

# 结构参数对石英纤维针刺毡防隔热和力学性能的影响

杨浩伟<sup>1</sup> 师建军<sup>2</sup> 王伟<sup>2</sup> 罗丽娟<sup>2</sup> 郑振荣<sup>1</sup>

(1 天津工业大学纺织科学与工程学院, 天津 300387)

(2 航天材料及工艺研究所, 先进功能复合材料技术重点实验室, 北京 100076)

**文 摘** 为开发具有良好防隔热和力学性能的高性能石英纤维毡,基于传热数学方程,预测了石英纤维毡的厚度对其隔热性能的影响规律;为提高纤维毡的力学性能,探究了在纤维毡中添加不同层数的石英纤维布对其力学性能的影响规律;此外还探讨了针刺密度对石英纤维毡隔热性能和力学性能的影响。结果表明:石英纤维毡传热模型与实验吻合度可达94.8%;石英纤维毡厚度提升2 mm,其隔热性能提高20℃左右;添加石英纤维布可以显著提高纤维毡断裂强度和撕破强度;针刺密度可以提升纤维毡力学性能,但针刺密度过大会破坏纤维毡结构,使其力学性能下降。

**关键词** 石英纤维毡,结构参数,隔热性能,力学性能,数值模拟

中图分类号:TQ343

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2024.02.007

## Effects of Structural Parameters on Thermal Insulation and Mechanical Properties of Quartz Fiber Needled Felt

YANG Haowei<sup>1</sup> SHI Jianjun<sup>2</sup> WANG Wei<sup>2</sup> LUO Lijuan<sup>2</sup> ZHENG Zhenrong<sup>1</sup>

(1 School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387)

(2 Science and Technology on Advanced Functional Composite Laboratory, Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** In order to develop high-performance quartz fiber felt with good thermal insulation and mechanical properties, the effects of the thickness of quartz fiber felt on its thermal insulation performance were predicted based on the mathematical equation of heat transfer. To improve the mechanical properties of fiber felt, the influence of adding different layers of quartz fiber cloth to the fiber felt on its mechanical properties was investigated. Additionally, the influence of needle-punched density on the thermal insulation and mechanical properties of quartz fiber felt was also discussed. The results show that the simulation temperature of quartz fiber felt has a good agreement with the experiment, with the calculation accuracy is up to 94.8%. The thermal insulation performance improves by about 20℃ when the thickness of the quartz fiber felt is increased by 2 mm. Adding quartz fiber cloth significantly improves the breaking strength and tearing strength of fiber felt. However, excessive needle punched density reduces its mechanical properties and damage the structure of fiber felt.

**Key words** Quartz fiber felt, Structure parameters, Heat insulation, Mechanical property, Numerical simulation

### 0 引言

高超声速飞行器<sup>[1]</sup>在飞行时,会面临严酷的气动加热<sup>[2]</sup>环境。在这样的高温下,会对飞行器内部的安全造成威胁,为了保证飞行器的正常运行,必须对飞行器进行有效的热防护。隔热材料<sup>[3]</sup>是飞行器热防护系统中最重要的组成部分,目前隔热材料大概可

以分为以下两类:一类是以碳纤维增强碳基体材料<sup>[4-5]</sup>、陶瓷瓦<sup>[6-8]</sup>等为代表性的刚性隔热材料;另一类是以纤维毡<sup>[3, 9-13]</sup>为代表性的柔性隔热材料。相比于刚性隔热材料,纤维毡柔性隔热材料具有不可比拟的优势。例如,柔性好易弯曲、密度低质量轻、与飞行器结构匹配性好、生产周期短、易安装、操作方

收稿日期:2022-12-26

基金项目:国家自然科学基金(No. 52003071);北京市科技新星计划(Z211100002121090)

第一作者简介:杨浩伟,1998年出生,硕士,主要从事防护纺织品研究工作。E-mail: yanghaowei12345@163.com

通信作者:郑振荣,1981年出生,教授,博士,主要从事防护纺织品研究工作。E-mail: tianjinzhengzr@163.com

便等。

纤维毡隔热材料的应用最早起步于欧美国家,例如NASA研制的早期柔性石英纤维隔热毡AFRSI,其在航空航天领域得到了成功的应用。国内也对纤维毡的性能应用进行了探究,薛云嘉等<sup>[14]</sup>对石英纤维毡的弹性性能和隔热性能进行了测试。结果表明纤维毡压缩30%时还具有良好的回弹性能,另外将纤维毡正面加热到1 000 °C后稳定1 h,其背面温度可以低于200 °C,表明石英纤维毡具有优异的隔热性能。陈照峰等<sup>[15]</sup>以空心微珠为基体,制备了玻璃纤维复合隔热毡,该复合纤维毡可以在热流多次侵袭的情况下,依然保持良好的隔热性能。

