

固体润滑概论(9)

西村 允

(日本航空宇宙技术研究所)

9. 金属基复合材料

9.1 前言

高分子复合材料虽然可以在从超低温到较高温度的宽温度范围内使用, 但是就连耐热性最佳的聚酰亚胺基复合材料, 其使用上限温度也只在300℃左右。尽管环境温度不升高, 但在摩擦条件苛刻的情况下, 传热系数低的高分子复合材料却很容易发生局部升温而达到耐热极限。高分子材料在高温、高速或高载荷等十分苛刻的条件下就很不适用, 同时为了提高材料的耐磨性, 因而又开发了金属基复合材料。

金属基复合材料系以金属为基材, 由于添加了固体润滑剂而具有自润滑性。其中, 固体润滑剂的含量有时也可以远比基材金属的高。图9.1所示是完全用金属基复合材料制造的滑动轴承, 也可以将其加工成薄壁作

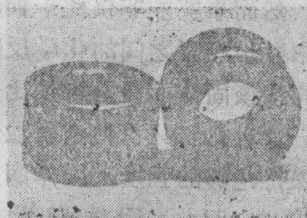


图9.1 用金属基复合材料制造的滑动轴承

为轴衬使用。

9.2 金属基复合材料的制造方法、种类与一般特性

表9.1列出了金属基复合材料的制造方法与产品的组成。尽管使用的金属和固体润滑剂是多种多样的, 然而它们都是粉末体。这就表明, 制造金属基复合材料也是粉末冶金的分支之一。因此, 不仅金属粉末和固体

表9.1 金属基自润滑复合材料的制造方法与典型实例

1. 常温加压成形→烧结	{ WSe ₂ +GaIn MoSe ₂ +PTFE+AgHg
2. 常温加压成形→热压	{ MoS ₂ , WS ₂ +Mo, Ta, W MoS ₂ +WS ₂ +Ta+Cu MoS ₂ +MoO ₃ +Mo, Ta
3. 冷锻→烧结热锻	{ 铁基材料+石墨 铁基材料+Pb, PTFE
4. 烧结体→浸渍固体润滑剂 青铜, Cu, 铁基材料	{ Pb, 尼龙 石墨
5. 铸造, 合金	{ Al+石墨 Fe+Mo+S

润滑剂的纯度和粒度，而且它们的粉碎及混合等前处理工序对产品的润滑特性都有很大的影响。

但是，目前除有一些零星的报道之外，尚无上述因素影响金属基复合材料润滑特性的系统研究工作发表。以添加的石墨为例，尽管其纯度不会明显地影响复合材料的耐磨性，但是不同产地以及天然或人造石墨的特性对烧结材料的孔隙度、耐磨性、摩擦系数的稳定性却均有影响^[1]。假如耐磨性和摩擦系数的稳定性都与烧结材料的孔隙度有本质的联系，那么最好就应当选择密度最高的粉末颗粒。然而事实并非仅此一面，还必须考虑到粉末颗粒相互之间的化学反应。

下面再谈谈固体润滑剂含量比金属多的复合材料。这种材料只有使金属粒子的三维骨架组织保持足够的强度，固体润滑剂本身才能承受载荷。因此，固体润滑剂或是分解，或是使金属粉末发生反应，其结果是以生成物作为增强材料使用。这不仅是金属粉末和固体润滑剂的组合，而且应当恰当地控制它们的粒度分布、粉碎混合的方法和烧结条件等。

由此可见，这方面仍处于经验阶段，尚待研究解决的问题还很多。

下面就以热压法为例看看金属基复合材料的制造方法。图9.2是作者等利用这种方法制造金属基复合材料的工艺过程。首先，将金属粉末和固体润滑剂过筛，以使两者的粒度一致。在需要的情况下，还应当预先对固体润滑剂进行热处理，以使其表面污染物蒸发掉。然后，把粉末置于球磨机或振动式球磨机中，并与丙酮、氟利昂等溶剂混合、粉碎。接着，在经过常温加压预成形之后再行热压。这种工艺流程中的前处理工序与其他制造方法中的相同。

这样制造的金属基复合材料是一种烧结材料，因而同样具有一般烧结材料的优缺点。诸如抗压强度高而抗拉强度或抗弯强度

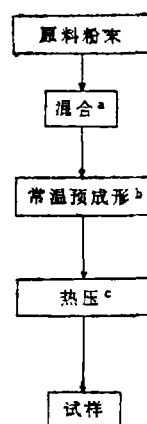


图9.2 利用热压法制造金属基复合材料的工艺过程^[1]

