

刹车条件对铁基粉末冶金材料 摩擦磨损性能的影响

王秀飞¹, 黄启忠¹, 宁克焱², 尹彩流¹, 高莹¹

(1 中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 湖南 长沙 410083;

2 中国北方车辆研究所 车辆传动国家重点实验室, 北京 100072)

摘要: 采用粉末冶金法制备某型号飞机用铁基刹车材料, 研究了刹车条件对铁基刹车材料摩擦磨损性能的影响, 利用光学显微镜观察铁基刹车材料表面及其磨损表面形貌, 利用 X 射线衍射仪分析其组织的变化情况. 结果表明: 随着刹车条件 (单位面积吸收能量) 的增加, 铁基刹车材料的摩擦系数减小, 磨损量增大, 摩擦表面温度升高; 磨损前铁基刹车材料由粗大的细片层珠光体和块状铁素体组成, 随着吸收能量的增加, 细片层珠光体较使用前明显增多和细化; 当刹车条件从正常着陆刹车变为超载着陆刹车时, 其摩擦表面 Fe 的高价氧化物比例增大.

关键词: 粉末冶金; 铁基摩擦材料; 刹车条件; 摩擦磨损性能

中图分类号: TB332; TH117.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-0595(2007)04-0372-05

随着航空航天技术的发展, 飞机的速度和负荷不断增大, 其制动材料的工作温度已达 800℃, 制动表面温度高达 1 000℃ 以上, 因而对制动材料的综合性能要求越来越高^[1~3]. 铁基粉末冶金摩擦材料因动摩擦系数高且稳定, 具有良好的耐磨性、抗粘结、使用负荷高以及工作稳定而得到广泛应用^[4~6]. 铁基摩擦材料中铁与偶件材料的亲和性好而易发生粘着, 可以通过添加合金元素以降低其塑性、提高强度和硬度, 从而提高其抗粘着性和耐磨性能^[5~9]. 刹车条件的改变将导致材料产生不同的摩擦热而改变摩擦表面层的组织结构, 从而使其摩擦磨损性能发生变化. 本文作者研究刹车条件对铁基刹车材料摩擦磨损性能及其摩擦表面组织的影响, 以为铁基刹车材料的实际应用提供实验依据.

1 实验部分

1.1 原材料

试验所采用还原铁粉 ($\text{Fe} \geq 98.0\%$) 的粒度 $< 74 \mu\text{m}$, 电解铜粉 ($\text{Cu} \geq 99.7\%$) 的粒度 $< 74 \mu\text{m}$; 天然石英砂为不规则形状, $W(\text{SiO}_2) \geq 97\%$, 粒度为 $150 \sim 250 \mu\text{m}$, 人造高纯电熔白钢玉, $W(\text{Al}_2\text{O}_3) \geq 99\%$, 粒度为 $150 \sim 650 \mu\text{m}$, 天然鳞片状石墨, $W(\text{C})$

$\geq 97\%$, 粒度为 $150 \sim 650 \mu\text{m}$, 胶体粉剂 MoS_2 为分析纯.

1.2 制备工艺

以还原铁粉作为基体, 添加 $8\% \sim 10\%$ (质量分数, 下同) 电解铜粉与基体合金化, 分别添加 $12\% \sim 15\%$ 鳞片石墨作为润滑组元, $8\% \sim 10\% \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$ 作为摩擦组元, $3\% \text{MoS}_2$ 作为辅助组元, 按照以上配比称取粉末装入“V”型混料机内混合均匀, 压制成形后, 于 H_2 保护下采用加压烧结制成铁基粉末冶金摩擦材料. 烧结温度为 $1000 \sim 1030^\circ\text{C}$, 烧结压力为 $20 \sim 40 \text{ MPa}$, 保温 3 h 后随炉冷却至室温出炉.

1.3 摩擦磨损性能评价

按照航标 HB5434-1998, 将烧结后的铁基摩擦材料加工成 $\phi_{\text{外}} 75 \text{ mm} \times \phi_{\text{内}} 53 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ 的试环, 然后与同尺寸的 30CrSMoVA 钢试环组成摩擦副在 MM-1000 型摩擦磨损试验机上评价其摩擦磨损性能. 试验条件见表 1, 分别按正常着陆刹车、设计着陆刹车和超载着陆刹车条件下进行模拟试验. 每种条件下做 10 次制动曲线, 采用精度 0.01 mm 的千分尺分别测量刹车前后摩擦环的厚度, 计算其磨损量, 并取连续 5 条制动曲线计算摩擦系数. 根据每次

基金项目: 车辆传动国家重点实验室基金资助项目 (51457030105QT7106).

