

刚性隔热瓦组件拉伸强度有限元分析与验证

张耕源¹ 蒋劲松¹ 孙陈诚² 李大涛³

(1 成都飞机设计研究所强度设计部, 成都 610041)

(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)

(3 长安大学工程机械学院, 西安 710064)

文 摘 为研究侧面涂层和应变隔离垫厚度及两者刚度对刚性隔热瓦及组件力学性能的影响,构建一种对称结构的刚性隔热瓦分析模型,进行了拉伸试验和有限元分析。结果表明,在拉伸载荷作用下刚性隔热瓦的应力分布不均匀,具有明显应力集中现象,其拉伸强度水平与最大应力密切相关,随涂层厚度或刚度增加,刚性隔热瓦最大应力上升,拉伸强度降低;当刚性隔热瓦粘结应变隔离垫时,应变隔离垫厚度增加或刚度减小,刚性隔热瓦最大应力下降,拉伸强度增大;当刚性隔热瓦含涂层时,增加应变隔离垫可减缓涂层对刚性隔热瓦的影响;并对有限元分析结果进行了试验验证,计算结果与试验结果吻合良好,表明建立的刚性隔热瓦分析模型合理,揭示了涂层和应变隔离垫参数与刚性隔热瓦失效的关联关系。

关键词 刚性隔热瓦,有限元,拉伸试验,涂层,应变隔离垫

中图分类号:V475.2

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2022.03.013

Finite Element Analysis and Verification of Tensile Stress of Insulation Tile

ZHANG Gengyuan¹ JIANG Jinsong¹ SUN Chencheng² LI Datao³

(1 Chengdu Aircraft Design & Research Institute, Strength Design Department, Chengdu 610041)

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

(3 Chang'an University, School of Construction Machinery, Xi'an 710064)

Abstract In order to research the effects of the thickness and stiffness of the side coating and strain isolation pad on the mechanical properties of the rigid thermal insulation tile and its components, a rigid thermal insulation tile analytical model with a symmetrical structure was constructed, finite element analysis (FEA) and static tensile test were carried out. The FEA results showed that the stress distribution of the rigid thermal insulation tile was not uniform under the action of tensile load, and there was obvious stress concentration, and its tensile strength level was closely related to the maximum stress. With the increase of coating thickness or stiffness, the maximum stress of the rigid thermal insulation tile increased, and the tensile strength decreased. When the rigid thermal insulation tile was bonded to the strain isolation pad, the maximum stress of the rigid thermal insulation tile decreased, and the tensile strength increased, while the thickness of the strain isolation pad increase or the stiffness decrease. When the rigid thermal insulation tile was coated, the strain isolation pad would reduce the effect of the coating on the rigid thermal insulation tile. The finite element analysis results were verified by static tensile tests, and the calculated results agreed well with the test results. The results showed that the analytical model was reasonable, the failure of the rigid thermal insulation tile were correlated with the coating and strain isolation pads.

Key words Insulation tile, Finite element analysis, Tensile test, Coating with the high emittance, Strain isolation pad

收稿日期:2020-09-22

第一作者简介:张耕源,1995年出生,硕士研究生,主要研究方向为飞机结构疲劳强度和无损检测。E-mail:zhzlgyl86@163.com

0 引言

航天飞机等飞行器高速返回大气层时,表面的刚性隔热瓦要承受严重的气动加热和气动载荷,因此,刚性隔热瓦除了需要具有良好的隔热性能外,还需具备一定的承载能力^[1-2]。

应变隔离垫是刚性隔热瓦热防护系统的关键技术之一,其通过胶粘将刚性隔热瓦与机身表面连接,周洁洁等从微观结构、力学、粘结及耐高温性能对芳纶纤维毡进行了研究,研究其作为应变隔离垫的可靠性^[3]。侧面涂层是刚性隔热瓦重要组成部分,兼具高辐射涂层的防热和防水功能,孙陈诚等从涂层的硬度、断裂延伸率等方面对刚性隔热瓦拉伸强度进行了研究^[4]。