- a—混合法：球磨机（SUS304），气氛：氩气；混合时间：1 h
 b—模具：钢制；压制压力： $4 \times 10^8 \text{ Pa}$
 c—模具：石墨制；加热方法：直接通电加热；气氛：氩气或真空；温度： $1000 \sim 1650^\circ \text{C}$ ；压力： $25 \times 10^8 \text{ Pa}$ ；持续时间：1 min；升温时间：10~15 min

低就是一例。表9.2列出了几种商品金属基复合材料的物理性质。可以看出，Molalloy PM-103这种复合材料的抗压强度就高达 $7.3 \times 10^8 \text{ Pa}$ ，但其抗弯强度和抗拉强度却分别只有 $1 \times 10^8 \text{ Pa}$ 和 $7 \times 10^7 \text{ Pa}$ ，后者尚不及抗压强度的1/10。所以，在使用金属基复合材料的场合下，必须注意设计，使其处于压缩应力状态下工作。

金属基复合材料的另一个缺点是其韧性较差。利用上述复合材料作为轴衬制造的衬套型产品，尽管其在静载下具有 $7 \times 10^8 \text{ Pa}$ 的承载能力，但是它在动载下的耐载荷能力却低于 $1.75 \times 10^8 \text{ Pa}$ 。就碳-石墨系轴承来说，其容许动载荷一般应当控制在静载荷上限值的10%以下。

金属基复合材料的振动吸收能力不如高分子复合材料的好，在轴承设计中应当考虑其韧性差这一缺点。如图9.1所示，实际采用的都是具有一定圆角半径的复合材料滑动轴承。

尽管金属基复合材料具有上述缺点，但

表9.2

商品金属基复合材料的物理性质

(摘自Tribon Bearing公司、Pure Carbon公司和东芝タンガロイ公司的产品目录)

材料代号	密度 (g/cm ³)	抗压强度 (Pa, ×10 ⁷)	抗弯强度 (Pa, ×10 ⁷)	抗拉强度 (Pa, ×10 ⁷)	弹性模量 (Pa, ×10 ⁹)	热膨胀系数 (×10 ⁻⁶ /°C)	用途	主要成分
Molalloy* T-0434	5.6	17.5	6	/	5600	/	保持器	MoS ₂ , Mo, Ta等
T-0051	6.2	70	18	/	12000	9.5	高载荷	
Molalloy**PM-103	5.9	73	10	7	14000	8.8	高载荷	
东芝タン ガロイ { SL-10	8.2	50	20	/	8900	10.5	高载荷	MoS ₂ , WS ₂ , Cu, Ta等
{ SL-20	7.2	27	10	/	10200	10.1	高载荷	
{ SL-30	5.6	15	7	/	3000	11.8	缓和条件	

*Tribon Bearing公司;

**Pure Carbon公司。

当其在对偶材料表面形成了稳定的转移膜之后,它就显示出优良的耐磨性。有关情况将在以后叙述。

由表9.2可见,金属基复合材料的热膨胀系数是 $8.8 \times 10^{-6} \sim 11.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,这与钢铁材料的 $9.5 \times 10^{-6} \sim 11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 基本相当。金属基复合材料中固体润滑剂的含量越多,其传热系数就越比基材的低。尽管如此,但因它们的传热系数是 $0.03 \sim 0.1 \text{ cal/s} \cdot \text{cm} \cdot ^{\circ}\text{C}$,所以仍比高分子复合材料的至少高2个数量级。

剂,以及TiO₂、NiO等金属氧化物为原料的复合材料,并且做了大量的筛选试验。此外,还研究了由Ta、Nb、W、Mo等耐热金属和MoS₂、WS₂等固体润滑剂组成的复合材料[8]。这些复合材料的物理性质见表9.2所列。其中,由美国空军命名为AFSL-15 (MoS₂80%+Ta20%)的复合材料之磨损特性示于图9.3[4]。可以看出,在室温于很宽的单位面积压力和速度范围内,这种复合材料的比磨损量可保持在约 $10^{-16} \text{ m}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 这一低值。摩擦系数为0.1~0.2。