石英纤维毡具有多种优点例如柔性好、隔热性能优异等,其广泛应用于航空航天、汽车、建筑等领域<sup>[10]</sup>。但是随着航空航天技术的发展,以及高超声速变体飞行器<sup>[16-21]</sup>的出现,石英纤维毡在使用过程中会随着飞行器变体结构的变化而发生弯曲、扭转甚至撕裂,需要纤维毡在具有优异的隔热性能的同时还需要具备良好的力学性能。此外在隔热材料的研究中,数值模拟<sup>[22]</sup>是一种先进的研究手段,通过仿真计算来预测材料的性能,可以大大减少时间及实验成本,节约能源。本文以石英纤维毡为对象,利用数值模拟的方法研究不同制备工艺参数对其隔热性能的影响,并且验证模型的准确性,同时对纤维毡实体进行力学性能测试,以找出不同因素对其力学性能影响的规律。

## 1 实验

### 1.1 石英纤维毡的制备

石英纤维毡采用针刺法自行制备。针刺法是指利用机械刺针对铺叠好的石英单纤进行连续针刺,通过刺针不断地上下运动,使不规则分散的单纤相互交叉、缠绕,来达到固结的目的,最终形成纤维集合体—石英纤维毡。

(1)为验证石英纤维毡传热数值模型的准确性,制备出体积密度 $112 \text{ kg/m}^3$ 、厚度为12 mm、针刺密度为30 针/ $\text{cm}^2$ 的石英纤维毡,对其进行酒精喷灯烧蚀实验。经测试,该纤维毡的热导率为 $77 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

(2)为提高石英纤维毡的力学性能,在纤维毡内部分别添加1、2、3层石英纤维布,石英纤维布沿纤维毡厚度方向等距均匀分布(1层纤维布时分布在中央位置),利用针刺方法制备成纤维毡,针刺密度为30 针/ $\text{cm}^2$ ,考察石英纤维布的添加对纤维毡力学性能的影响,纤维毡参数见表1(通过对纤维毡实体进行测试得到基本参数)。自制石英纤维布基本参数为:克重 $120 \text{ g/m}^2$ ,经密和纬密5 根/cm,厚度0.3 mm。

(3)针刺密度对纤维毡的隔热和力学性能具有

表1 添加不同石英纤维布层数纤维毡的基本参数

Tab. 1 Basic parameters of adding different layers of quartz fiber cloth to fiber felt

玻纤布层数	$\rho$ / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\lambda$ / $\text{mW}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	纤维毡厚度/mm
添加1层	156	62	12
添加2层	183	67	12
添加3层	200	69	12

重要影响,选择在纤维毡内部添加3层石英纤维布,并采用以下三个不同的针刺密度制备石英纤维毡:10、15、25 针/ $\text{cm}^2$ ,分别探究针刺密度对纤维毡隔热性能和力学性能的影响,纤维毡参数见表2(通过对纤维毡实体进行测试得到基本参数)。

表2 不同针刺密度石英纤维毡的基本参数

Tab. 2 Basic parameters of quartz fiber felt with different needle density

针刺密度/ 针· $\text{cm}^{-2}$	$\rho$ / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\lambda$ / $\text{mW}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	纤维毡厚度/mm
10	168	56	12
15	172	61	12
25	178	65	12

### 1.2 石英纤维毡参数测试方法

石英纤维毡厚度测试采用太原莱州市电子仪器有限公司的YG141LA数字式织物厚度仪按照GB/T 3819—1997进行测试,加压压力0.5 kPa,加压时间30 s,测取10个数值后取平均值作为纤维毡的厚度。

石英纤维毡热导率通过瑞典凯戈纳斯有限公司的TPS2500S热常数分析仪进行测试,表面发射率通过德国英格拉斯股份有限公司的TIR100-2红外热发射率测定仪进行测试。

石英纤维毡的断裂拉伸性能采用美国英斯特朗公司的Instron3369万能强力机按照GB/T 3923.1—2013进行测试,样品大小为 $300 \text{ mm}\times 50 \text{ mm}$ ,拉伸速率 $100 \text{ mm/min}$ ,隔距长度为200 mm。

