

# 柔性隔热材料体积变化率的研究

张宏波 姚先周 王 钦 王晓婷 胡子君

(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** 通过 L9(34) 正交试验分析了缝制工艺中的几种参数对体积变化率的影响,分析得到产品厚度和缝线间距是影响尺寸变化率的主要影响因素。经过分析和实验验证,提出通过合理分配缝线间距来调整缝线张力的方法,控制异性结构柔性隔热材料的变形问题。

**关键词** 柔性隔热材料, 体积变化率, 正交试验

中图分类号: TB332

DOI: 10.3969/j.issn.1007-2330.2014.05.015

## The Volume Change of the Flexible Insulation

ZHANG Hongbo YAO Xianzhou WANG Qin WANG Xiaoting HU Zijun

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

**Abstract** In this paper L9(34) orthogonal experiment design was performed to investigate the effects of the volume change in the insulation sewing process. The results of the experiment show that thickness and density of thread are the factor which play the most important role. An improved adaptive controlling method based on setting space between thread was proposed to control the deformation of curve flexible insulation.

**Key words** Flexible insulation, The volume change, Orthogonal experiment

### 0 引言

柔性隔热材料是目前航天飞行器热防护系统中使用较多的一种隔热材料,美国从 1971 年开始研制应用于航天飞机上的柔性隔热材料,并经过了多个发展阶段。第二代大面积使用的柔性隔热材料,其主要成分是石英纤维,最高使用温度为 750℃,它是把氧化硅纤维棉夹在编织的氧化硅(石英)布中,用氧化硅纤维缝线缝制在一起并使之增强<sup>[1]</sup>。国内从 20 世纪 80 年代开始研制柔性隔热材料,其中航天材料及工艺研究所研制的柔性隔热材料性能已与国外同类材料的性能相当<sup>[2]</sup>。

柔性隔热材料在缝制完成后,垂直方向的厚度显著膨胀,同时平面方向的长宽尺寸有一定的收缩,研究这种变化规律对提高柔性隔热材料的外观尺寸精度有重要的指导意义。如作为外部使用的柔性隔热材料,其厚度上的差异使飞行器表面不平整。飞行器高速飞行时,这些不平整的区域表面产生气流扰动,

导致气流发生分离和再附,使局部热流急剧升高,产生严重的气动热和烧蚀现象<sup>[3]</sup>。本文通过正交试验分析了缝制工艺中参数对尺寸变化率的影响,并提出通过合理控制缝线张力的方法,以解决非平板隔热材料的变形问题。

### 1 实验

#### 1.1 材料制备

采用缝制工艺制备柔性隔热材料,玻璃纤维棉和纤维布按顺序铺层后,用玻璃纤维缝线上下贯穿隔热材料的各层,缝制成类似棉被结构的柔性隔热材料。选用了不同工艺参数缝制柔性隔热材料,比较各参数对缝制前后隔热材料的尺寸变化,分析缝制工艺对尺寸变化率的影响规律。

#### 1.2 参数水平

纤维棉毡的膨胀力和缝线拉力不容易直接测出来,难于通过理论计算得到柔性隔热材料最终的成品尺寸,本文通过 L9(34) 正交试验,考察缝制工艺中各

收稿日期: 2013-10-26

作者简介: 张宏波, 1978 年出生, 硕士, 主要从事高效隔热复合材料的研究。E-mail: zpedder@126.com

种因素对制品厚度方向膨胀率的影响。膨胀力主要与纤维棉毡的长宽、厚度有关;缝线拉力与缝线间距、缝线规格等因素相关。因此本文选择制品的长度(宽度)、厚度、缝线间距和缝线规格作为试验因素,每个因素选取3个水平,具体见表1。

表1 因素-水平表  
Tab.1 Factors and levels

试验水平	长度(宽度) /mm	厚度 /mm	缝线间距 /mm	缝线粗细 /Tex
1	150	10	5	51
2	300	20	10	95
3	450	30	15	190