本文通过拉伸试验和有限元分析,研究了侧面涂层和应变隔离垫厚度的厚度以及两者刚度对刚性隔热瓦及组件力学性能的影响,获得了涂层和应变隔离垫参数与刚性隔热瓦失效的关联关系。

1 刚性隔热瓦组件拉伸试验

1.1 试验件

根据刚性隔热瓦组件的结构特点设计了一种对称结构刚性隔热瓦拉伸试验件^[5-7],侧面含涂层的刚性隔热瓦和应变隔离垫通过胶层粘结在复合材料面板上,见图1。刚性隔热瓦主要成分为石英纤维和氧化铝纤维,长时间使用的温度为1 200℃,密度为0.33 g/cm³。应变隔离垫为有机纤维织物,胶层为高温胶黏剂,复合材料面板材料为碳纤维增强酚醛复合材料。

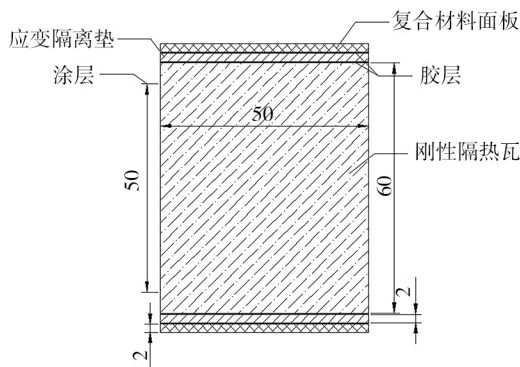


图1 刚性隔热瓦组件结构图
Fig. 1 Structure of Insulation tile

1.2 试验结果

依据 ASTM C297 试验标准进行了拉伸试验,如图2所示,试验温度为室温。

刚性隔热瓦组件的抗拉强度^[8]如图3所示,其中取无涂层刚性隔热瓦平均拉伸强度0.958 MPa,图中纵坐标为比值数据^[9-10]。

由图3和试验现象可知:(1)刚性隔热瓦侧边制

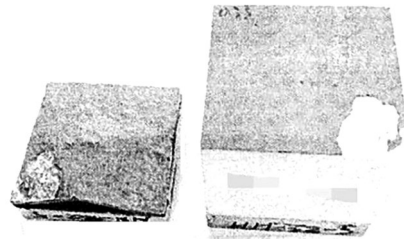
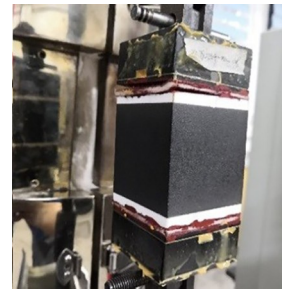


图2 刚性隔热瓦拉伸试验
Fig. 2 Tile tensile test

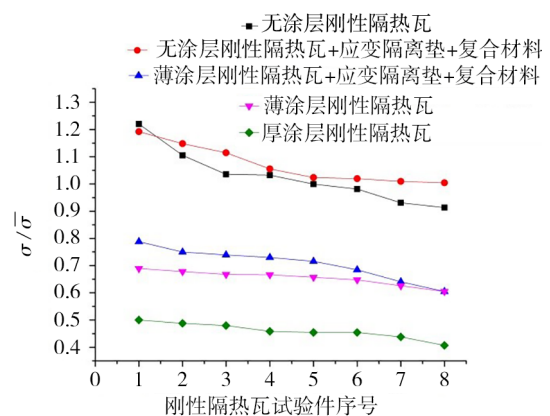


图3 刚性隔热瓦拉伸强度对比分析

Fig. 3 Comparative analysis of insulation tile test

备涂层,拉伸强度明显降低,当涂层较厚时,刚性隔热瓦拉伸强度急剧下降;(2)刚性隔热瓦粘接应变隔离垫和复合材料成组件,其拉伸强度较刚性隔热瓦略有增大;(3)刚性隔热瓦组件,拉伸断裂面主要在粘接面附近,厚涂层的刚性隔热瓦组件,拉伸断裂面主要在侧边涂层分界面和侧边涂层中部。