9.3 润滑特性

通常使用的金属基自润滑复合材料大都是以表9.1所列第1、2两种方法制造的。这些都是在常温加压成形之后,通过烧结或热压制造金属基复合材料的方法。自1960年前后开始的20年间,美国就对它们开展了广泛的研究。目前,有两类金属基复合材料很引人注目,其一是Boeing公司Van Wyk开发的以耐热金属为基材的系列产品,其二是Westing House公司Boes开发的液态金属合金系列产品。

9.3.1 耐热金属基复合材料

1960年代初开始,Boeing公司的Van Wyk利用热压法制造了以Ni、Fe、Zr、Pt、Cu等金属和MoS₂、WS₂等固体润滑

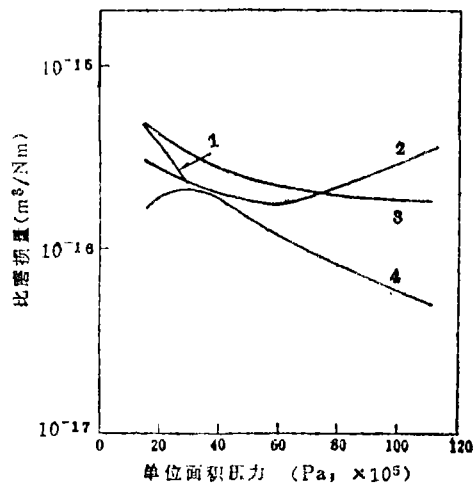


图9.3 Ta-MoS₂复合材料的比磨损量与单位面积压力及摩擦速度的关系[4]

复合材料: Ta20%+MoS₂80%; 气氛: 空气;
摩擦速度: 1—2.93m/s; 2—1.46m/s;
3—0.46m/s; 4—0.73m/s

这种复合材料已经商品化,其商品名为 Molalloy, 并且广泛应用于原子能工业、真空工业和宇航工业等领域。例如,波音 747 运输机的喷气发动机推力换向器采用的就是这种复合材料。当飞机着陆时,推力换向器就使喷射气流逆向喷射而将开动制动器的装置暴露在高温下,所以滑动部件的润滑很困难。大型运输机喷气发动机推力换向器的滑动构件示于图 9.4。可以看出,埋置在侧面的球形物就是 Molalloy PM-103 (其物理性质见表 9.2)。在静载荷为 $7 \times 10^7 \text{ Pa}$ 、动载荷为 $3.5 \times 10^7 \text{ Pa}$ 、滑动速度为 0.3 m/s 、温度为 150°C 的工况下,这种滑动构件的耐久性为 3~5 年。在这样的使用条件下, PV 值竟高达 $1.05 \times 10^7 \text{ Pa} \cdot \text{m/s}$ 。这相当于本刊前期所述聚四氟乙烯 (PTFE) 基复合材料的 15 倍。

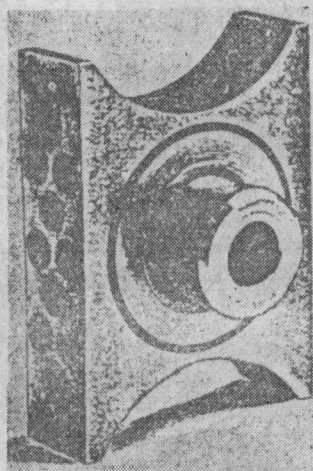


图 9.4 大型喷气式飞机推力换向器的滑动构件
(使用的复合材料为 Molalloy PM-103)

这种复合材料应用于真空滚动轴承保持器是引人注目的。因为金属基复合材料的韧性差,所以不能完全用其制造保持器。假定保持器是金属制品,就可以在油兜孔中镶嵌这种复合材料环。图 9.5 所示就是镶嵌了这种复合材料环的钛合金保持器。复合材料环配有凸缘,并以凸缘作为内侧镶嵌在保持器

油兜孔中成为(保持器的)内径。凸缘部分就成为内套圈的导向面。保持器与环材料的固定由限位过盈量或者用过盈配合。



图 9.5 镶嵌了金属基复合材料环的钛合金保持器的外观图〔5〕
1—不平衡修补; 2—6Al4V Ti 合金;
3—复合材料 ($\text{MoS}_2 80\% + \text{Ta} 20\%$)

滚动轴承系由复合材料转移到滚动体上形成固体润滑膜润滑。因此,为了延长轴承的使用寿命,不仅需要生成稳定的转移膜,而且要求固体润滑剂的消耗量很少。但是,如果固体润滑剂的转移量太少,那就会导致润滑不良;相反,若是其转移过多,则又会造成振动和噪声,结果都要使轴承的寿命缩短。尽管原因相当复杂,然而保持器材料的选择及其设计却都是至关重要的。