### 1.3 试验指标

尺寸变化率包括两个方面,垂直方向的厚度膨胀率和平面方向的长度收缩率。其中厚度膨胀率  $\Delta H$  由公式(1)计算得到,长度收缩率  $\Delta L$  由式(2)计算。

$$\Delta H = (h_1 - h_0) / h_0 \times 100\% \quad (1)$$

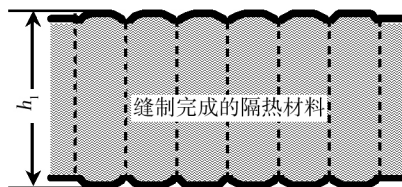


图1 柔性隔热毡厚度变化示意图

Fig.1 Thickness change of flexible insulation

### 2.1 直观分析

正交试验的极差分析法又称为直观分析法,可通过极差  $R$  的大小评价各因素及其耦合作用的影响敏感性,它反映了各因素对试验指标影响的相对大小<sup>[4]</sup>。极差越大,表示这个因素的数值在试验范围内变化时,导致试验结果的变化越大,所以极差最大的那个因素是主要因素。各因素的极差  $R$  由式(3)计算得到:

$$R = K_{\max} - K_{\min} \quad (3)$$

式中,  $K$  为各因素在不同水平下的各试验结果之和。各因素的极差分析结果如表2所示。

从极差分析结果可以看出,试样厚度和缝线间距对厚度膨胀率的影响较大,而试样长宽尺寸和缝线规格影响较小。试样厚度因素对膨胀率的影响最大,极差为26.39%,并且随厚度的增加膨胀率减小。其中

式中,  $h_0$  为隔热材料在工装中的厚度测量值,  $h_1$  为缝制完成后隔热材料在自然状态下的厚度测量值。

$$\Delta L = (l_0 - l_1) / l_0 \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $l_0$  为隔热材料在工装中的长度测量值,  $l_1$  为缝制完成后隔热材料在自然状态下的长度测量值。

### 2 结果与分析

柔性隔热材料中的纤维棉毡密度较低,缝制过程中用工装将纤维棉毡压紧至一定厚度,然后用纤维缝线在厚度方向贯穿纤维布和纤维棉毡缝制成一定密度的隔热材料。纤维棉毡在受压后,都有恢复原有状态的趋势,即膨胀趋势,因此缝制完成的柔性隔热材料,在卸去工装后在厚度方向产生膨胀。当隔热材料内部的膨胀作用力与纤维缝线的拉力达到平衡时,此时隔热材料的厚度即为成品厚度(图1)。

选择了制品的长度(宽度)、厚度、缝线间距和缝线规格作为试验因素,以制品卸去工装后的厚度变化,即厚度膨胀率作为试验指标,分析各因素对膨胀率的影响。

6#试样的膨胀率最低,该样品的缝制厚度最大,而缝线间距最小,因此表现出最小的膨胀率,试验现象与极差分析结果相符。试样的长宽尺寸对膨胀率的影响较小,而缝线规格几乎对厚度变化没有明显贡献。各因素对厚度膨胀率的影响由大到小依次为:厚度>缝线间距>长度/宽度>缝线规格。指标-因素趋势见图2。

厚度因素是膨胀率的主要影响因素,通常会认为物料越多、越厚,则膨胀越多。但是从正交试验的结果可知,厚度方向的膨胀率随产品缝制厚度的增加而减小,该结果与原有经验相反。分析其原因可能在于缝制完成的产品厚度不但与物料自身的膨胀有关,而且受到纤维缝线的拉力。产品的自然厚度应该是物料膨胀与缝线拉紧后平衡的结果,两个力同时作用则导致膨胀率随厚度增加而减小。

