

超弹性材料缓冲均匀性的有限元仿真与优化^{*}

赵鑫¹, 黄翔¹, 江一帆¹, 刘平²

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016;

2. 航空工业江西洪都航空工业集团有限责任公司制造工程部, 南昌 330024)

[摘要] 为了保证柔性加载时脆性结构件表面受力均匀, 借助有限元方法对起缓冲作用的超弹性材料的受载进行仿真, 分析并优化了弹性材料和脆性结构件接触应力的均匀程度。根据超弹性缓冲垫受压时的特性, 建立了能够反映接触应力均匀性的评估模型; 通过对缓冲基本模型仿真结果的分析, 提出了建立减小摩擦因数、改变缓冲垫结构这两种优化模型; 针对有限元仿真结果, 进行了超弹性缓冲垫加载脆性结构件的试验, 对有限元模型的有效性进行了验证。结果表明: 所建立的有限元模型能够较准确地描述机器人加载脆性结构件的实际情况; 两种优化模型均可有效提高脆性件表面受力的均匀性; 中心打 $\Phi 20\text{mm}$ 孔的优化模型对脆性结构件的等效覆盖率为 77.44%, 相比基本模型, 提升了 15% 的均匀性能。本研究结果为后续超弹性缓冲垫的设计与优化提供了理论依据。

关键词: 柔性加载; 超弹性; 有限元; 均匀性; 评估模型; 接触应力; 脆性结构件

Finite Element Simulation and Optimization of Cushioning Uniformity of Hyperelastic Materials

ZHAO Xin¹, HUANG Xiang¹, JIANG Yifan¹, LIU Ping²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Manufacturing Engineering Department, AVIC Jiangxi Hongdu Aviation Industry Group Corporation Ltd., Nanchang 330024, China)

[ABSTRACT] In order to ensure uniform stress on the surface of friable structure while flexible loading, we use finite element method to simulate the load of hyperelastic material, analyzing and optimizing the uniformity of contact stress on the friable structure. According to the characteristics of hyperelastic cushion under pressure, a model for evaluating the uniformity of contact stress is established. Based on the analysis of simulation results of the basic model, two optimization models are proposed to reduce the friction factor and to change the cushion structure; Aiming at the results of finite element simulation, an experiment of flexible load is carried out to verify the validity of the finite element model. The results show that the finite element model can, to some extent, accurately describe the actual situation of robot loading on the friable structure, and the two optimization models can effectively improve the uniformity of the stress on the surface of the tile; Compared with the basic model, the equivalent coverage ratio of the optimized model with 20mm hole is 77.44%, which improves the uniformity by 15%. This result will provide a theoretical basis for the design and optimization of hyperelastic cushion in the future.

Keywords: Flexible loading; Hyperelastic; Finite element; Uniformity; Evaluation model; Contact stress; Friable structure

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.01/02.082

现代飞行器常用胶接粘接结构件, 为了保证结构件之间连接的强度, 在粘接过程中, 必须对其施加足够的压力^[1]。当结构件材料为刚性体时, 可以直接进行无缓冲的刚性加载。而当结构件为轻质易碎、对表面受力均

匀性要求较高的树脂基复合材料时, 直接对其进行刚性加载会造成材料表面的破裂^[2]。为了防止这种脆性材料在胶接保压过程中受到损坏, 有必要在加载末端连接一块柔性材料的缓冲垫作为缓冲, 对其进行柔性加载, 以满足均匀性要求。研究和分析在实际情况下, 柔性材料作为脆性结构缓冲垫, 脆性件表面受力的均匀性到底

^{*} 基金项目: 航空科学基金项目(2016ZE52053)。

能达到什么程度?如何通过结构、参数的优化来提高均匀性?对于脆性件的安全胶接有着重要的意义。

柔性材料是实现脆性结构件表面柔性均布力加载的关键^[3],具有硬度低(柔软)、易变形(超弹性)、不可压缩的特点。它在受载时,能适应脆性件表面曲率而变形,将末端出力传递到脆性件表面。近年来兴起的橡胶等静压技术(RIP技术)^[4-5],便是利用橡胶这种超弹性材料作为传压介质在加载时具有流动性和不可压缩性的特点,使受压物体能均匀受力而类似于等静压效果。但这种技术应用于脆性结构件这种对受力均匀性要求很高的材料时,其均匀程度到底能达到多少,必须通过大量加载测试和仿真来确定。在获取这一信息的基础上,可以对缓冲垫的结构、参数进行进一步优化,为缓冲垫的设计提出参考与建议。