McConnell 等曾给 204* 轴承组装了如图 9.5 所示的保持器,并在超高真空中于 1790 r/min 的条件下进行了 6 万小时的连续运转试验〔5〕。图 9.6 所示就是保持器磨损量与运转时间的关系曲线。试验用保持器系由 $\text{Ta} 20\% + \text{MoS}_2 80\%$ 复合材料制造而成,这是一种所含固体润滑剂占绝对多量的复合材料。由图 9.6 可见,保持器呈现出稳定磨损和剧烈磨损交替进行的特征。这可能与金属基复合材料的韧性差有关。但是,当试验进行到 25000 小时以后,保持器的磨损就非常缓

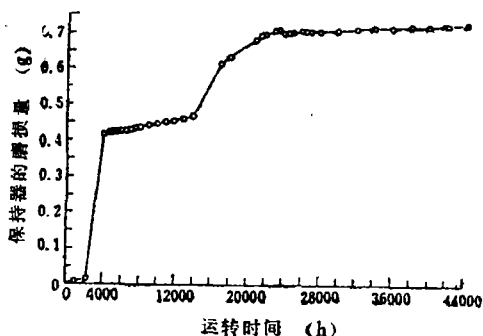


图9.6 金属基复合材料(MoS_2 80% + Ta 20%)保持器的磨损量与运转时间的关系〔5〕

超高真空中, 载荷33.1N, 转速1790r/min

慢。图9.6虽然没有示出44000小时以后的试验结果, 但是这种滚动轴承实际上已经创造了连续运转10万小时以上的惊人记录, 其总转数竟高达 1.1×10^{10} 次。

在Van Wyk的金属基复合材料问世之后, 日本在这方面的开发研究工作也很快盛行起来。津谷等研制了以Ta和Cu为基材、以 MoS_2 和 WS_2 为润滑剂的复合材料〔6〕。图9.7就是这种复合材料在真空中的摩擦系数与温度的关系曲线。可以看出, 在从室温到900℃的温度范围内, 其摩擦系数保持在0.1~0.2之间。

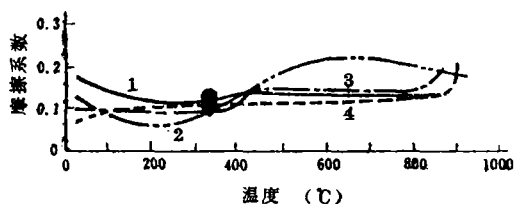


图9.7 $\text{Cu-Ta-MoS}_2\text{-WS}_2$ 复合材料在真空中的摩擦系数与温度的关系〔6〕

复合材料中固体润滑剂的含量:

1—20%; 2—40%; 3—60%; 4—70%

下面谈谈金属基复合材料的磨损问题。

图9.8示出了复合材料的磨损速率(注意不是比磨损量)与单位面积压力的关系。可以看出, 复合材料的磨损速率随单位面积

压力的升高而降低, 並以200℃下单位面积压力为100MPa时的磨损速率最小。磨损最小的单位面积压力的存在, 这从图9.3也能看得出来。除了以上所述之外, 尚未见到津谷等对复合材料的磨损与温度的关系之类更多的评价资料发表。