石英纤维毡的撕破性能采用美国英斯特朗公司的Instron3369万能强力机按照GB/T 3917.3—2009进行测试,样品大小为 $150 \text{ mm}\times 75 \text{ mm}$ 的梯形试样,拉伸速率为 $100 \text{ mm/min}$ ,隔距长度为25 mm。

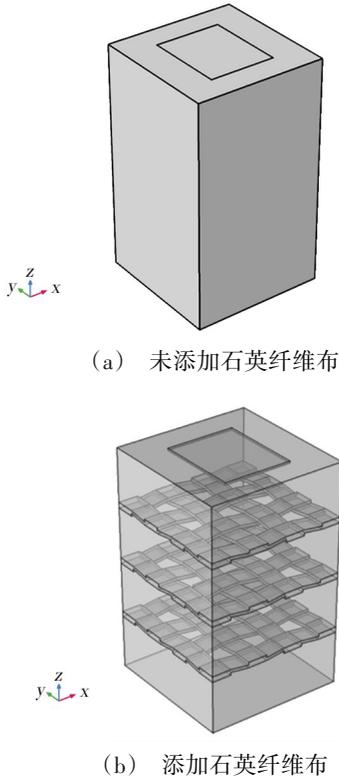
## 2 石英纤维毡传热数值模型的建立

### 2.1 石英纤维毡三维几何建模

为简化计算,将石英纤维毡看作一个匀质的整体材料,利用Catia软件建立其三维几何模型,结果见图1。为了减小计算负荷,将纤维毡模型的长宽缩小,固定为 $7 \text{ mm}\times 7 \text{ mm}$ ,厚度为12 mm。模型上方的矩形代表纤维毡被加热的区域,该区域大小经过实

验测试确定其面积占纤维毡整个面大小的30%左右,所以其长宽设置为4.2 mm×3.5 mm。

建立出的石英纤维毡模型主要分为未添加石英纤维布和添加石英纤维布。对于不同厚度纤维毡的模拟通过直接改变石英纤维毡的厚度即可达到目的。对于不同针刺密度的石英纤维毡,由于针刺密度的改变会引起纤维毡体积密度、热导率等的变化,故通过输入不同的体积密度及热导率来表示不同针刺密度的石英纤维毡。



(a) 未添加石英纤维布

(b) 添加石英纤维布

图1 石英纤维毡模型

Fig. 1 Model of quartz fiber felt

## 2.2 模型导入及材料属性添加

将建立的石英纤维毡模型导入Comsol软件利用固体传热模块对其进行传热性能计算。模型导入完毕之后,对模型进行材料添加,导入不同石英纤维毡的性能参数(体积密度、热导率等)。

## 2.3 传热模拟条件及热载荷添加

模拟的初始温度设置为环境温度20℃。对纤维毡的正面进行加热,加热温度为750℃。

纤维毡内部存在着大量静止空气,当受到高温加热时,纤维毡内部热量传递的主导方式为热传导,外部热量的传递方式为其表面的热对流和热辐射,据此为传热模型添加热载荷。

当纤维毡被750℃的火焰烧蚀时,会从热源获得热量 $Q$ ;纤维毡周围存在空气的流动带走热量 $Q_1$ ;当纤维毡温度升高后,又会向周围环境辐射热量 $Q_2$ ;在

纤维毡内部以热传导的方式进行传递的热量为 $Q_3$ ;基于能量守恒方程,建立纤维毡的传热数学方程如下:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (1)$$

(1)添加热载荷 $Q_1$ :对纤维毡表面添加与外界空气的热对流,对流方程如下:

$$Q_1 = h(T_1 - T_2) \quad (2)$$

式中, $h$ 代表对流换热系数,值为12 W/(m<sup>2</sup>·K), $T_1$ 代表织物表面的温度, $T_2$ 代表周围空气的温度。

(2)添加热载荷 $Q_2$ :对纤维毡添加表面对环境的辐射,辐射方程如下:

$$Q_2 = \varepsilon\sigma(T_{\text{amb}}^4 - T^4) \quad (3)$$

式中, $\varepsilon$ 代表织物的表面发射率,值为0.76, $\sigma$ 代表斯蒂芬-玻尔兹曼常数,约为5.67×10<sup>-8</sup> W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>)。 $T_{\text{amb}}$ 和 $T$ 分别为环境温度和织物表面的温度。

(3)添加热载荷 $Q_3$ :该部分载荷无需特意添加,为Comsol软件中固体热传导模块的内置方程。该方程如下:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \frac{Q_3}{\rho c_p} \quad (4)$$

