

一些难熔金属复合材料的机械和摩擦学特性

张绪寿 阮虎生 牛淑琴 欧阳锦林

(中国科学院兰州化学物理研究所)

摘 要

本文介绍了对难熔金属和 MoS_2 的复合材料的研究结果。着重考察了制备工艺参数、滑动速度、负荷和环境温度等对这类复合材料的机械强度、摩擦系数和磨损率的影响。

前 言

五十年代初期,人们就把固体润滑剂粉末和金属粉末混合,用通常的粉末冶金方法制成了低摩擦的金属基复合材料。到了六十年代,由于空间技术的迅速发展,促进了人们对低摩擦复合材料的更加广泛的研究和发展^[1, 2]。虽然金属基复合材料已在许多方面获得了应用,但是,制得具有高机械强度、低摩擦和低磨损的金属基复合材料是极为困难的^[2]。六十年代末期,人们发现把固体润滑剂粉末,主要是 MoS_2 ,和W、Mo、Nb、Ta等难熔金属的一种或它们的混合物混合后,可以制得具有较好性能的复合材料^[3]。试验表明,这类材料是很好的承载构件,例如作为滑动轴套,或作为转移膜润滑的构件,例如作为滚动轴承的保持架材料^[3, 4, 5]。我们曾报道过Mo-Mo S_2 、W-Mo S_2 等体系材料^[6, 7]及用Ta20%—Mo S_2 80%材料作成滚动轴承保持架的有关试验研究^[8]。这类材料通常被称为固体润滑剂复合材料或固体润滑剂压制品,我们把它称为含难熔金属的自润滑复合材料。

本文主要介绍这类复合材料的制备工艺参数,工作负荷、速度和环境温度等对其机械强度,摩擦和磨损性能影响的考察结果。

摩擦、磨损性能测试所用的仪器及其试验条件

室温下的摩擦和磨损试验是分别在Timken型环-块摩擦磨损试验机(MHK500)和Skoda型盘-块磨损试验机上进行的。高温下的摩擦磨损试验是在栓-盘式高温摩擦磨损试验机上进行的。所有情况下,磨损率都是以每单位滑动距离材料的体积损失表示的。

除注明外,所有图表的标准试验条件是:

1. 环-块试验机上的摩擦试验条件：试环是用GCr15钢（C 1%，Mn0.3%，Si0.25%，Cr1.48%，Rc58-62）制作的，试块是试验材料，负荷35公斤，滑动速度1.5米/秒，运转40分钟。由于圆柱形的接触构形，所以初始的接触应力是高的。

2. Skoda试验机上的磨损试验条件：轮盘是用钨合金工具钢制成的；块是试验材料；负荷8公斤；线速度1.9米/秒，试验持续时间是轮盘转数一万转。接触面积随着表面的磨损是变化的。

3. 栓-盘式高温摩擦磨损试验机上的试验条件：栓（直径5毫米，平面接触）是试验材料；盘（直径42毫米，厚8毫米）是用高温合金钢（GH169，Rc40-44，Cr19%，Ni53%，Mo3%，（Nb+Ta）3%，C 0.05%）制成的，接触应力50公斤/厘米²，滑动速度1米/秒。在给定温度下运转1小时。称重法测定磨损。

热压工艺参数对复合材料性能的影响

含难熔金属的复合材料的制备方法是：把按一定重量比混合均匀的MoS₂和难熔金属粉末的混合物，放入石墨模具中在350公斤/厘米²的压力下热压制成的。热压温度在1300~1750℃之间，它是通过电磁感应加热迅速地达到的。显然，热压的温度和时间，难熔金属的类型和配比及压力对制得的复合材料的性能都有一定的影响，但是，先前的工作^[9]表明，组分和热压温度是影响复合材料性能的最主要的因素，因此，我们只着重考察了这两个参数的影响。