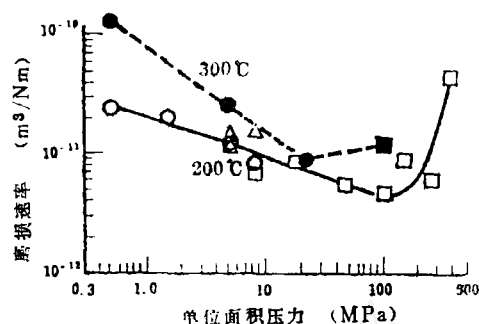


图9.8 $\text{Cu-Ta-MoS}_2\text{-WS}_2$ 复合材料(40%金属, 60%固体润滑剂)的磨损速率与单位面积压力的关系〔6〕

作者等也曾经对以真空用滚动轴承为应用目标的金属基复合材料进行过研究〔7〕。我们认为, 只有在金属与固体润滑剂发生反应以后, 复合材料才会具有实用的机械强度。为了控制模具损耗, 把反应温度大幅度地降低到1200℃以下, 並在与Van Wyk同系列的金属和固体润滑剂中添加金属氧化物进行热压。这样制造的复合材料的耐磨性与Van Wyk的金属基复合材料的相当, 其热压温度为1200℃。这种复合材料的特征是在对偶材料上形成稳定的转移膜。图9.9示出了组成为 MoS_2 80% + MoO_3 20%的复合材料在氮气中摩擦时磨损量随摩擦距离的变化。可以看出, 在50~200km的摩擦距离范围内, 其磨损量没有明显的变化。这是因为复合材料已经在对偶材料的表面形成了稳定的转移膜, 所以磨损几乎不再增加, 这与图9.6所示金属基复合材料保持器运转到25000小时以后的磨损状态十分相似。这种金属系列复合材料在摩擦距离为200km时的比磨损量是 $3 \times 10^{-18} \text{ m}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 。

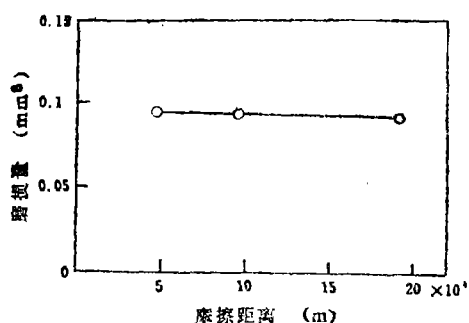


图9.9 金属系列复合材料的磨损量
随摩擦距离的变化〔7〕

复合材料: MoS_2 80% + MoO_3 20%;
热压温度: 1200℃; 气氛: 氮气;
摩擦速度: 0.55m/s; 载荷: $1 \times 10^6 \text{Pa}$;
对偶材料: 440C

以上对热压法制造的金属基复合材料进行了叙述。由于这种制造方法的生产能力低, 所以材料的价格昂贵。例如, 1个使用图9.5所示保持器的滚动轴承的售价就高达1000美元。因此, 在目前状况下, 这种复合材料的应用还难以普遍推广。但是, 只要采用生产能力高的热等静压法(Hot Isostatic Pressing), 材料的价格就会降低。

9.3.2 液态金属合金复合材料

利用热压法制造的复合材料不仅成本高, 而且因其所含 MoS_2 和 WS_2 之类固体润滑剂都很容易受环境湿度的影响, 所以在空气中使用时的抗湿性也差。Westing House公司的Boes研制的液态金属基复合材料同时克服了这两个缺点。这是一种以镓(Ga)和铟(In)的合金或银汞齐为基材, 添加硒化物作为固体润滑剂的特种材料, 目前已经投入使用的主要有表9.1所列1中之两种。其中, $\text{WSe}_2 + \text{GaIn}$ 就连在空气中直至高温下的稳定性也非常好。这种复合材料和其他几种固体润滑材料在空气中于不同温度下放置1小时之后的失重量示于图9.10〔8〕。可以看出, 在550℃以上的高温下, 就连超高纯度石墨的失重量也迅速增加。但

是, $\text{WSe}_2 + \text{GaIn}$ 的情形却与此不同, 即使升温到750℃时, 其失重量也依然很少。这就说明, $\text{WSe}_2 + \text{GaIn}$ 可用于直至750℃的高温场合。但是, 也有报道〔9〕认为, 这种复合材料在450℃下的物理化学性质就不太稳定。另一种复合材料是 $\text{AgHg} + \text{PTFE} + \text{MoSe}_2^*$, 其使用上限温度因取决于PTFE故为315℃。

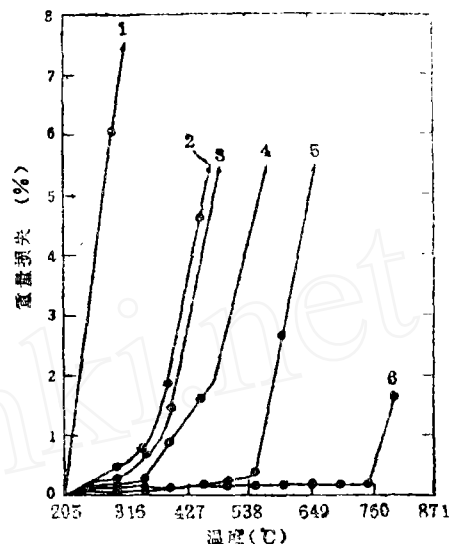


图9.10 几种固体润滑材料在不同温度下放置1小时的重量损失随温度上升的变化〔7〕

1— WSe_2 ; 2—碳-石墨密封材料; 3— MoS_2 ;
4—高温用碳-石墨; 5—超高纯度石墨;
6— WSe_2 90% + GaIn 10%

为了提高这种复合材料的产量, 可以在常温加压成形之后, 再于电炉中进行热处理。

这种复合材料在空气中于室温和510℃下的摩擦系数分别是0.11~0.18和0.17~0.28, 至于磨损数据却未见原作者发表。但据文献〔10〕记载, 商品 GaIn-WSe_2 复合材料的磨损率为 $1 \times 10^{-6} \text{g/N} \cdot \text{m}$ 。这大约是Ta- MoS_2 系复合材料的10倍。

