

刚性隔热材料的力学性能

孙陈诚 胡子君 鲁胜 张宏波 陈海坤

(航天材料及工艺研究所先进功能复合材料技术国防科技重点实验室,北京 100076)

摘 要 采用纤维烧结法制备了刚性隔热材料,研究了材料密度、纤维取向、测试温度、与气凝胶复合等因素对材料力学强度的影响规律。结果表明:隔热材料力学强度随着密度的提高而增加;隔热材料平面方向拉伸和压缩强度均达到厚度方向的4倍以上;800和1000℃下,材料的压缩强度保持率分别达到90%和50%;与气凝胶复合后隔热材料在拉伸强度维持不变的情况下,压缩强度增加35%以上。

关键词 刚性隔热材料,力学性能,气凝胶

Mechanical Properties of Rigid Thermal Insulating Materials

Sun Chencheng Hu Zijun Lu Sheng Zhang Hongbo Chen Haikun

(National Key Laboratory of Advanced Functional Composite Materials, Aerospace Research
Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract Rigid thermal insulating materials(RTIM) were prepared from ceramic fibers through sintering. The effects of density, fiber orientation, test temperature and composition with aerogel on the mechanical properties of the RTIM were investigated. The results indicate that the mechanical properties of the RTIM increase with the increasing of the density. Tensile and compressive properties of the RTIM in plane direction are four times larger than that in thickness direction. The compressive properties of the RTIM at 800℃ and 1000℃ are 90% and 50% of those at room temperature respectively. The compressive properties of composites increased by 35% after composition with aerogel, while the tensile properties of composites keep unchanged.

Key words Rigid thermal insulating materials, Mechanical properties, Aerogel

1 前言

随着高超声速飞行器的发展,对高效隔热材料的需求越来越迫切。刚性隔热材料是发展最早的一类隔热材料,美国从20世纪80年代开始从事刚性隔热材料的研究,至今发展了LI、FRCI、HTP、AETB、BRI等系列^[1~3],为美国航天飞机和高超声速飞行器的发展发挥了重要作用。我国也较早地开展刚性隔热材料的研制工作,性能达到了美国第三代陶瓷瓦的水平。对于隔热材料首先关注的是材料的隔热性能,但力学性能也是至关重要的。本文采用纤维烧结法制备了刚性隔热材料,并从材料密度、纤维取向、测试温度和复合工艺等方面对其力学性能进行了研究。

2 实验

2.1 材料制备

按比例称取陶瓷纤维1、2、黏接剂和烧结助剂在

分散液中搅拌均匀,经抽滤成型、干燥、烧结后即得刚性隔热材料。刚性隔热材料与二氧化硅溶胶复合、老化、置换、干燥后制备出复合气凝胶的刚性隔热材料。

2.2 性能测试

采用美国MTS公司Alliance_RF/100电子万能试验机,按DqES396—2002和Q/Dq360.3—2000测试拉伸和压缩性能;利用CJS—36电子万能试验机测试高温压缩性能;采用LEICA—S440扫描电镜对隔热材料微观结构进行表征。

3 结果与讨论

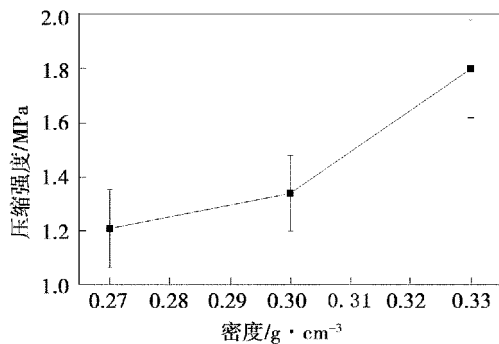
3.1 密度对力学性能的影响

按同一配比,通过改变致密化程度得到不同密度的隔热材料的压缩和拉伸强度与密度关系(图1)。随着隔热材料密度的增加,单位受力界面内纤维数量会随之增加,即相同截面上受力元素增加,相同作用

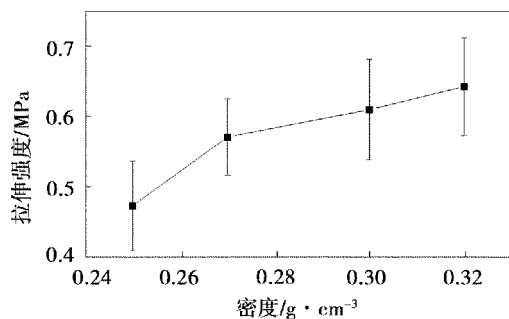
收稿日期:2009-09-20;修回日期:2009-12-29

作者简介:孙陈诚,1979年出生,硕士,工程师,主要从事高效隔热复合材料方面的研究。E-mail:sunyahua2005@yahoo.com.cn

力产生的形变就会小,表现为强度的增加。可看出增加密度是提高力学性能的有效途径之一,但随着密度的增加使得单位体积内固体含量增加,从而导致固体传热效率提高,材料的有效热导率必然会增加。研究热导率和强度的最优化匹配是研究的重点之一。



