

新型无油润滑复合材料*

六二一所 张登高

一、前言

近年来,国外在军工和民用产品上广泛应用了一种商品名称叫“DU”的无油润滑零件。它是目前国外使用性能较好的一种干轴承材料。根据需要,我们研制出了这种材料,配方、工艺基本稳定,几项主要性能指标达到国外同类材料的水平^[1]。

本文着重介绍材料的制造工艺、主要性能及其在航空上的应用。

二、固体润滑与自润滑复合材料

DU材料是固体润滑材料的一种,属于自润滑复合材料类型。所谓固体润滑剂,一般是指为了减少两个滑动或滚动表面间的摩擦和磨损、防止表面损坏所用的任何固体材料,如石墨、二硫化钼、聚四氟乙烯等。固体润滑材料按使用形式大致可分为三种类型。第一类是粉状固体润滑剂。它是将固体润滑粉分散在润滑油、脂或其他液体中,或者单独擦涂到零件表面使用。第二类叫固体膜润滑剂,一般称干膜润滑剂,即由润滑剂与粘接剂按一定比例混合,用喷、涂、浸或其他方法成膜,然后干燥。因为组成、工艺都和油漆类似,而作用是润滑,所以有人叫它“润滑漆”或“润滑涂层”。第三类是自润滑复合材料,或叫“无油润滑复合材料”。它是既起润滑作用又具有复合结构的工程材料。根据组成、比例不同,这种材料一

般又可分成三种,即金属基、石墨基和高聚物基。金属基是以金属作基体或骨架,作为主要成份,再加入其他组份,如高聚物、固体润滑粉或纤维等。同样,石墨基和高聚物基是以石墨或高聚物为主体再加其他组份。例如,本文所介绍的,即为钢基烧结铜粉再灌进聚四氟乙烯和铅的金属基自润滑轴承材料DU;以石墨为骨架加有机或无机粘接剂及金属粉,经压制、烧结做成的石墨衬套;以及在聚四氟乙烯中加少量石墨和青铜粉制成的高聚物基的干轴承材料,这些都属于自润滑复合材料类型。其制造方法,一般是由骨架材料加一种或几种其他润滑材料,经热压烧结、或向烧结的多孔骨架中灌注润滑材料,或者用挤压、模塑等方法成型。

自润滑复合材料除具有一般固体润滑材料的优点如用于高、低温,高真空环境,并有耐腐蚀,抗污染等性能,以及在极压、辐射条件下均能较好的操作外,它还有比较突出的特点:使用寿命长,能承受较高载荷,尤其对于振动和冲击负荷;同时,它可以直接加工成标准零件,便于使用。因此,国外曾认为在固体润滑材料和技术方面,自润滑复合材料不久将会有较大的发展。当然,这类材料也和其它固体润滑材料一样,存在着一定的局限性,如润滑性能一般低于润滑油、脂,摩擦系数有时达0.15左右或更高;制造工艺要求某些特殊装置,如粉末冶金烧结设备、滚压、模塑机械等。另外,自润滑复合材料的使用经验不多,检查标准和仪器尚不完善,这都有待今后在进一步研

* 本工作实验室研制已于1976年完成。参加研究工作的还有杨利东、何镇华等同志。本所有关研究室与车间也曾给予本工作以大力协助,谨致谢意。——作者

究、扩大试验和使用中逐步解决。

三、DU材料的制造

工艺和主要性能

近几年，在引进的英、法航空产品上，可以看到使用了大量的DU自润滑轴承材料。零件形状基本是衬套和垫圈两种类型。图1是斯贝发动机用的一种DU零件断面结构。

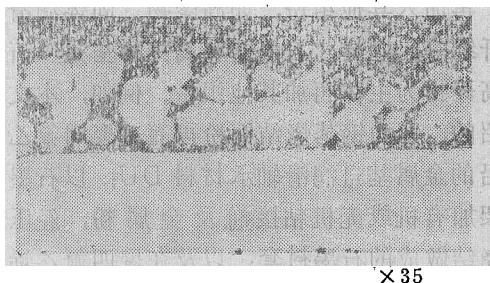


图1 斯贝发动机用的DU零件断面结构

这种材料虽然国外六十年代就用于工业，但在美、英、法等国，近几年仍在推广使用。目前，全世界每年生产的DU零件总量已达一亿五千万件。据报导，美国计划近几年内把这类材料的产量增加4倍。

