



# 直八型多用直升机旋翼刹车材料的研制

谭明福 黄尚文 刘先交 傅兴龙

(中南工业大学)

〔摘要〕阐述了直八型直升机旋翼刹车材料的研究工艺；探讨了非金属基、铜基和铁基在相同条件下的摩擦性能；研究了润滑组元 $\text{MoS}_2$ 、BN以及摩擦组元SiC对铁基摩擦材料性能的影响，并分析了其影响机理；指出非金属成分含量可以控制摩擦材料制动过程中摩擦力矩的峰比值，提高力矩的稳定性；同时也指出细片状珠光体组织的铁基材料耐磨性最好，并研制成功国内首次应用于直升机旋翼刹车装置的9—9铁基摩擦材料。

## 一、成分选择

直八型直升机是单旋翼带尾浆，装有三台涡轮轴发动机的新型多用途直升机。

直八型直升机旋翼刹车材料的使用条件非常苛刻，仅由4块直径为64mm的刹车片承担刹车任务，除铆钉孔外，刹车有效面积只有 $122\text{cm}^2$ ，单位面积吸收动能高达 $900\text{J}/\text{cm}^2$ ，刹车比压为 $1.84\text{MPa}$ ，高于大型客机机轮刹车压力的一倍，制动速度为 $32\text{m}/\text{s}$ 。

我所研制的9—9铁基材料于1985年底试飞成功，制动灵敏，摩擦性能稳定，耐磨性能好，单面单次磨损在 $0.003\text{mm}$ 以下。该材料于1987年7月通过部级鉴定。

根据有关资料，像这样大型直升机的旋翼刹车材料，动盘采用高强度的铍青铜，静盘采用非金属基加纤维强化的摩擦材料或碳/碳摩擦材料。我们的方案是：动盘采用30CrSiMoVA钢，静盘采用粉末冶金摩擦材料。并对基体和各成分对基体金属的影响进行了研究。对非金属为基加入金属纤维强化的复合材料、铜基和铁基摩擦材料，分别在

MM—1000摩擦试验机和地面惯性台进行了试验。非金属基的复合材料和烧结铜基摩擦材料都难以满足要求。前者摩擦系数较低，刹车后表面出现裂纹，磨损量大；后者摩擦系数偏低。铁基摩擦材料可以满足要求，摩擦系数可以在0.18以上，磨损量可以在 $0.006\text{mm}/\text{面次}$ 以下。表1为不同基体金属惯性台试验的摩擦性能。

铁基摩擦材料具有高强度、耐高温和耐磨等优良的综合性能<sup>〔1,2〕</sup>。强化基体组元采用铜和钼，铜不仅可以强化基体，还可以改善烧结性能，铜本身具有良好的导热性，可以降低刹车温度。钼熔于铁中可以强化基体，提高基体耐热性。润滑组元采用铅、石墨、 $\text{MoS}_2$ 和BN<sup>〔3,4〕</sup>。铅在高温下熔化并吸附在材料微孔内，工作时与 $\text{MoS}_2$ 形成表面膜，附着在摩擦表面上，起着降低材料磨损和稳定摩擦系数的作用。加入的石墨与铁作用，强化了基体铁，控制适当的工艺参数使基体组织成为片状珠光体，提高材料耐磨性，多余的石墨起润滑作用。BN与石墨一样也属六方晶系<sup>〔3〕</sup>，其结构与石墨相似，

表 1 不同基体金属惯性台试验的摩擦性能

材 料	平均动 摩擦系数 f	静摩擦 系 数 f <sub>i</sub>	稳定系数 a	力 矩 峰 比 值	刹车时间 s	磨 损 量		表面质量
						材 料 mm/面次	对 偶 mm/面次	
非金属材料	0.181	0.222	82	1.6	11.7	0.0363	0.0014	有裂纹
铜 基	0.130	0.190	70	2.0	14.1	0.0062	0.0021	好
铁 基	0.244	0.312	60	2.1	12.1	0.0064	0.0021	好

