

一种铍合金材料的结构和性能

徐五丹¹ 郭领军¹ 李贺军¹ 李晏辉² 王剑锋¹

(1 西北工业大学凝固技术国家重点实验室,西安 710072)

(2 上海锆朴国际贸易有限公司,上海 200439)

文 摘 对国外某型号飞机所用的铍合金刹车材料进行了密度测试、结构观察、化学元素分析、力学、物理和摩擦性能表征,并与 C/C、C/SiC 复合材料和粉末冶金材料的相关性能作了对比,结果表明,粉末冶金铍合金材料密度低,力学和摩擦性能优异,是一种很有发展前途的刹车材料。

关键词 铍合金,结构,力学性能,物理性能,摩擦性能

Structure and Properties of a Beryllium Alloy

Xu Wudan¹ Guo Lingjun¹ Li Hejun¹ Li Yanhui² Wang Jianfeng¹

(1 The State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

(2 Shanghai Ever Skill M & E Co., Ltd, Shanghai 200439)

Abstract The density, structure, chemical element analysis, mechanical, physical and friction properties of a certain type of aircraft brake material -a beryllium alloy were investigated. A comparison of some performances between C/C composites, C/SiC composites and the Be alloy made by powder metallurgy (PM) was made and the results show that beryllium alloy has low density, excellent mechanical and friction properties, and is a potential brake material.

Key words Beryllium alloy, Structure, Mechanical properties, Physical properties, Friction properties

0 引言

铍(Be)是最轻的碱土金属元素,其原子序数小,熔点较高(1 283℃),热容量大(1.882 8 J/(g·K)),另外它具有高的弹性模量,良好的导热率和较低的线胀系数(1.16×10⁻⁵/K),可形成保护性氧化层,故在空气中即使红热状态时也很稳定。铍也可作为合金添加剂,常见的铍基合金(或者含铍材料)有 Be-Cu、Be-Al、Be-Ni、Cu-Al-Be(-X)合金等,这些合金体系已成功应用于航空航天制造,汽车制造,通信业等多个领域^[1]。

作为刹车盘材料,对传统的粉末冶金材料来说,存在着密度大、热容限低、易腐蚀等缺点;而 C/C 复合材料存在着易氧化、湿衰等不利的方面^[2];对于 C/SiC 复合材料来说,由于碳纤维与 SiC 基体的线胀系数的差异,材料内部存在着热失配的问题。

目前国内对于作为刹车材料使用的铍合金研究较少,尚未发现相关的文献报道。本文对国外某型号

军用飞机所用铍合金刹车材料的微观组织进行了观察与分析,对其密度、化学元素、力学、物理和摩擦性能进行了测试、分析与表征,并将其与传统的粉末冶金航空刹车材料和目前研究较多的 C/C 复合材料、C/SiC 复合材料的相关性能进行比较,以便为国内开展铍合金研究提供参考。

1 实验

1.1 试样加工

将样件沿 xy 向和 z 向两个方向加工成力学、热膨胀、导热性能测试试样。弯曲性能试样尺寸为 55 mm×10 mm×4.5 mm,其中 xy 向试样的厚度方向和 z 向试样的宽度方向为刹车盘样件的厚度方向;剪切性能试样尺寸为 40 mm×8 mm×4.5 mm,其中 xy 向试样的厚度方向为刹车盘样件的厚度方向;压缩性能试样尺寸为 12 mm×8 mm×8 mm,其中 xy 向试样的边长方向和 z 向试样的高度方向为刹车盘样件的厚度方向;热膨胀性能试样尺寸为 $\Phi 6$ mm×20 mm,导热性能试

收稿日期:2010-12-02;修回日期:2011-01-18

作者简介:徐五丹,1985 年出生,硕士,从事 C/C 复合材料制备工艺研究。E-mail:guolingjun@nwpu.edu.cn

样尺寸为 $\Phi 12.6 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 其中 xy 向试样的直径方向和 z 向试样高度方向为刹车盘样件的厚度方向。摩擦性能试样尺寸为 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 试样的厚度方向为刹车盘样件的厚度方向。图 1 为刹车盘样件取样方向示意图。

