

不同热解温度石英杂化酚醛复合材料渗透率测试*

王丽燕¹, 陈伟华¹, 崔占中¹, 王振峰¹, 王筠², 纪兵兵³

(1. 中国运载火箭技术研究院 空间物理重点实验室, 北京 100076;

2. 中国运载火箭技术研究院 航天材料及工艺研究所, 北京 100076;

3. 中国运载火箭技术研究院 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要:为得到不同温度下石英杂化酚醛材料的渗透率,自主搭建了材料气体渗透率测试平台,提出基于 Darcy 定律的复合材料气体渗透率的测试方法。对不同温度下石英杂化材料进行研究,测量渗透过程中试验件上下表面气体压力变化和流过试验件的气体流量,进而得到复合材料的渗透率。结果表明:该实验平台可以用来测量复杂孔隙复合材料的渗透率。石英杂化酚醛材料渗透率与热解温度呈正相关,热解温度越高,复合材料的渗透率越大,材料渗透率和热解温度满足关系式 $K = 9.5 \times 10^{-15} T - 6.32 \times 10^{-12}$ 。673 K 热解温度下,复合材料渗透率为 10^{-13} m^2 量级;873 K 和 1 073 K 热解温度下,其渗透率在 10^{-12} m^2 量级。本试验结果丰富了该类树脂基复合材料的基础物性数据,为材料渗透和热质扩散特性分析提供了依据。

关键词:石英杂化酚醛复合材料;热解温度;试验测量;渗透率

中图分类号:TK124 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2021)05-153-07

Test on the permeability of quartz hybrid phenolic material under different pyrolysis temperatures

WANG Liyan¹, CHEN Weihua¹, CUI Zhanzhong¹, WANG Zhenfeng¹, WANG Yun², JI Bingbing³

(1. Science and Technology on Space Physics Laboratory, China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China;

2. Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology, China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China;

3. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to acquire the permeability of quartz hybrid phenolic materials at different temperatures, the experimental device which was used for measurement in gas permeation process in quartz hybrid phenolic materials was developed, and a method based on Darcy's law for measuring permeability of quartz hybrid phenolic materials was presented. Quartz hybrid phenolic materials at different pyrolysis temperatures were chosen as the research object, and the gas pressure between down and upper materials and the gas flow rate through the materials were obtained. The permeability of the materials was obtained according to Darcy's law. The results show that the permeability of complex pore composites can be measured by this experimental device. As the results show, the permeability of the quartz hybrid phenolic material is positively correlated with the pyrolysis temperature. The higher the pyrolysis temperature is, the greater the permeability be. The permeability level is in 10^{-13} m^2 at 673 K pyrolysis temperature and in 10^{-12} m^2 at 873 K and 1 073 K pyrolysis temperature. Furthermore, permeability of quartz hybrid phenolic materials and pyrolysis temperature meet the formula $K = 9.5 \times 10^{-15} T - 6.32 \times 10^{-12}$. The experimental results have enriched the basic physical data of this kind of resin-based composite materials, and provided a basis for the analysis of material permeability and thermal mass diffusion characteristics.

Keywords: quartz hybrid phenolic material; pyrolysis temperatures; experimental measurement; permeability

轻质烧蚀复合材料是一种密度低、热导率低、吸热性能优良且耐烧蚀的新型防隔热材料,此材料不仅满足长时间中低热流密度环境下的防隔热需求,而且耐烧蚀和高气流剪切,故而应用广泛^[1-2]。在长时间中低热流的加热环境下,树脂发生热解,残留多孔结构的碳化层,轻质烧蚀复合材料中的热解气体流过碳化层引射进入边界层,

一方面可以使边界层增厚,增大外界对材料的传导热阻,形成热阻塞效应^[3];另一方面可以吸收碳化层结构的热量,降低碳化层温度,增强其稳定性^[4]。此过程中,轻质烧蚀复合材料内部热解层区域与碳化层外表面不单有温度差还有压力差^[5],这使得热解层部分产生的气体在压差作用下向材料碳化层外表面持续渗出,并与多孔碳层

* 收稿日期:2020-03-01

基金项目:国家安全重大基础研究资助项目(613285);中央军委科学技术委员会基础加强类资助项目(0327004)