目前，美、英、法、西德、日本、苏联等许多国家都在制造和使用这种材料。其中以英国的格利西亚(Glacier)金属公司生产较早，规模也大。这家公司除了生产DU，还先后生产其他的复合轴承材料，如DP、DX及DQ等不同商品牌号的系列产品。日本Daido金属公司也

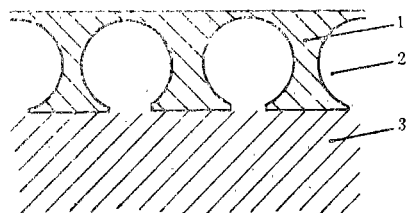


图2 单层金属颗粒结构的轴承材料断面图

- 1—灌入的润滑剂混合物；
- 2—金属颗粒烧结层；
- 3—钢基（一部分）。

大量研究和生产DU。苏联制造的“4ДВ”等产品亦属这种类型。法国专利曾介绍过类似DU但又不同于它的单层结构的干轴承材料，图2是其断面结构示意图^[1]。这种材料在制造工艺和某些性能方面都有一定改进。

DU材料的制造工艺：在镀铜钢板上烧结球形青铜粉，形成双金属多孔层。然后在多孔层中灌进聚四氟乙烯和铅的混合物。经固化、整形处理，表面最后保持均匀、平整、呈灰色的聚四氟乙烯和铅的混合物层。材料的断面结构见图3。钢基主要保证材料有高的强度和高的

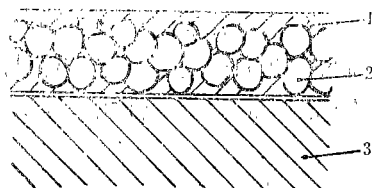


图3 DU材料断面结构示意图

- 1—灌入的聚四氟乙烯和铅的混合物；
- 2—青铜颗粒烧结层；
- 3—钢基（一部分）。

承载能力；青铜颗粒多孔层起导热和容纳聚四氟乙烯-铅的作用；表面层主要为了润滑。材料表面一般不允许进行切削加工，避免破坏润滑层。图4是DU材料板材的制造工艺流程简图。

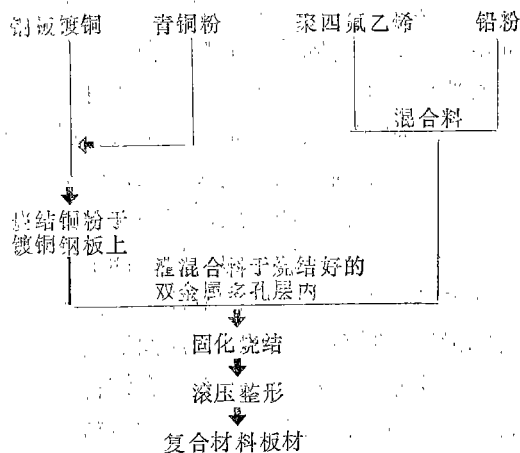


图4 DU板材的制造工艺流程

由制成的板材可直接冲压加工成衬套、垫圈、滑动平面及半球形轴碗等零件。板材在弯曲、冲压或零件成型过程中，各复合层及表面不允许出现剥落和裂纹。图5是常用的几种DU零件。