式中, $\frac{\partial T}{\partial t}$ 为温度和时间的函数, $\alpha$ 代表织物的热扩散系数, $\rho$ 代表织物密度, $c_p$ 代表织物的比热容。

## 2.4 网格划分

传热模拟条件及热载荷添加完毕后,需要对石英纤维毡进行网格化划分,本次模拟采用自由四面体网格划分,最大单元大小为0.3 mm,最小单元大小为1 μm,最大单元增长率为1.5%。

## 2.5 传热计算

待模型网格化划分完毕,设置传热模拟总时间为700 s,时间步长为1 s,对模型进行传热计算。记录模型背部温度随加热时间增加而变化的曲线,将其作为传热模拟结果。

## 2.6 传热数值模型的验证

采用酒精喷灯烧蚀实验对石英纤维毡在高温下的数学传热模型进行验证。实验装置见图2(a),具体实验步骤为:调节酒精喷灯的火焰,使其外焰温度达到750℃;将石英纤维毡放置于三脚架的石棉网上,利用酒精喷灯对其进行加热;同时通过红外测温计测量纤维毡背部的温度,记录并存储在电脑中;最后将多次实验测量的数据取平均值制作成曲线图,并与模拟值进行比较。

由图2(b)可知,随着加热时间的增加,石英纤维毡背部温度逐渐增大,当增大到一定值后升温速率下降为0,背部温度保持不变。对比实验温度曲线和模拟温度曲线,可以发现两者结果一致性较好,并且

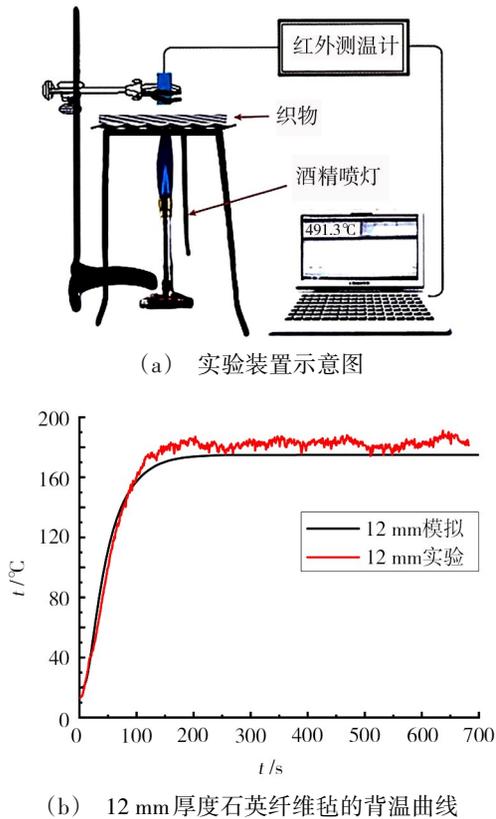


图2 采用酒精喷灯烧蚀实验验证传热模型  
Fig. 2 Validation of heat transfer model by alcohol blowtorch ablation experiment

最终两者背部温度差值仅为7℃。对两者曲线每一个相同加热时间下的背部温度计算误差并求出平均值,结果表明模拟温度平均误差为5.2%,即精度可达94.8%,建立的传热计算模型准确度较高,可以很好地反映纤维毡隔热性能的变化情况。

### 3 结果与分析

#### 3.1 厚度对石英纤维毡隔热性能的影响

厚度对于织物的热防护性能影响较大,一般来说,厚度越大的织物热防护性能越好。利用数值模型探讨不同厚度下纤维毡的隔热性能结果如图3所示。由图3(a)可知,在一定厚度下,石英纤维毡随着烧蚀时间的延长,其背面温度先快速升高到最高值,然后趋于稳定,说明纤维毡达到了热平衡状态。厚度为6 mm纤维毡在85 s达到最高温238℃;而厚度12 mm纤维毡在200 s达到最高温174℃,说明随着厚度的增加,纤维毡达到最大背部温度的时间逐渐增大,最高温度逐渐降低,隔热能力逐渐增强。但是当纤维毡的厚度为6 mm到8 mm时,纤维毡背部温度下降了27℃,而纤维毡的厚度为10 mm到12 mm时,背部温度只是下降了17℃,可以说明随着厚度的增加,纤维毡的隔热性能提升的幅度会越来越小。