表1和表2中分别列出了在给定的组分下，材料的机械强度及摩擦和磨损性能随热压温度的变化。表1表明，在1500℃以下时，材料的硬度随着热压温度的升高而增大，在1500℃以上时所有材料硬度的变化不明显。例外的情况是：含Nb30%的材料其硬度最高且不随热压温度而变化，在1750℃时含Mo20%材料的硬度也明显降低。从表1还可以看出，在一定的温度范围以内时，所有材料的抗弯强度都随热压温度的升高而增加。但是，在1550℃以上时，含W40%和Mo20%材料的抗弯强度，尤其含Mo20%的材料，其降低更明显。

表1 热压温度对复合材料机械强度的影响

项目 组分 热压 温度 ℃	布氏硬度 公斤/毫米 ²				抗弯强度 公斤/厘米 ²			
	W40% MoS ₂ 60%	Mo20% MoS ₂ 80%	Nb30% MoS ₂ 70%	Ta20% MoS ₂ 80%	W40% MoS ₂ 60%	Mo20% MoS ₂ 80%	Nb30% MoS ₂ 70%	Ta20% MoS ₂ 80%
1300	—	153	—	—	—	241	—	—
1350	—	—	300~400	77	—	—	570	438
1400	143	—	300~400	—	—	—	620	—
1450	143	—	300~400	120	484	—	777	520
1500	—	231	300~400	—	—	707	758	—
1550	184	—	300~400	140	592	—	798	530
1580	—	268	—	—	—	763	—	—
1600	180	—	300~400	—	558	—	1052	—
1650	174	246	—	—	533	194	—	—
1750	—	104	—	—	—	124	—	—

表2表明，在1450℃到1650℃的温度范围内，热压温度对材料的摩擦系数没有明显的影

表2 热压温度对复合材料摩擦系数、磨损率的影响(20℃)

热压温度 ℃	项目 组分	摩擦系数				磨损率 $\times 10^{-5}$ 毫米 ³ /米			
		W40% MoS ₂ 60%	Mo20% MoS ₂ 80%	Nb30% MoS ₂ 70%	Ta20% MoS ₂ 80%	W40% MoS ₂ 60%	Mo20% MoS ₂ 80%	Nb30% MoS ₂ 70%	Ta20% MoS ₂ 80%
1350	—	—	—	0.09	0.08	—	—	1.46	2.60
1400	0.07	—	0.09	—	—	2.57	—	1.26	—
1450	0.07	—	0.08	0.07	—	2.40	—	1.18	1.80
1500	—	0.07	0.10	—	—	—	1.99	1.24	—
1550	0.07	—	0.10	0.07	—	1.92	—	1.20	1.80
1580	—	0.08	—	—	—	—	1.60	—	—
1600	0.07	—	0.10	—	—	1.83	—	1.07	—
1650	0.07	0.08	—	—	—	2.29	1.62	—	—
1750	—	0.12	—	—	—	—	2.33	—	—

响,但热压温度对材料的磨损率有一定的影响。在1400—1600℃的热压温度范围内,随着热压温度升高,材料的磨损率逐渐降低。在1600℃以后,含Mo、W材料的磨损率有增大的趋势。

表3和表4分别示出了在固定的热压温度下(Mo—MoS₂体系热压温度为1580℃、W—MoS₂体系和Nb—MoS₂体系均为1550℃),不同体系中金属含量对材料强度和摩擦、磨损性能的影响。表3表明,当金属含量(Wt%)增加时材料在20℃下的硬度没有明显的

表3 金属含量对复合材料机械强度的影响(20℃)

金属含量, %	体系 项目	W—MoS ₂		Mo—MoS ₂		Nb—MoS ₂	
		布氏硬度 公斤/毫米 ²	抗弯强度 公斤/厘米 ²	布氏硬度 公斤/毫米 ²	抗弯强度 公斤/厘米 ²	布氏硬度 公斤/毫米 ²	抗弯强度 公斤/厘米 ²
10		—	—	—	444	—	252
20		140	496	268	763	200~300	561
30		—	—	295	775	300~400	796
40		184	592	281	1191	300~400	1212
60		159	537	—	—	—	—
80		152	684	—	—	—	—