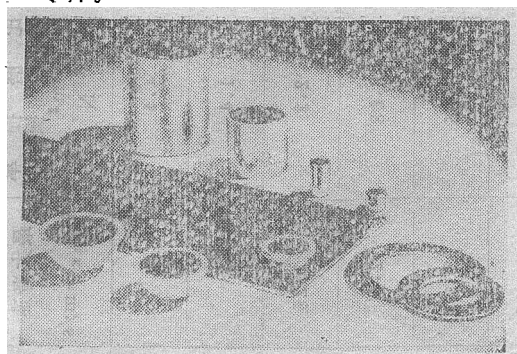


图5 常用的DU零件

由于这种材料是由金属和聚四氟乙烯组成的，所以它既具有高的机械强度，又有较好的自润滑性能，而且磨损寿命长，导热性良好，线膨胀系数小；工作温度一般在 $-200 \sim +250^{\circ}\text{C}$ 范围（短期使用可达 $+280^{\circ}\text{C}$ ）。它可以在尘粒较多的环境中工作而不易粘附脏物；能耐多种溶剂、工业液体及化学物质作用，在水中操作亦不易被腐蚀。由于动、静摩擦系数相近，轴承运转平稳，一般无“粘-滑”现象，适宜于在经常起动和低速运转的场合使用。DU材料的摩擦系数一般与负荷和摩擦速度有关。当高负荷、低速度时，摩擦系数较小；反之，摩擦系数增大，见图6曲线^[3]。图7是材料的寿命同PV值的关系^[4]。由图看出：当PV值为10000时，寿命接近2000小时；而当PV值增加到50000，寿命则不到200小时。如果操作是不连

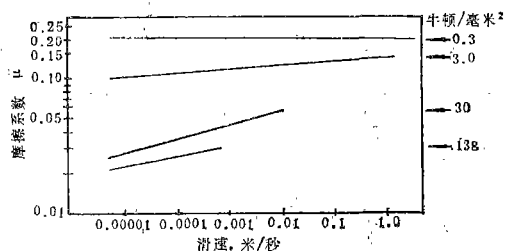


图6 DU材料的摩擦特性

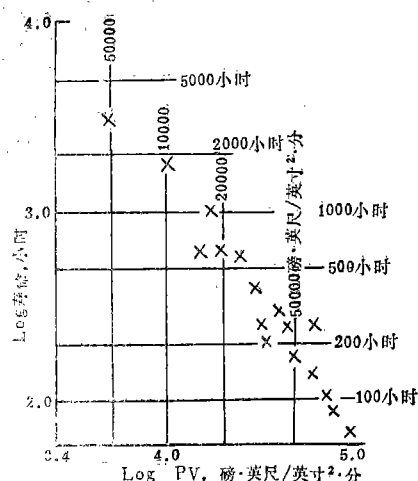


图7 DU材料的PV-寿命关系

续进行的，由于摩擦引起的温升比较缓慢，材料寿命可以相应得到改善。在寿命期内，材料的磨损厚度一般不超过0.05毫米。

表1和2分别是DU材料同其他可用作干轴承材料的磨损情况和一些物理性能的比较。

表1 一些自润滑材料的磨损数据

材 料	磨损0.005英寸厚度所用的时间, 小时
D U	1000
DP (DU中不含铅)	213
聚四氟乙烯+25%石墨	134
石墨-铅青铜	79
含 MoS_2 的酚醛树脂	73
聚四氟乙烯+25%玻璃纤维	48
石墨轴承	24
多孔青铜+25% MoS_2	17
用树脂粘接的石棉和 MoS_2	0.8
尼 龙	0.15

试验条件：PV=16000磅·英尺/英寸²·分

由表1和2数据看出，DU材料的许多性能是比较好的。

对自行研制的同类材料，我们在性能试验方面也做了一些工作。其中100小时磨损试验，是用J02摩擦试验机进行的。室温操作，干摩擦。P=50公斤/厘米²，V=0.53米/秒，试环尺寸 $\phi 28 \times 20$ ，对偶材料为30CrSiMoV中

表 2 一些干轴承材料的有关物理性能

材 料	比 磨 损 率 (轻载荷操作) $K = \frac{m^3}{N} \times 10^{-5}$	最大滑速 $V_{max} = m/s$	最大比 负 荷 $P_{max} = \frac{MN}{m^2}$	最高使用 温 度 °C	热的线膨胀系数 $10^{-6}/^{\circ}C$	导 热 率 $\frac{W}{m^{\circ}C}$	压缩弹性 模 量 $\frac{MN}{m^2}$	吸水引起 尺寸变化 %	动 摩 擦 系 数 [*] μ_d
尼 龙	4.4	1	13	120	99	0.24	1700~2800	0.7~2.0	0.15 (0.2~0.35) 0.4
聚 甲 醛	1.4	1	12	120	95	0.23	3100	0.2	0.15 (0.2~0.3) 0.35
填充 MoS_2 的尼龙	2.3	1-25	12	120	63	0.24	3100~4100	0.6~2.0	0.15 (0.2~0.3) 0.4
聚甲醛+聚四氟 乙烯+填料	0.08	2.5	20	120	100	0.15	1320	0.1	0.10 (0.15~0.25) 0.35
聚酰胺+15% 石墨	0.65	3	50	280	38~59	0.68~1.02	3700	0.15~0.3	0.10 (0.25~0.35) 0.4
聚四氟乙烯+25% 玻璃纤维	0.3	2	5	250	92~126	0.45	—	0.06~0.2	0.15 (0.25~0.30) 0.35
用石墨填充油槽的 铸青铜	0.7	1.25	55	400	17	46	—	无	0.10 (0.2~0.35) 0.4
在金属织物中填 充聚四氟乙烯	0.05	3	150	280	18.5	7.6	3280	无	0.04 (0.10~0.20) 0.25
聚四氟乙烯- MoS_2 灌注金属基的多孔 青铜	0.15	4	138	280	¹² (平行于表面)	40	21000	无	0.04 (0.10~0.25) 0.35
D U	0.03	4	138	280	¹¹ (平行于表面) ³⁰ (垂直于表面)	40	21000	无	0.04 (0.10~0.20) 0.25