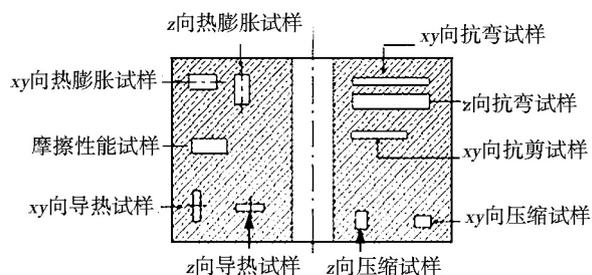


图 1 刹车盘样件取样方向示意图

(箭头方向为加载或测试方向)

Fig. 1 Sampling direction of the disc (direction of the arrow is the direction to load or test)

1.2 实验方法

1.2.1 密度测试

根据质量体积法即公式(1)计算力学性能试样的表观密度:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

式中, m 为材料的质量, V 为材料的体积。

1.2.2 化学元素分析

采用德国 Bruker AXS 生产的 S4 Pioneer X 射线荧光光谱仪得到铍合金中其他元素的含量, 然后根据所有元素含量之和为 1 来确定 Be 元素的含量。采用 Cu 靶 X-Pert 自动 X 射线衍射仪对合金的物相定性分析。

1.2.3 力学性能测试

根据 Q/NPU-CC-02-02、Q/NPU-CC-02-03 和 Q/NPU-CC-02-04 方法, 采用 CMT 5304-30KN 微机控制电子万能试验机对铍合金试样的压缩、弯曲及剪切性能进行测试, 加载速率为 0.5 mm/min 。

1.2.4 热膨胀性能测试

采用德国 NETZSCH DIL-402C 热膨胀仪对铍合金试样的热膨胀性能进行表征。表征温度范围为室温至 600°C , 升温速率为 5 K/min 。整个测量过程以氩气作为保护气体, 支架系统为石英, 校正标样为 Al_2O_3 。

1.2.5 导热性能测试

采用 LFA-427 激光导热仪对铍合金试样的比热容和热扩散系数进行测试, 测试条件为环境温度 25°C , 湿度 60%。然后根据热导率公式(2)计算热导率。

$$\lambda = c_p \alpha \rho \quad (2)$$

式中, α 为热扩散率; c_p 为比热容, ρ 为材料的密度。

1.2.6 摩擦性能测试

采用 QDM150 型干式摩擦性能试验机, 对偶材质为铸铁, 圆盘转速 500 r/min , 紧压力 1.51 MPa 。

1.2.7 微观结构观察

将铍合金经粗磨、细磨、抛光后, 用混合酸和氢氟酸反复腐蚀至可观察到清晰的晶界, 采用 Net. hot. I 型卧式光学显微镜观察其微观结构。

2 结果与分析

2.1 密度分析

测试得出铍合金的平均密度为 1.82 g/cm^3 , 而 C/SiC 复合材料的密度一般在 $1.9 \sim 2.2 \text{ g/cm}^3$, 常见的粉末冶金材料如铁基合金的密度为 $5.8 \sim 6.2 \text{ g/cm}^3$, 铁铜基合金密度为 $4.8 \sim 5.2 \text{ g/cm}^3$, 铜基合金的密度范围为 $6.0 \sim 6.4 \text{ g/cm}^3$ (表 1), 相比较而言, 铍合金属于低密度材料。鉴于铍合金在密度方面的优势, 应用于军用飞机的刹车盘可以大大降低飞机本身的重量, 提高飞机的性能。

表 1 其他几种材料的密度及力学性能^[3-4]

Tab. 1 Density and mechanical properties of some brake materials

| 材料 | 密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ | 弯曲强度 / MPa | 压缩强度 / MPa | 剪切强度 / MPa |
|------------------------|---|------------------------|------------------------|------------------------|
| C/C 复合材料 ¹⁾ | 1.71 | 130.1 | 100.6 | 11.5 |
| C/SiC 复合材料 | 2.1 ± 0.1 | 165 ± 30 | 260 ± 41 | 22.0 |
| 铁基粉末冶金材料 | $5.8 \sim 6.2$ | - | $294 \sim 343$ | - |
| 铁铜基粉末冶金材料 | $4.8 \sim 5.2$ | - | $140 \sim 250$ | - |
| 铜基粉末冶金材料 | $6.0 \sim 6.4$ | - | $226 \sim 245$ | - |