表4 金属含量对复合材料摩擦系数、磨损率的影响(20℃)

金属含量, %	体系 项 目	W—MoS ₂		Mo—MoS ₂		Nb—MoS ₂	
		摩擦系数	磨 损 率 × 10 ⁻⁵ 毫米 ³ /米	摩擦系数	磨 损 率 × 10 ⁻⁵ 毫米 ³ /米	摩擦系数	磨 损 率 × 10 ⁻⁵ 毫米 ³ /米
10		—	—	0.09	1.80	0.11	2.14
20		0.07	3.49	0.08	1.60	0.08	1.35
30		—	—	0.06	1.70	0.10	1.20
40		0.07	1.92	0.08	2.10	0.08	1.22
60		0.06	2.40	—	—	—	—
80		0.07	3.25	—	—	—	—

变化,但其抗弯强度有明显的增大。从表4可以看出,金属含量通常对材料的摩擦系数没有明显的影响,但对材料的磨损率有明显的影响。在给定的试验条件下,各种体系的材料都有

一个能得到最小磨损率的最佳金属含量范围。对W-MoS₂体系, Mo-MoS₂和Nb-MoS₂体系的材料而言,最佳的金属含量分别是W40%, Mo20%, Nb30%左右。

速度、负荷、温度对这类复合材料摩擦、磨损性能的影响

我们考察了速度对四种典型的复合材料的摩擦系数和磨损率的影响。它们中的三种材料是根据上述试验结果(见表4)选择的,我们选定了在试验条件下具有最低磨损率的Mo(20%)、MoS₂(80%)、Nb(30%)、MoS₂(70%)和W(40%)、MoS₂(60%)作为试验材料。对Ta-MoS₂体系材料而言,我们根据另外的试验^[5, 9]选定了具有最好转移润滑能力的Ta(20%) - MoS₂(80%)的材料作为试验材料。图1、2分别示出了速度对材料摩擦系数和磨损率的影响。图1表明,除了Nb30% MoS₂70%材料之外,其余三种材料的摩擦系数都随滑动速度的升高而降低,继而达到一个近似稳定的值。图2表明,除了W40% MoS₂60%材料的磨损率在速度>1.9米/秒后明显上升外,其余三种材料的磨损率都随着速度的升高而降低。

图3和图4分别示出了负荷对三种W-MoS₂复合材料的摩擦系数和磨损率的影响。为了表明负荷对不同W含量材料的影响,我们示出了三种不同W含量材料的摩擦系数和磨损率随负荷的变化。这三种材料都进行过热处理,以使它们性能稳定。图3表明,随着负荷升高,三种材料的摩擦系数都降低。图4表明,在给定的滑动速度(1.9米/秒)下,随着负荷增大,材料的磨损率都逐渐增大。不过,三条曲线的斜率明显不同。排列这些斜率时我们发现,在低于和高于约10公斤的负荷时它们有完全不同的排列顺序。在大于12公斤负荷下,W含量越高,磨损率越低,这和Van Wyk^[3]关于这类材料的研究结果是一致的。

温度对W40% MoS₂60%, Ta20% MoS₂80%和Mo20% MoS₂80%材料的摩擦系数和磨损率的影响是在栓-盘式高温摩擦磨损试验机上进行的。试验结果列于表5。由表5可看出,

