

DOI:10.16356/j.1005-2615.2016.01.003

## 钛合金蜂窝壁板隔热性能试验研究

谢宗蕙<sup>1</sup> 岳喜山<sup>1,2</sup> 孙俊锋<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学航天学院, 西安, 710072; 2. 北京航空制造工程研究所, 北京, 100024)

**摘要:**针对钛合金蜂窝夹层结构的隔热性能进行试验研究。试验中研究了在 300 °C 稳态条件下, 蜂窝芯格尺寸、芯格高度和芯格壁厚等参数对隔热性能的影响规律; 分析了各几何参数对隔热性能敏感度; 测试了不同温度条件下钛合金蜂窝夹层结构壁板的等效导热系数。试验结果表明: 增大蜂窝芯格尺寸和芯格高度, 减少芯格壁厚均有利于提高蜂窝壁板的隔热效果; 不同几何参量对钛合金蜂窝夹层结构隔热效果的影响敏感程度从大到小依次为: 芯体高度、芯格尺寸和芯体壁厚; 钛合金蜂窝壁板的等效导热系数随温度的升高而增大, 相同温度下钛合金蜂窝壁板的等效导热系数约为钛合金材料的 3%~5%。

**关键词:**钛合金蜂窝壁板; 隔热性能; 试验研究

**中图分类号:** V414.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2016)01-0016-05

## Experimental Study on Thermal Insulation Performance of Titanium Honeycomb Sandwich Panels

Xie Zonghong<sup>1</sup>, Yue Xishan<sup>1,2</sup>, Sun Junfeng<sup>1</sup>

(1. School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072, China;

2. Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing, 100024, China)

**Abstract:** The thermal insulation performance of titanium honeycomb sandwich panels is evaluated by experimental method. The influence of different geometric parameters of honeycomb sandwich panels, such as core diameter, core cell height and core cell wall thickness, on the thermal insulation performance is studied at 300 °C; the sensitivity of above parameters to the thermal insulation performance is analyzed; moreover, the equivalent thermal conductivity of titanium honeycomb sandwich panels is tested at different temperature. The experimental results show that increasing the core cell height and core diameter and decreasing the core cell wall thickness can improve the insulation performance of titanium honeycomb sandwich panels; the sensitivity effect of honeycomb core height on the thermal insulation performance is the greatest, followed by the core cell diameter, and that of core cell wall thickness is the smallest; the equivalent thermal conductivity increases with the increase of temperature and is roughly about 3%—5% of the titanium materials.

**Key words:** titanium honeycomb sandwich panel; thermal insulation performance; experimental study

**收稿日期:** 2015-12-30; **修订日期:** 2016-01-25

**作者简介:** 谢宗蕙, 男, 1973 年生, 教授, 博士生导师。主要从事飞行器先进结构与复合材料方面研究。

**通信作者:** 谢宗蕙, E-mail: xzhae@nwpu.edu.cn.

**引用格式:** 谢宗蕙, 岳喜山, 孙俊锋. 钛合金蜂窝壁板隔热性能试验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(1): 16-20.  
Xie Zonghong, Yue Xishan, Sun Junfeng. Experimental study on thermal insulation performance of titanium honeycomb sandwich panels[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(1): 16-20.

随着高速、高机动飞行器的发展,航空、航天飞行器结构件要求能在较高温度环境下具有良好的刚度、强度和隔热性能。钛合金蜂窝夹层结构内蜂窝形成了无数个密封腔体,内部为真空状态,具有非常好的隔热效果;同时该结构具有质轻,比强度、比刚度高等优良特性,能够在  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上高温环境下长期工作。在先进飞行器不同部位上采用不同结构类型的钛合金蜂窝夹层结构,有利于满足飞行器减重、承载和隔热等功能要求,以进一步提高飞机的综合性能<sup>[1-2]</sup>。如:俄罗斯安-70 飞机防火隔墙采用钛合金蜂窝夹层结构,既达到减重效果,又起到了非常好的隔热作用;美国 F-22 飞机发动机舱门采用 TC4 钛合金蜂窝夹层结构,利用其隔热效果,有效提高飞机的隐身性能。随着中国钛合金蜂窝壁板结构制造技术的日益成熟,在新型战斗机、高速无人机上也大量采用钛合金蜂窝夹层结构。但是国内目前对于金属蜂窝夹层结构隔热性能研究大多局限于理论计算方面,开展的试验验证工作较少。