注: 1) C/C 复合材料性能数据为对国外某刹车材料进行测试所得。

2.2 化学元素及微观结构分析

表 2 为铍合金的化学成分测试结果, 图 2 为铍合金的 XRD 衍射图。从图中可以看出, 铍合金主要含有铍和少量的氧化铍。通过 X 射线荧光分析合金元素组成, 结果如表 2 所示。因 X 射线荧光分析对于元素周期表中氢、氦、锂、铍四种元素分析比较困难, 所以利用 X 荧光分析得到的铍合金元素含量只是定性测量。

表 2 铍合金的化学成分测试结果

Tab. 2 Results of chemical elements

| analysis for beryllium Alloy | | | | | wt% |
|------------------------------|------|------|------|-----|------|
| Be | Fe | Al | Ni | U | 其他 |
| 87.37 | 6.07 | 4.04 | 1.01 | 1.0 | 0.51 |

铍合金的强度以及韧性。

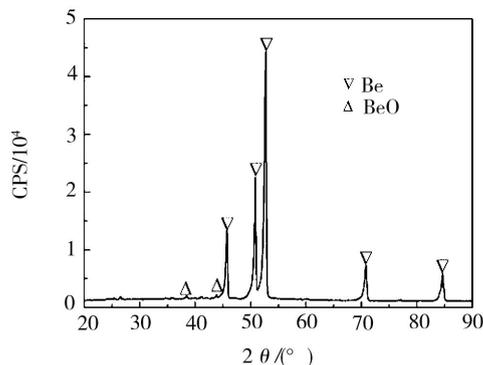


图2 铍合金的XRD衍射图

Fig.2 XRD pattern of beryllium alloy

对照表2和图2,可知铍合金中铍含量最高,铍合金是通过粉末冶金工艺制备而成的,在制备过程之中不可避免的会掺入Fe、Al等其他元素,但是这些元素的含量很少,在图2中未见这些元素的峰。铍合金在空气中会发生缓慢氧化,在表层形成一层致密的氧化物薄膜,阻止合金的进一步氧化,因而从XRD衍射图像中也发现了少量的氧化铍。

图3为铍合金的微观结构。可以看出铍合金的晶粒尺寸很小,较大的晶粒粒径约50 μm,大小晶粒镶嵌排布,小的晶粒围绕在大晶粒的四周。由于铍合金的晶粒较小,根据细晶强化机制,对铍合金实施作用力时,这样的细小晶粒会消耗合金内的能量,提高

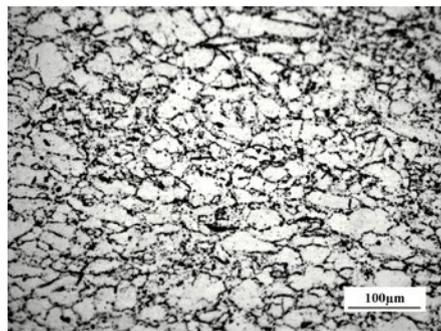


图3 铍合金微观结构

Fig.3 Microstructure of beryllium alloy

2.3 力学性能

表3为铍合金的力学性能测试结果。由表1和表3可知,铍合金在 xy 向和 z 向的弯曲强度分别为470.9和586.2 MPa,均远大于C/C和C/SiC复合材料,说明铍合金具有良好的抗弯性能;铍合金在 xy 、 z 向的压缩强度分别为1477.6和1427.36 MPa,要远远高于两种复合材料以及传统粉末冶金材料。由此可知,铍合金具有非常优异的抗压性能,更适合用于刹车片的制备,在相同的压力情况下,铍合金的使用寿命较其他三种材料而言会更长;另外,铍合金的 xy 向平均剪切强度为62.8 MPa,同样大于两种复合材料的剪切强度,具有良好的抗剪切性能。