本文之所以要对这种磨损率相当高的复合材料也作介绍, 是因为美国正就其用作为

(下转第180页)

*原文为 MoSg , 但根据前后文分析认为此处应当是 MoSe_2 ——译者注。

平滑,没有明显的粘着剥落现象,划痕也明显地比未渗硫试件磨损后〔图6(b)〕的少而浅。由渗硫45*钢磨损与未磨损表面形貌(图7)的对比可见,摩擦能使原来较为光滑的平面变得更加光滑。这就使真实接触面积增大,在同样的载荷条件下,降低了真实接触应力,提高了抗磨性。

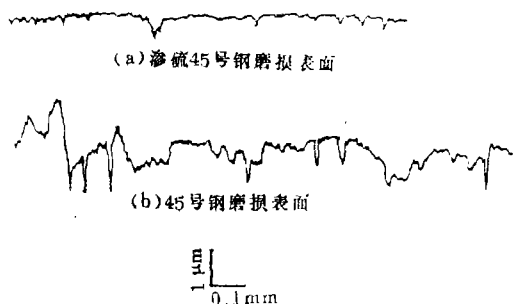


图6 不同材料的磨损表面形貌

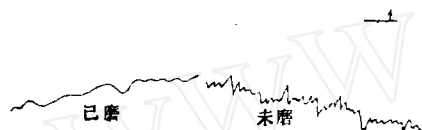


图7 渗硫45*钢已磨损的及未磨损的表面形貌

此外,我们还对不同磨损阶段的试件表面进行了SEM(扫描电子显微镜)分析,同样未见试件表面有明显的粘着剥落现象。

三、结 论

通过对渗硫45*钢进行的磨损试验、形貌测量和SEM分析,我们认为:

1. 渗硫使45*钢表层获得了新的物理机械特性,尤其是优良的抗粘着磨损性,因而摩擦表面很少发生粘着剥落。

2. 45*钢渗硫后,表面趋于光滑,摩擦接触时的实际承载面积增大,降低了真实接触应力,从而减小了磨损。

3. 在相同的试验条件下,渗硫45*钢的耐磨性比轴承合金的高约2~4倍,并且更适用于重载场合。

参 考 文 献

- 〔1〕洪班德等,《化学热处理》,黑龙江人民出版社,1981年,404页。
- 〔2〕B.B.科斯特金,П.А.高列兹柯,《摩擦表面的渗硫处理》,吴振寰译,科学技术出版社,1957年,10~16页、40~50页。
- 〔3〕刘向锋,“提高胶印机轴承寿命的实验研究与理论分析”,清华大学精密仪器系硕士学位论文,1985年。

(上接第188页)

巡航导弹喷气发动机主轴承材料〔11〕和空气中高温滑动构件材料〔12〕进行着实用化的试验研究。这或许是美国人断定其磨损特性要比文献报道的好。

9.3.3 其他金属基复合材料

中川等开发的石墨复合材料是一种用锻造法制造的金属基复合材料〔13〕。它系以铸铁的机械加工切屑为原料,并在其中添加石墨,再经锻造、烧结制造而成。试验结果表明,当石墨的添加量为5%时,这种复合材料的机械强度、比磨损量和摩擦系数等综合性

能最佳。例如,在滑动速度低于0.7m/s时的比磨损量约是 $1 \times 10^{-16} \text{ m}^3/\text{N} \cdot \text{m}$,在0.7~4m/s的滑动速度下,其比磨损量是 $1 \times 10^{-16} \text{ m}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 。

这种复合材料的缺点是摩擦系数高于0.3,然而以废品为原料使其成本低廉却是很引人注目的一大优点。这种复合材料正在投入工业化生产。

参考文献(略)

(王安钧译自日刊《机械の研究》
37(1985), 9, 1089~1093)