本文主要针对 TC4/TC1 钛合金蜂窝夹层结构的隔热性能开展试验研究,为钛合金蜂窝夹层结构在近发动机部位、高速无人机热结构及热防护结构上的应用提供了数据支持。

## 1 试验件及试验方法

### 1.1 钛合金蜂窝夹层结构试验件

钛合金蜂窝夹层结构面板材料为 TC4,芯体材料选用 TC1,试验件尺寸为  $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ ,采用钎焊方法制造,试验件具体信息参见表 1,试验件规格参数表示方法如图 1 所示。

表 1 试验件尺寸及数量

Tab. 1 Sample size and quantity

芯体尺寸/mm			面板尺寸/mm		试验件数量/个
芯格尺寸	芯体壁厚	芯体高度	面板 1 厚度	面板 2 厚度	
4.8	0.05	10	0.8	0.8	1
6.4	0.05	10	0.8	0.8	1
9.6	0.05	6	0.8	0.8	1
9.6	0.05	10	0.8	0.8	1
9.6	0.05	15	0.8	0.8	1
9.6	0.10	10	0.8	0.8	3
11.2	0.10	10	0.8	0.8	3

### 1.2 试验条件及试验方法

本文采用稳态法测试蜂窝壁板热性能,试验原理如图 2 所示。试验过程中,将钛合金蜂窝壁板置于辐射加热装置上,在壁板面内周围包覆绝热材料以减少其在面内与四边环境的热交换,壁板冷面开

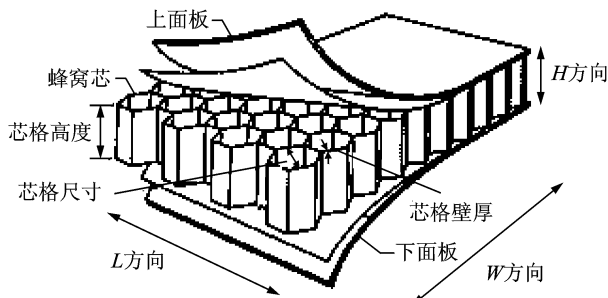


图 1 钛合金蜂窝壁板结构图

Fig. 1 Structure of titanium honeycomb panels

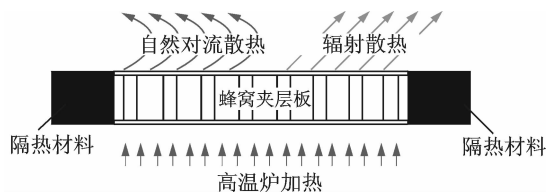


图 2 钛合金蜂窝壁板热性能测试原理图

Fig. 2 Schematic diagram of thermal performance testing of titanium honeycomb panel

敞,处于自然对流散热状态,尽可能地模拟工程实际中飞行器表面真实换热状态<sup>[3]</sup>。

试验过程中采用辐射加热器对金属蜂窝板试验件加热面的升温过程和温度状态进行实时控制,在 5 min 内热面升至  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,保温 2 h,在试验过程中,钛合金蜂窝夹层结构壁板试验件热面和冷面均焊有 K 型热电偶(图 3),控制试验件热面温度,实时记录壁板试验件冷面温度,并由冷热面温度计算评估钛合金蜂窝壁板在不同温度情况下的隔热效果。



图 3 钛合金蜂窝壁板试验件

Fig. 3 A specimen of titanium honeycomb panel

## 2 试验结果分析

### 2.1 试验数据稳定性分析

图 4,5 分别为芯格尺寸为  $9.6\text{ mm}$ 、壁厚为  $0.1\text{ mm}$ 、高度为  $10\text{ mm}$  的 3 件钛合金蜂窝壁板,和芯格尺寸为  $11.2\text{ mm}$ 、壁厚为  $0.1\text{ mm}$ 、高度为  $10\text{ mm}$  的 3 件钛合金蜂窝壁板在热面温度为  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,保温 2 h 过程中的冷面温度响应曲线。可

