,新生的金属表面也能生成氧化铁,从而起到减摩、抗磨作用。但 T321 加入的量,腐蚀磨损也大。这是由于 T321 是一种金属腐蚀剂,优良的性能须具备适度的化学活性,活性太强,则腐蚀性过大;活性太弱,则极压性不够。可见, T321 提高极压性能是以牺牲表面磨损为基础的,这要求设计极压抗磨剂时,既要提高极压性能,又要减少腐蚀磨损。如在抗磨剂中加入抑制腐蚀的元素,把单剂的抗磨剂进行复合配伍,能同时兼顾这两方面的要求。

2.5 摩擦温度

5 种喷油气工况下,上试样摩擦区域试验前后的温升均在 45 min 试验结束时最高。DOD 基础油油气润滑 45 min 的温升最高,为 29 $^{\circ}\text{C}$, 1% T321+DOD 油气润滑 45 min 的温升最低,仅为 16 $^{\circ}\text{C}$ 。而干摩擦仅 16 s 时的温升就超过了 40 $^{\circ}\text{C}$ 。可见,油气润滑可以显著降低摩擦区域的温升。

3 结 论

(1)对于航空油 DOD-L-85734,添加不同质量分数的 T321 磨损量也不同。0.5% T321+DOD 和 1% T321+DOD 的磨损量较小,而 1.5% T321+DOD 和 2% T321+DOD 的磨损量较大。

(2) T321 的 4 种添加量中,磨损表面质量最好的是 1%,抗磨效果最好的也是 1%,只喷油气 4 次、用油量仅 0.02 mL, 则 45 min 的磨痕宽度仅为 427 μm ,而干摩擦仅 50 s 的磨痕宽度却为 632 μm 。

(3)油气润滑可以显著降低摩擦区域的温升。1% T321+DOD 油气润滑 45 min 的上试样摩擦区域温升仅为 16 $^{\circ}\text{C}$,而干摩擦仅 16 s 时温升就超过 40 $^{\circ}\text{C}$ 。

参考文献:

- [1] DHANASEKARAN S, GNANAMOORTHY R. Gear tooth wear in sintered spur gears under dry running conditions [J]. Wear, 2008, 265: 81-87.
- [2] MULLEN M F, COOPER C V, GLASSER A R, et al. Secondary lubrication system with injectable additive; US, 2007/0261922A1 [P]. 2007-11-15.

(下转第 122 页)

- and Gas Storage and Transportation, 1998, 17(1): 10-14.
- [17] 崔秀国,王龙,柳建军,等. 基于工业环道试验的启动压力波传递特性[J]. 油气储运, 2010, 29(7): 491-493.
- CUI Xiu-guo, WANG Long, LIU Jian-jun, et al. Commercial loop test-based transfer characteristic of startup pressure wave[J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2010, 29(7): 491-493.
- [18] BORGHI G-P, CORRERA S, MERLINI M, et al. Prediction and scaleup of waxy oil restart behavior[R]. SPE 80259, 2003.
- [19] 张国忠. 管道瞬变流动分析[M]. 东营:石油大学出版社, 1994: 6-9.
- [20] 兰浩. 胶凝原油屈服特性及环道启动过程研究[D]. 青岛:中国石油大学储运与建筑工程学院, 2010.
- LAN Hao. Study on the yield behavior and pipeline restart process of gelled crude oil[D]. Qingdao: College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum, 2010.
- [21] HOUSKA M. Engineering aspects of the rheology of thixotropic liquids[D]. Prague: Czech Technical University of Prague, 1981.
- [22] 张国忠,刘刚. 大庆胶凝原油启动屈服应力研究[J]. 石油大学学报:自然科学版, 2005, 29(6): 91-93.
- ZHANG Guo-zhong, LIU Gang. Investigation on start-up yield stress of Daqing gelled crude oil[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2005, 29(6): 91-93.

(编辑 沈玉英)

(上接第108页)

- [3] MORALES W, HANDSCHUH R F, KRANTZ T L. Feasibility study of vapor-mist phase reaction lubrication using a thioether liquid[J]. Tribology Transactions, 2009, 52: 370-375.
- [4] 王典. 用于直升机传动系统干运转的油雾润滑技术[D]. 南京:南京航空航天大学机电学院, 2011.
- WANG Dian. Oil-mist lubrication technology used for helicopter gear transmission under oil-out operation[D]. Nanjing: College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [5] HANDSCHUH R F, POLLY J, MORALES W. Gear mesh loss-of-lubrication experiments and analytical simulation[R]. NASA/TM-217106, 2011.
- [6] 王延忠,孙振宇,周元子,等. 基于加载接触分析的航空螺旋锥齿轮油雾润滑性能分析[J]. 润滑与密封, 2010, 7: 23-27.
- WANG Yan-zhong, SUN Zhen-yu, ZHOU Yuan-zi, et al. Analysis on vapor/mist lubrication of aerial spiral bevel gears[J]. Lubrication Engineering, 2010, 7: 23-27.
- [7] MATUMURA H, YOSHIMURA H, OKAZAKI T. Oil/air lubrication system; US, 2009/0026016 A1[P]. 2009-01-29.
- [8] HÖHN B R, MICHAELIS K, OTTO H P. Minimised gear lubrication by a minimum oil/air flow[J]. Wear, 2009, 266: 461-467.
- [9] 管文,戴振东,夏延秋,等. 直升机减速器润滑系统应急技术研究[J]. 润滑与密封, 2012, 37(3): 94-97.
- GUAN Wen, DAI Zhen-dong, XIA Yan-qiu, et al. Emergency technology study of helicopter reducer lubrication system[J]. Lubrication Engineering, 2012, 37(3): 94-97.
- [10] 管文,戴振东,于敏,等. 极压抗磨剂对不同航空油的适应性[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2012, 36(5): 119-121.
- GUAN Wen, DAI Zhen-dong, YU Min, et al. Adaptability of extreme pressure and anti-wear additives in different aeronautical oils[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36(5): 119-121.
- [11] 沈铁军,卢春喜,单影,等. 极压抗磨剂对锂基润滑脂抗磨减摩性能的影响[J]. 石油学报:石油加工, 2009, 25: 16-21.
- SHEN Tie-jun, LU Chun-xi, SHAN Ying, et al. The effect of extreme pressure-antiwear additives on the anti-wear and friction-reduction properties of lithium-base grease[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2009, 25: 16-21.
- [12] ZHANG Z, NAJMAN M, KASRAI M, et al. Study of interaction of EP and AW additives with dispersants using XANES[J]. Tribology Letters, 2005, 18(1): 43-51.

(编辑 沈玉英)