收稿日期: 2006-08-15; 修回日期: 2006-10-29 联系人黄启忠, e-mail: qzhuang@mail.csu.edu.cn

作者简介: 黄启忠, 男, 1962 年生, 博士, 博导, 目前主要从事炭/炭复合材料研究.

表 1 摩擦磨损试验条件

Table 1 Condition of tribological test

Conditions	Brake velocity $v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Inertia $I/\text{kg} \cdot \text{m}^2$	Brake pressure p/MPa	Absorption energy $E/\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$
Normal brake	20.1	0.21	0.8	2053
Design brake	25.1	0.33	1.1	5337
Overbad brake	27.8	0.35	1.1	6547

刹车过程的吸收能量除以摩擦环面积得到单位面积的吸收能量.采用光学显微镜观察铁基刹车材料表面及其磨损表面形貌,利用 X 射线衍射仪 (XRD) 分析其组织的变化情况.

2 结果与分析

2.1 刹车条件对摩擦磨损性能的影响

表 2 列出了 3 种刹车条件下铁基摩擦材料的摩

擦磨损性能测试结果.可以看出,随着刹车条件的变化,即当单位面积吸收能量增加时,铁基摩擦材料的摩擦系数降低,磨损量增大,摩擦表面温度升高.

在正常着陆刹车条件下,材料单位面积吸收的能量和温升较低,其粘着磨损主要由摩擦表面微突体啮合深度造成的,偶件表面微突体硬度高于材料硬度,因此摩擦系数较高.而在设计着陆刹车和超载着陆刹车条件下,摩擦表面微突体啮合程度减弱,其

表 2 铁基摩擦材料的摩擦磨损性能

Table 2 Tribological performance of Fe-based materials

Conditions	Friction coefficient μ	Abrasion/ $\mu\text{m} \cdot \text{per}$		Surface temperature $T/$
		PM materials	Steel segment	
Normal brake	0.30	5.0	2.7	750
Design brake	0.24	19.3	13.0	850
Overbad brake	0.21	30.3	7.0	915

粘着磨损占据主要地位,从正常着陆刹车到超载着陆刹车的变化过程中,材料单位面积吸收的能量由 $2\,053\text{ J}/\text{cm}^2$ 升至 $6\,547\text{ J}/\text{cm}^2$,其表面层的瞬时吸收能量增大,表层温度进一步提高.一方面,由于抗剪切强度具有热波动性^[10],随着温度升高,分子键的抗剪切强度降低,使其摩擦系数低;另一方面,温度增加使摩擦表面发生氧化,表面形成致密的氧化膜 (Fe_3O_4),减少了摩擦表面微突体的接触,从而降低了摩擦系数.

而在正常着陆刹车条件下,其能量、速度、压力和温度等均较低,可以在摩擦表面能够形成氧化膜,因此其磨损量较小.随着刹车能量提高,摩擦表面氧化膜被破坏,表面材料部分脱落,犁削加强,磨损加剧.另外,从摩擦表面脱落的游离硬质颗粒或摩擦表面的硬质凸峰将进一步增加磨损.

2.2 磨损表面分析

图 1 所示为烧结后铁基摩擦材料在垂直于试样摩擦方向的表面微观组织金相照片.由图 1 可见,硬质颗粒 (摩擦相和摩擦组元) 较均匀地分布于基体中.鳞片石墨裸露排列于摩擦表面,从而保证了摩擦

系数的平稳性和防止金属粘着及相对转移的发生.

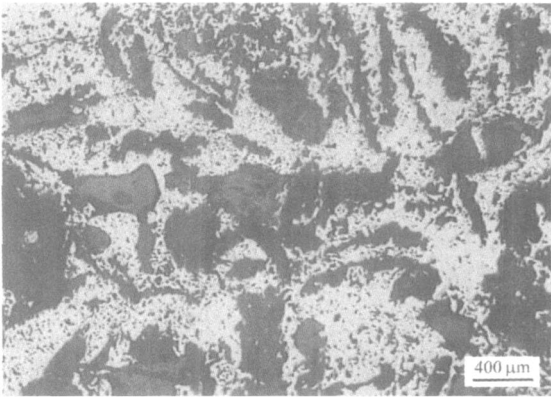


Fig 1 Original microstructure of Fe-based friction materials

图 1 Fe基摩擦材料试样表面的显微组织金相照片

材料中的金属基体由较粗大的珠光体和块状铁素体组成.