可以看出,6件两种规格的钛合金蜂窝壁板试验件背面温度稳定性较好:对于3个规格为9.6-0.1-10的钛合金蜂窝壁板试验件,在稳态过程中冷面温度均稳定在229~234℃;对于3个规格为11.2-0.1-10的钛合金蜂窝壁板试验件,在稳态过程中冷面温度均稳定在221~225℃,温度最大偏差不超过5℃。试验数据具有较好的一致性和稳定性。

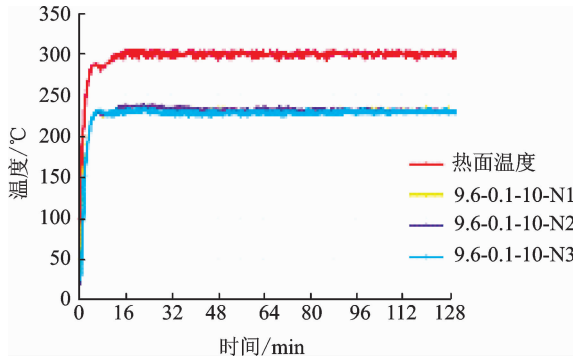


图4 9.6-0.1-10试验件稳态冷热面温度

Fig. 4 Cold and hot surface temperature of 9.6-0.1-10 specimen

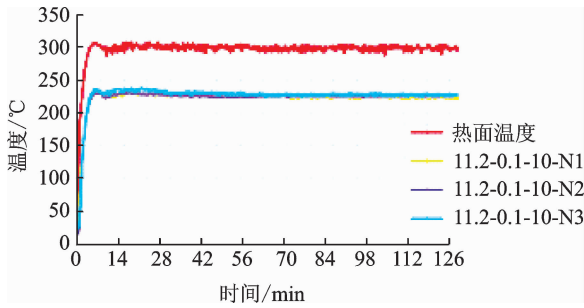


图5 11.2-0.1-10试验件稳态冷热面温度

Fig. 5 Cold and hot surface temperature of 11.2-0.1-10 specimen

## 2.2 蜂窝芯体参数对壁板隔热性能的影响

图6为热面温度为300℃,胞壁厚度为0.05mm,芯体高度为10mm的情况下,芯格尺寸变化(芯格内切圆直径分别为4.8,6.4,9.6mm)时对钛合金蜂窝壁板隔热性能的影响。从图中可以发现,随着芯格尺寸的增大,蜂窝壁板冷热面温差也随之增加。芯格尺寸为4.8mm时,冷热面温差仅为57℃;而当芯格尺寸为9.6mm时,冷热面温差达到81℃。

图7为热面温度为300℃,芯格尺寸为9.6mm,胞壁厚度为0.05mm,芯体高度变化(分别为6,10,15mm)时对钛合金蜂窝壁板隔热性能的影响。可以发现:芯体高度越高,蜂窝壁板冷热面温差越大。

图8为热面温度为300℃,芯格内切圆直径为9.6mm,芯体高度为10mm的情况下,芯体胞壁

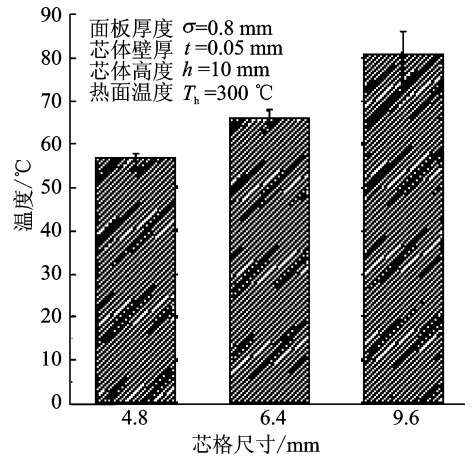


图6 芯格尺寸不同的蜂窝壁板冷热面温差对比

Fig. 6 Comparison of temperature difference of honeycomb panels with different core sizes