* 在正常情况下使用, μ_d 为较低值; 在特殊条件下, 则接近于上限。

碳合金结构钢。试环在试验前预先进行磨合。
试验结果见表 3。

表 3 100小时磨损试验有关数据

磨损时间 小时	磨损厚度 毫米	摩擦系数 μ	轴承温升 $^{\circ}\text{C}$
38.0	0.005	整个试验期 内在0.07~ 0.13范围变 化	整个试验期内 一般稳定在 130~140
65.3	0.006		
77.3	0.007		
86.0	0.010		
95.2	0.016		
100.0	0.018		

材料经100小时磨损试验后,试环表面更为光滑、平整。仅在表面个别地方有青铜颗粒露出。图 8 和 9 是材料经100小时磨损试验后的试环及表面显微结构。图 9 中箭头所指那种“白点”,均为试验后露在表面的青铜颗粒。这是材料在使用过程中出现的正常情况(详见后面摩擦机理部分)。

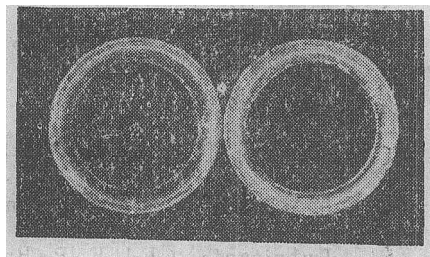


图 8 100小时磨损试验后试环的表面状态

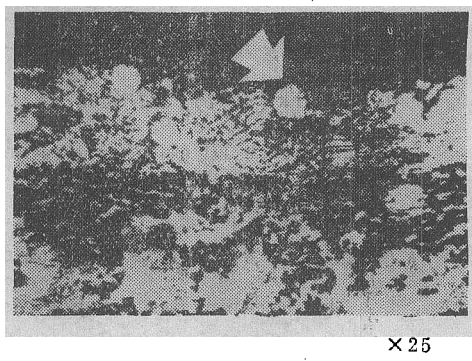


图 9 100小时磨损试验后试环表面的显微结构

100小时试验后,对偶环表面基本完好无损。图10是试验后的对偶环表面状态,

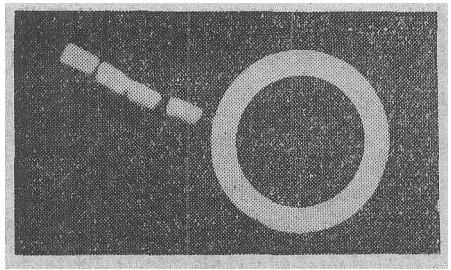


图 10 100小时磨损试验后对偶环的表面状态

四、材料在航空上的应用 和磨损机理简介

由于这种材料具有许多优异性能,目前国外已广泛应用于民用和军事工业^[5,6]。这里简要介绍其在航空及航天工业方面的应用情况。

在飞机和发动机中,英国使用较多。英国政府以DTD.900/4575A批准 DU 材料可用于飞机及航天器方面。在罗·罗公司制造的产品中,大量使用了这种材料。仅一台斯贝涡扇发动机上装的DU 衬套和垫圈就达三百多件,主要用在中介机匣零级可调部位、高压放气活门及低压压气机风扇叶片等机构中。埃及喷气发动机涡轮叶片用DU作轴套,每台发动机装有90个。推力较大的RB211涡扇发动机在反推力装置上也用了DU材料,这个部位不易润滑,用它比较理想。另外,达特、苔茵、康维等许多改型发动机也都装有DU零件。在各种飞机上使用DU材料亦很多。英、法合制的协和号客机,在通风和机舱压力控制系统气阀机构中用DU作轴套,避免了机舱空气的污染,起落架通气系统联动装置使用DU,可以长期操作,减少维修。一些轻型飞机的起落架机构中也用这种材料。在大型客机襟翼驱动系统的驱动轴上,装有大量DU轴套,它在飞机起飞、降落时,承受较高的振动载荷,并能耐灰尘和其他脏物的污染。此外,飞机的燃料调节与控制系统、机舱的可调座位、武器和摄影调节装置,以及机械操纵手柄等机构都普遍用了DU

