

碳纤维织物/环氧复合材料销钉连接实验研究

Experimental Study on Pinned Joints Strength of Satin Carbon Fabric/Epoxy Composites

刘建超^{1,2}, 王铁军¹, 张 炜²

(1 西安交通大学 工程力学系, 西安 710049; 2 西安航天复合材料研究所, 西安 710025)

LIU Jian-chao^{1,2}, WANG Tie-jun¹, ZHANG Wei²

(1 Department of Engineering Mechanics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2 Xi'an Aerospace Composites Research Institute, Xi'an 710025, China)

摘要: 针对 1K 缎纹碳纤维织物/环氧复合材料层板销钉连接, 实验研究了几何参数对连接性能的影响。选取了不同的端距和边距, 测试了碳纤维织物复合材料层板 W/D (试样宽度/孔直径) 及 E/D (孔端距/孔直径) 对销钉连接强度的影响, 并分析了销钉连接的破坏模式。实验结果表明: 1K 缎纹织物/环氧复合材料层板销钉连接承载能力随着边距 E 和端距 W 的增加而增加, 当 $E/D=2$, $W/D=3$ 时, 销钉连接强度达到稳定值, 此后增加边距 E 和端距 W 值连接强度不会有明显的增加。

关键词: 连接; 织物复合材料; 销钉; 挤压强度

中图分类号: T Q342 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2005)07-0051-04

Abstract: The effect of specimen width to hole diameter ratio (W/D), and the ratio of edge distance to hole diameter (E/D) on the bearing strength of satin carbon fabric/epoxy composites was performed experimentally. Single-hole pin-loaded specimens were tested for their tension response. Failure propagation and failure type were observed on the specimens. The influence of the joint geometry on the strength of the pin-loaded composites was assessed. The experimental results show that the load capacity of carbon fabric reinforced epoxy laminates with pin connection was increased by increasing W and E . However increasing the E/D ratio beyond 2 and increasing the W/D ratio beyond 3 have an insignificant effect on the load capability of the connection.

Key words: joint; fabric composite; pin; bearing strength

复合材料具有较高的比强度、比模量, 在航空、航天等领域得到了广泛的应用。由于其特有的各向异性及设计性强等特点, 使复合材料的连接结构设计具有很大的复杂性, 复合材料连接接头通常成为结构的薄弱环节。在连接结构设计中, 机械连接具有承载能力大、结构可靠性高、成本低、易于装配等特点, 是广泛采用的一种连接方式。纤维复合材料机械连接强度及破坏模式与接头的几何参数、纤维的铺层方向、铺层顺序等多种因素有关, 很多学者对此进行了大量的实验研究和分析工作^[1-6], 得出了很多指导性的设计数据和结论^[7, 8]。

近年来织物复合材料的应用越来越多, 但织物复合材料连接方面的研究报道较少。Matthews F L^[9]研究了碳/玻璃混杂织物螺栓连接挤压强度, Okutan B^[10]及 Icten B M^[11]等人实验研究了碳/玻璃混杂织物和玻璃纤维织物复合材料销钉连接接头几何参数对连接性能

的影响, 并进行了有限元数值模拟。由于织物复合材料与单向纤维铺层复合材料结构、性能的不同, 连接接头的最佳几何参数也不相同。本工作针对高性能碳纤维织物复合材料销钉连接结构, 实验研究了几何参数对连接性能的影响。选取了不同的端距和边距, 测试了碳纤维织物复合材料层板 W/D (试样宽度/孔直径) 及 E/D (孔端距/孔直径) 对销钉连接强度的影响, 并分析了销钉连接的破坏模式, 为织物复合材料的结构设计及后续的研究工作奠定了一定的实验基础。

1 实验

1.1 原材料及性能

增强材料: 1K 5 枚缎纹碳布, 经/纬纱密度: 90 根/130 根/10cm, 面密度: 144g/m^2 , 厚度: 0.27mm, 所用纤维为日本东丽公司生产的 HTA-1K 碳纤维。

树脂基体: 混合环氧/ 芳香胺树脂体系 AE22。增强材料及树脂基体的主要性能见表 1。

表 1 原材料的主要性能

Table 1 Main properties of carbon fiber and epoxy resin

Material	Tensile strength/ MPa	Young' s modulus/ GPa	Fracture strain/ %	Density / (g · cm ⁻³)
Epoxy resin	98	4.0	4.0	1.25
Carbon fiber	3530	235	1.5	1.76

