

民用客机碳刹车盘的制备及性能研究



刘海平*, 薛亮

航空工业西安航空制动科技有限公司, 陕西 西安 710065

摘要:为实现民用客机碳刹车盘组件的国产化,开展碳刹车盘组件的研制工作。本文采用整体针刺毡+化学气相沉积(CVD)工艺制备该型飞机碳刹车盘,其平均密度达到 1.769g/cm^3 ,高于国外OEM样件。整体针刺毡结构的引入,使碳刹车盘的力学性能要明显优于国外OEM件,提高了刹车材料及飞机的安全性。同时,该碳刹车材料摩擦性能的离散性小于国外OEM件,在刹车过程中冲击力较小,提高了飞机的操稳性,延长了起落架的寿命。

关键词:碳/碳复合材料刹车盘;物理性能;力学性能;摩擦磨损性能

中图分类号:TB332

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2019.12.012

由于碳/碳复合材料具有密度低、耐高温、抗腐蚀、摩擦磨损性能优异、抗热振性好及不易发生突发灾难性破坏等一系列优点,现已成为航空制动装置的首选刹车材料。1976年,英国Dunlop航空公司的碳/碳复合材料飞机刹车盘首次在“协和”号超声速飞机上试飞成功,随后碳/碳刹车盘逐渐用于高速军用飞机和大型民用飞机作为刹车盘^[1]。现代的高性能民用客机,如波音747、波音757、波音767、空客系列、麦道系列等都采用碳/碳复合制动材料刹车装置^[2]。

随着我国经济的不断发展和经济全球化的深入,整个航空业呈现出快速发展的趋势,国内营运机队数量及规模的不断扩大,给民航产品业务发展带来了巨大的机遇^[3]。而飞机刹车盘作为耗材,每次在磨损到标后都需要进行更换,市场需求量很大,目前主要依赖于进口。国外主要的碳刹车盘制造商有法国赛峰公司(米歇尔)、美国联合航空运输公司(古德里奇)、霍尼韦尔与英国的美捷特公司^[4]。国内主要有北摩高科、长沙鑫航和西安超玛科技有限公司^[5]。国外公司(OEM件)采用短纤维模压工艺生产碳刹车盘,具有良好的摩擦磨损性能,但是其力学性能相对偏低^[6]。为了进一步提高碳刹车盘的力学性能,以提升刹车材料及飞机的安全性,西安航空制动科技有限公司采用整体针刺毡

联合化学气相沉积工艺制备碳刹车盘。本文将对西安航空制动科技有限公司(简称西安制动)制造的国产化样件与国外OEM碳刹车盘样件力学、热物理及摩擦性能进行对比,分析其制备方法与各项性能之间的差异,最终实现碳刹车盘国产化,现已为国内数十架客机提供碳刹车盘组件,累计生产万余盘。

1 样件制备

1.1 国产PMA样件制造过程

国产PMA样件工艺方法为整体针刺毡+化学气相沉积(CVD)工艺,其工艺流程如图1所示。

西安制动民用客机碳刹车盘的预制体采用一层进口HTA 12K PANCF无纬布与一层进口HTA 12K PANCF网胎,无纬布为 $0^\circ/90^\circ$ 铺层,按照“无纬布-网胎-无纬布-网

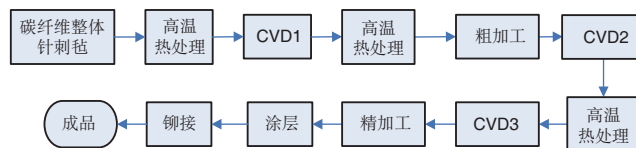


图1 国产PMA件工艺流程图

Fig.1 Process flow chart of home-made PMA products

收稿日期: 2019-10-11; 退修日期: 2019-10-29; 录用日期: 2019-11-20

*通信作者. Tel.: 029-38249747 E-mail: llhapp198123@126.com

引用格式: Liu Haiping, Xue Liang. Preparation and performance analysis of carbon brake disc for a passenger aircraft [J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(12): 76-80. 刘海平, 薛亮. 民用客机碳刹车盘的制备及性能研究[J]. 航空科学技术, 2019, 30(12): 76-80.