将纤维毡在烧蚀条件下其背面达到热平衡状态时

的温度( $T$ )与纤维毡厚度( $d$ )绘制回归曲线,利用Origin软件中的Allometric1函数对曲线进行非线性拟合,结果如图3(b)所示。获得回归方程 $T=530.79 d^{-0.45}$ ,其中拟合度因子 $R$ 为0.99826,表明拟合度较好。

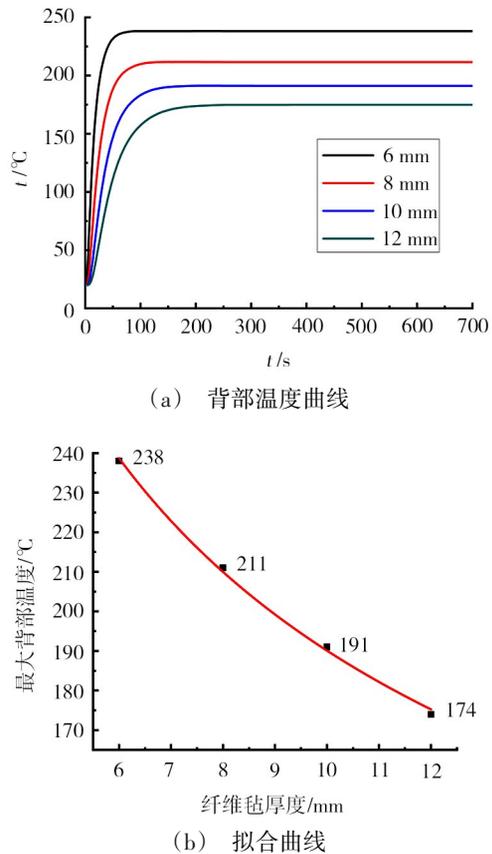


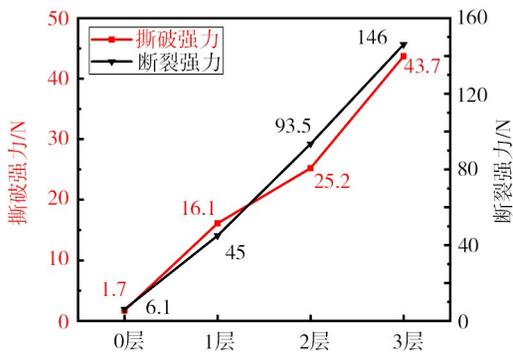
图3 不同厚度石英纤维毡的背部温度曲线及其拟合曲线

Fig. 3 The back temperature curves and its fitting curve of quartz fiber felt with different thicknesses

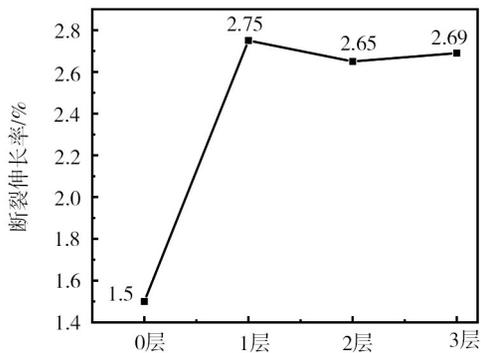
#### 3.2 添加石英纤维布层数对其力学性能的影响

由于12 mm石英纤维毡具有良好的隔热性能,为保证其在使用中具有良好的力学性能,对其进行力学性能测试,结果显示该织物的撕破强力为1.7 N,断裂强力为6.1 N,断裂伸长率为1.5%,说明力学性能还有待提高。为解决纤维毡类材料力学性能差的问题,探讨在石英纤维毡中添加石英纤维布的方法来提高其力学性能,其结果如图4所示。

由图4(a)可知,当添加的石英纤维布从1层增加到3层时,纤维毡的撕破强力可达43.7 N,断裂强力可达146 N,比起未添加石英纤维布的纤维毡,两者性能提高了约20倍,说明石英纤维布的添加显著提高了纤维毡的力学性能。这是由于添加石英纤维布后,不仅织物本身具有良好的力学性能,其在制备的过程中会随着针刺运动的进行,与纤维毡内部的石英纤维发生穿插、缠绕,形成一定的石英纤维布—石



(a) 力学性能



(b) 断裂伸长率

图4 添加不同石英纤维布层数的纤维毡力学性能及其断裂伸长率

Fig. 4 Mechanical properties and elongation at break of fiber felt with adding different layers of quartz fiber cloth