1.2 试样制备

复合材料层板制作采用织物预浸布模压成型。碳纤维织物通过多功能浸胶机预浸胶, 制作成预浸碳布, 裁剪后在压制平板上铺设, 铺设时各层织物经/ 纬向严格排布, 铺设到要求厚度后, 在热压机上热压成型。固化制度: RT - 80℃/ 1.5h - 100℃/ 2h - 120℃/ 2h - 150℃/ 4h, 成型压力 0.5MPa。固化后的层板厚度 2mm, 树脂含量 40% (质量分数)。板形件脱模后按相关标准进行机加, 制作试样。碳纤维层板的力学性能见表 2。

表 2 1K 缎纹碳布/ 环氧复合材料基本力学性能

Table 2 Mechanical properties of woven fabric/ epoxy composites

Properties	Average value	Mean square deviation	C _v / %	Number of samples
Weft tensile strength/ MPa	761.2	114.7	15	5
Warp tensile strength/ MPa	392.6	29.5	7.5	5
Weft compressive strength/ MPa	635.5	53.1	8.3	10
Warp compressive strength/ MPa	353.1	23.1	6.5	6
In-plane shear strength/ MPa	105.2	13.8	13	5
Interlaminar shear strength/ MPa	79.5	3.1	3.9	6
Weft tensile modulus/ GPa	62.1	0.5	5.8	5
Warp tensile modulus/ GPa	50.9	0.9	17	5
Weft compressive modulus/ GPa	54.0	2.7	4	10
Warp compressive modulus/ GPa	40.3	2.0	4.9	6
In-plane shear modulus/ GPa	4.7	1.0	21	5
Poisson' ratio μ _{xy} *	0.085			
Poisson' ratio μ _{yx}	0.118	0.024	19	7

* x —warp direction, y —weft direction; C_v = mean square deviation/ average value

实验采用的试样为长方形试样, 试样长度 L = 100mm, 厚度 t = 2mm, 连接孔直径 d = 5mm, 试样的基本形状尺寸如图 1 所示。为研究接头几何参数的影响, 试样选取了一系列的宽度和端距: 试样宽度分别为 10, 18, 25, 端距分别为 5, 10, 15, 20, 25, 共 15 组试样, 每组试样数为 5 个。试样长度方向为织物的纬向, 纬纱密度为 130 根/ 10cm。为了比较织物经、纬密度对

连接性能的影响, 还制作了 E/D = 3, W/D = 5 的经向连接试样(长度方向纤维密度 90 根/ 10cm)。

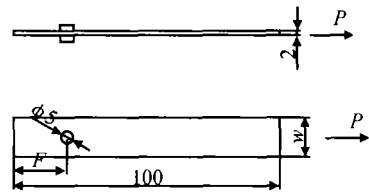


图 1 织物复合材料销钉连接层板试样

Fig. 1 Geometry of fabric composite plate with a circular hole

1.3 性能测试

销钉连接性能测试参考 GB7559 —87 纤维增强塑料层板螺栓连接挤压强度实验方法进行。销钉连接实验采用的实验夹具和载荷加载方式如图 2 所示。实验在 Instron 4505 材料试验机上进行, 加载速率为 1mm/min, 实验过程中设备自动记录加载孔的变形和载荷值, 绘制孔位移-载荷曲线。试样正式加载前先预拉伸, 以消除孔间隙等因素带来的影响。

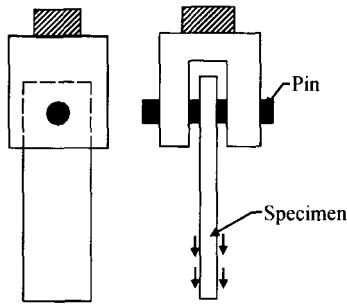


图 2 实验夹具

Fig. 2 Testing fixture

销钉孔挤压强度按下式计算:

$$\sigma_b = \frac{P}{Dt}$$

式中: P ——挤压损伤载荷值, D ——销钉孔直径, t ——试样厚度。

2 结果与讨论

实验分别进行了不同接头几何参数 W/D 及 E/D 销钉连接挤压实验。图 3 是销钉孔变形-载荷曲线, 图中分别给出了 E/D = 1, 2, 3, 4, 5 及 W/D = 2, 3, 5, 5 时所对应的孔位移-载荷曲线。可以看出, 各曲线起始段均为直线, 且斜率基本相同。初始损伤后(曲线出现斜率变化点), 不同几何参数的实验, 曲线表现出不同的特征。表 3 列出了不同连接几何参数的试样初始破坏载荷和最大破坏载荷值。