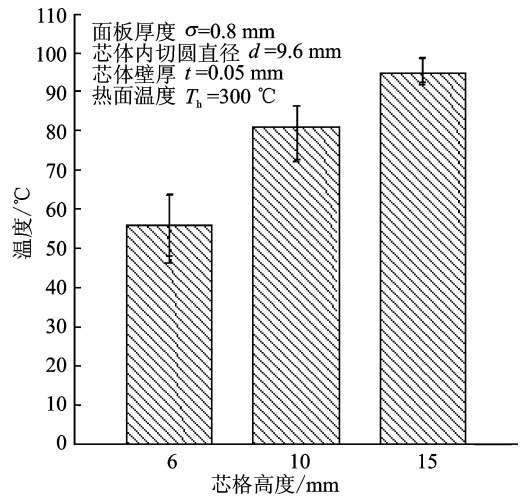


图7 芯格高度不同的蜂窝壁板冷热面温差对比

Fig. 7 Comparison of temperature difference of honeycomb panels with different core heights

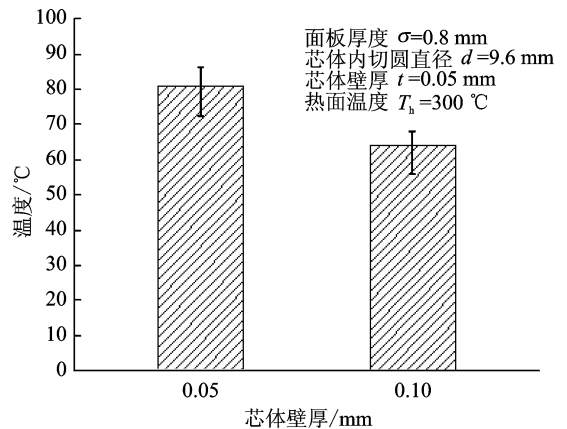


图8 壁厚不同的蜂窝壁板冷热面温差对比

Fig. 8 Comparison of temperature difference of honeycomb panels with different core wall thicknesses

厚度(分别为 0.05, 0.1 mm)对蜂窝壁板隔热性能的影响。从图中可以看出:芯体薄壁越厚,蜂窝壁板冷热面温差越小。

根据上述试验结果,可以得到以下结论:增大芯格尺寸和芯格高度,降低芯格壁厚均有利于提高钛合金蜂窝壁板的隔热性能。

对于蜂窝壁板结构,在沿面外热流路径上的传热途径共有 4 种,分别是:芯体胞壁的热传导、芯体内空气的热传导、芯体内空气的对流传热以及芯体内胞壁和面板间的辐射散热,如图 9 所示。钛合金蜂窝壁板结构采用真空钎焊方法制成,芯格内空腔为近真空状态,传热较金属材料小很多,因此增大芯格尺寸、减少壁厚均可增大芯格空腔占比面积,有效提高了蜂窝壁板的隔热效果。同样增加芯格高度,可使芯格空腔体积增大,以致蜂窝腔内各表面间的辐射换热减少,使得冷热面温差增大<sup>[4]</sup>。

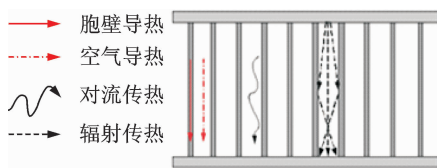


图 9 蜂窝板传热模型

Fig. 9 Heat transfer modes of honeycomb panels

### 2.3 芯体参数敏感度分析

表 2 对比了蜂窝芯体芯格尺寸、芯体壁厚和芯格高度 3 个特征参数对钛合金蜂窝壁板整体隔热效果的影响。表 2 中几何参量的变化用尺寸增幅百分比来描述,隔热效果用温差增幅比例来描述,尺寸的增幅和温差的增幅均相对与第 1 组数据而言。图 10 为根据表 2 绘出的温差增幅随几何尺寸增幅的曲线。

表 2 芯体特征参数变化对蜂窝壁板隔热性能的影响

Tab. 2 Effects of different geometric parameters on thermal insulation performance of titanium sandwich panels