可在1000℃左右的氧化气氛中工作。一般在轻载和中载工作条件下，采用SiO<sub>2</sub>、石棉和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，其平均粒度为80~150μm在重载下，采用SiC和BN，其粒度可从50μm增加到300μm，摩擦系数和耐磨性都有所提高。我们采用较粗的SiC，其粒度为250~300μm。SiC的硬度和熔点比SiO<sub>2</sub>高，其硬度达HRA70以上，熔点2827℃，耐磨性和导热性比SiO<sub>2</sub>及Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>好，性能稳定，它可以在1000℃左右的氧化气氛中工作。

二、实验方法

实验工艺过程是采用粉末冶金摩擦材料的生产工艺。各成分在V形混料器中混合均匀，压制成形，在氢气保护下进行加压烧结。原材料技术要求及处理工艺规程见表2。9-9摩擦材料成分配比见表3。

9-9摩擦材料中，非金属体积达40%，成形后弹性后效很大，压块易产生开裂、分

表 2 原材料技术要求及处理工艺规程

材 料	粒 度	纯 度	松装密度	处 理 规 程		
	目	%	g/cm <sup>3</sup>	温 度 ℃	时 间 h	气 氛
铁 粉	-200	>98	2.43	600—650	2	氢 气
铜 粉	-200	>98	1.50	400—450	2	氢 气
钼 粉	-320	>99	2.41	800—900	2	氢 气
铅 粉	-150	>98	5.37	/	/	/
MoS <sub>2</sub>	胶体	化学纯	0.56	80—100	4	/
BN	-100	六方, >98	0.24	80—100	4	/
石 墨 粉	-200	鳞片状>96	0.14	80—100	4	/
SiC	-36	>98	1.73	80—100	4	/
航空煤油	/	工业纯	/	/	/	/

表 3 9—9 摩擦材料成分配比

组 元	钼 粉	铜 粉	石 墨 粉	SiC	铝 粉	BN	MoS <sub>2</sub>	铁 粉
wt%	2—5	2—5	2—3	10—14	4—6	4—8	4—6	余量

层等不良现象，故取成形压力为343~392MPa。烧结温度980~1020℃，烧结时压力4.9~6.86MPa，保温2小时。产品尺寸如图1所示。

(2) 对偶材料为30CrMoSiVA钢， $\phi$ 外110mm， $\phi$ 内90mm(图3)；

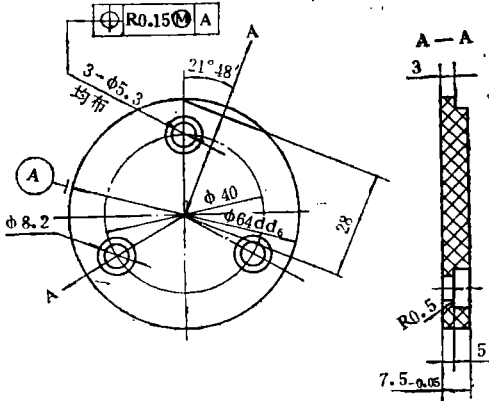


图1 产品设计图(左件，右件与此对称)

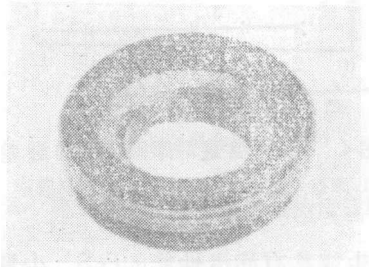


图3 对偶材料装置照片

- (3) 试验转速6000r/min(32m/s)；
- (4) 比压为1.84MPa，总作用力为792N；
- (5) 飞轮转动惯量为0.176kgm<sup>2</sup>；
- (6) 重叠系数0.13。

2. MoS<sub>2</sub>对材料性能的影响

MoS<sub>2</sub>为六方晶系层状结构，剪切强度小，具有良好的润滑性能，已广泛地作为固体润滑剂，摩擦时，摩擦表面不断产生致密的MoS<sub>2</sub>薄膜。在MoS<sub>2</sub>晶体中，由于层与层之间相对位移所必须的切向应力不大，易于滑动，因此是一种比较理想的固体滑润材料[4,5]。

从X射线衍射相分析表明，MoS<sub>2</sub>在烧结中有少量分解，大量的MoS<sub>2</sub>还依然存在，从图4可以看出，当MoS<sub>2</sub>含量增加时，对材料的摩擦性能影响较大，即材料的摩擦系数和磨损量均随之减小，这是由于MoS<sub>2</sub>是层状结构，其层内晶格常数之比为1:3.77，实际滑移数增多，摩擦阻力减小，摩擦力矩降低所致。