表3 铍合金的力学性能测试结果

Tab.3 Mechanical properties of beryllium alloy

| 试样 | 弯曲性能 | | | | 压缩性能 | | | | 剪切性能 强度/MPa |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|----------------|
| | xy | | z | | xy | | z | | |
| | 强度/MPa | 模量/GPa | 强度/MPa | 模量/GPa | 强度/MPa | 模量/GPa | 强度/MPa | 模量/GPa | |
| 1 | 394.9 | 152.1 | 578.4 | 161.3 | 1457.1 | 15.4 | 1453.9 | 13.5 | 54.9 |
| 2 | 486.0 | 154.83 | 588.9 | 201.3 | 1516.0 | 11.7 | 1492.1 | 11.1 | 66.2 |
| 3 | 531.9 | 161.7 | 586.3 | 162.5 | 1536.1 | 11.8 | 1414.4 | 11.8 | 65.6 |
| 4 | | | 575.4 | 155.9 | 1401.0 | 11.1 | 1349.0 | 10.5 | 64.0 |
| 5 | | | 601.8 | 155.9 | | | | | 63.5 |
| 均值 | 470.9 | 156.2 | 586.2 | 167.4 | 1477.6 | 12.5 | 1427.36 | 11.7 | 62.8 |

2.4 物理性能

图4为铍合金线胀系数—温度曲线,表4为铍合金热导率测试结果。由图4可见铍合金 xy 向的线胀系数在 $(8.9 \sim 17.1) \times 10^{-6}/K$, z 向线胀系数在 $(3.1 \sim 16.2) \times 10^{-6}/K$, xy 向的线胀系数略高于 z 向的。曲线可以分为两个阶段:第一阶段,线胀系数随温度的增加迅速增大,曲线的斜率比较大;第二阶段,线胀系数继续随温度的增加而增大,曲线近似为直线,斜率变小。在低温区域(小于150℃),线胀系数对温度变化比较敏感。

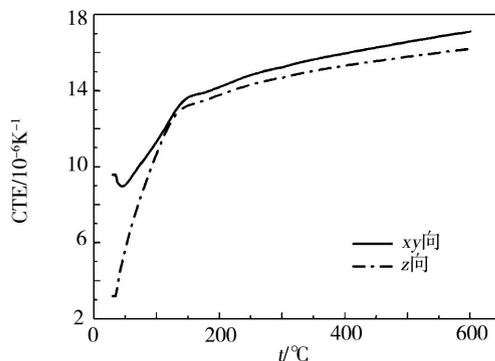


图4 铍合金线胀系数—温度曲线

Fig.4 Thermal expansion coefficient vs temperature curves for beryllium alloy

与 C/C 复合材料和 C/SiC 复合材料相比 (表 5), 线胀系数较大, 容易在材料内部产生热应力, 但钹合金强度及延展性要明显优于两种复合材料, 所以不影响它在刹车盘方面的应用。钹合金热导率在 58.5 ~ 90.0 W/(m·K), 明显高于 C/C 复合材料和

C/SiC 复合材料, 因而在刹车片使用过程之中, 能够将摩擦产生的热量快速地散发, 降低刹车片自身的温度, 避免材料在高温下使用, 从而提高材料的使用寿命。

表 4 热导率测试结果

Tab. 4 Thermal conductivities along different direction

| 温度 /°C | xy 向 | | | z 向 | | |
|-----------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| | 热容/J·(g·K) ⁻¹ | 热扩散率/mm ² ·s ⁻¹ | 热导率/W·(m·K) ⁻¹ | 热容/J·(g·K) ⁻¹ | 热扩散率/mm ² ·s ⁻¹ | 热导率/W·(m·K) ⁻¹ |
| 25 | 0.782 | 61.729 | 87.035 | 0.808 | 62.928 | 90.032 |
| 200 | 1.204 | 31.622 | 68.645 | 1.218 | 31.818 | 68.819 |
| 400 | 1.587 | 22.866 | 65.428 | 1.604 | 23.644 | 67.355 |
| 600 | 1.756 | 18.465 | 58.461 | 1.749 | 18.885 | 58.568 |

表 5 两种复合材料的线胀系数和热扩散率^[4]