胎”方式铺层到一定厚度时进行连续针刺而成,使得针刺纤维由于摩擦作用保留在毡体内部而成为垂直方向的纤维^[7],最终预制体体积密度为 $(0.45\pm 0.03)\text{g}/\text{cm}^3$ 。由于低密度预制体内部孔隙直径较大,气体进入孔隙更加容易,沉积过程中气体由Kundsén扩散逐步变为Fick扩散,从而使得扩散速率大于沉积速率,有效地缓解了沉积过程中碳刹车盘表面结壳现象,有利于增密^[8]。

而CVD工艺起源于20世纪60年代^[9],基本过程是,将气态先驱体(甲烷、丙烯、丙烷或者天然气等碳氢气体)送达多孔的碳纤维预制体中,使先驱体在纤维表面上发生化学反应,生成不挥发的产物并沉积,形成热解碳(PyC)基体得到预期密度($\geq 1.75\text{g}/\text{cm}^3$)的多孔碳/碳复合材料。如图2所示。

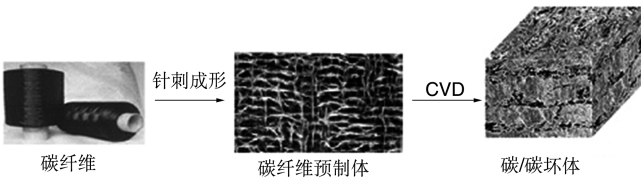


图2 整体针刺毡示意图

Fig.2 Schematic diagram of integral needle-felt

1.2 国外OEM样件生产过程

国外OEM件工艺方法为短纤维模压工艺,其工艺流程如图3所示。

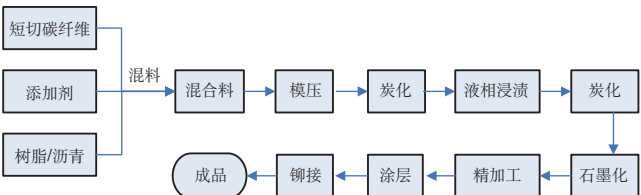


图3 国外OEM件工艺流程图

Fig.3 Process flow chart of foreign OEM products

霍尼韦尔公司生产的民用客机碳刹车盘采用短纤维模压预制体工艺^[10]。该工艺方法是将纤维束从线轴经过打捻器得到纤维绳,通过分散头把多个纤维绳均匀分散,经切刀切短后杂乱地散落在已装有树脂的模压形腔内,底部圆盘传输器能保证短纤维绳杂乱且均匀落入模腔内,当短纤维绳达到重量后热压成形,预成形后再次浸入树脂,并用专用夹具定型放入烘箱固化成形,再炭化、致密化、机加工至成品。

目前,美国制造的军机及商用MD-90飞机均采用了短

纤维模压预制体制备碳刹车盘。不连续碳纤维增强的各种复合材料,具有成形工艺简单、制备成本低廉等特点,其应用前景较连续碳纤维增强的各种复合材料更具有诱惑力。然而,短纤维模压预制体中纤维为不连续分布,并随机取向,其最大的弱点是力学性能偏低,这在很大程度上与其制备工艺密切相关。

2 性能分析

2.1 力学及热物理性能

碳/碳复合制动材料的性能主要包括密度、石墨化度和热导率,每种性能对航空刹车用碳/碳复合制动材料来说至关重要。下面将对西安制动公司生产的民用碳刹车盘与国外原样件进行性能对比。

分别取OEM样件和PMA样件两个样本,进行了力学性能和热物理性能测试,结果见表1。

表1 性能测试结果

Table 1 Performance test results

测试项目	霍尼韦尔(OEM件)		国产化样件(PMA件)	
	样本1	样本2	样本1	样本2
平均密度/(g/cm^3)	1.702		1.769	
石墨化度/%	66.0	68.0	17.0	16.0
综合热导率/($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)	44.5	48.0	23.0	22.5
拉伸强度//MPa	22.1	17.3	60.0	77.3
压缩强度 $\perp$ /MPa	80.0	84.5	135.3	129.4
压缩强度//MPa	62.1	—	78.9	—
弯曲强度 $\perp$ /MPa	73.0	70.4	164.2	140.4
弯曲强度//MPa	70.29	84.5	197.1	126.3
剪切强度 $\perp$ /MPa	34.8	30.4	45.4	40.0
层间剪切强度/MPa	6.1	7.2	13.0	11.6