随着计算机技术的不断发展,涉及复杂超弹性材料的力学高精度模型的有限元计算成为可能。通过有限元仿真来获取加载前后,脆性件外表面接触应力的分布情况,缓冲垫的扩张程度、压缩量等参数,与脆性件表面均匀性分析息息相关。根据仿真后得到的各项结果与缓冲垫自身的结构、参数的关系,可以对缓冲垫进一步优化设计。关于超弹性材料的计算仿真,已有学者进行了基于试验数据的研究分析。黄建龙等^[6]结合ANSYS有限元分析软件对橡胶这类超弹性材料的常见应变能密度模型的适用范围进行了验证。郑明军等^[7]对压缩状态下的橡胶大变形进行了研究,提出了用有限元分析与测试来确定超弹性材料Mooney-Rivlin模型力学性能常数的方法。燕山等^[8]采用试验对超弹性材料的两种本构关系进行了拟合,给出了本构模型中材料参数的确定方法。

本文将通过有限元的方法搭建超弹性缓冲模型来研究脆性结构件在机械加载过程中表面受力的均匀性情况。超弹性缓冲模型综合考虑合适的本构关系、参数、模型的结构、边界的接触关系与约束关系,最终完成模型的仿真,并通过相关缓冲性能试验对模型进行验证。此模型不但为机械加载脆性结构件提供参考依据,同时也为柔性缓冲垫的优化提供参考与建议。

1 超弹性缓冲模型

整个超弹性缓冲模型主要由机器人加载末端、超弹性缓冲垫、脆性结构件构成,其结构组成如图1所示。

缓冲垫固定在缓冲垫安装背板上,其上表面被固定无法扩张。由机器人末端施力,通过缓冲垫自身缓冲特性均分集中力,从而实现对脆性结构件的柔性加载。最终理想的结果为,缓冲垫将机器人末端的集中力均匀分布到脆性件表面。

1.1 建立缓冲垫加载有限元模型

整个机械加载过程涉及由于缓冲垫选材引起的材料非线性、加载过程大位移引起的几何非线性、接触面摩擦引起的边界非线性。因此,使用处理高度非线性问题比较出色的ABAQUS对此加载过程进行计算。基于脆性结构件缓冲垫的结构特点,为了便于计算,将模型简化为轴对称模型,如图2所示。

虽然机械加载缓冲垫是一个动态过程,但此问题所关注的不是瞬间的冲击响应,而是加载末端运动到不同位置时结构的静态响应,所以使用ABAQUS/Standard作为求解器,设置分析步类型为Static和General。由于重点分析缓冲垫底部接触应力的分布情况,因此需细化缓冲垫网格,将缓冲垫材料设置为超弹性体,划分为1000个单元,脆性结构件设置为弹性体,划分为20个单元。模拟中加载末端向下加载而缓冲垫和脆性结构件保持不动,约束条件如图2所示。滑动摩擦因数通过缓冲垫和脆性结构件之间的摩擦试验来获取,具体试验过程参照了文献[9]。理想状态下脆性结构件表面需受到0.05MPa的均布力,由于机械加载输出的是一个集中力,故加载力设为该均布力的等效力,各参数为:均布力 $q=0.05\text{MPa}$;均布力的等效集中力 $F=769.3\text{N}$;接触时的滑动摩擦因数 $\mu_f=0.16$;脆性结构件的杨氏模量 $E=94\text{GPa}$;脆性结构件的泊松比 $\mu=0.25$; C_{10} 和 C_{01} 分别为0.17和-0.13。