图 2 所示为在正常着陆刹车条件下,Fe基刹车材料摩擦试验后的表面状态及其表层显微组织形貌金相照片.从图 2 (a) 可以看出:磨损表面的硬质点颗粒较为平整并牢固镶嵌于基体中,在摩擦过程中,

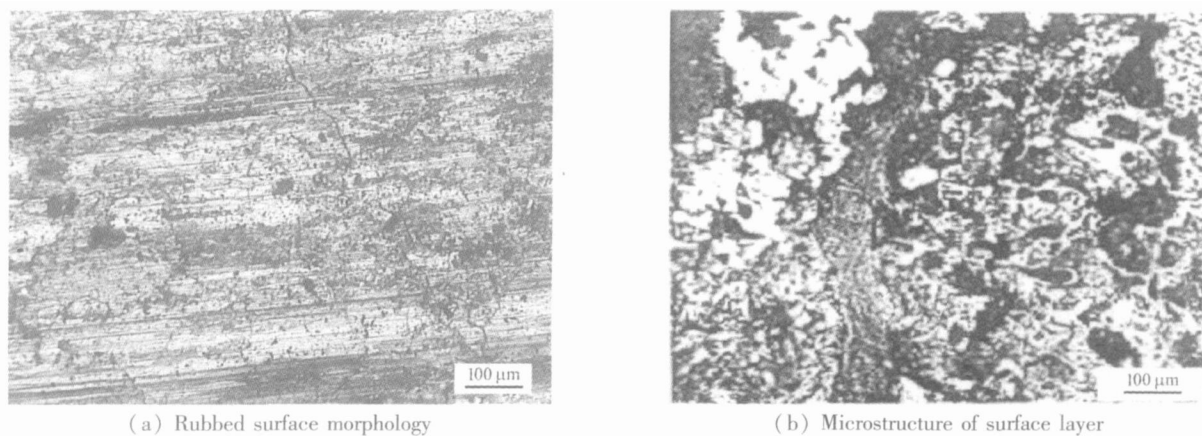


Fig 2 Rubbed surface morphology (a) and microstructures of surface layer (b) under normal brake condition

图 2 正常着陆条件下磨损表面形貌及其表层显微组织形貌照片

摩擦相逐渐磨损而不会脱离基体.同时,在正常着陆条件下,由于受到摩擦热的冲击,随着材料中润滑组元石墨(碳)向基体金属相扩散溶量的增加,Fe基刹车材料显微组织中细片层珠光体较磨损前明显增多

和细化,且愈接近受热冲击影响严重的磨损表面,其珠光体愈多.

图 3 所示为在设计着陆刹车条件下摩擦试验后的磨损表面及其表层显微组织形貌金相照片.可见,

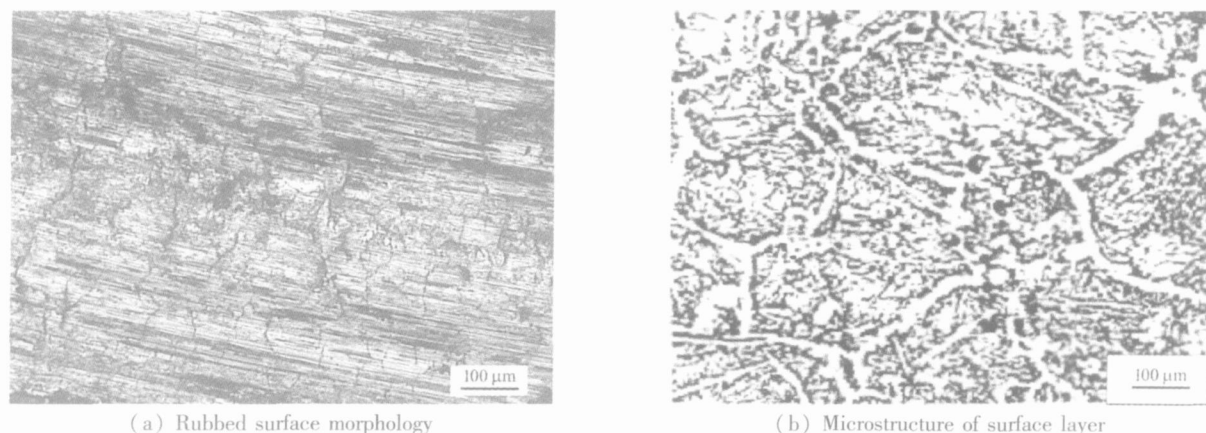


Fig 3 Rubbed surface morphology (a) and microstructures of surface layer (b) under designed brake condition

图 3 设计着陆条件下磨损表面形貌及其表层显微组织形貌照片

在设计着陆刹车条件下,材料表面形成断续白层,经观察为细马氏体组织,部分渗碳体变得粗大且出现少量网状渗碳体,而中间层仍为珠光体.