民用客机PMA与OEM样件力学性能对比

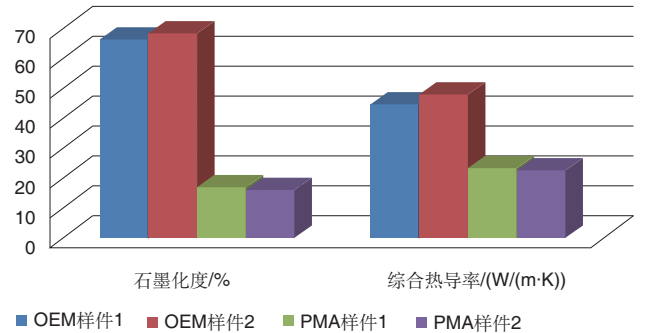


图4 民用客机PMA与OEM样件物理性能对比

Fig.4 Physical properties of PMA and OEM products

如表1和图4所示,民用客机PMA样件的平均密度为 $1.769\text{g}/\text{cm}^3$,石墨化度为17%和16%,综合热导率为 $23\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和 $22.5\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;而OEM样件的平均密度为 $1.702\text{g}/\text{cm}^3$,石墨化度为66%和68%,综合热导率为 $44.5\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和 $48\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。西安制动生产的民用客机碳刹车盘的密度高于国外原样件密度,而物理性能低于国外原样件。

首先,密度是碳/碳复合制动材料致密化程度的直接反映,是使材料的其他重要性能得以发挥的基础和前提。碳/碳复合制动材料密度取决于碳纤维的密度、基体碳的密度及孔隙度的大小。西安制动采用整体针刺毡+CVD工艺使得成品密度可以达到 $1.75\text{g}/\text{cm}^3$ 以上。其次,石墨化度是碳/碳复合制动材料的一个重要结构参量,它反映了材料中碳结构与理想石墨晶体结构的接近程度,并且与材料最终的力学性能和摩擦磨损性能密切相关。石墨化度的大小与热处理温度有关,高温热处理通常在 $2400\sim 3000\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度范围进行,以促进六方晶石墨结构的生成。通过石墨化处理,碳/碳复合材料的热导率可由 $10\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 提高到 $120\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。最后,热导率是碳/碳复合制动材料的一个极其重要的物理性能指标,因为在制动过程中碳/碳材料必须具有吸收和传递大量热量、保证刹车装置正常工作的能力。碳/碳复合制动材料的导热性能取决于碳纤维与基体碳各自对热传导的贡献。影响基体碳热导率的主要因素有结构、密度和石墨化度,而碳纤维对碳/碳复合制动材料的热导率的贡献取决于碳纤维的体积分数、取向以及其本身的热导率。

与此同时,根据民用客机碳盘的研制经验与外场实际使用情况,该碳盘采用不进行最终高温热处理的工艺来增加碳盘中生碳的含量,由此使得其热导率和石墨化度较低。然而,经过试验验证表明,由现有工艺制备的XX PMA碳盘刹车性能稳定,能够完全满足设计要求。

如表1和图5所示,民用客机PMA样件的平行毡层方向拉伸强度为60MPa和77.3MPa,垂直毡层方向压缩强度为135.3MPa和129.4MPa,平行毡层方向压缩强度为78.9MPa,垂直毡层方向弯曲强度为164.2MPa和140.4MPa,平行毡层方向弯曲强度为197.1MPa和126.3MPa,垂直毡层方向剪切强度为45.4MPa和40MPa,层间剪切强度为13MPa和11.6MPa;而OEM样件的平行毡层方向拉伸强度为22.1MPa和17.3MPa,垂直毡层方向压缩强度为80MPa和84.5MPa,平行毡层方向压缩强度为62.1MPa,垂直毡层方向弯曲强度为73MPa和70.4MPa,平行毡层方向弯曲强度为70.29MPa和84.5MPa,垂直毡层方向剪切强度为34.8MPa和30.4MPa,