2 有限元模型

2.1 模型建立

使用Abaqus软件进行建模和计算。将刚性隔热瓦组件分为复合材料面板、应变隔离垫、涂层和刚性隔热瓦,并进行独立建模,最后将其组合成刚性隔热瓦组件,实体模型如图4所示。

为了便于计算,对模型进行如下假设:由于刚性隔热瓦为多孔材料,涂层在制备过程中已浸入刚性隔热瓦本体中,故假设涂层与刚性隔热瓦为Tie连接;应变隔离垫与刚性隔热瓦实际为胶接,本次分析未考虑胶接对刚性隔热瓦的影响,故假设应变隔离

垫与刚性隔热瓦为Tie连接,由于实际胶层较薄,连接的简化处理对整体分析结果影响小;刚性隔热瓦、高辐射涂层、应变隔离垫采用各向同性材料模拟。

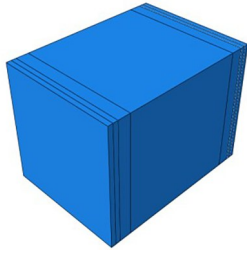


图4 刚性隔热瓦结构实体模型

Fig. 4 Solid model of tile

2.2 网格划分

刚性隔热瓦、应变隔离垫和复合材料面板网格划分采用8节点六面体线性减缩积分单元,涂层网格划分采用四边形减缩积分壳单元。网格细化见图5。网格大小1.5 mm,总计56 628单元,63 444节点。

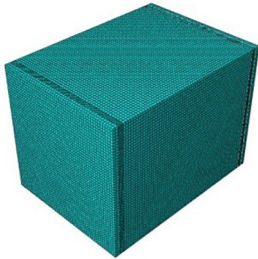


图5 刚性隔热瓦网格模型

Fig. 5 Grid model of tile

2.3 边界条件及载荷

计算边界条件如下:(1)载荷和约束施加在复合材料面板上,在一端施加1 MPa均匀分布的拉伸载荷,另一端的所有节点的6个自由度均约束;(2)复合材料面板、应变隔离垫、刚性隔热瓦及涂层之间设置刚性连接即所有接触面都为绑定约束。

2.4 模型构型

针对4种组合形式建立了4套模型:(1)无涂层刚性隔热瓦,(2)含涂层刚性隔热瓦,(3)无涂层刚性隔热瓦与应变隔离垫组合(下文简称无涂层刚性隔热瓦组件),(4)含涂层刚性隔热瓦、应变隔离垫组件(下文简称刚性隔热瓦组件);为了便于施加载荷,4种结构均与蒙皮粘结。

3 结果及讨论

采用变参分析方法计算4种构型的刚性隔热瓦组件的应力场,用于对比分析,以探寻提升刚性隔热瓦组件强度性能的途径。图中的数据均为单位比值,仅表示刚性隔热瓦受涂层与应变隔离垫的影响趋势。

3.1 无涂层刚性隔热瓦

无涂层刚性隔热瓦施加1 MPa均布拉载,隔热瓦整体应力较低,均匀应力约0.9 MPa,而在粘结面靠

近角点和边缘处,边界效应导致应力升高,产生应力集中,最大应力区为尖角位置,最大应力为 $\sigma_0=2.36$ MPa,其局部应力集中影响因子为2.36,见图6。高应力区主要集中在粘接面(厚度1 mm内),这与无涂层刚性隔热瓦拉伸试验中大部分试验件在靠近粘接面破坏相吻合。