作者简介:王丽燕(1989—),女,云南瑞丽人,工程师,博士,E-mail:wang_liyan12@163.com

发生热交换,使部分热量沿厚度方向传递到外表面^[6-7],从而提高复合材料的隔热性能。热解气体流动换热问题是典型的多孔介质传热传质问题,需要采用多孔介质理论解决,而流体在多孔介质中的流动特性主要取决于渗透率等参数^[8]。因此研究轻质烧蚀复合材料的气体渗透特性,得到不同温度下的渗透率对该材料的防隔热设计具有重要意义。渗透率表征流体透过多孔介质的能力,其大小不仅与流体的特性有关,还与材料的通孔率、孔分布形式和材料厚度等因素有关^[9]。

达西于 19 世纪给出了著名的达西渗透率公式^[10],之后,Forchheimer 发现在高雷诺数下,微孔中的流体存在运动惯性,不再符合达西定律,进而提出了第二渗透率公式^[8]。随着红外技术、示踪粒子和微孔探针等先进测量技术的发展,一些学者对多孔材料内部流体流动形式进行了实验研究。Gascoin 等^[11]将示踪粒子注入多孔介质流体中,利用红外辐射进行测试,并对辐射信号进行分析,得到确定点处流体的流量和压降关系,进而得到渗透率。其他学者^[12-13]在对颗粒堆积床内的流动形式的研究中发现,随着流体速度的增大,流动由稳定向振动发展。当 Re 为 90 ~ 110 时,流动是稳定的。当 Re 大于 110 时,示踪粒子出现轻微振动,且 Re 越大,振动越强烈^[13]。因而此类方法对示踪粒子的跟随性有一定要求。目前,渗透率主要通过数值^[14]、解析分析和实验测量^[15-16]这三种方法获得。且已有的研究主要集中在多孔介质的气体渗透特征、材料的渗透率测量^[17-18]及气体渗透对材料传热传质的影响^[3,19-21],但绝大多数研究都是针对均匀球体堆积床,很少以轻质烧蚀复合材料为研究对象。虽然王等^[18]针对石英酚醛复合材料的气体渗透率进行了试验研究,并得到了该材料气体渗透率随热解温度的变化关系,但对于新型防隔热材料石英杂化酚醛材料的渗透率的研究仍然空白,因而需对石英杂化酚醛复合材料的渗透率进行系统研究,建立和完善此类复合材料渗透率数据库。石英杂化酚醛复合材料微孔分布的任意性、非均匀特征,使得材料内部气体的流动表现出了与均匀球体堆积床有很大的差异,在实际使用中,复合材料的渗透率一般通过现场试验测试得到。

本文以石英杂化酚醛复合材料为研究对象,使用自行设计的实验系统对不同热解温度下石英杂化酚醛复合材料气体渗透过程进行实时测量,并基于达西定律推导出复合材料的渗

透率计算公式,得到渗透率随热解温度的变化规律,为进一步研究树脂热解气体流经多孔碳层的流动换热和轻质复合材料的防隔热设计提供支撑。

1 实验

1.1 实验原理

1.1.1 孔隙率

孔隙率可定义为介质中孔隙所占总体积与介质在自然状态下所占总体积之比,其与多孔材料固体颗粒的形状、结构组成和排布形式等因素有关。当多孔材料被流体充满时,流体所占空间体积即为介质中孔隙的总体积。通过依据国家标准 GB/T 25995—2010《精细陶瓷密度和显气孔率试验方法》^[22],测试得到不同热解温度下复合材料的孔隙率,计算公式为:

$$\varphi = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中, m_1 表示试验件干燥质量, m_2 表示饱和试样在水中的质量, m_3 表示饱和试样在空气中的质量。

1.1.2 渗透率

渗透率表征流体通过多孔介质的难易程度,是多孔材料重要特性之一。根据已有研究,当雷诺数小于临近雷诺数时,通过达西定律可获得多孔介质的渗透率。

达西定律的一般表达式为:

$$\mathbf{q} = -\frac{K}{\mu}(\text{grad}p - \rho\mathbf{g}) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{q} = (q_x, q_y, q_z)$ 为多孔介质单位面积通过流体的流量; K 是材料的渗透率,一般通过试验测定; μ 是渗透流体的动力黏性系数。若通过的流体为气体,则重力可忽略不计。此时,流体在 x 方向的压力梯度和流速的关系表示为:

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{\mu}{K}v \quad (3)$$

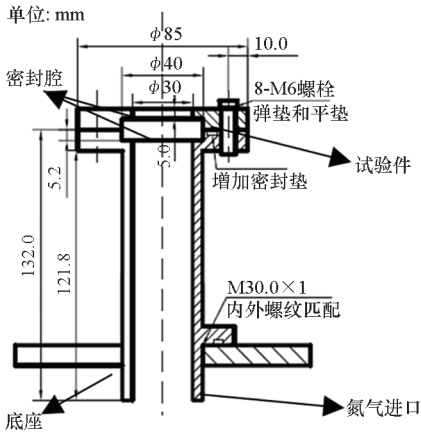
式中: dp/dx 为流体在 x 方向上的压力梯度; p 为进气口压力; v 为流体流速; μ 为实验温度为 288 K 时实验流体氮气的动力黏性系数,取 $\mu = 1.726 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

实验装置如图 1 所示。结合图 1 可知,试样气体流量可表示为:

$$Q_v = -\frac{K(p_1 - p_2)}{\mu H}A \quad (4)$$

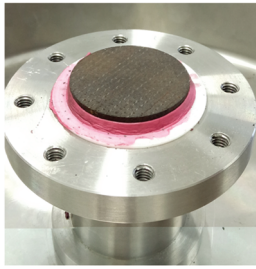
式中: A 是有效渗透面积, $A = \varphi A_f$, A_f 是试样面积; Q_v 是氮气流量; p_1 是进口压力; p_2 是出口压力; H

是试验件厚度。



(a) 安装示意图

(a) Installation diagram



(b) 试验照片

(b) Test picture

图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental equipment

则渗透率 K 可表示为:

$$K = - \frac{Q_v H \mu}{A_j \varphi \Delta p} \quad (5)$$

1.2 实验过程

图 2 展示了自主设计搭建的多孔介质渗透率测试实验系统,通过此实验平台,可得到不同热解温度下石英杂化材料试验件的渗透率。此实验系统包括氮气瓶、减压器、压力传感器、温度传感器、质量流量计、试验装置。连接管路使用内径为 16 mm 的钢丝软管,总长 2 m。试验件为直径 40 mm,厚 10 mm 的不同热解温度下石英杂化酚醛复合材料平板。为了堵塞试验件侧面的微孔,用铣床对复合材料试验件侧面进行加工,减小侧面粗糙度。安装试验件时,在试验件和装置之间用航天用密封胶带密封,确保气密性。试验件下表面与密封腔接触,密封腔通过管路与进气罐连通,如图 1 所示。在距离进气罐出口不远处设置球阀调节气体流量,满足试验条件。实验过程中,从进气罐流出的高压 N_2 ,先流过减压阀降压,后顺次流经 CYYZ11 压力变送器, MF4000 气体质量

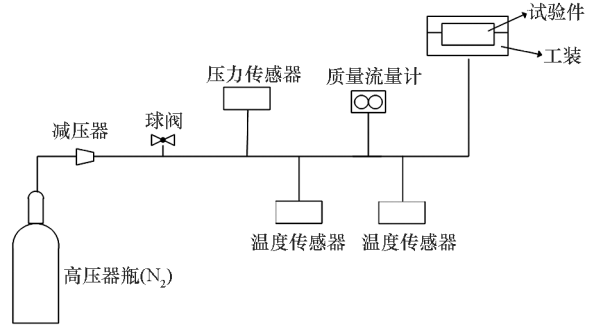


图 2 实验系统

Fig. 2 Experimental system

流量计,到达密封腔,均匀稳定压力,最后经样件厚度方向孔隙排入空气中。此过程中,通过 KEYSIGHT 34972A 实时数据采集装置将压力变送器和流量计输出信号输入到计算机终端。实验中,石英杂化酚醛复合材料共 3 个不同的热解温度,分别为 673 K、873 K 和 1 073 K,在马弗炉中保温 1 h,充分热解。图 3 所示为不同热解温度下热解后的试验件,本实验中使用的试验件由航天材料与工艺研究所制备。材料基础性能参数见表 1。



(a) 673 K

(b) 873 K

(c) 1 073 K

图 3 不同热解温度下石英杂化酚醛复合材料

Fig. 3 Quartz hybrid phenolic composites at different pyrolysis temperatures

表 1 石英杂化酚醛材料基础物性参数

Tab. 1 Fundamental physical parameters of quartz hybrid phenolic materials

温度	密度/ ($kg \cdot m^{-3}$)	热导率/ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	比热容/ ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	XY 向 拉伸强 度/MPa	压缩 强度/ MPa
常温	0.496	0.05	1.00	29.9	2.5
473 K	0.490	0.08	1.05	27.3	2.1