在超载着陆刹车条件下,材料磨损表面形成了大片白层,其显微硬度高于基体且不易腐蚀,白层与基体间存在含较多条状石墨的过渡层,白层为粗针状马氏体和粗大网状渗碳体组织,过渡层则为较细针状马氏体和较小网状渗碳体.

从正常着陆刹车到超载着陆刹车,摩擦表层显微组织变化较大,同时摩擦系数降低且磨损量增加,尤其在超载着陆刹车条件下,摩擦表面实际接触部位的温度超过临界点 AC_3 ,使得大量石墨碳溶入基

体奥氏体而形成摩擦表面层.试验结束后,由于快速冷却则在摩擦表面附近过渡层中析出石墨,这种边界层既降低了摩擦系数,也容易引起剥落,从而导致其磨损量增加.另外,粗针状马氏体在相变时易导致基体产生微裂纹,而粗大网状渗碳体组织的脆性以及边界层、过渡层和基体材料组织的不同也会使材料结构疏松,容易引起基体材料的剥落转移,从而对刹车副的工作可靠性造成极大威胁,这也是其摩擦系数低且磨损量大的主要原因.

2.3 摩擦表面元素分析

图 4 示出了在 3 种刹车条件下试样磨损表面的 XRD 图谱.可见:在正常着陆刹车条件下,摩擦表面

的氧化膜以 Fe_3O_4 居多, Fe_2O_3 次之, 几乎没有 FeO ; 在设计着陆刹车条件下 Fe_2O_3 增多; 在超载着陆刹

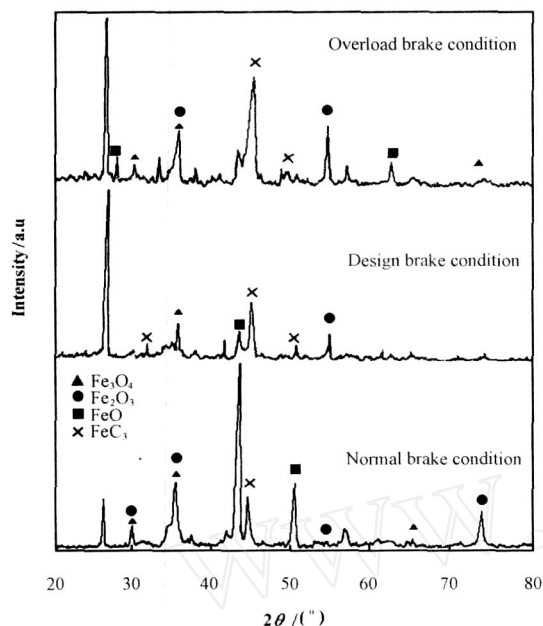


Fig 4 XRD spectrum of friction faces after test under three braking conditions

图 4 3种刹车条件下试样磨损表面的 XRD图谱

车条件下 FeO 增多, 其磨损表面出现大量渗碳体相 Fe_3C 。这是由于随着单位面积吸收能量的增加, 摩擦表面高温氧化增加的缘故^[11]。当单位面积吸收能量增加时, 摩擦表面温度逐步增加, 氧化物由 Fe_3O_4 和 FeO 逐步转化为 FeO 和 Fe_2O_3 。在超载着陆刹车条件下出现 Fe_3C 的强衍射峰, 这与其相应的显微组织中出现大量网状渗碳体有关。

3 结论

a Fe基刹车材料的组织主要为细片层珠光体, 具有良好的摩擦磨损特性。在正常着陆刹车条件下, 受摩擦热冲击的影响, 其碳溶量增大, 显微组织中珠光体增加, 摩擦系数较高。

b 在单位面积吸收能量增加 (从正常着陆刹车到超载着陆刹车) 的条件下, 其显微组织中出现白色的摩擦层, 该组织为粗针状马氏体和网状渗碳体, 使得摩擦系数降低, 磨损量增加。

c 随着单位面积吸收能量的增加 (从正常着陆刹车到超载着陆刹车), 摩擦表面 Fe 的氧化物由 Fe_3O_4 和 FeO 为主逐步转化为 FeO 和 Fe_2O_3 为主。

参考文献:

[1] 姚萍屏, 熊翔, 黄伯云. 粉末冶金航空刹车材料的应用现状与

发展[J]. 粉末冶金工业, 2000, 10(6): 34-38.