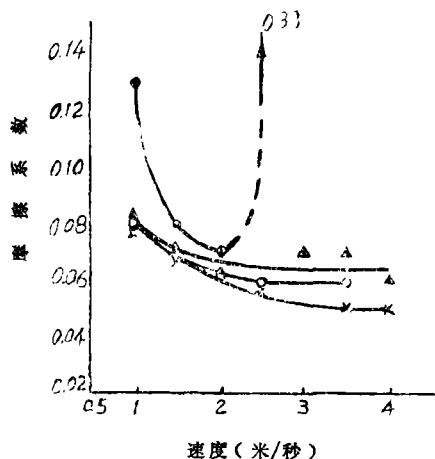


图1 速度对摩擦系数的影响

- ▲ W40% MoS₂60% (热压温度1450℃)
- Mo20% MoS₂80% (热压温度1580℃)
- × Ta20% MoS₂80% (热压温度1450℃)
- Nb30% MoS₂70% (热压温度1450℃)

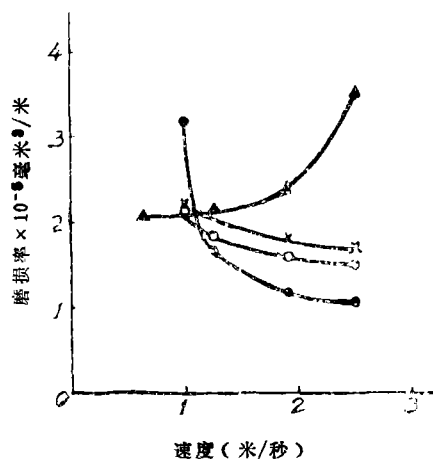


图2 速度对磨损率的影响

符号 ▲、○、×、●意义同图1

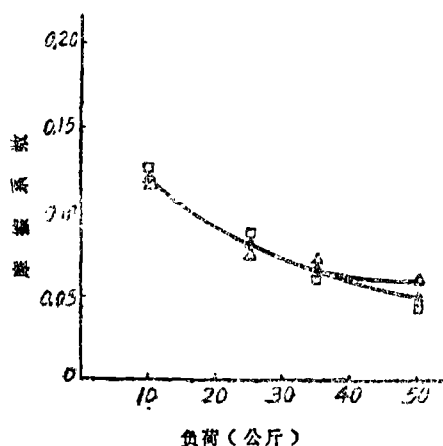


图3 负荷对摩擦系数的影响

- △ W20% MoS₂80% (热压温度1650℃)
 ▲ W40% MoS₂60% (热压温度1450℃)
 □ W80% MoS₂20% (热压温度1450℃)

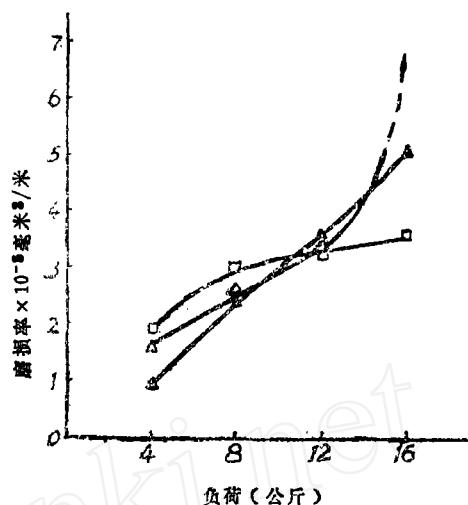


图4 负荷对磨损率的影响

符号△、▲、□意义同图3

在20~300℃范围内,当温度升高时,摩擦系数开始有所下降,继而几乎不变。而在300~400℃范围内,所有三种材料的摩擦系数都明显地上升。这种现象与以MoS₂粉末润滑试验时的现象是相似的〔2〕。表5还表明,W40%-MoS₂60%复合材料的磨损率在300℃才急剧增大,而Mo20%-MoS₂80%及Ta20%-MoS₂80%材料的磨损率在200℃时就开始急剧增大。