表 2 交互正交试验方案和试验结果

Tab. 2 Interactive orthogonal experimental details and results

试样	试验因素				厚度膨胀率 $\Delta H/\%$
	长度(宽度) /mm	厚度 /mm	缝线间距 /mm	缝线规格 /Tex	
1 <sup>#</sup>	150	10	5	51	27.50
2 <sup>#</sup>	150	20	10	95	16.25
3 <sup>#</sup>	150	30	15	190	10.42
4 <sup>#</sup>	300	10	10	190	37.50
5 <sup>#</sup>	300	20	15	51	19.38
6 <sup>#</sup>	300	30	5	95	2.08
7 <sup>#</sup>	450	10	15	95	38.75
8 <sup>#</sup>	450	20	5	190	10.63
9 <sup>#</sup>	450	30	10	51	12.08
$K_1$	18.06	34.58	13.40	19.65	
$K_2$	19.65	15.42	21.94	19.03	
$K_3$	20.49	8.19	22.85	19.51	
$R$	2.43	26.39	9.44	0.63	

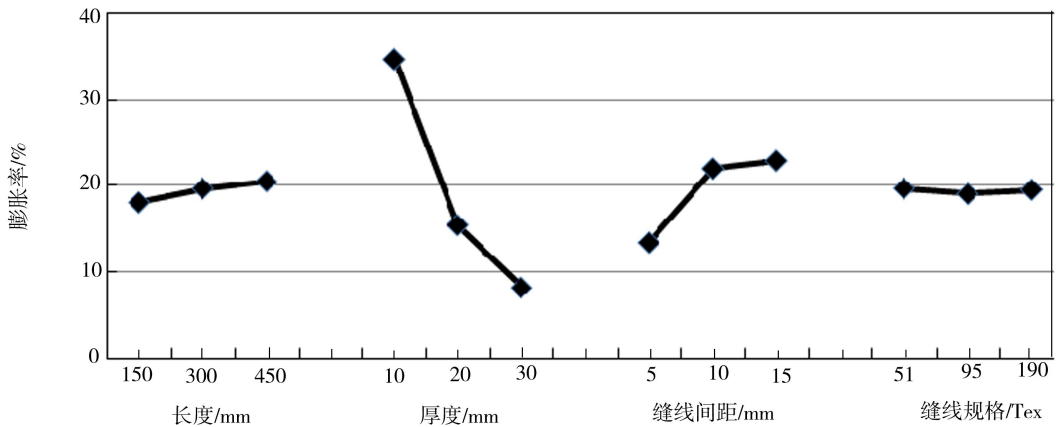


图 2 指标—因素趋势图

Fig. 2 Trends of the index-factors

## 2.2 收缩率的极差分析

制品在厚度方向产生膨胀后,导致纤维缝线在平面方向收缩。以平面方向的长度收缩率作为试验指标,分析各因素的影响规律。

分析平面方向的长度收缩率可知,缝线间距因素的极差最大为 0.26%,表明缝线间距是影响长宽方向收缩率的主要因素;缝线规格因素的极差最小为 0.01%,表明缝线粗细对柔性隔热材料体积变化率的影响较弱。各因素对长宽收缩率的影响由大到小依次为:缝线间距>厚度>长度/宽度>缝线规格。指标—因素趋势见图 3

平板型柔性隔热材料平面方向的收缩只会影响整体的尺寸,不会引起翘曲等变形。但是对于曲面制品,缝线拉力可改变制品的变形方向。使用不同的缝

线方向,曲面制品上下表面存在不同的缝线间距。如所有贯穿制品的缝线都是平行排列时,则上下表面的缝线间距相等,缝制完成的隔热材料趋于平整。若缝线都沿曲面的法向方向排列,那么下表面缝线间距小于上表面,如图 4 所示。根据上述的直观分析已知,使制品产生收缩的缝线拉力受缝线间距的影响,缝线间距越大则拉力越大。曲面制品下表面缝线间距小于上表面,所以下表面的拉力较大,使得制品向曲率小的方向变形,即试样趋于弯曲。为验证上述分析结果,按不同的缝线方向制备出两件隔热材料(图 5)。明显可以看出沿法向方向缝制的制品弯曲较大,该结果与上述分析一致。因此在实际生产中可以通过控制缝线间距,有效控制曲面制品的外形。