1.3 实验误差

实验过程中,渗透率精度的主要影响因素有:试样上下表面 N_2 压力、流过试样的 N_2 流量和试样厚度的测量误差。表 2 列举了实验过程中涉及的测量仪器及其相关参数。

表 2 仪器参数

Tab. 2 Instrument parameters

仪器	量程范围	精度	最大绝对误差
游标卡尺	0 ~ 200 mm	±0.02 mm	0.02 mm
压力变送器	0 ~ 1.6 MPa	±0.1% FS	1 600 Pa
流量计	0 ~ 40 L/min	±(1.5+0.2FS)%	3.8 L/min

注:FS 为 full scale, 满量程。

实验过程中直接测量的物理量有氮气流量 Q_v , 气体流动方向试验件厚度 H , 密封腔进气口压力 p 。根据达西定律推导出的气体渗透率计算式(5)及测量精度影响因素, 本实验误差可通过式(6)^[23] 计算得到。

$$\frac{\delta K}{K} = \sqrt{\left(\frac{\delta H}{H}\right)^2 + \left(\frac{\delta p}{p}\right)^2 + \left(\frac{\delta Q_v}{Q_v}\right)^2} \quad (6)$$

式中: δK 为试验件渗透率绝对误差; δH 为试验件厚度测量的绝对误差; δp 为密封腔进气口压力测量的绝对误差; δQ_v 为通过试验件氮气流量测量的绝对误差。

2 结果与讨论

2.1 石英杂化酚醛复合材料结构及性能分析

为了分析石英杂化酚醛材料渗透率与热解温度之间的关系, 先对原始材料的基本结构和性能进行研究。图 4 给出了该复合材料的显微图像, 由图 4 可知, 该复合材料编织结构为二维短纤维编织后针刺缝合, 其中短纤维的铺层方向与使用方向(气体流动方向)平行。

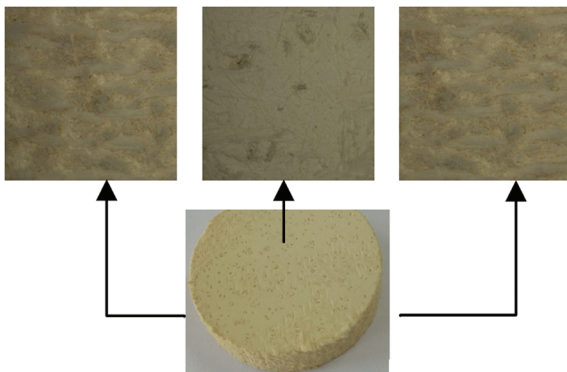


图 4 原始材料的宏观结构

Fig. 4 Macrostructure of the original composites

图 5 为石英杂化酚醛复合材料的微观放大图(由扫描电镜获得)。由图 5 进一步确认了该复合材料纤维的编织结构。由图 5 可知, 该材料由杂乱的纤维和多孔树脂基体组成, 纤维之间存在

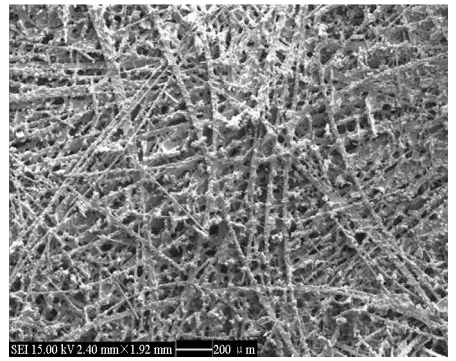


图 5 原始材料的微观结构

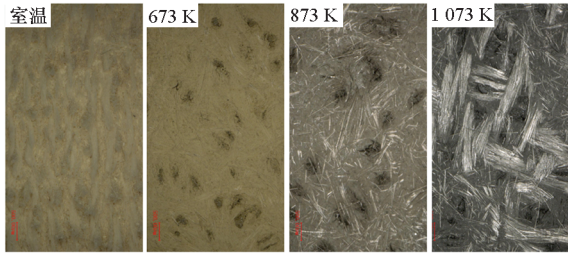
Fig. 5 Microstructure of the original composites