芯体特征参数	尺寸/mm	尺寸增幅/%	平均温差/℃	温差增幅/%
芯格尺寸 $d$	4.8	0	57	0
	6.4	33	66	16
	9.6	100	81	42
壁厚 $t$	0.05	0	81	0
	0.10	100	64	-21
	6	0	56	0
芯格高度 $h$	10	67	81	45
	15	150	95	70

由表 2 和图 10 可以看出,钛合金蜂窝壁板隔热效果对各几何参量的敏感程度分别是:对芯格高度变化最敏感,芯格尺寸次之,芯体壁厚最小。这是因为:蜂窝高度增加,导致面外热传导长度变大,冷热面温差增大,芯格空腔体积增大,蜂窝腔内各表面间(特别是上下面)的辐射换热减少,从而导致隔热效果对芯格高度变化最为敏感。然而芯格空腔占比面积与芯格尺寸成二次方增加,而与壁厚仅成比例增加,故芯格尺寸对隔热效果敏感度较芯格壁厚要大。

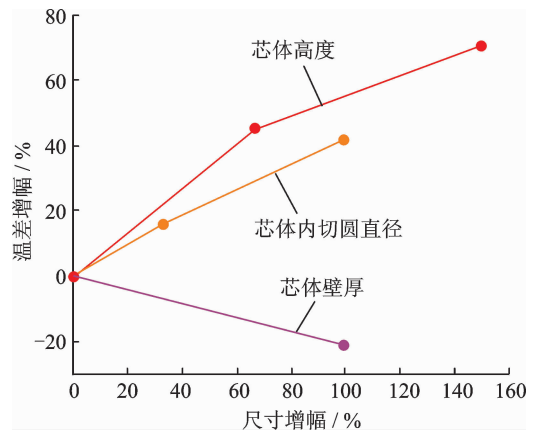


图 10 温差增幅随几何尺寸增幅曲线

Fig. 10 Increase of temperature difference vs. increase of geometric parameters

### 3 面外导热系数测试

本节针对芯体尺寸 11.2 mm,壁厚 0.1 mm,高度 10 mm 的蜂窝壁板进行了面外等效导热系数测试。为了获得钛合金蜂窝在 100~350 °C 温度范围内的面外导热系数,设定热面稳态温度分别为 100, 150, 200, 250, 300 和 350 °C,热面温度逐级上升到上述稳态温度点并保温 15 min。表 3 为不同热面温度下的冷热面温度差。从表 3 中可以发现,随着温度的升高,钛合金蜂窝壁板冷热面温度差逐渐增大,蜂窝板的隔热效率逐渐增强<sup>[5-6]</sup>。

表 3 钛合金蜂窝壁板冷热面温度差

Tab. 3 Temperature difference between hot and cold surfaces of titanium honeycomb panels

热面温度 $T_h/°C$	冷面温度 $T/°C$	冷热面温差 $\Delta T/°C$	隔热效率 $\eta/\%$
101.70	83.76	17.94	17.64
149.24	118.87	30.37	20.35
200.60	157.20	43.40	21.63
250.76	193.79	56.97	22.72
300.65	232.00	68.65	22.83
351.95	271.22	80.73	22.94

参考文献[7~11]中的方法计算得到了不同温度下钛合金蜂窝壁板的等效导热系数(取钛合金壁板表面发射率为0.4),如图11所示。从图11中数据可以发现,钛合金蜂窝板的等效导热系数随着试验温度的升高而增大,但与同温度下钛合金材料等效导热系数(中国航空材料手册<sup>[12]</sup>中数据)相比要小一个数量级,仅为其3%~5%。由此可见,金属蜂窝壁板与同种均质金属材料本身相比具有更优的隔热效果。