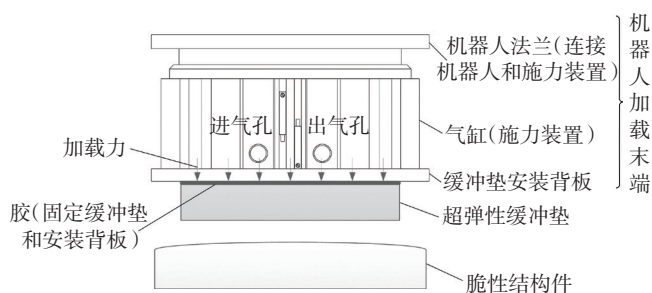


图1 超弹性缓冲模型

Fig.1 Hyperelastic buffer model

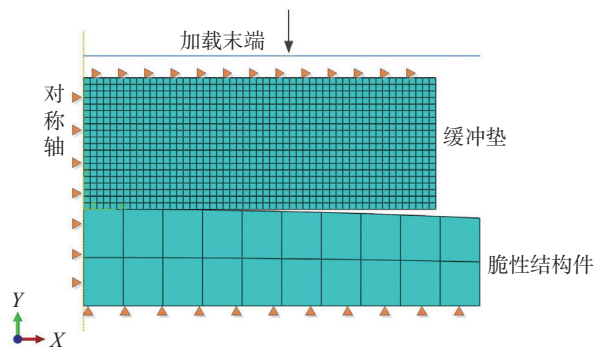


图2 缓冲垫加载有限元模型

Fig.2 Finite element model of loading cushion

1.1.1 确立缓冲垫材料本构模型

缓冲垫材料选用硬度小、性能稳定、制备简易的硅橡胶^[10]。大多数连续介质力学处理硅橡胶弹性时,将其材料的变形看成是各向同性的超弹性体的均匀变形,即以应变不变量表示应变能密度函数^[11]。因此,工程上广泛应用 Mooney-Rivlin^[12] 模型来描述该种硅橡胶材料应力张量与应变张量的关系。其本构关系为:

$$W(I_1, I_2) = \sum_{i+j=1}^n C_{ij}(I_1 - 3)^i(I_2 - 3)^j \quad (1)$$

式中, $W(I_1, I_2)$ 为应变能密度; C_{ij} 为 Rivlin 系数; I_1, I_2 分别为第一、第二 Green 应变不变量。

本次分析采用上述函数的二参数模型,其应变能密度公式为:

$$W(I_1, I_2) = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (2)$$

对硅胶缓冲垫进行单轴拉伸测试,将测试得出的应力应变值导入 ABAQUS 中进行拟合,具体试验和拟合过程见文献 [6-8]。

1.1.2 均匀性评估模型

为了反映脆性结构件外表面接触应力的分布情况,建立一个评估受力均匀程度的模型(图3)。受到加载后,根据应力的分布情况,分成 n 个环形区域(每个环形区域内所受应力大小相同),各个圆环的环距分别为 $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$ 。

根据加载力和接触力的平衡可得:

$$\pi(\sum_{i=1}^n r_i)^2 f_{理想} = \pi \sum_{i=1}^n f_i [(\sum_{i=1}^n r_i)^2 - (\sum_{i=1}^{n-1} r_{i=1})^2] \quad (r_0 = 0) \quad (3)$$

由于仿真计算时采用了轴对称模型,仿真结果仅提取了圆形缓冲垫一条半径上的应力值,对半径上的应力值求平均,引入 $f_{平均}$:

$$\sum_{i=1}^n r_i f_{平均} = \sum_{i=1}^n r_i f_i \quad (4)$$

为了比较公式(3)和公式(4)左项 $f_{理想}$ 和 $f_{平均}$ 的差异,

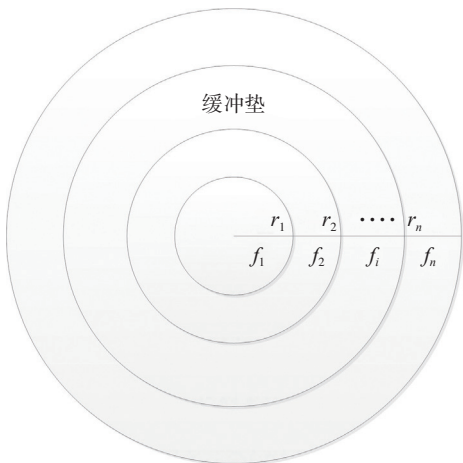


图3 均匀性评估模型

Fig.3 Evaluation model of uniformity

故统一公式(3)和公式(4)左项的系数后求差,即公式(4) $\times \pi \sum_{i=1}^n r_i$ - 公式(3),得到:

$$\pi(\sum_{i=1}^n r_i)^2 (f_{平均} - f_{理想}) = \pi[\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n r_i r_j (f_i - f_j)] \quad (5)$$