大量的空隙, 此空隙被浸渍的树脂填充。当材料受热, 温度升高达到杂化树脂热解温度时, 纤维间填充的杂化树脂开始热解碳化并产生热解气体, 热解气体从杂化树脂热解后形成的碳骨架孔隙中溢出材料表面。材料内部热解气体向材料表面流动过程中, 与材料发生热交换, 带走部分热, 使材料温度降低。

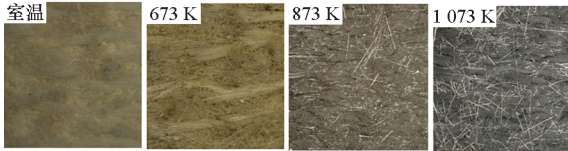
图 6 所示为不同热解温度下试验件的宏观图像。分别选取典型的三个热解温度 673 K、873 K 和 1 073 K, 在马弗炉中持续保温时间 1 h。从图 6 中可以看出, 673 K 时, 试样表面出现散布的小孔, 孔周边呈黑色, 说明材料开始发生热解反应, 从而产生了热解气体和黑色的炭。但试验件的纤维并未发生明显变化。当温度升高到 873 K, 材料上的分布孔变大, 说明树脂热解程度增大, 材料表面呈现黑色, 说明材料开始大面积热解, 从而产生了黑色的炭。因为树脂热解后形成无机陶瓷与碳的杂合体, 碳以纳米团簇方式分布于陶瓷相中, 陶瓷相使材料表面致密, 有效阻隔了氧与碳的接触, 因此树脂裂解产物抗氧化性强, 表面呈黑色。测量材料厚度, 未有明显变化, 材料表面也没有明显的裂纹。当热解温度升高到 1 073 K, 材料表面纤维裸露, 明显看到编织纹路, 纤维间几乎没有树脂, 热解产生的孔非常明显, 说明树脂已经基本热解完全。

2.2 渗透率测试结果分析

热解温度为 673 K 时, 试样失重率为 2.44%; 热解温度为 873 K 时, 试样失重率为 8.66%; 当温度为 1 073 K 时, 试样失重率高达 11.99%。材料试样失重率随热解温度升高而增加。高温下复合材料的树脂热解程度增加, 释放大量的热解气体, 使材料内部出现大量热解后残留的小孔。



(a) 俯视图
(a) Vertical view



(b) 侧视图
(b) Side view

图6 不同热解温度下材料的局部放大图像
Fig.6 Partial magnification picture of materials at different pyrolysis temperatures

图7为不同温度热解后材料残重率。由图7可知,材料残重率与热解温度呈负相关,即热解温度越高,残重率越低。热解温度低于473 K和高于1 073 K时,残重率随热解温度变化不明显。热解温度高于473 K后,残重率缓慢降低;热解温度在673 ~ 973 K之间时,残重率快速下降。因为热解温度低于473 K时,树脂还未开始热解,热解温度在673 ~ 973 K之间时,材料内树脂大量热解,产生热解气体释放出去。热解温度高于1 073 K时,材料内部的树脂基本已经热解完全。

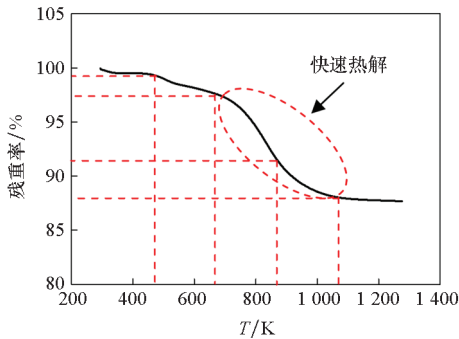
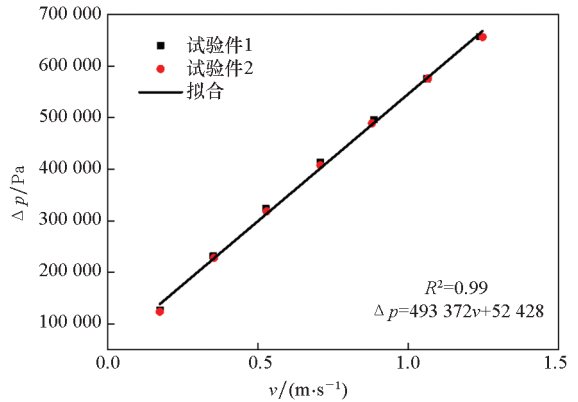