图5表明，MoS<sub>2</sub>含量增加，材料硬度提高，这是由于MoS<sub>2</sub>在铁基摩擦材料烧结中发生分解并析出硫和钼，钼熔于铁中强化了铁的基体[6,7,8,9]所致。分解出来的硫与铁

三、实验结果与分析

1. 检验方法及条件

首先进行小试样模拟性的检验，然后进行地面惯性台试验。小试样的检验在MM—1000摩擦试验机上进行，其试验条件为：

(1) 摩擦材料试样几何尺寸为 $\phi$ 10.6mm，高14mm。共5个，均匀地安装在一个有5个孔的钢盘上，钢盘直径为105mm(以 $\phi$ 10.6mm试样的中心线为基准)，总有效承压面积为4.3cm<sup>2</sup>(图2)；

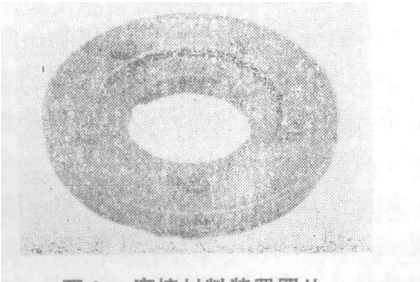
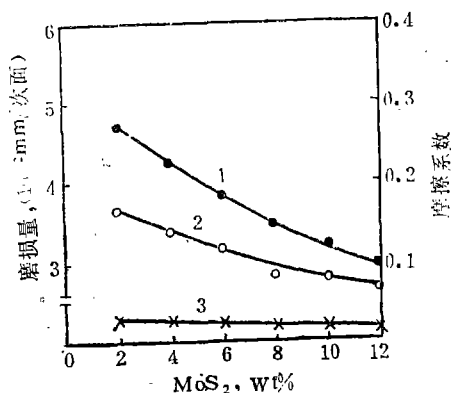
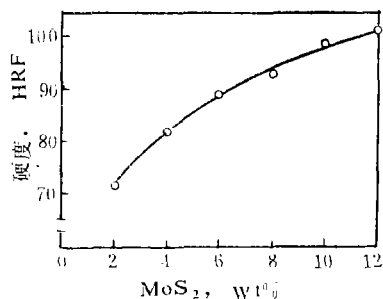


图2 摩擦材料装置照片

图4 MoS<sub>2</sub>含量对摩擦性能的影响

1.摩擦系数; 2.材料磨损; 3.对偶磨损

起作用生成具有润滑性能的FeS, 少量钼还可以与碳起作用生成MoC, 可以降低材料的磨损。X射线衍射相的分析证明了这一点。但MoS<sub>2</sub>含量大于6%以后, 材料的摩擦系数已小于0.2, 而且MoS<sub>2</sub>是非金属成分, 含量太多, 会导致材料强度降低, 因而MoS<sub>2</sub>的含量应控制在6%以下为好。

图5 MoS<sub>2</sub>含量对材料硬度的影响

MoS<sub>2</sub>对对偶材料磨损量的影响不大, 随着MoS<sub>2</sub>含量的增加其磨损量减小, 这也是由于MoS<sub>2</sub>含量增加, 润滑性能提高所致。

### 3. BN对材料性能的影响

BN也属六方晶系<sup>[3,4]</sup>, 其结构与石墨相似, 有“白石墨”之称, 其平面为重叠层状结构, 层与层之间的硼与氮交错排列, 因此层间的力与石墨不同, BN层不仅靠范德华力, 而且还存在着硼和氮之间的偶极矩作用

力。

BN的摩擦系数比石墨和MoS<sub>2</sub>高, 因为BN不存在自由电子, 除N和S电子对之外, 所有电子都加强晶面间的结合, 剩余电子则强化了电子间结合<sup>[4]</sup>。所以磨损量随着BN含量增加而减小, 摩擦系数反而提高(图6)。