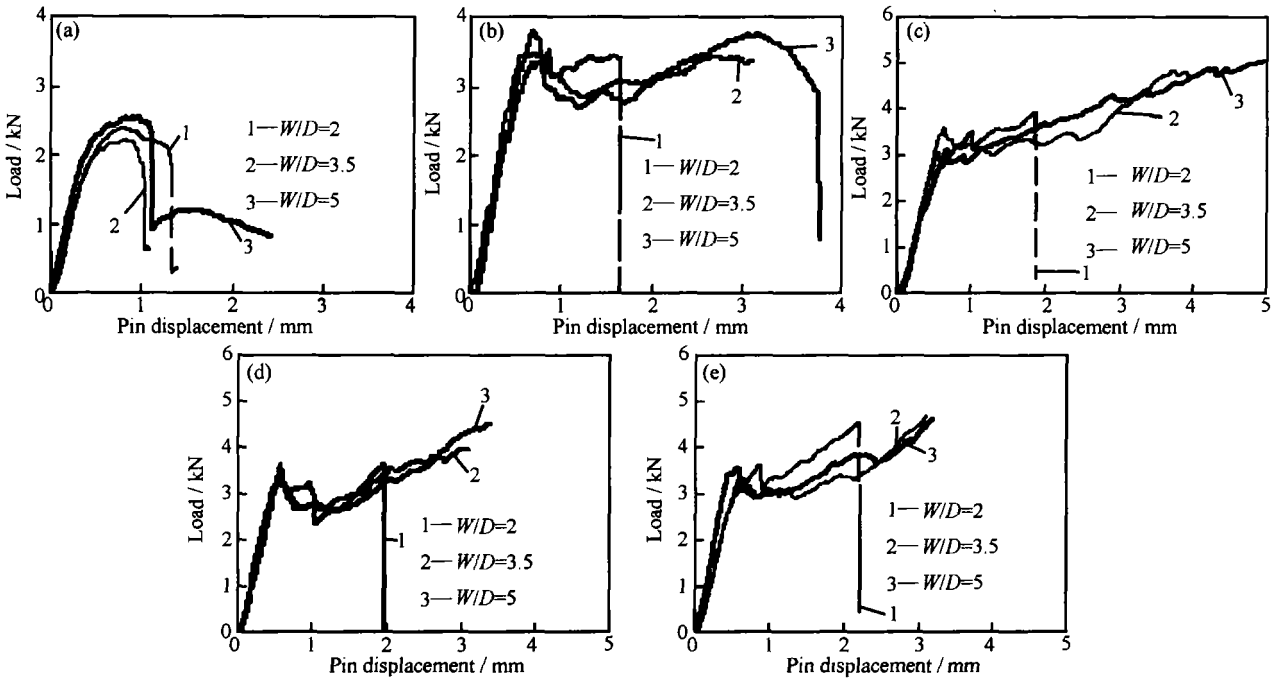


图 3 销钉连接载荷-位移曲线

Fig.3 Typical load-displacement curves for pin-loaded laminates
(A) $E/D=1$; (b) $E/D=2$; (c) $E/D=3$; (d) $E/D=4$; (e) $E/D=5$

从图 3 及表 3 可以看出,不同接头几何参数,试样的承载能力不同,同时试样的初始破坏载荷和最大破坏载荷值也不相同。在工程应用中,可以认为当试样出现初始损伤后,试样就发生了破坏,故在下面的分析中,试样的承载能力认为是试样发生初始破坏时的值。当 $E/D=1$ 时,连接承载能力只有其它试样的 60% 左右。增加试样端距,可以增加接头的承载能力,但当 $E/D \geq 2$ 时,试样的承载能力基本相同。实验发现当 E/D 相同, $W/D=2 \sim 5$ 时,试样的承载能力没有大的变化,说明 $W/D \geq 2$ 时, W/D 对承载能力没有大的影响。图 4 和图 5 分别给出了不同 E/D 及 W/D 时,织物层板的挤压强度(按初始破坏载荷计算)。