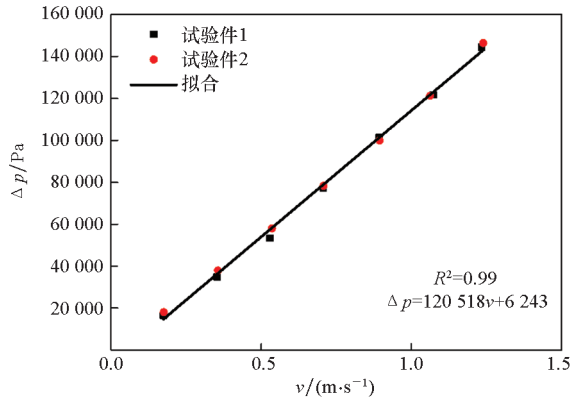
图7 不同温度热解后材料残重率
Fig.7 Cripple specific gravity of materials at different pyrolysis temperatures

实验测量气体流过石英杂化酚醛材料时的压力及流量,进而得到压差与流速的变化关系,如图8所示。图8中,压差与气体流速成正相关,流速越大,压差越大,类似于石英杂化酚醛复合材料,

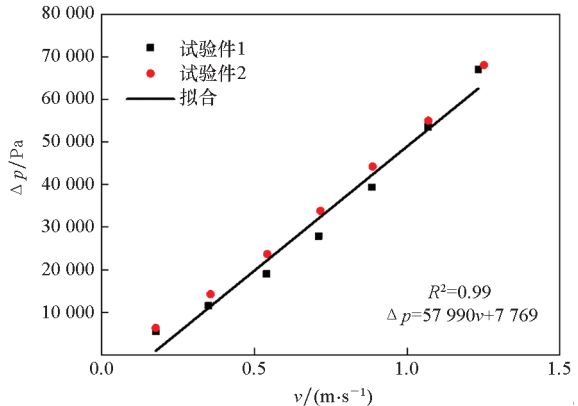
用线性拟合 R^2 均等于 99%。热解温度为 673 K 时,压差和流速的变化满足关系式 $\Delta p = 493\ 372v + 52\ 428$;热解温度为 873 K 时,压差和流速的变化满足关系式 $\Delta p = 120\ 518v + 6\ 243$;热解温度为 1 073 K 时,压差和流速的变化满足关系式 $\Delta p = 57\ 990v + 7\ 769$ 。即,压差与气体流速满足线性关系,因而不同热解温度下石英杂化酚醛材料试样的渗流过程也满足达西流动,可通过达西定律获得对应条件下试样的渗透率。



(a) 673 K



(b) 873 K



(c) 1 073 K

图8 不同热解温度下气体压差随流速的变化
Fig.8 Variation of gas pressure with velocity at different pyrolysis temperatures

图 9 展示了石英杂化酚醛复合材料使用达西定律式(5)时气体渗透率随热解温度的变化。如图 9 所示,不同温度下对应的材料气体渗透率也不相等。拟合得到 R^2 大于 98%, 渗透率和热解温度服从线性关系, 可表示为 $K = 9.5 \times 10^{-15} T - 6.32 \times 10^{-12}$ 。总体来说,随着温度升高,试样渗透率增大,一定驱动力下气体通过多孔材料越容易。当热解温度为 673 K 时,实验测得石英杂化酚醛复合材料气体渗透率为 10^{-13} m^2 量级。873 K 和 1 073 K 热解温度下,其气体渗透率都是 10^{-12} m^2 量级。因为温度越高,试样中的树脂热解得越多,其热解程度越大,残留在试样中的树脂越少。树脂的气化产生的微孔越多,直径越大,气体越容易通过,而由渗透率定义可知,渗透率表征流体通过多孔介质的难易程度,所以温度越高,渗透率越大。

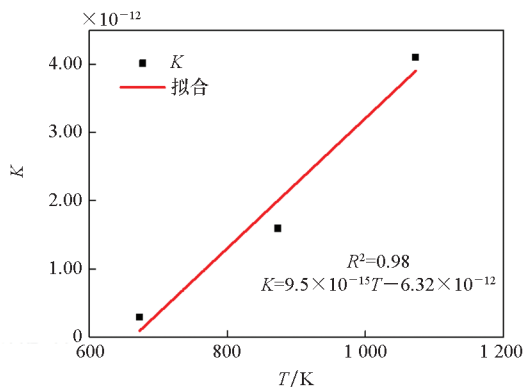


图 9 石英杂化酚醛材料渗透率随热解温度的变化

Fig. 9 Variation of permeability of quartz hybrid phenolic materials with pyrolysis temperatures