(a) 压缩强度



(b) 拉伸强度

图1 刚性隔热材料压缩和拉伸强度与密度关系曲线

Fig. 1 Compressive and tensile strength of RTIM vs density

3.2 纤维取向对力学性能的影响

厚度和平面方向(试样密度 $0.33 g/cm^3$)力学性能的结果如图2所示。

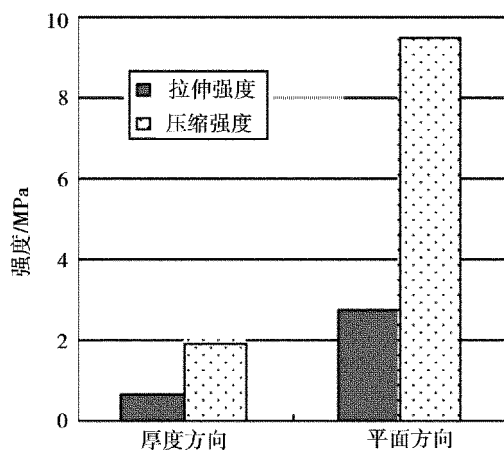
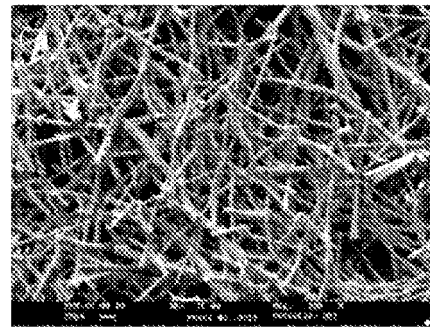


图2 刚性隔热材料不同方向力学性能比较

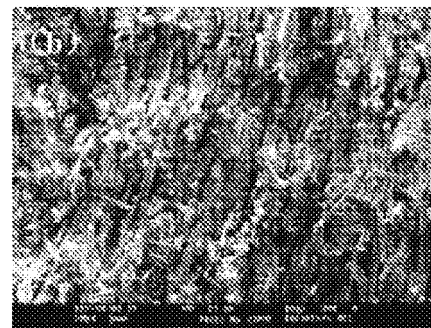
Fig. 2 Mechanical properties of RTIM as a function of fiber orientation

平面方向的压缩强度是厚度方向的4.9倍(9.50和2.80 MPa),厚度方向拉伸强度是平面方向的4倍(2.80和0.70 MPa),刚性隔热材料呈现各向异性。

图3是刚性隔热材料平面和厚度方向的微观结构,从图3(a)可见,绝大多数纤维平行于观察面,且孔隙所占面积大,而从图3(b)可见,纤维垂直于观察面,且纤维堆积致密。纤维堆积稀疏,固体成分少,受力元素少,力学性能差。反之,纤维堆积致密,固体成分多,隔热效果差,力学性能优异。所以隔热材料不同方向的力学性能的差异源于其微观结构的不同。



(a) 厚度方向



(b) 平面方向

图3 刚性隔热材料的SEM照片

Fig. 3 SEM photographs of RTIM

从传热学看,这种独特纤维排布方式不利于热量沿厚度方向传播,是刚性隔热材料厚度方向隔热性能优异的根本原因。合理进行结构设计将有利于材料在不同的使用环境下使用。

3.3 测试温度对压缩强度的影响

密度为 $0.36 g/cm^3$ 试样高温测试结果见图4。

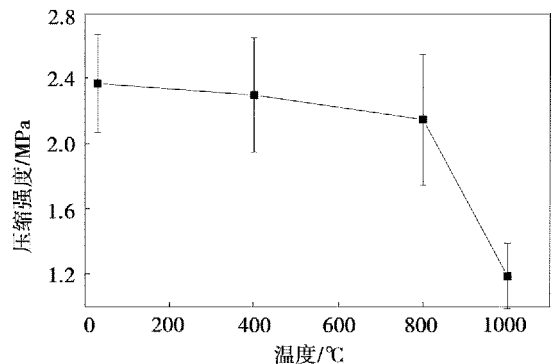


图4 刚性隔热材料压缩强度与测试温度的关系

Fig. 4 Compressive strength of RTIM vs temperature

从常温到800°C材料的压缩强度从2.37 MPa变

到 2.15 MPa,下降了 9.3%,可见刚性隔热材料在 800℃下其压缩强度保持常温下 90%以上。刚性隔热材料在制备过程中氧化硅、氧化硼形成低共熔物,低共熔物的熔点取决于两者之间的相图。不难预测该配方形形成共熔物作为“焊点”在 1 000℃发生了熔融,进而纤维间失去链接作用,使得刚性隔热材料在 1 000℃时压缩强度下降到 1.19 MPa。不过对于隔热材料而言仍处在较高水平,可通过调节氧化硼含量或者选择其他烧结剂进一步提高隔热材料高温压缩性能。