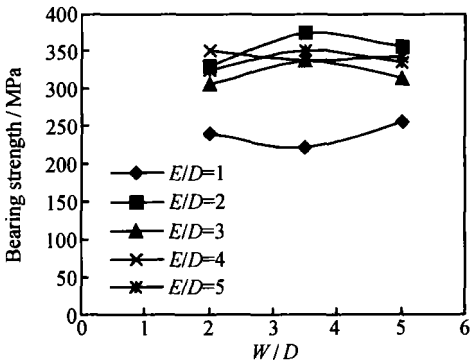


图 4 试样端距对挤压强度的影响

Fig.4 Effect of edge distance on the bearing strength

表 3 不同几何参数连接接头的销钉承载能力

Table 3 Failure loads for pin joints of different geometry

		$W/D=2$	$W/D=3.5$	$W/D=5$
$E/D=1$	First failure load/N	2402	2223	2508
	Maximum failure load/N	2402	2223	2508
$E/D=2$	First failure load/N	3409	3732	3556
	Maximum failure load/N	3409	3732	3556
$E/D=3$	First failure load/N	3468	3360	3540
	Maximum failure load/N	3909	4868	5044
$E/D=4$	First failure load/N	3505	3374	3428
	Maximum failure load/N	3586	5036	4564
$E/D=5$	First failure load/N	3493	3516	3331
	Maximum failure load/N	4150	4496	4531

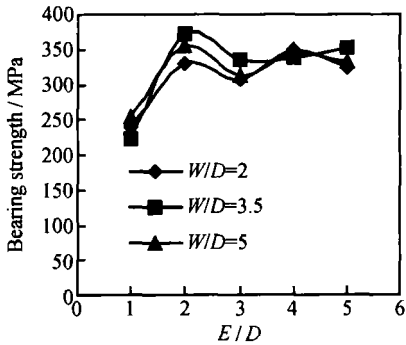


图 5 试样边距对挤压强度的影响

Fig.5 Effect of width distance ratio on the bearing strength

从试样的位移-载荷曲线(图 3)可以看出,不同的 E/D 及 W/D , 试样的位移-载荷曲线不同。当 $E/D=$

1 时,销钉孔位移达到 1~ 1.3mm 时,试样突然发生断裂破坏,破坏模式为剪切破坏模式(图 6c)。增加端距 $E/D \geq 2(W/D \geq 3.5)$,试样的位移-载荷曲线表现为:加载初始段为直线,当出现初始损伤后,载荷值先下降,然后随着孔位移的增加,载荷值在一定的区域内缓慢变化,试样的初始破坏模式为挤压破坏(图 6a),随着变形的进一步增加,试样最终表现为孔的挤压剪切混合破坏;当 $W/D = 2$ 时,受载孔的变形达到一定的值时,试样突然失效,试样的破坏模式为典型的拉伸破坏