图 10 给出了此实验平台测量的石英酚醛材料试验件渗透率随热解温度的变化^[21]。比较图 9 和图 10 可以发现,两种复合材料的渗透率随热解温度变化趋势基本一致,热解温度升高,渗透率增大。热解温度为 673 K 时,石英酚醛和石英杂化酚醛复合材料的渗透率量级都是 10^{-13} m^2 。增大热解温度,两种材料渗透率变化程度不同。当热解温度为 873 K 和 1 073 K 时,石英杂化酚醛复合材料渗透率比酚醛树脂复合材料的渗透率小一个量级。因为在此温度下石英杂化酚醛复合材料未明显出现纤维收缩融化,导致纤维与基体分离,产生不规则裂缝的情况。进而可推测石英杂化酚醛材料相较于石英酚醛材料在高温下不容易发生线烧蚀。

3 结论

1) 673 K 下热解的试验件仍包含着大量的石

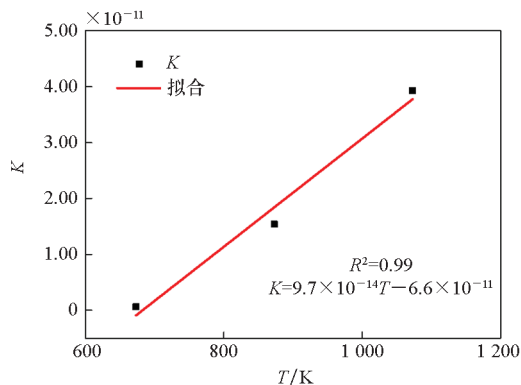


图 10 石英酚醛材料渗透率随热解温度的变化^[21]

Fig. 10 Variation of permeability of phenolic materials with pyrolysis temperatures

英杂化酚醛固化物,处于少量热解状态。673 ~ 973 K 下的石英杂化酚醛绝大部分热解成气体排除。1 073 K 下试样内的石英杂化酚醛基本热解完全,材料纤维没有明显变化。

2) 石英杂化酚醛材料孔隙复杂,不同热解温度下内部结构各不相同,无法通过理论或数值方法对其渗透特性进行分析,需通过实验测量的方法得到不同温度下石英杂化酚醛材料的渗透率。

3) 试验测量得到石英杂化酚醛材料的渗透率与热解温度成正相关。总体上,渗透率随热解温度升高而增大。673 K 热解温度下,石英杂化酚醛复合材料渗透率量级为 10^{-13} m^2 ; 873 K 和 1 073 K 下,材料渗透率为 10^{-12} m^2 量级。此种材料渗透率和热解温度满足式 $K = 9.5 \times 10^{-15} T - 6.32 \times 10^{-12}$ 。

参考文献 (References)

- [1] MCMANUS H L N, SPRINGER G S. High temperature thermomechanical behavior of carbon-phenolic and carbon-carbon composites, I. analysis [J]. Journal of Composite Materials, 1992, 26(2): 206 - 229.
- [2] DIMITRIENKO Y I. A structural thermo-mechanical model of textile composite materials at high temperatures [J]. Composites Science and Technology, 1999, 59(7): 1041 - 1053.
- [3] 时圣波. 高硅氧/酚醛复合材料的烧蚀机理及热-力学性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013. SHI Shengbo. Ablation mechanism and thermo-mechanical behavior of silica/phenolic composites [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [4] 郑成航, 程乐鸣, 李涛, 等. 多孔介质内低热值气体燃烧及传热数值模拟 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(8): 1567 - 1572. ZHENG Chenghang, CHENG Leming, LI Tao, et al. Numerical simulation of low calorific gas combustion and heat transfer in porous media [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(8): 1567 - 1572. (in Chinese)