刚性隔热瓦的形状和粘接装配方式决定了刚性隔热瓦存在应力集中,而其拉伸强度受局部应力集中影响较大,组件强度会明显低于材料强度性能。

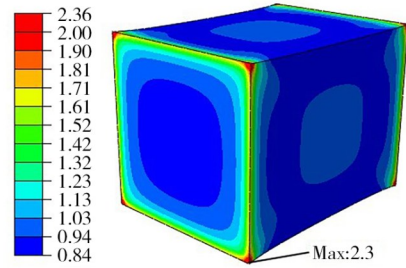


图6 刚性隔热瓦应力分布图

Fig. 6 Stress distribution of tile

3.2 含涂层刚性隔热瓦

如图7所示,刚性隔热瓦制备厚度为0.381 mm的涂层之后,因涂层的刚度比刚性隔热瓦本体大,涂层承载远高于刚性隔热瓦本体,导致刚性隔热瓦的最大应力出现在涂层终止的界面尖角位置(2.79 MPa处),高于无涂层刚性隔热瓦时的应力集中。随涂层模量或厚度增加,刚性隔热瓦最大应力增大;当涂层厚度增加一倍,模量由1 MPa增加到2 GPa时,其应力集中影响因子达到3.0。最大应力区域随涂层刚度和厚度变化,沿厚度方向有所移动,一般距刚性隔热瓦粘结面3~4 mm的边线位置(涂层终止界面距边线5 mm)。与含涂层刚性隔热瓦拉伸试验大部分试验件在涂层或靠近涂层区先破坏现象相吻合^[8]。

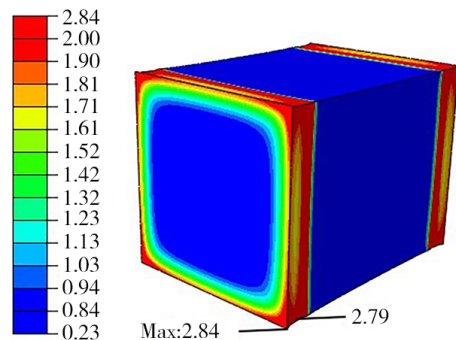


图7 含涂层刚性隔热瓦应力分布图

Fig. 7 Stress distribution of tile with coating

拉伸试验结果也表明:含涂层隔热瓦拉伸性能较无涂层隔热瓦低,与分析结果吻合,见图8。因此,在满足涂层功能的前提下,可以通过多孔结构和成分的设计降低涂层的刚度和厚度。

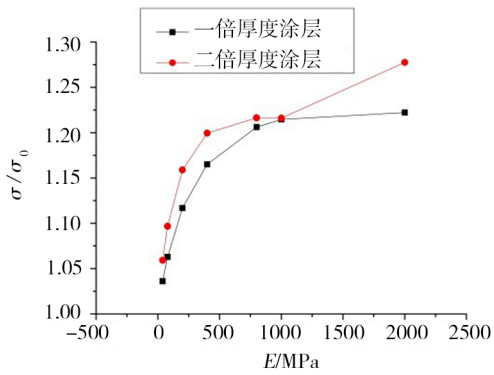


图8 涂层刚度和厚度对刚性隔热瓦最大应力的影响

Fig. 8 Effect of coating stiffness and thickness on the maximum stress of insulation tile

3.3 无涂层刚性隔热瓦和应变隔离垫组件

如图9所示,计算结果显示组件中最大应力区仍然位于刚性隔热瓦粘结界内靠近尖角的位置,其最大应力 $\sigma_0=1.27$ MPa,局部应力集中影响因子为1.27,明显低于无应变隔离垫的状态。这是由于应变隔离垫具有的较大弹性变形能力协调了刚性隔热瓦与结构间的变形,使隔热瓦粘接面的应力分布趋于均匀,减缓了应力集中。

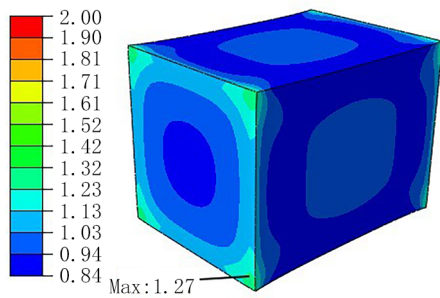


图9 无涂层刚性隔热瓦组件应力分布图

Fig. 9 Stress distribution of tile with strain isolation pad

如图10所示,将应变隔离垫厚度从2 mm增加到4 mm,因为应变隔离垫变厚,边界上协调变形能力增强,刚性隔热瓦尖角处拉伸应力更低。

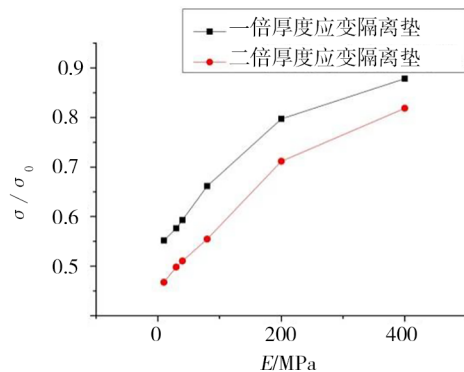


图10 应变隔离垫刚度和厚度对刚性隔热瓦最大应力的影响

Fig. 10 Effect of strain isolation pad stiffness and thickness on the maximum stress of insulation tile