表5 温度对复合材料摩擦系数、磨损率的影响

项目 组分 温度,℃	摩 擦 系 数			磨 损 率 毫米³/米		
	W40% MoS ₂ 60%	Ta20% MoS ₂ 80%	Mo20% MoS ₂ 80%	W40% MoS ₂ 60%	Ta20% MoS ₂ 80%	Mo20% MoS ₂ 80%
室温	0.09	0.07	0.08	5.8×10^{-5}	5.4×10^{-5}	5.7×10^{-5}
100	0.07	0.05	0.07	5.0×10^{-5}	5.4×10^{-5}	4.8×10^{-5}
200	0.07	0.06	0.07	6.4×10^{-5}	1.5×10^{-4}	3.2×10^{-4}
300	0.09	0.07	0.11	1.6×10^{-4}	7.6×10^{-4}	1.2×10^{-3}
400	0.11	0.10	0.11	1.1×10^{-3}	1.1×10^{-3}	2.8×10^{-3}

讨 论

从表1和表2可以看出,在1300~1750℃的热压温度范围内,热压温度对Mo20%-MoS₂80%材料的机械强度及摩擦磨损性能的影响是十分显著的。因此,我们探讨一下这种材料性能变化与材料本身的密度和晶粒大小之间的关系。图5示出了在不同热压温度下制备的Mo20%-MoS₂80%材料的SEM晶粒结构的图象。表6列出了它们的密度。参照表1和表2我们可以看出:这些材料的摩擦和磨损性能与它们的晶粒大小密切相关。当晶粒尺寸由中等到较大时(图5, a-c)磨损率增大而摩擦系数不变。当晶粒尺寸过大时(图5, d),材料的摩擦系数,磨损率都明显增大。此外,当密度减小,晶粒尺寸过大或过小时,

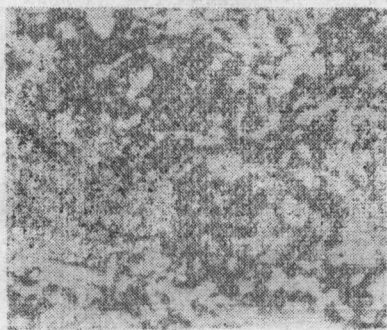
材料的强度明显降低。即这种材料的强度不仅决定于它们的密度，而且决定于它们的晶粒大小。这和一般多晶脆性材料观测到的特性完全一致。



a. 热压温度1500℃



b. 热压温度1580℃



c. 热压温度1650℃



d. 热压温度1750℃

图5 不同热压温度下制得材料断面的SEM图(×900)

表6 不同热压温度下制得的复合材料密度

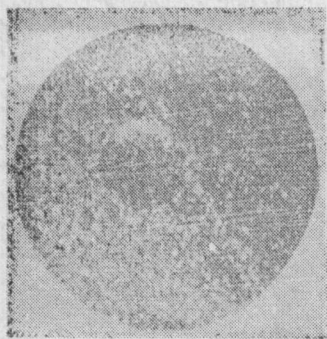
热压温度℃	1300	1500	1580	1650	1750
密度 克/厘米 ³	5.4	5.8	5.8	5.7	5.7



图6 W20%-MoS₂80%材料的压痕
(×40)

负荷31.25公斤, 球径φ2.5毫米。

图6、7、8分别示出了含W20%、W40%、W80%的材料在硬度试验时, 试样表面产生的压痕图象(硬度试验条件: 压头球直径φ2.5毫米, 负荷分别为31.25公斤、62.5公斤)。可以看出, 这三种材料产生赫芝裂纹所需的负荷是十分不同的, W20%材料的这个负荷约为31.25公斤(图6), W40%材料的这个负荷约为62.5公斤(图7、b), 但W80%的材料在62.5公斤的负荷下(图8)仍看不见明显的裂纹, 而只是塑性流动而留下的压痕。把图4和图6、7、8联系起来, 可以看出, 在大于12公斤负荷下, 从某种意义上说, 材料磨损率的大小与产生赫芝裂纹所需的负荷有关。定性地说, 产生赫芝裂纹所需的负荷越大, 材料的磨损率越小。不过, 必须指出, a. 压痕的观测只是定性地