- [5] 李玮洁. 变密度炭化复合材料的热防护模型及其数值模拟[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
LI Weijie. Thermal protection models and numerical simulation for variable density charring materials [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [6] 谢涛, 何雅玲, 吴明, 等. 气凝胶纳米多孔隔热材料传热计算模型的研究[J]. 工程热物理论, 2014, 35(2): 299-304.
XIE Tao, HE Yaling, WU Ming, et al. Study on theoretical model for the effective thermal conductivity of silica aerogel composite insulating materials [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(2): 299-304. (in Chinese)
- [7] 李月锋, 张东. 膨胀石墨/LiCl-NaCl 复合相变材料导热系数各向异性[J]. 功能材料, 2013, 44(16): 2409-2415.
LI Yuefeng, ZHANG Dong. Thermal conductivity anisotropy of expanded graphite/LiCl-NaCl phase change material [J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44(16): 2409-2415. (in Chinese)
- [8] 李亨, 张锡文, 何枫. 考虑气体压缩性的多孔材料渗透率和惯性系数的测定[J]. 实验力学, 2002, 17(3): 326-332.
LI Heng, ZHANG Xiwen, HE Feng. Measurement of permeability and inertial coefficient for porous materials with the consideration of compressible effects of gas [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2002, 17(3): 326-332. (in Chinese)
- [9] 刘培生, 马晓明. 多孔材料检测方法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
LIU Peisheng, MA Xiaoming. Porous materials testing methods [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [10] JOSEPH D D, NIELD D A, PAPANICOLAOU G. Nonlinear equation governing flow in a saturated porous medium [J]. Water Resources Research, 1982, 18(4): 1049-1052.
- [11] GASCOIN N, FAU G, GILLARD P. Indirect Infra-Red Determination of Darcian permeability for cooling applications [C] // Proceedings of the 17th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, 2011.
- [12] JOLLS K R, HANRATTY T J. Transition to turbulence for flow through a dumped bed of spheres [J]. Chemical Engineering Science, 1966, 21(12): 1185-1190.
- [13] WEGNER T H, KARABELAS A J, HANRATTY T J. Visual studies of flow in a regular array of spheres [J]. Chemical Engineering Science, 1971, 26(1): 59-63.
- [14] 陈永平, 施明恒. 基于分形理论的多孔介质渗透率的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(12): 94-97.
CHEN Yongping, SHI Mingheng. Determination of permeability for porous media using fractal theory [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2000, 40(12): 94-97. (in Chinese)
- [15] WANG T J, WU C H, LEE L J. In-plane permeability measurement and analysis in liquid composite molding [J]. Polymer Composites, 1994, 15(4): 278-288.
- [16] 王晶, 夏新林, 李东辉, 等. 微纳孔隙材料渗透率的瞬态实验研究 [J]. 工程热物理论, 2016, 37(9): 2023-2026.
WANG Jing, XIA Xinlin, LI Donghui, et al. Transient experiment on the permeability of micro-nano porous materials [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(9): 2023-2026. (in Chinese)
- [17] BYON C, KIM S J. The effect of the particle size distribution and packing structure on the permeability of sintered porous wicks [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 61: 499-504.
- [18] 王丽燕, 崔占中, 陈伟华, 等. 不同热解温度下酚醛树脂复合材料渗透率测试 [J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 123-129.
WANG Liyan, CUI Zhazhong, CHEN Weihua, et al. Test on permeability of phenolic composites under different pyrolysis temperatures [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 123-129. (in Chinese)
- [19] 孙纪宁, 邓晶, 邓宏武. 涡轮叶片微小通道气膜新型复合冷却结构设计 [J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(5): 702-706.
SUN Jining, DENG Jing, DENG Hongwu. Structure design of a new cooling system combined micro channel and film cooling in the turbine blade [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(5): 702-706. (in Chinese)
- [20] GASCOIN N. High temperature and pressure reactive flows through porous media [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2011, 37(1): 24-35.
- [21] KIM H M, LETTRY Y, PARK D, et al. Field evaluation of permeability of concrete linings and rock masses around underground lined rock caverns by a novel in situ measurement system [J]. Engineering Geology, 2012, 137/138: 97-106.
- [22] 中国国家标准化管理委员会. 精细陶瓷密度和显气孔率试验方法: GB/T 25995—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Test methods for density and apparent porosity of fine ceramics: GB/T 25995—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011. (in Chinese)
- [23] 严兆大. 热能与动力工程测试技术 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2006: 45-47.
YAN Zhaoda. Thermal Energy and Power Engineering Testing Technology [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2006: 45-47. (in Chinese)