拉伸试验结果也表明:增加应变隔离垫后,可以明显减缓粘接区的应力集中,应变隔离垫刚度越小,越有利于起到应力协调的作用。因此,在满足应变隔离垫粘接强度和耐温能力的前提下,应选用柔顺性好的纤维,即选用较低密度、较低刚度的应变隔离垫。

3.4 含涂层刚性隔热瓦和应变隔离垫组件

实际应用中因功能需求,刚性隔热瓦侧边涂层不可缺少,而侧边涂层会加剧应力集中,需要充分利用应变隔离垫减缓应力集中的有利因素,综合考虑涂层和应变隔离垫对刚性隔热瓦的影响,探寻较为匹配的组合,以指导工程设计。将涂层厚度与应变隔离垫刚度进行变参对比分析,结果见图11~图13。

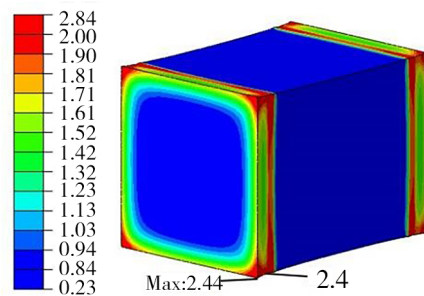


图11 刚性隔热瓦组件应力分布图

Fig. 11 Stress distribution of tile components

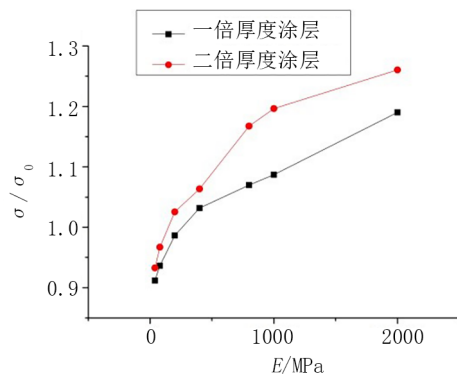


图12 涂层刚度和厚度对刚性隔热瓦组件最大应力的影响

Fig. 12 Effect of coating stiffness and thickness on the maximum stress of insulation tile components

如图11所示,带涂层刚性隔热瓦组件应力集中区略有变化,主要为侧边涂层的分界面附近,其原因是应变隔离垫降低了粘接面的应力集中,涂层分界面就成了带涂层刚性隔热瓦组件的薄弱部位。

在隔热材料的研制工程中,无涂层刚性隔热瓦的强度数据是材料基础性能数据,通过控制 σ/σ_0 在0.9~1.1之间,可保持刚性隔热瓦组件较为优异的强度性能,因此可通过图12、图13选取涂层和应变隔离垫厚度和刚度的最佳组合,实现对 σ/σ_0 的设计控制,获取刚性隔热瓦组件较为优异的强度性能。

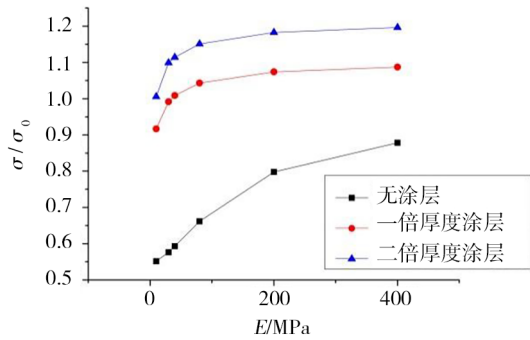


图13 应变隔离垫厚度和刚度对刚性隔热瓦组件最大应力的影响

Fig. 13 Effect of strain isolation pad stiffness and rigidity on the maximum stress of insulation tile components