坏模式(图 6b)。观察破坏试件可以看到,除 $E/D = 1$ 的试件外,所有试件孔边受载区均出现挤压的破坏形式。

从图 3 还可以看出,当 $E/D \geq 2, W/D > 2$ 时,即试样端距及边距足够大,试样的最终破坏载荷大于初始破坏载荷。

综合分析试样的初始损伤载荷、最终破坏载荷及试样破坏模式,可以认为当试样的 $E/D \geq 2$ 及 $W/D \geq 3$ 时,接头强度达到稳定值。

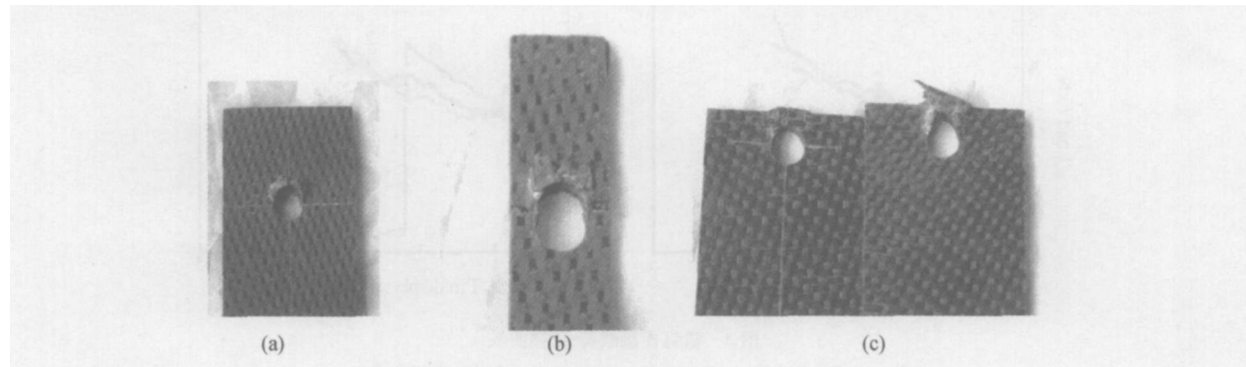


图 6 织物层板销钉连接破坏形貌 (a) 挤压破坏; (b) 拉伸破坏; (c) 剪切破坏

Fig. 6 Failure appearance of pin joints specimen of fabric composites (a) bearing; (b) net-tension; (c) shear-out

对于定向纤维复合材料,连接接头几何参数的设计要求随着铺层方向的不同而不相同,但临界 $E/D, W/D$ 的值通常大于 3~ 4^[7,8,12],从本研究的实验数据可以看出,1K 缎纹碳织物/环氧复合材料销钉连接的临界端距和边距分别是 $E/D \geq 2, W/D \geq 3$,与文献[10,13]的研究基本相近。这可以从织物复合材料的结构特点来解释,织物经、纬纱的交织点明显阻止了面内裂纹的扩展,从而表现出对边距及端距的要求低于纤维复合材料。

本研究采用的织物经、纬向编织密度不同,实验同时进行了经向销钉连接强度测试,以比较织物经纬向编织密度对连接性能的影响,在经向织物层板中,0°/90°的铺层比例可以认为是 0°/90°= 41%/59%。经向销钉连接试样采用 $E/D = 2, W/D = 5$,销钉连接强度数据见表 4,表中同时给出了相同几何参数的纬向层板承载能力。

从表 4 可以看出,织物层板经向销钉连接承载能力 3964N,高于纬向试样的承载能力。关于织物经、纬向铺层比例对连接性能的影响,还需要进一步的研究。

表 4 层板不同方向的销钉承载能力

Table 4 Load carrying ability of laminates of different direction						
Sample	1	2	3	4	5	Average
Weft load/kN	3809	3556	3546	3173	3594	3536
Warp load/kN	3924	3813	4156			3964

3 结论

(1) 连接接头的几何参数是影响碳纤维织物复合材料销钉连接强度的关键因素,织物复合材料机械连接强度随着端距(E/D)和边距(W/D)的增加而增加,当 $E/D \geq 2, W/D \geq 3$ 时,接头性能达到稳定值。

(2) 碳纤维织物复合材料销钉连接接头的破坏模式主要表现为拉伸破坏、剪切破坏、挤压破坏的一种或其组合破坏模式。不同的接头几何参数,试样的破坏模式不同,当 W/D 较小时($W/D \leq 2$),破坏模式主要表现为拉伸破坏;当 E/D 较小时($E/D \leq 2$),破坏模式主要为端部剪切破坏;当接头几何参数超过最小值($E/D \geq 2, W/D \geq 3$)时,破坏模式为挤压破坏和剪切破坏混合模式。

参考文献

[1] COLLINGS T A. The strength of bolted joints in multi-directional CFRP laminates[J]. Composites, 1977, 8: 43- 55.
[2] OKUTAN B. The effects of geometric parameters on the failure strength for pin-loaded multi-directional fiber-glass reinforced epoxy laminate[J]. Composites Part B, 2002, 33: 567- 578.
[3] OUINN W J, MATTHEWS F L. The effect of stacking sequence on the pin-bearing strength in glass fiber reinforced plastic[J]. J Comp Mater, 1977, 11: 139- 145.
[4] AKTAS A, DIRIKOLU M H. The effect of stacking sequence of

magnetomechanical properties of [112]-oriented terfenol-D/epoxy 1- 3 magnetostrictive particulate composites[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93: 8510- 8512.

[10] 钟文定. 铁磁学[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 26- 28.

[11] 方忠, 姚凯伦, 刘祖黎. 有机强磁体研究进展[J]. 物理, 1995, 24 (9): 528- 533.

[12] GEOFFREY P MCKNIGHT. [112] Oriented Terfenol-D composites[D]. Los Angeles: University of California, 2002.

[13] HUDSON J, BUSBRIDGE S C, PIERCY A R. Magnetomechanical coupling and elastic module of polymer-bonded terfenol composites[J]. Journal of Applied Physics, 1998, 83: 7255- 7257.