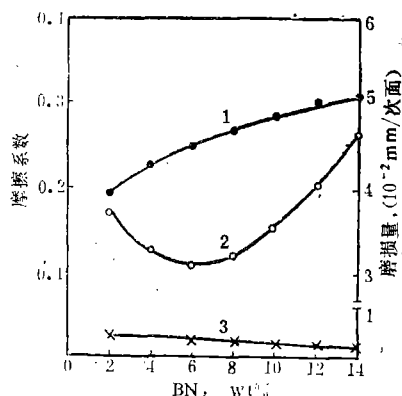


图6 BN含量对摩擦性能的影响

1.摩擦系数; 2.材料磨损; 3.对偶磨损

在烧结过程中, BN不分解也不挥发, X射线衍射相的分析证明了这一点, 在摩擦过程中, 促使形成薄膜, 保持良好润滑, 从而提高了耐磨性<sup>[9]</sup>。由图6可以看出, 当BN含量为6~8%时, 材料磨损最小, 超过8%后, 磨损量加大, 这说明BN的润滑性能不及MoS<sub>2</sub>, 但含量在6~8%时, 摩擦表面温度达800℃, 表现出良好的润滑性能, 提高了材料的摩擦系数和耐磨性, 这是MoS<sub>2</sub>和石墨所不及的。

### 4. SiC对材料性能的影响

SiC是一种硬度很高的碳化物, 常用作粉末冶金摩擦材料的摩擦剂, 其熔点高, 高温下不与基体发生化学反应, 适合作铁基材料的硬质相<sup>[4]</sup>。

如图7所示, SiC的含量增加, 摩擦系数提高, 磨损减小, SiC含量在10~12%时, 磨损量最小, 超过12%后, 磨损量有所增

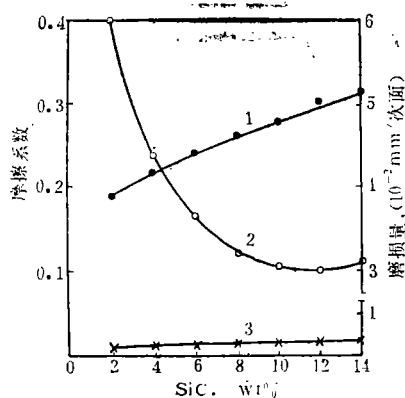


图7 SiC含量对摩擦性能的影响

1. 摩擦系数; 2. 材料磨损量; 3. 对偶磨损量

加。实验已证明加入适量的SiC可以降低材料磨损, 提高摩擦系数, 由于SiC是作为硬质相镶嵌在材料基体内的, 经加工和磨合之后, SiC就突出基体表面, 减少了基体与对偶的直接摩擦, 避免了粘着磨损, 降低了材料磨损, 即提高了耐磨性。SiC过量后, 因破坏了基体的连接, 使SiC容易剥落, 引起材料磨损量显著增加。对偶的磨损量也随着SiC含量的增加而增加, 但增加很缓慢。

### 5. 非金属含量对摩擦力矩峰比值的影响

所谓摩擦力矩峰比值就是最大摩擦力矩与最小摩擦力矩之比值或最大摩擦系数与最小摩擦系数之比值。其比值越小, 说明材料的摩擦系数愈稳定, 摩擦性能愈好, 它是衡量摩擦材料的一个重要参数。实验证明, 铁基摩擦材料的摩擦系数(或摩擦力矩)的峰比值与非金属含量密切相关。

从图8可以看出, 随着非金属含量的增加, 摩擦力矩峰比值减小。根据文献<sup>[10]</sup>, 两个接触的表面相对运动时所产生的摩擦力的本质, 目前较普遍能接受的还是“粘着一变形”(分子—机械)摩擦理论。这种理论认为, 产生摩擦力的基本原因是: 在摩擦面的实际接触处, 由于实际压力很大, 远远超过其弹性极限而达到塑性变形, 表面膜受到破坏、剥落, 使基体直接接触, 产生强烈的粘