英纤维抱合结构,内部结合力更大,在受到外力作用时,表现出更优异的力学性能。

石英纤维毡的延展能力可由其断裂伸长指标进行考核。由图4(b)可知,添加1层石英纤维布后,纤维毡的伸长率会增加到2.75%,明显高于未添加石英纤维布时纤维毡的伸长率(1.5%),但继续增加石英纤维布层数,对其断裂伸长率的影响不大。

### 3.3 针刺密度对石英纤维毡性能的影响

在非织造纤维毡的制备过程中,针刺密度的取值对于其结构有很大的影响。当针刺密度增加时,可以提高纤维毡内部纤维的结合强度:一方面使得纤维毡力学性能得到提升;另一方面会加强纤维毡内部固相传热的强度,使得纤维毡隔热性能下降。此外,针刺密度过大时,可能会对纤维毡的结构造成损伤。

#### 3.3.1 隔热性能

当针刺密度分别为10、15和25针/cm<sup>2</sup>时,石英纤维毡在750℃烧蚀时的背部温度曲线如图5所示。由图5可知,可以发现当加热时间在25~50s时,不同针刺密度下三种纤维毡的升温曲线完全重合。50s

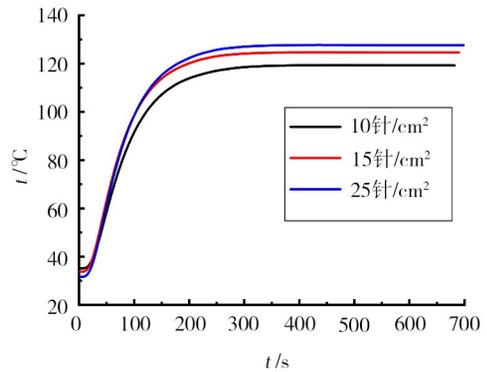


图5 不同针刺密度下石英纤维毡的背部温度曲线  
Fig. 5 Back temperature curves of quartz fiber felt under different needling density

之后,三条曲线开始出现第一个拐点,10针/cm<sup>2</sup>针的升温曲线与其他两者分离开来。随着时间的进一步增加,针刺密度为15和25针/cm<sup>2</sup>的升温曲线保持一致,直到115s出现第二个拐点,两条曲线才完全分离。此外,随着针刺密度的增加,石英纤维毡背部达到热平衡时的温度逐渐增大,10针/cm<sup>2</sup>时为119℃,15针/cm<sup>2</sup>时为124℃,25针/cm<sup>2</sup>时为127℃。

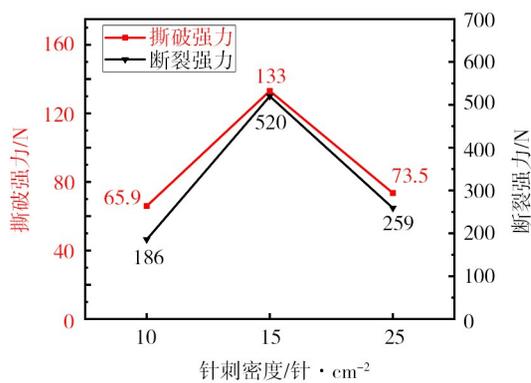
当针刺密度由15针/cm<sup>2</sup>增加到25针/cm<sup>2</sup>时,纤维毡的体积密度由165 kg/m<sup>3</sup>提高到178 kg/m<sup>3</sup>(表2),说明随着针刺密度的增加,纤维毡内部的体积密度增大,这不仅增大了纤维毡内部纤维之间接触的面积,增加了热传导,而且降低了纤维毡内部静止空气的含量,导致纤维毡隔热性能变差。

#### 3.3.2 力学性能

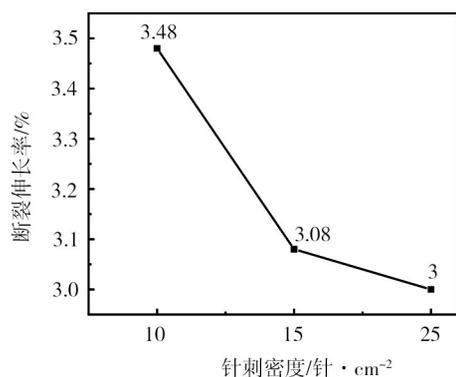
当针刺密度分别为10、15和25针/cm<sup>2</sup>时,石英纤维毡的力学性能变化如图6所示。