a



b

图7 W40%-MoS₂60%材料的压痕(×40)

a. 负荷: 31.25公斤 球径φ2.5毫米 b. 负荷: 62.5公斤 球径φ2.5毫米

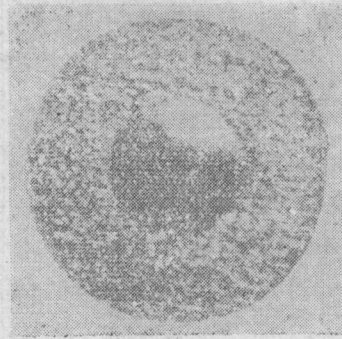


图8 W80%-MoS₂20%材

料的压痕(×40)

负荷62.5公斤 球径φ2.5毫米

说明高负荷下材料磨损率与产生赫芝裂纹负荷之间的关系。b.大量研究表明,脆性材料摩擦时摩擦力会使产生赫芝裂纹的负荷低于静压时所需的负荷^[11]。

结 论

1.组分、热压温度等工艺参数对难熔金属和MoS₂复合材料的性能有显著的影响。在一定的热压温度范围内当热压温度升高时,材料的机械强度增大,磨损率降低。在固定的热压温度下,随着金属含量增加,材料的抗弯强度增大。在给定的试验条件下,每种体系的材料都有一个能得到最小磨损率的最佳金属含量范围。本文中具有最低摩擦系数和磨损率的几种材料的最佳工艺参数是,组分:W40%-MoS₂60%、热压温度1550℃;组分:Mo20%-MoS₂80%、热压温度1580℃;组分Nb30%-MoS₂70%、热压温度1550℃。

2.这类材料的机械强度和抗磨性不仅决定于材料的密度,而且主要决定于它们的晶粒大小。我们发现,材料的机械强度、抗磨性都随材料密度的减小和晶粒尺寸的过大而明显降低。

3.一般地说,当试验负荷增大时,材料的摩擦系数降低,而磨损率增大。随着负荷和滑动速度的增大各种材料磨损率的变化是不同的。试验温度升高时,这类复合材料的磨损率都会增大。

参 考 文 献

- [1] 津谷裕子, 润滑(日), 19(1974), 10: 739.
- [2] 兰州化学物理研究所固体抗磨材料编写组, 固体抗磨材料, 科学出版社, 1973.
- [3] Van Wyk, J.W., UK Patent, 1265870 (1972), 1295508 (1972).
- [4] Murray, S.F., ASLE Proceeding-2nd International Conference on Solid Lubrication, Denver, Colorado, 1978, 58.
- [5] Mc Connell, B.D., et al., Lub. Eng., 33 (1977), 10: 544.
- [6] 张绪寿等, 第二次全国摩擦磨损会议论文集.
- [7] 牛淑琴等, 固体润滑, 2 (1982), 3: 158.

- [8] 张绪寿等, 固体润滑, 1 (1981), 1 : 54.
- [9] Hubbell, R.D., et al., *Lub.Eng.*, 25 (1969), 1 : 31.
- [10] Lipp, L.C., et al., *Lub.Eng.*, 29 (1973), 3 : 108.
- [11] Tabor, D., Transaction of the ASME, Series F, journal of Lubrication Technology, 99 (1977), 387.

The Mechanical And Tribological Properties of Smoe Refractory Metal Composites

Zhang Xushou, Ruan Hushen, Nin Shuchin, Ouyang Jinlin
(*Lanzhou Institute of Chemical Pnysics, Academia Sinica*)

Abstract

This paper presents the results of some studies using composites of refractory metal and MoS_2 . The work is focussed on the effect of processing parameters, sliding speed, load and surrounding temperature on the mechanical strength, friction coefficient and wear rate of the composites.