材料。法国“超黄蜂”直升机的尾桨及抛放机构操纵联动系统等部位也装有很多DU衬套和垫圈。它还用于火箭的发射机构。美国“阿波罗”飞船的登月舱接合探测器也用了DU材料。因为这种材料既能耐较高温度，又可在真空状态下正常运转。一般地，DU材料特别适宜于在周期往复摆动和低速、高负荷旋转或滑动条件下工作。

这种材料的整个磨损过程大体是当开始磨合时，磨损较快，因为首先要铺平材料表面本身，同时，表面层中部分聚四氟乙烯、铅的混合物转移并物理地吸附到对偶表面。这样，就成为聚四氟乙烯、铅与聚四氟乙烯、铅的对磨。因而，这期间的磨损率变得很低，摩擦系数也小。当表面层不断减少后，由于摩擦热使得中间多孔层中储存的聚四氟乙烯和铅，部分地被挤出表面，从而表面层不断得到补充。因此，在不再另外添加润滑剂的情况下，DU材料能持续较长的操作时间，延长磨损寿命。有时，一次装配就可满足一些产品的整个寿命。但是，材料的使用寿命并非无止境的。在操作过程中，表面的聚四氟乙烯和铅不断以极小的薄片脱落掉，而露出的青铜颗粒面积也在逐渐扩大。到了一定程度，磨损率就会显著增加，摩擦情况也开始变坏。这时材料的寿命也就接近终结。这就是DU材料全部磨损过程的大致情况。图11中的磨损-时间曲线，可帮助我们了解整个磨损过程。

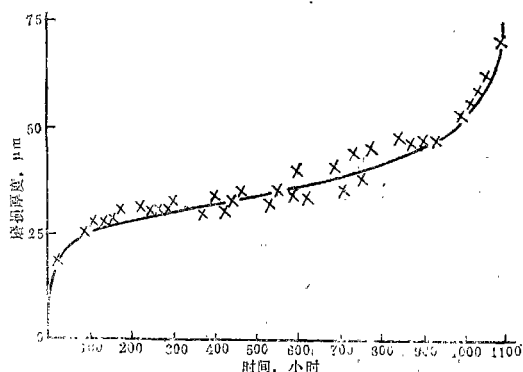


图 11 DU衬套的磨损-时间曲线

五、结 束 语

DU自润滑复合材料，国外已获得比较广泛的应用，但我国目前还未正式批生产，尚处于研制、扩试和试用阶段。随着社会主义四化建设的发展，这种优异的无油润滑轴承材料，将会在我国航空工业和整个国民经济中发挥应有的作用。

主要参考资料

- 〔1〕张登高、杨利东、何镇华，发动机用自润滑轴承衬套及垫圈材料板材实验室研制总结，六二一所内部资料（1976）。
- 〔2〕法国专利，1,428,120。
- 〔3〕Designers' Handbook No2, Glacier 金属公司（1976）。
- 〔4〕Pratt, G. C., "Plastic-based bearings", In Lubrication and Lubricants, (Ed. E. R. Braithwaite) Elsevier Publishing Company, Amsterdam-London-New York (1967), 377—426。
- 〔5〕Glacier DU的用途，Glacier 金属公司（1977）。
- 〔6〕Evans, C. J., "Applications of bronze-plastics composites for dry bearings", Industrial Lubrication and Tribology, Vol. 22, No. 12 (1970), 345—349。