表3 长度收缩率的极差分析

Tab.3 Interactive orthogonal experimental details and results

试样	试验因素				长度收缩率 $\Delta L/\%$
	长度(宽度)/mm	厚度/mm	缝线间距/mm	缝线规格/Tex	
1#	150	10	5	51	0.97
2#	150	20	10	95	0.97
3#	150	30	15	190	1.00
4#	300	10	10	190	1.28
5#	300	20	15	51	1.10
6#	300	30	5	95	0.82
7#	450	10	15	95	1.40
8#	450	20	5	190	0.93
9#	450	30	10	51	1.13
$K_1$	0.98	1.22	0.91	1.07	
$K_2$	1.07	1.00	1.13	1.06	
$K_3$	1.16	0.98	1.17	1.07	
$R$	0.18	0.23	0.26	0.01	

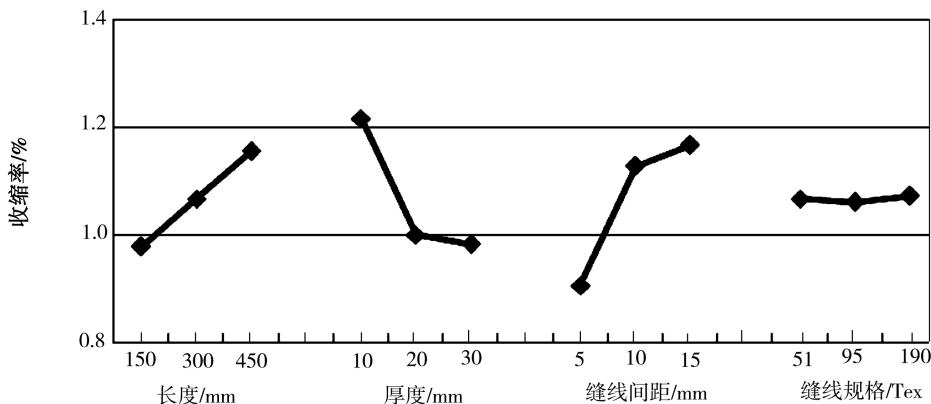


图3 指标—因素趋势图

Fig.3 Trends of the index-factors

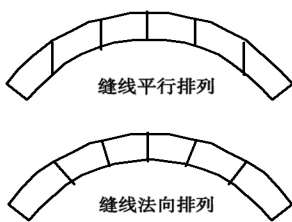


图4 曲面柔性隔热材料缝线方向示意图

Fig.4 Rank of threads in curve flexible insulation

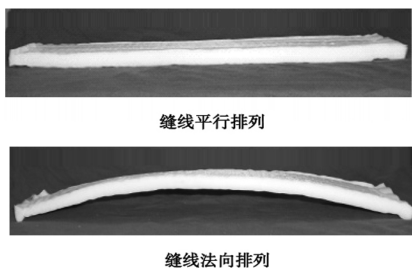


图5 柔性隔热材料实物图

Fig.5 Picture of curve flexible insulation

### 3 结论

通过正交试验,考察了缝制工艺中各种因素对制品厚度方向膨胀率的影响,分析得到产品厚度和缝线间距是影响厚度膨胀率的主要影响因素,同时得到厚度膨胀率随制品厚度增加而减小的规律。通过平面方向收缩率的考察,经过分析和实验验证,提出了用分配缝线间距来调整缝线张力的方法,以此控制异性结构柔性隔热材料的变形问题。

#### 参考文献

[1] 李俊宁,胡子君,孙陈诚,等. 高超声速飞行器隔热材料技术研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2011,41(6):10-13  
 [2] 孙陈诚,胡子君,叶辉,等. 多层反射纳米隔热材料的制备及性能研究[J]. 宇航材料工艺, 2011,41(1):34-37  
 [3] ESTRUCH-SAMPER David, 卜雪琴. 高超声速下表面凸起干扰气动热实验研究[J]. 航空学报,2012,33(9):1578-1586  
 [4] 正交试验法编写组编. 正交试验法[M]. 北京:国防工业出版社,1976

(编辑 任涛)