Yao P P, Xiong X, Huang B Y. Present situation and development of powder metallurgy airplane brake materials[J]. Powder Metallurgy Industry, 2000, 10(6): 34-38.

[2] 樊毅, 张金生, 王零森, 等. 铁含量对铜铁基摩擦材料性能的影响[J]. 摩擦学学报, 1999, 19(3): 204-208.

Fan Y, Zhang J S, Wang L S, et al. Effect of iron concentration on friction and wear characteristics of Cu-Fe based P/M friction materials[J]. Tribology, 1999, 19(3): 204-208.

[3] 熊翔, 黄伯云. 现代航空粉末冶金刹车材料[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 1996, 1(1): 1-6.

Xiong X, Huang B Y. Modern aerospace brake materials of powder metallurgy[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 1996, 1(1): 1-6.

[4] Wells T C. Friction materials in aerospace applications[J]. Powder Metallurgy, 1992, 5(4): 257.

[5] 王秀飞, 李东生. 航空用铁基金属陶瓷摩擦材料[J]. 材料工程, 1998, (8): 27-29.

Wang X F, Li D S. Iron-cement friction materials for aircraft application[J]. Journal of Materials Engineering, 1998, (8): 27-29.

[6] 石宗利, 杜心康, 俞焕然, 等. 铁基金属陶瓷制动材料的显微组织与性能研究[J]. 兰州大学学报, 2001, (5): 36-41.

Shi Z L, Du X K, Yu H R, et al. Study on the microstructures and properties of iron-based metal-ceramic braking materials[J]. Journal of Lanzhou University, 2001, (5): 36-41.

[7] Locker K D. Friction materials an overview[J]. Powder Metallurgy, 1992, 35(4): 253-255.

[8] 杜心康, 石宗利, 叶明惠, 等. 高速列车铁基烧结闸片材料的摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2001, 21(4): 256-259.

Du X K, Shi Z L, Ye M H, et al. Friction and behavior of Fe-based sintered lining material for highway train[J]. Tribology, 2001, 21(4): 256-259.

[9] 袁国州, 彭剑昕, 姚萍屏. 硼铁含量和粒度对铁铜基摩擦材料性能的影响[J]. 矿冶工程, 2001, (4): 89-91.

Yuan G Z, Peng J X, Yao P P. Effects of total amount and grain size of FeB on properties of Fe-Cu based frictional materials[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2001, (4): 89-91.

[10] 温诗铸. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.

[11] 陈洁, 熊翔, 姚萍屏, 等. 摩擦面温度对铁基摩擦材料摩擦磨损性能影响机理的研究[J]. 粉末冶金技术, 2004, (4): 223-227.

Chen J, Xiong X, Yao P P, et al. Effect of rubbed surface temperature on frictional behavior of iron based P/M friction materials[J]. Powder Metallurgy Technology, 2004, (4): 223-227.

Effects of Brake Conditions on Tribological Properties of Fe-based Powder Metallurgy Material

WANG Xiu-fei¹, HUANG Qi-zhong¹, NING Ke-yan², YIN Cai-liu¹, GAO Ying¹

(1. State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China;

2. National Key Laboratory of Vehicle Transmission, China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

Abstract: A kind of brake material on some model planes was made by powder metallurgy process. The material was used to analyze the relationship between brake conditions on friction coefficient and abrasion rate. The material surface before and after experiments were analyzed through metallographic analysis by optical microscopy, and the surface microstructure was also analyzed by X-ray diffraction. The results show that, with the increase of energy absorption in unit area, the friction coefficients of materials decreased, wear rates increased, and temperature of friction surface rose. Microstructure of materials was mainly composed of coarse thin pearlite and bulk ferrite before experiment, the content of thin pearlite was obviously raised and thinner due to increase of absorption energy after experiment. At the same time, analysis of composition indicates that the high-valence iron oxide of friction surface had a higher content with increase of braking energy.

Key words: powder metallurgy, Fe-based friction material, brake condition, tribological properties

Author: HUANG Qi-zhong, male, born in 1962, Ph. D., Professor, e-mail: qzhuang@mail.csu.edu.cn