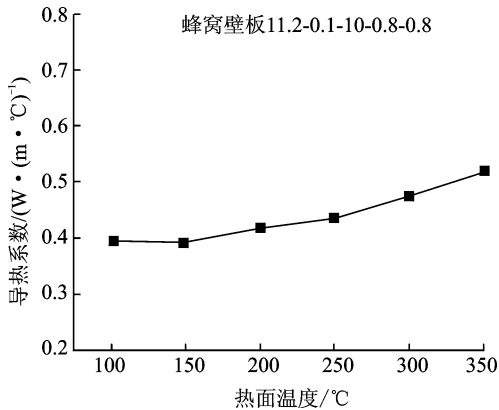


图11 钛合金蜂窝壁板面外等效导热系数

Fig. 11 Effective thermal conductivities of titanium honeycomb panels

## 4 结 论

(1) 通过对6件两种规格的钛合金蜂窝壁板试验件进行测试,验证了试验数据具有较好的一致性和稳定性。

(2) 增大芯格尺寸和芯格高度,降低芯格薄壁厚度均有利于提高钛合金蜂窝壁板的隔热性能。

(3) 钛合金蜂窝壁板结构隔热效果对芯体高度最为敏感,芯格尺寸次之,芯体壁厚最小。

(4) 随着热面温度的升高,钛合金蜂窝壁板冷热面温差逐渐增大,隔热效率逐渐增强。

(5) 钛合金蜂窝壁板的等效导热系数随着试验温度的升高而增大,但与同温度下钛合金材料相比要小一个数量级,仅为其3%~5%。

### 参考文献:

[1] 岳喜山,欧阳小龙,侯金保. 钛合金蜂窝壁板结构制造技术研究[C]//第十六届全国钎焊及特种连接技术交流会论文集. 南宁,中国:[s. n.], 2008:239-242.

[2] 刘绍然,许忠旭,张春元,等. 航天用蜂窝夹层板传热特性的研究进展[J]. 真空与低温,2012,18(1):1-8.

Liu Shaoran, Xu Zhongxu, Zhang Chunyuan, et al. Research progress of heat transfer of honeycomb

sandwich panels used in spacecraft[J]. Vacuum and Cryogenics, 2012,18(1):1-8.

- [3] 景丽,王广飞,唐绍锋,等. 金属蜂窝夹芯板辐射导热耦合问题[J]. 哈尔滨工业大学学报,2010,42(5):827-831.
- Jing Li, Wang Guangfei, Tang Shaofeng, et al. Radiation and conduction coupling problems of honeycomb sandwich panel[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010,42(5):827-831.
- [4] 李东辉,夏新林. 金属蜂窝结构的稳态热性能[J]. 工程热物理学报,2008,29(12):2094-2096.
- Li Donghui, Xia Xinlin. Steady thermal performance of metallic honeycomb panels [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008,29(12):2094-2096.
- [5] 吴大方,房元鹏,张敏. 高速飞行器瞬态气动热试验模拟系统[J]. 航空计测技术,2003,23(1):9-14.
- Wu Dafang, Fang Yuanpeng, Zhang Min. Experimental simulation system of transient aerodynamic heating for high-speed flight vehicle [J]. Aviation Metrology & Measurement Technology, 2003,23(1):9-14.
- [6] 梁伟,张立春,吴大方,等. 金属蜂窝夹芯板瞬态热性能的计算与试验分析[J]. 航空学报,2009,30(4):672-677.
- Liang Wei, Zhang Lichun, Wu Dafang, et al. Computation and analysis of transient thermal performance of metal honeycomb sandwich panels [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009,30(4):672-677.
- [7] 李义强,聂玉峰,魏杰. 金属蜂窝夹芯面板有效导热系数的数值计算[J]. 航空计算技术,2010,40(2):5-8.
- Li Yiqiang, Nie Yufeng, Wei Jie. Numerical simulation of effective thermal conductivity of metal honeycomb core sandwich panel [J]. Aeronautical Computing Technique, 2010,40(2):5-8.
- [8] Bergman T L, Lavine A S, Incropera F P, et al. Fundamentals of heat and mass transfer [M]. Seventh edition. New York: John Wiley & Sons, 2011:594-610.
- [9] Bejan A, Kraus A D. Heat transfer handbook[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003:562-563.
- [10] Daryabeigi K. Heat transfer in adhesively bonded honeycomb core panels[R]. AIAA 2001-2825, 2001.
- [11] Xie Zonghong, Sun Junfeng, Li Wei, et al. Study on the equivalent thermal conductivity of super alloy honeycomb core structures[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014,483:194-198.
- [12] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册:钛合金、铜合金(第四卷)[M]. 2版. 北京:中国标准出版社,2001.