由图6(a)可知,针刺密度为10针/cm<sup>2</sup>时,石英纤维毡的撕裂强力为65.9N,断裂强力为186N。当针刺密度增加到15针/cm<sup>2</sup>时,石英纤维毡的撕裂强力和断裂强力分别增加到原来的约2倍和3倍,可以看出增加针刺密度可以提升石英纤维毡的力学性能。但当针刺密度增加到25针/cm<sup>2</sup>时,纤维毡的撕裂强力和断裂强力反而会下降。这是因为,当在一定范围内增加石英纤维毡的针刺密度时,单根纤维可以结合的纤维数量便会增多,纤维间的结合力增大,抱合作用更强,当受到撕破和断裂外力作用时,会获得更大的撕裂强力和断裂强力;但是针刺密度过大,会破坏纤维本身的结构,导致纤维破损甚至断裂,使得石英纤维毡的撕裂强力和断裂强力迅速下降。

由图6(b)可知,随着针刺密度的增加,石英纤维毡的断裂伸长率不断下降。这是因为当针刺密度增大后,纤维会发生破损甚至断裂,导致纤维毡的断裂伸长率进一步降低。



(a) 力学性能



(b) 断裂伸长率

图6 不同针刺密度石英纤维毡的力学性能及其断裂伸长率

Fig. 6 Mechanical properties and elongation at break of quartz fiber felt with different needle punched densities

#### 4 结论

基于石英纤维毡的三维几何模型,利用数学传热方程建立了石英纤维毡在750℃烧蚀下的数学传热模型,结果表明,所建立的模型精度在90%以上,可以准确地反映纤维毡的隔热性能;厚度对于纤维毡隔热性能影响显著,石英纤维毡厚度每提升2mm,其背部温度可以降低20℃左右;针刺密度也会影响纤维毡隔热性能,但是影响较小。

通过在纤维毡中添加石英纤维布的方法探究纤维毡的力学性能变化,当添加的石英纤维布从1层增加到3层时,纤维毡的撕破强力可达43.7N,断裂强力可达146N,比起未添加石英纤维布的纤维毡,两者性能提高了约20倍。针刺密度的增大可以提升石英纤维毡的力学性能,当针刺密度从10针/cm<sup>2</sup>增加到15针/cm<sup>2</sup>时,石英纤维毡的撕破强力和断裂强力分别增加到原来的约2倍和3倍。当针刺密度过大时,会使纤维毡力学性能下降,例如当针刺密度由15针/cm<sup>2</sup>增加到25针/cm<sup>2</sup>时,石英纤维毡的断裂强力由520N降到259N。

#### 参考文献

[1] 梁伟,金华,孟松鹤,等. 高超声速飞行器新型热防护机制研究进展[J]. 宇航学报,2021,42(4):409-424.

LIANG Wei, JIN Hua, MENG Songhe, et al. Research progress on new thermal protection mechanisms for hypersonic vehicles [J]. Acta Astronautica, 2021, 42(4): 409-424.

[2] 俞继军,邓代英,罗晓光,等. 材料防热的多尺度现象与防热建模[J]. 气体物理,2021,6(4):1-18.

YU Jijun, DENG Daiying, LUO Xiaoguang, et al. Multi-scale phenomena and modeling of thermal protection of materials [J]. Gas Physics, 2021, 6(4): 1-18.

[3] 郝栋连,冯慧,苏悦,等. 高温隔热材料的研究现状及发展趋势[J]. 合成纤维工业. 2022,45(1):68-73.

HAO Donglian, FENG Hui, SU Yue, et al. Research status and development trend of high temperature thermal insulation materials[J]. Synthetic Fiber Industry, 2022, 45(1): 68-73.

[4] PHAM S D W D. Ablation analysis of the shuttle orbiter oxidation protected reinforced carbon-carbon[R]. AIAA, 1994.

[5] CURRY D M, J W L G. Space shuttle orbiter leading edge structural subsystem development[R]. AIAA, 1983.

[6] 黄红岩,苏力军,雷朝帅,等. 可重复使用热防护材料应用与研究进展[J]. 航空学报,2020,41(12):1-35.

HUANG Hongyan, SU Lijun, LEI Chaoshuai, et al. Application and research progress of reusable thermal protection materials [J]. Acta Aeronautica, 2020, 41(12): 1-35.

[7] HUANG J, YAO W X. High-temperature mechanical properties of strain isolation pad for thermal protection system [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2018, 55(4): 848-855.

[8] JENKINS D R. Protecting the body: the orbiter's thermal protection system [M]. Space Shuttle Legacy, 2013: 111-135.