Tab. 5 CTE and thermal diffusion coefficient of two composites

| 复合材料 | CTE /10 ⁻⁶ K ⁻¹ | 热扩散率/mm ² ·s ⁻¹ |
|-------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| C/C | -2.20 ~ 1.48 (30 ~ 1200°C) | 29.27 ~ 13.87 (25 ~ 800°C) |
| C/SiC | -1.6 ~ 2.9 (100 ~ 1300°C) | 0.45 ~ 0.13 (25 ~ 1000°C) |

注: C/C 复合材料性能数据为对国外某刹车材料进行测试所得。

2.5 摩擦磨损性能

刹车材料的性能好坏、性能是否稳定, 直接影响着飞机制动系统的灵敏度和可靠性^[5]。图 5 所示为钹合金强制磨损全程图形, 表 6 为钹合金强制磨损测试结果。从图 5 和表 6 可知, 不同行程下钹合金的摩擦系数比较平稳, 基本在 0.26 ~ 0.28 波动。在摩擦过程中, 材料表面的温度随着行程的增加而增大, 但曲线斜率较小, 行程 4.71 km 之后, 温度保持比较平稳的趋势, 最大值为 216°C。钹合金磨损量约为 0, 说明其耐磨性高, 使用寿命长, 优于其他几种材料 (表 7)。图 5 所示的压力曲线随着行程的变化比较平稳, 但出现了多个小峰, 图 6 是钹合金摩擦前后的表面形貌。从图 6(a) 中可以知道材料表面存在许多小的凹坑, 而且分布均匀, 可解释压力曲线上出现这些峰的原因。

从图 6(b) 中可以看出, 摩擦后表面形成许多的划痕, 部分区域附有黏着层, 说明摩擦过程之中存在着磨粒磨损^[6]。对摩擦后的材料做 XRD 衍射分析, 如图 7 所示, 无黏着层钹合金表面的成分主要是钹与氧化钹 [图 7(a)], 与未摩擦时的成分相比没有发生较大的变化; 附有黏着层区域的成分主要是铁, 镁 [图 7(b)], 这是由于在摩擦过程之中, 铸铁的硬度

较低, 发生黏着摩擦^[6], 使铸铁黏着在钹合金表面。

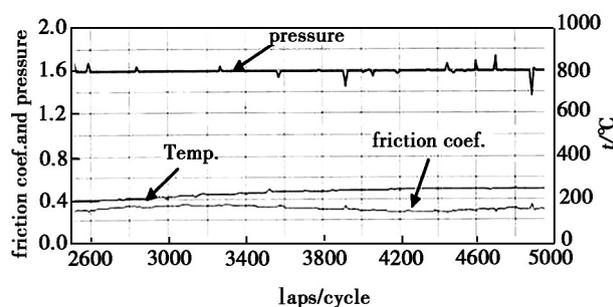


图 5 钹合金强制磨损全程图形

Fig. 5 Full stroke curves of mandatory wear for beryllium alloy

表 6 钹合金强制摩擦性能测试结果

Tab. 6 Results of friction test for beryllium alloy

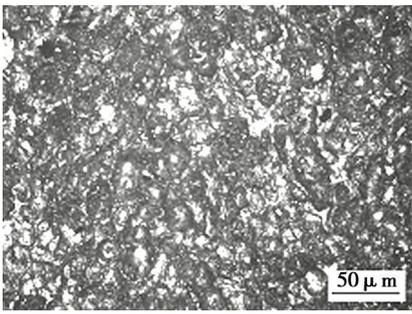
| 检测项目 | 最高温度/°C | 动摩擦系数 | 最小动摩擦系数 |
|------|---------|-------|---------|
| 前半 | 135 | 0.26 | 0.06 |
| 后半 | 216 | 0.27 | 0.00 |
| 全程 | 216 | 0.27 | 0.00 |

表 7 其他几种材料的摩擦性能^[3-4]