[14] GUO Z J, BUSBRIDGE S C, PIERCY A R, et al. Effective magnetostriction and magnetomechanical coupling of terfenol-D composites[J]. Applied Physics Letter, 2001, 78: 3490- 3492.

[15] SANDLUND L, FABLANDER M, CLARK A E, et al. Magnetostriction, elastic module and coupling factors of composites terfenol-D[J]. Journal of Applied Physics, 1994, 76: 5656- 5658.

[16] DUENAS T A, CARMAN G P. Particle distribution study for low-volume fraction magnetostrictive composites[J]. Journal of Applied Physics, 2001, 90(5): 2433- 2439.

[17] PASQUALE M, LIM S H. High frequency magnetic properties of polymer-bonded terfenol-D composites[J]. Journal of Applied Physics, 1999, 85(8): 4633- 4635.

[18] 解伟, 吴双霞, 江丽萍. 粉末冶金粘结磁致伸缩材料[J]. 金属功能材料, 2001, 8(4): 29- 32.

[19] ORS W, NESSESIAN N, MCKNIGHT, G P, et al. Dynamic magnetomechanical properties of [112] - oriented Terfenol-D/epoxy 1- 3 magnetostrictive particulate composites[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93: 8510- 8512.

收稿日期: 2004-05-27; 修订日期: 2005-03-25

作者简介: 詹茂盛(1954-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高分子复合材料研究, 联系地址: 北京航空航天大学材料科学与工程学院(100083)。

(上接第 54 页)

carbon epoxy composite laminates on pinned joint strength[J]. Composite Structures, 2003, 62: 107- 111.

[5] 华玉, 郦正能, 寇长河. 复合材料单钉接头的损伤累积模拟[J]. 航空学报, 1995, 16(2): 186- 191.

[6] 关长文, 陈浩然, 成万植. 复合材料和结构机械连接件破坏历程的数值模拟和试验验证[J]. 航空学报, 1995, 16(2): 143- 147.

[7] 薛克兴, 周瑾. 复合材料结构连接件设计与强度[M]. 北京: 航空工业出版社, 1988.

[8] 汪裕炳. 复合材料的结构连接[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992.

[9] MATTHEWS F L, ROSHAN A A, PHILIPS L N. The bolt bearing strength of glass/ carbon hybrid composites[J]. Composites, 1982, 13: 225- 227.

[10] OKUTAN B, ASLAN Z, KARAKUZU R. A study of the effects of various geometric parameters on the failure strength of pin-loaded woven-glass fiber reinforced epoxy laminate[J].

Composite Science and Technology, 2001, 61: 1491- 1497.

[11] ICTEN B M, OKUTAN B, KARAKUZU R. Failure strength of woven glass fiber-epoxy composites pinned joints[J]. Journal of Composite Materials, 2003, 37(15): 1337- 1350.

[12] OKUTAN B, KARAKUZU R. The strength of pinned joints in laminated composites[J]. Composites Science and Technology, 2003, 63: 893- 905.

[13] OKUTAN B, KARAKUZU R. Progressive analysis of pin-load carbon-epoxy woven composite plates[J]. Composites Science and Technology, 2002, 62: 1259- 1271.

收稿日期: 2004-11-24; 修订日期: 2005-04-20

作者简介: 刘建超(1969-), 博士研究生, 从事树脂基复合材料及工艺研究, 联系地址: 西安市 101 信箱研发中心(710025)。

A380 超大型喷气式客机用 PM 高温合金盘

2006 年美国空中客车公司 A380 超大型喷气式客机正式投入运营, 它将使用一种由通用电气公司、普·惠公司和 NASA 公司共同研制的新型镍基高温合金制造的高温/ 高压涡轮盘(PM 盘)。

这种 PM 盘将在 GE 飞机发动机公司和普·惠公司联合开发的新型商务发动机 GP7200 上运转使用。

据 R& D 杂志报道, 这种粉末合金具有高强度/ 损伤容限, 而且能耐高温。与大多数现役发动机相比, 该合金在较高燃烧温度下使用时, 可有助于综合提高发动机燃料利用效率, 减少燃料的消耗, 排放物减少 5%。

GE 与普·惠公司的联盟成立于 1996 年, 旨在制造可容 450 座或更多座位的大型四发动机的客机。GP7000 系列发动机综合并改进了 GE90 和 PW4000 系列发动机的技术。PM 涡轮盘通常要经热压成型、挤压和等温锻造处理。

(徐)