[9] QIONG T, NAN W, BING W, et al. Fabrication of hollow SiC ultrafine fibers by single-nozzle electrospinning for high-temperature thermal insulation application [J]. Materials Letters, 2019, 239: 109-112.

[10] TANG B, WANG Y, HU L, et al. Preparation and properties of lightweight carbon/carbon fiber composite thermal field insulation materials for high-temperature furnace [J]. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2019, 14: 1925954443.

[11] 李桢,陆琳玲,张陆贤. 废旧聚酯短纤/芳纶针刺纤维毡保温材料制备及工艺分析[J]. 上海纺织科技, 2021, 49(4): 23-26.

LI Zhen, LU Linling, ZHANG Luxian. Preparation and process analysis of waste polyester staple fiber / aramid needle-punched fiber felt insulation materials [J]. Shanghai Textile Science and Technology, 2021, 49(4): 23-26.

[12] 徐自超,张得昆,吴江伟,等. 高强度PP/PI非织造布辊用基布的制备工艺优化[J]. 纺织高校基础科学学报, 2021, 34(3): 7-13.

XU Zichao, ZHANG Dekun, WU Jiangwei, et al. Optimization of preparation process of base cloth for high strength PP/PI nonwoven roller [J]. Journal of Basic Science of Textile University, 2021, 34(3): 7-13.

[13] 彭飞,姜勇刚,冯坚,等. 耐高温氧化铝气凝胶隔热复合材料研究进展[J]. 无机材料学报,2021,36(7): 673-684.

PENG Fei, JIANG Yonggang, FENG Jian, et al. Research progress of high temperature resistant alumina aerogel thermal insulation composites [J]. Inorganic Materials Journal, 2021, 36(7): 673-684.

[14] 薛云嘉,刘家臣. 柔性纤维毡的制备及其弹性与隔热性能研究[J]. 材料导报,2022(3):1-13.

XUE Yunjia, LIU Jiachen. Preparation of flexible fiber felt and its elastic and thermal insulation properties [J]. Material Guide, 2022(3):1-13.

[15] 郭建业,赵英民,吴朝军,等. 温度对石英纤维毡隔热性能的影响[J]. 材料导报,2020,34(24):24019-24022,24033.

GUO Jianye, ZHAO Yingmin, WU Chaojun, et al. The effect of temperature on the thermal insulation performance of quartz fiber felt [J]. Material Bulletin, 2020, 34(24):24019-24022,24033.

[16] 冉茂鹏,王成才,刘华华,等. 变体飞行器控制技术发展现状与展望[J]. 航空学报,2022,43(10): 432-449.

RAN Maopeng, WANG Chengcai, LIU Huahua, et al. Development and prospect of control technology for morphing aircraft [J]. Journal of Aeronautics, 2022, 43(10): 432-449.

[17] 孙杨,昌敏,白俊强. 变形机翼飞行器发展综述[J]. 无人系统技术,2021,4(3):65-77.

SUN Yang, CHANG Min, BAI Junqiang. Development of morphing wing aircraft [J]. Unmanned Systems Technology,

2021,4(3):65-77.

[18] 杨博,朱一川,魏延明,等. 折叠式变体飞行器轨迹优化及控制分析[J]. 中国空间科学技术,2020,40(3): 64-75.

YANG B, ZHU Y C, WE YM, et al. Trajectory optimization and control analysis of folding morphing aircraft [J]. China Space Science and Technology, 2020, 40(3):64-75.

[19] 张尧,张婉,别大卫,等. 智能变体飞行器研究综述与发展趋势分析[J]. 飞航导弹,2021(6): 14-23.

ZHANG Yao, ZHANG Wan, BIE David, et al. Review and development trend analysis of intelligent morphing aircraft [J]. Flying Missile, 2021 (6):14-23.

[20] 陈铁彪,龚旻,王洪波,等. 临近空间可变形滑翔飞行器轨迹优化与性能分析[J]. 宇航学报,2018,39(9): 943-951.

CHEN Tiebiao, GONG Min, WANG Hongbo, et al. Trajectory optimization and performance analysis of near space deformable glider [J]. Journal of Astronautics, 2018, 39(9): 943-951.

[21] 沈元. 柔性翼变体飞行器设计与特性研究[D]. 南京航空航天大学,2017.

SHEN Yuan. Design and characteristics of flexible wing morphing aircraft [D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.

[22] DEHGHAN N, PAYVANDY P, TALEBI S. Introducing a novel model for predicting effective thermal conductivity of spacer fabrics based on their structural parameters[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2022, 147(12):6615-6629.