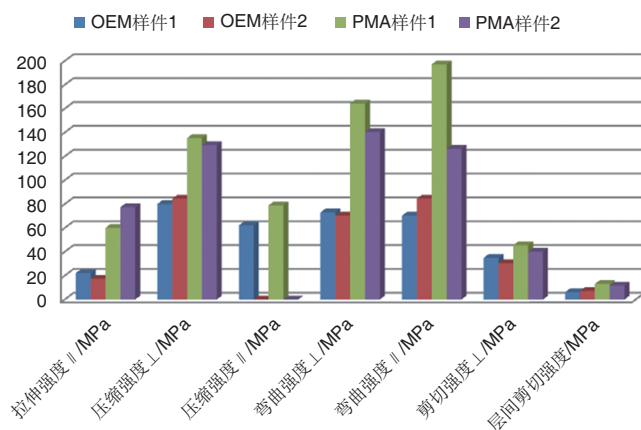


图5 民用客机PMA与OEM样件力学性能对比

Fig.5 Mechanical properties of PMA and OEM products

层间剪切强度为6.1MPa和7.2MPa。

由此可见,民用客机PMA样件的力学性能明显优于国外原样件的力学性能。影响碳/碳复合制动材料力学性能的主要因素有碳纤维的类型、体积分数与增强方式(坯体结构)、纤维与基体碳间界面的状态、基体碳的类型与结构、材料密度以及高温热处理(石墨化等)。一般地,随密度的提高,碳/碳材料的力学性能提高,并且由于坯体和致密化工艺的不同,所得到的碳/碳复合制动材料的力学性能也会有很大的不同。然而,较高的力学性能能够提高碳刹车盘的使用寿命,保证良好的刹车性能。

2.2 摩擦性能

碳刹车盘的摩擦功能是作为飞机制动材料的结构、摩擦、吸热三大功能中最为关键的特征,用于飞机的滑行、着陆、停机和中止起飞等各种条件下的停机刹车、差动刹车、自动刹车、正常刹车、应急刹车以及起落架收上时主轮的止转刹车。下面对西安制动公司生产的民用客机碳刹车盘与国外原样件进行大样试验对比。

民用客机国产PMA件力矩峰值的波动范围为 $60.66\sim 70.37\text{kN}\cdot\text{m}$,其离散系数为0.043;平均力矩的波动范围为 $50.35\sim 56.76\text{kN}\cdot\text{m}$,其离散系数为0.033;减速率的波动范围为 $3.53\sim 3.94\text{m}/\text{s}^2$,其离散系数为0.029。而国外原样件力矩峰值的波动范围为 $65.98\sim 84.29\text{kN}\cdot\text{m}$,其离散系数为0.061;平均力矩的波动范围为 $48.41\sim 58.29\text{kN}\cdot\text{m}$,其离散系数为0.053;减速率的波动范围为 $3.41\sim 4.01\text{m}/\text{s}^2$,其离散系数为0.051。

由此可见,国外原样件刹车盘的力矩峰值和平均力矩的波动范围较大、刹车性能相对不稳定,而西安制动公司生产的民用客机碳刹车盘的力矩峰值和平均力矩均较为稳定,在刹车过程中冲击力较低,对于提高飞机的操稳性和延

长起落架的寿命都有很大的作用。

3 结论

本文通过采用整体纤维针刺毡+CVD 沉积工艺方法, 制备了民用客机碳/碳刹车盘组件, 实现了民用客机碳刹车盘的国产化。

通过对生产的民用客机碳刹车盘与国外样件进行对比分析, 结果表明:

(1) 生产的民用客机碳刹车盘平均密度达到 1.769g/cm^3 , 高于国外样件的平均密度 1.702g/cm^3 。

(2) 由于工艺方法的不同, 生产的民用客机碳刹车盘的石墨化度和综合导热率低于国外样件。

(3) 生产的民用客机碳刹车盘的各项力学性能指标均高于国外样件。

(4) 生产的民用客机碳刹车盘的力矩峰值和平均力矩均较为稳定, 在刹车过程中冲击力较低, 对于提高飞机的操稳性和延长起落架的寿命都有很大的作用, 刹车性能优于国外样件。

为了进一步提高石墨化度和综合热导率, 建议可采取进行最终热处理工艺。在满足各项力学性能及摩擦磨损性能的前提下, 提高石墨化度及综合热导率, 提高刹车性能, 延长刹车盘的使用寿命。

AST

参考文献

- [1] 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.
Chang Shunhong, Tian Guanglai, Lin Hui. Development of China aviation wheel and brake system [J]. Aeronautical Science & Technology, 2003(5): 24-26. (in Chinese)
- [2] 杨尊社. 航空机轮刹车系统研究新进展[J]. 航空精密制造技术, 2002, 38(6): 20-23.
Yang Zunshe. New development of aviation wheel and brake system[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2002, 38(6): 20-23. (in Chinese)
- [3] 刘海平, 田广来, 张立同, 等. “三明治”碳/碳复合材料及其摩擦磨损性能 [J]. 碳素技术, 2012, 31(3): 19-22.
Liu Haiping, Tian Guanglai, Zhang Litong, et al. Carbon/Carbon composites with sandwich structure and their frictional wear properties [J]. Carbon Techniques, 2012, 31(3): 19-22. (in Chinese)
- [4] 李贺军, 罗瑞盈, 杨峥. 碳/碳复合材料在航空领域的应用研究现状[J]. 材料工程, 1997(8): 8-10.