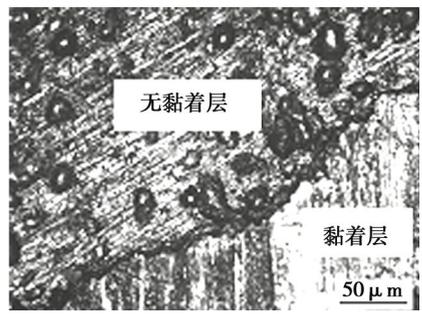
Tab. 7 Friction properties of some brake materials

| 材料类型 | 刹车压力/MPa | 摩擦系数 | 磨损量/μm |
|------------------------|----------|------|------------|
| C/C 复合材料 ¹⁾ | - | 0.30 | - |
| C/SiC 复合材料 | - | 0.34 | 1.9 |
| 铁基粉末冶金材料 | 0.82 | 0.23 | 5.0 ~ 13.0 |
| 铁铜基粉末冶金材料 | 0.95 | 0.26 | ≤8.0 |
| 铜基粉末冶金材料 | 0.45 | 0.24 | 5.4 ~ 7.2 |

注: 1) C/C 复合材料性能数据为对国外某刹车材料进行测试所得。



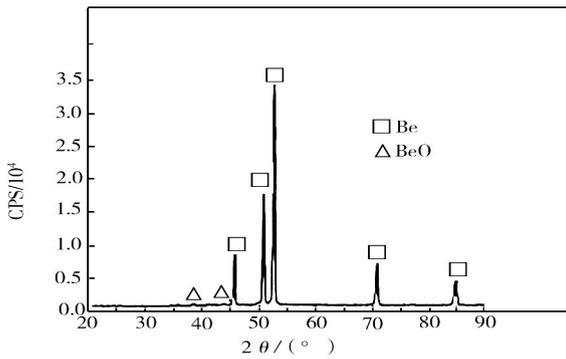
(a) 摩擦前



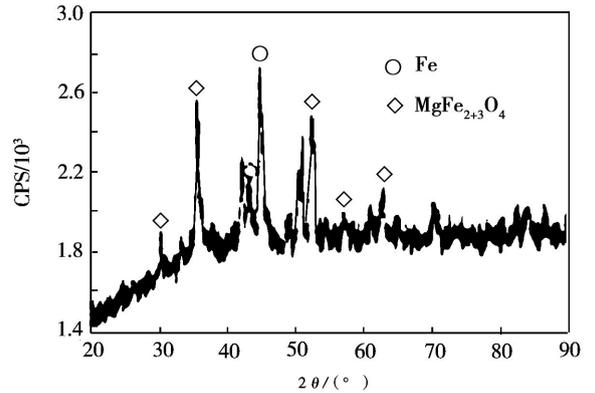
(b) 摩擦后

图6 铍合金摩擦前后表面形貌

Fig.6 Surface topography of beryllium alloy before and after friction



(a) 无粘结层区域



(b) 有粘结层区域

图7 铍合金摩擦后的 XRD 衍射图

Fig.7 XRD patterns of beryllium alloy after friction

3 结论

(1) 铍合金密度低, 晶粒尺寸较小, 大小晶粒镶嵌排布, 提高了其强度及韧性。

(2) 铍合金弯曲、压缩和剪切性能优异, 明显优于 C/C、C/SiC 复合材料以及传统粉末冶金材料。

(3) 铍合金热导率在 58.5 ~ 90.0 W/(m·K), 可迅速降低刹车片自身的温度, 避免材料在高温下使用, 从而提高材料的使用寿命。

(4) 铍合金具有优良的抗磨损性能以及稳定的摩擦特性, 安全可靠。

参考文献

[1] 张友寿, 秦有钧, 吴东周, 等. 铍和含铍材料的性能及应用[J]. 焊接学报, 2001, 22(6): 92-96

[2] 常顺宏, 田广来, 林辉. 中国航空机轮刹车系统发展综述[J]. 航空科学技术, 2003(5): 24-26

[3] 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, 2000, 10(6): 34-38

[4] Fan Shangwu, Zhang Litong, Xu Yongdong, et al. Microstructure and properties of 3D needle-punched carbon/silicon carbide brake materials [J]. Compos. Sci. Technol., 2007(67): 2390-2398

[5] 姚萍屏, 熊翔, 彭剑昕. 粉末冶金航空刹车材料的选择[J]. 中国机械工程, 2002, 13(12): 1067-1068

[6] 康立忠. SiC 颗粒增强铝基复合材料干摩擦磨损的研究[D]. 上海交通大学, 2008

(编辑 任涛)