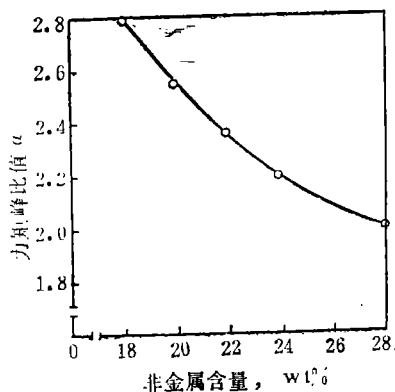


图8 非金属含量对摩擦力矩峰比值的影响

着力, 粘着力的大小与材料性质有关, 同种材料的粘着力最大, 异种材料的粘着力较小。同时, 由于两接触面凹凸相互啮合产生了变形阻力, 变形阻力随表面粗糙度不同而改变, 表面越粗糙, 变形阻力越大, 表面越光滑, 变形阻力越小。两物体相接触时产生的摩擦力就是由这两种力组成, 即 $F_{总} = F_{粘} + F_{变}$ , 用摩擦系数表示即 $f_{总} = f_{粘} + f_{变}$ 。

在制动过程中, 从高速到低速(高温到低温), 直到静止。在高温下, 金属之间的结合强度降低, 即粘着力降低, 也就是摩擦力矩降低; 在低温下则相反。非金属加入, 在高温下, 不但非金属的结合强度大于金属间的结合强度, 同时表面粗糙度也增加了, 所以粘着力不但不降低, 而且有所提高。在低温下, 金属间的结合强度随着非金属含量的增加而减小, 而非金属间的结合强度又小于金属间的结合强度, 所以使摩擦力矩降低。在低温下,  $f_{总}$ 随着非金属含量的增加而减少, 在高温下,  $f_{总}$ 随着非金属含量的增加而增加, 所以使力矩峰比值变小。

图9是非金属含量不同的六个样品的摩擦试验曲线, 曲线1~6非金属的含量分别为28、26、24、22、20、18%(重量比), 相应的峰比值为2.0、2.2、2.38、2.56、2.80。从图9可以看出, 非金属含量增加,

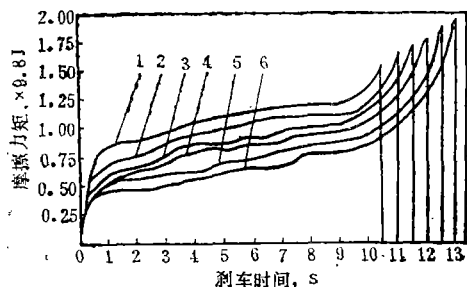


图9 摩擦转矩与刹车时间的关系

力矩峰值减小, 刹车时间缩短。因此, 在耐磨性及强度允许下, 适当地增加材料中的非金属含量, 不仅可以改善刹车平稳性, 而且可以缩短刹车时间, 防止粘结。保证安全可靠, 对航空刹车材料来说是非常重要的。

#### 6. 材料基体组织对材料性能的影响

要保证摩擦材料具有良好的摩擦性能, 材料基体组织也是一个十分重要的因素。对于铁基材料, 组织中不希望形成连续网状的渗碳体, 这种组织能使材料变硬变脆, 给材料本身和对偶都会带来不良影响, 因此, 在形成铁—石墨材料的原始组织时, 组织中存在铁素体将使材料耐磨性降低, 细片状珠光体组织耐磨性好而且抗粘结<sup>[4]</sup>。在相同成分条件下, 改变工艺制度, 可以获得不同粗细的珠光体组织。对粗、中、细三种不同的珠光体组织的材料进行了相同条件的摩擦性能检验。其中细片状珠光体组织的材料耐磨性最好, 磨损量为 $1.2 \times 10^{-2}$ mm/面次, 摩擦系数为0.28; 中片状珠光体组织者, 磨损量为 $2.1 \times 10^{-2}$ mm/面次, 摩擦系数为0.30; 粗片状珠光体组织者, 磨损量为 $3.5 \times$

$10^{-2}$ mm/面次, 摩擦系数为0.32。试验证明, 细片状珠光体组织材料的磨损量最小, 摩擦系数适中, 这正是材料所要求的。

#### 7. 9-9 铁基摩擦材料的物理机械性能及摩擦性能

密度	5.2—5.4g/cm <sup>3</sup>
抗压强度	255~265MPa
硬度(HRF)	90—110
导温系数	0.006975cm <sup>2</sup> /s
导热系数	0.004213Cal/°C·cm·s
金相组织	细片状珠光体
平均摩擦系数	0.23—0.25(惯性试验台数据)
平均磨损量	0.006—0.008mm/面次(惯性试验台数据)