3.4 复合气凝胶后对强度的影响

刚性隔热材料为孔径几十微米的多孔材料,通过与纳米二氧化硅进行复合,其内部微米级孔转变成纳米级孔,有效阻碍气体的传热^[1],同时也影响了材料的力学性能(图 5)。

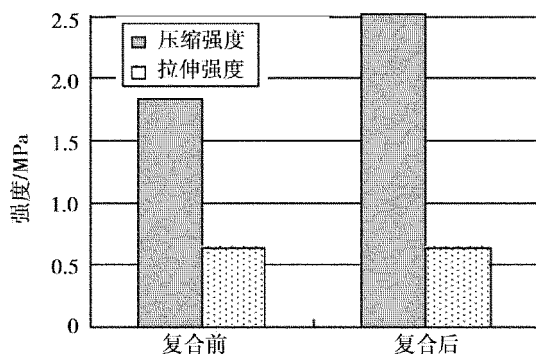


图 5 刚性隔热材料复合前后力学性能的变化

Fig. 5 Mechanical strength of RTIM as function of compositing process

经过复合的隔热材料,压缩强度由 1.83 MPa 增加到 2.51 MPa,所引入的气凝胶,密度较低(0.08 g/cm³),具有压缩强度高、拉伸强度低的特点;同时由于干燥过程中体积收缩和增强相的阻隔效应使得气凝胶在隔热材料内部形成裂缝进而不能成为连续相。由于上述原因,复合工艺在密度增加幅度不大的情况下,材料压缩强度得到了提高,拉伸强度变化极小。

4 结论

(1)随着密度的增加、单位面积承力元素增加,刚性隔热材料力学性能得到提高;

(2)由于纤维的各向异性排布的特点,使得刚性隔热材料平面方向的力学性能大于厚度方向的;

(3)测试温度在 800℃以下,隔热材料压缩性能保持 90%以上,当温度为 1 000℃时压缩强度大幅降低;

(4)经过气凝胶,复合后材料密度增加了 0.08 g/cm³,但其压缩性能从 1.83 MPa 增加到 2.51 MPa,拉伸性能变化不大。

参考文献

- 1 曾昭煊. 航天飞机用刚性陶瓷瓦防热材料发展概况. 宇航材料工艺, 1989; (2): 12~20
- 2 Cleland J et al. Thermal protection system of the space shuttle, NASA Contractor Report 4227, 1989
- 3 Heng et al. Rigid insulation and method of producing same, US Patent NO. 6716782
- 4 孙陈诚,胡子君等. 改性陶瓷瓦隔热材料制备和性能研究. 见:全国第十四届复合材料会议, 2006

(编辑 吴坚)

(上接第 73 页)

可以看出,随着黏附吸收剂质量的增加,蜂窝夹层复合材料的吸收峰频率向低频移动,这是因为被黏附吸收剂越多,相当于吸波蜂窝芯的平均介电常数 ϵ_r 增加,根据介质中波长 λ_m 与自由空间波长 λ_0 之间的关系 $\lambda_m = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_r}$,当蜂窝芯厚度一定时,其所能够匹配的介质中的电磁波波长 λ_m 一定,因此蜂窝芯的平均介电常数 ϵ_r 增加导致其所能够匹配的自由空间的电磁波波长 λ_0 增加,相应的吸收峰频率就越低;但这两种增重的试样的反射率在 2~18 GHz 均小于 -10 dB,证明采用自研的吸波胶液制备吸波蜂窝工艺控制的容度较大,工艺适应性强。

4 结论

(1)随着蜂窝芯厚度的增加,其夹层复合材料的低频吸收带边向低频扩展, -10 dB 有效带宽增加; 6、10 和 18 mm 厚吸波蜂窝夹层复合材料 -10 dB 的低频吸收极限分别为 5.4、3.8 和 2 GHz。

(2)18 mm 厚蜂窝芯随着蒙皮厚度的增加,蜂窝夹层复合材料的吸收峰频率向低频移动,反射率在 2~18 GHz 均保持在 -10 dB 以下。

(3)随着黏附吸收剂质量的增加,吸波蜂窝夹层复合材料的吸收峰频率向低频移动。

参考文献

- 1 赵东林,周万城. 结构吸波材料及其结构型式设计. 兵器材料科学与工程, 1997; (20): 53~57
- 2 唐泽辉. 新型玻璃钢隐身盖板的研制. 玻璃钢/复合材料, 2005; (6): 45~47
- 3 邢丽英,刘俊能. 蜂窝夹层结构吸波材料浸渍胶液体系的研究. 航空材料学报, 1993; (13): 44~51
- 4 高正平,罗青. 平面波垂直入射浸渍吸收剂蜂窝的反射特性. 电子科学大学学报, 2003; (32): 389~394
- 5 赵灵智,胡社军,李伟善等. 吸波材料的吸波原理及其研究进展. 现代防御技术, 2007; (35): 27~31

(编辑 任涛)