Li Hejun, Luo Ruiying, Yang Zheng. Application research status of 碳/碳 composites in aviation field[J]. Material Engineering, 1997(8): 8-10. (in Chinese)

- [5] 田广来. 碳/碳复合材料刹车盘刹车性能研究 [J]. 航空学报, 1993, 14(12): 645-648.

Tian Guanglai. The study of brake property of brake discs carbon/carbon composite [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1993, 14(12): 645-648. (in Chinese)

- [6] 田广来. 民用飞机碳刹车盘国产化适航审查与标准化的探讨[J]. 航空标准化与质量, 2008(4): 18-20.

Tian Guanglai. Discussion on airworthiness examination and standardization of domestic carbon brake disc for civil aircraft [J]. Airworthiness Standardization and Quality, 2008(4): 18-20. (in Chinese)

- [7] 刘海平, 张立同, 田广来, 等. “三明治”型预制体结构对碳/碳刹车材料的影响[J]. 碳素技术, 2011(1): 142-147.

Liu Haiping, Zhang Litong, Tian Guanglai, et al. Effect of sandwich prefabrication structure on 碳/碳 brake materia[J]. Carbon Techniques, 2011(1): 142-147. (in Chinese)

- [8] 杨尊社, 曲德全, 梁勇光. 高温热处理对碳/碳复合材料刹车盘尺寸的影响[J]. 碳素技术, 2004, 23(3): 22-24.

Yang Zunshe, Qu Dequan, Liang Yongguang. Effect of high temperature treatment on dimension of carbon brake disc [J]. Carbon Techniques, 2004, 23(3): 22-24. (in Chinese)

- [9] 杨尊社, 曲德全, 陈志军, 等. 碳/碳刹车材料CVD 制备工艺研究[J]. 新型碳材料, 1999, 14(4): 75-78.

Yang Zunshe, Qu Dequan, Chen Zhijun, et al. Study on CVD preparation technology of 碳/碳 brake material[J]. New Carbon Materials, 1999, 14(4): 75-78. (in Chinese)

- [10] 雷玥, 李瑞珍, 谢惠贞. 碳/碳复合材料预制体结构对摩擦性能的影响[J]. 碳素技术, 2018, 177(4): 27-31.

Lei Yue, Li Ruizhen, Xie Huizhen. Influence of preform structure on friction properties of carbon/carbon composites [J]. Carbon Techniques, 2018, 177(4): 27-31. (in Chinese)

(责任编辑 王昕)

作者简介

刘海平(1981—)男, 博士, 研究员级高级工程师。主要研究方向: 高温碳基刹车材料的制备及其工程化应用。

Tel: 029-38249747 E-mail: llh198123@126.com

薛亮(1986—)男,博士,高级工程师。主要研究方向:高温
碳基刹车材料的制备及其工程化应用。

Tel: 029-38249747

E-mail:287539950@qq.com

Preparation and Performance Analysis of Carbon Brake Disc for a Passenger Aircraft

Liu Haiping*, Xue Liang

AVIC Xi'an Aviation Brake Technology Co., Ltd., Xi'an 710065, China

Abstract: In order to realize the localization of carbon brake disc components of a certain type of passenger aircraft, AVIC Xi'an Aviation Brake Technology Co., Ltd. carried out the research and development. Combined with Chemical Vapor Deposition (CVD), the integral needle-felt was used to fabricate the aircraft brake disc. The average density was 1.769g/cm^3 , mechanical properties was better than foreign carbon brake disc, and the safety was improved. Meanwhile, the dispersion of friction properties was less than that of foreign carbon brake disc. The impact was smaller during braking, that was improved the stability of the aircraft and extended the life of the landing gear.

Key Words: carbon brake disc; physical properties; mechanical properties; friction and wear properties

Received: 2019-10-11; Revised: 2019-10-29; Accepted: 2019-11-20

*Corresponding author. Tel. : 029-38249747 E-mail: llhcpp198123@126.com