#### 四、结论

1. 润滑组元BN、MoS<sub>2</sub>, 摩擦剂SiC等都能有效地控制材料的摩擦系数和磨损量, 其含量多少直接影响材料的摩擦性能;

2. 非金属含量可以调节材料制动过程中的摩擦力矩峰值, 改变摩擦曲线状态;

3. 改变烧结工艺制度可以获得不同粗细的珠光体组织, 其中以细片状珠光体组织的耐磨性最好;

4. 分别对非金属基、铜基和铁基三种摩擦材料进行地面惯性台试验, 只有铁基摩擦材料达到技术要求;

5. 9-9 铁基摩擦材料通过装机使用, 证明已达到设计要求, 是国内首次应用于直升机旋翼刹车装置的铁基刹车材料。

#### 参考文献

- [1] B. T. Krysin et al, Perspectives in Powder Metallurgy, 1970, Vol. 4, 111—121
- [2] 曹天伦, 重型机械, 1979, No. 2, 88—97
- [3] 松尾正, 润滑与密封, 1978, No. 3, 89—93
- [4] [苏] И. М. 费多尔钦科等著, 徐润泽等译, 现代摩擦材料, 110—111, 122—125, 137—139, 147, 冶金工业出版社, 1983
- [5] USP3853493, 1974

- [6] [日] 日本金属学会编, 金属テ“タフ”ツク, 丸善株式会社, 昭和49年, 444  
 [7] [苏] H.H. 莫尔古诺娃等著, 徐克玷等译, 铝合金, 48, 1984  
 [8] [日] 松山芳治等著, 周安生等译, 粉末冶金学, 280, 科学出版社, 1978  
 [9] SUP 731833, 1982  
 [10] 戴中涛, 润滑与密封, 1980, No. 2, 48~56

## A STUDY ON BRAKE MATERIALS FOR THE ROTATING WINGS OF Z-8 HELICOPTER

Tan Minfu, Huang Shangwen, Liu Xianjiao and Fu Xinlong

(Central South University of Technology)

**ABSTRACT** The technological process of brake materials for the rotating wings of z-8 helicopter was studied in the research. Frictional properties of non-metal-base, copper-base and iron-base brake materials were compared under same test conditions. The effects of lubricating components,  $\text{MoS}_2$  and BN, and frictional materials of iron-base were discussed. The mechanism of this effects was also explained. The amount of nonmetal components may control the peak ratio of moment of frictional force in the braking process by friction materials. It may also increase the stability of moment. The iron-base materials with fine lamellar pearlite structure showed the best frictional properties. A “9-9 iron-base material” was successfully manufactured and firstly used in brake system of z-8 helicopter.

## 新 书 征 订

《金属粉末技术进展》一书系冶金工业出版社1989年出版的图书。该书汇集了1988年在广东中山召开的“第五届全国金属粉末学术会议”的118篇学术论文, 包括综述评论与理论研究、黑色金属粉末、有色金属与陶瓷粉末、粉末成形烧结及工艺装置、烧结材料与制品五部分。较全面地反映了近年国内外粉末冶金领域的科研、生产技术。约60万字, 定价10元。

订购时请由邮局汇款, 汇款地址为: 北京学院南路76号四信箱 陈木兰 收 (邮政编码100081)

## 新 刊 信 息

中国科学技术期刊编辑学会主办的《编辑学报》已经正式出版。

《编辑学报》是有关编辑学的综合性学术期刊, 报道国内外有关编辑学, 主要是科技期刊编辑理论研究成果, 交流编辑实践经验, 为培养编辑人才, 提高期刊质量, 促进科技交流服务。本刊设有理论研究、专题报告、编辑工程、期刊管理、出版知识、科技文章写作、海外信息、书刊评介等。

读者对象, 主要是科技编辑人员, 撰写各类科技文章的科技人员, 大专院校编辑专业的师生等。

《编辑学报》为季刊, 国内定价每本2.00元, 全年4期, 共计8.00元, 本会团体和个人会员9折优惠。订阅者请邮局汇款至“100081, 北京海淀区学院南路86号716室中国科学技术期刊编辑学会发行组”。