4 结论

(1)试验结果可知,侧边含涂层刚性隔热瓦的拉伸强度明显低于无涂层刚性隔热瓦;刚性隔热瓦粘接应变隔离垫后成组件,组件的抗拉强度较刚性隔热瓦略有提高。

(2)有限元分析表明,侧边涂层会加剧刚性隔热瓦的应力集中,导致强度性能下降,随涂层厚度或刚度增加,刚性隔热瓦最大应力上升,拉伸强度降低。刚性隔热瓦在粘接应变隔离垫后,增强了粘接面的协调变形能力,降低了应力集中,随应变隔离垫厚度增加或刚度减小,刚性隔热瓦最大应力下降,拉伸强度增大。

(3)根据刚性隔热瓦拉伸试验及有限元分析表明,侧面薄涂层的刚性隔热瓦和柔性顺性好的应变隔离垫组合件为最优组合,即拉伸试验结果的分散度相对较低,抗拉强度平均水平较高。

参考文献

[1] 吴国庭. 哥伦比亚号防热系统概貌[J]. 国际太空, 2003(6):26—28.

Wu G. Overview of the columbia heat protection system [J]. Space International, 2003(6):26—28.

[2] JOHN Cleland, FRANCESCAO Iannetti. Thermal protection system of the space shuttle [R]. NASA contractor report, 1989

[3] 周洁洁,孙陈诚,陈育阳,等. 陶瓷防热瓦用应变隔离垫的制备及性能[J]. 宇航材料工艺, 2017,47(3):61—63.

ZHOU J, SUN C, CHEN Y, et al. Preparation and properties of strain isolation pad for ceramic insulating tile [J]. Aerospace Materials & Technology, 2017,47(3):61—63.

[4] 孙陈诚,何雅玲,王晓婷等. 高辐射涂层对刚性隔热瓦性能的影响[J]. 宇航材料工艺, 2018,48(3):42—46.

SUN C, HE Y, WANG X, et al. Effects of coating on performance rigid tile [J]. Aerospace Materials & Technology, 2018,48(3):42—46.

[5] 尹凯军,王志瑾. 可重复使用飞行器陶瓷瓦热防护系统尺寸优化分析[J]. 飞机设计, 2011,31(3):24—27.

YIN K, WANG Z. Analysis of ceramic tile thermal protection system size optimization for reusable launch vehicle [J]. Aircraft Design, 2011,31(3):24—27.

[6] 杨海龙,胡胜泊,王晓婷,等. 涂层制备过程中刚性隔热瓦的变形控制[J]. 宇航材料工艺, 2016,46(5):46—49.

YANG H, HU S, WANG X, et al. Distortion control of ceramic fiber rigid insulation tiles during coating forming [J]. Aerospace Materials & Technology, 2016,46(5):46—49.

[7] WILLIAMS S D, CURRY D M. Thermal protect materials—thermophysical property data [M]. NASA Reference Publication, 1992.

[8] 陈海坤,孙陈诚,周洁洁,等. 高效隔热材料结构与性能研究[J]. 宇航材料工艺, 2013,43(2):38—42.

CHEN H, SUN C, ZHOU J, et al. Microstructure and properties of insulating materials [J]. Aerospace Materials & Technology, 2013,43(2):38—42.

[9] 孙陈诚,胡子君,鲁胜,等. 刚性隔热材料的力学性能[J]. 宇航材料工艺, 2010,40(2):74—76.

SUN C, HU Z, LU S, et al. Mechanical properties of rigid thermal insulating materials [J]. Aerospace Materials & Technology, 2010,40(2):74—76.

[10] 王钦,胡子君,孙陈诚,等. 陶瓷隔热瓦力学性能影响因素及其稳定性控制[J]. 宇航材料工艺, 2010,40(2):77—79.

WANG Q, HU Z, SUN C, et al. Factors affecting mechanical properties and stability control of ceramic insulating tile [J]. Aerospace Materials & Technology, 2010,40(2):77—79.