公式(5)左边代表了引入的 $f_{平均}$ 和理想均布力 $f_{理想}$ 的差距,右边代表了缓冲模型中相邻环之间的差距,即评估模型中的均匀度值越小,相邻环之间的差距就越小,脆性结构件表面受力的均匀性亦越好。由超弹性缓冲基本模型的仿真结果可知,应力分布是由内到外依次递减的,即 $(f_1 \geq f_2 \geq f_3 \dots \geq f_n)$,故公式(5)的右边始终大于等于0,当且仅当 $f_1=f_2=f_3 \dots = f_n$ 时,才有 $f_{平均} = f_{理想}$,此时缓冲均匀性最理想。

实际情况中始终有 $f_{平均} \geq f_{理想}$,即两者差值越小,缓冲均匀性越优。为了更直观地衡量缓冲垫受力分布的均匀性,引入一个等效受力面积的概念:

$$S_{等效} \times f_{平均} = S_{理想} \times f_{理想} \quad (6)$$

根据公式(6)推出缓冲垫的等效受力面积,通过缓冲垫等效受力面积对脆性件的覆盖率评判缓冲垫的均匀性能力。

1.1.3 缓冲基本模型仿真结果

对脆性结构件进行加载仿真。由于整个模型为轴对称模型,为了使结果更直观,将整个轴对称模型结果绕对称轴旋转 180°,缓冲垫底部接触力如图4所示。

用 ABAQUS 提取缓冲垫底部所有点的接触力信息,在圆形缓冲垫的圆心处建立垂直于缓冲垫的对称轴,以缓冲垫底部提取点到对称轴的距离为 X 轴,接触应力为 Y 轴,绘制缓冲垫底部点受力分布的曲线图,如图5所示。

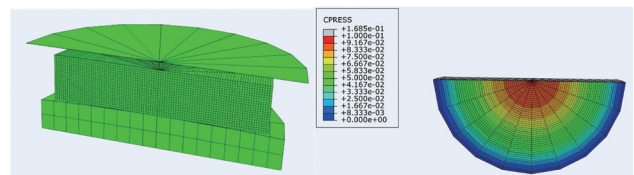


图4 缓冲垫底部接触应力分布云图

Fig.4 Distribution of contact stress at the bottom of cushion

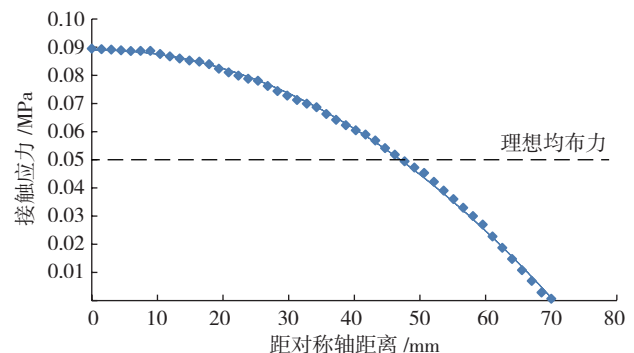


图5 缓冲垫底部点受力分布

Fig.5 Stress distribution at the bottom of cushion

示。由提取的接触力信息可知,缓冲垫底部受力分布为(0.004,0.092)MPa。

加载后缓冲垫的半径为72.61mm,根据正态分布,1 σ 覆盖70%的值,可知缓冲垫底部大部分应力分布在($\mu-\sigma, \mu+\sigma$)之间,缓冲垫底部应力状况如表1所示。可知,缓冲垫的等效面积仅能覆盖67.50%的脆性件,更多的力集中在对称轴附近。

1.1.4 原因分析

缓冲垫是超弹性体,硬度小、流动性大。在加载过程中,由于缓冲垫底部与脆性件的摩擦力,超弹性缓冲垫底部流动受到阻碍,导致缓冲垫底部扩张小于中部,产生“鼓包”现象(图6)。由于摩擦力束缚,缓冲垫越往对称轴处的流动性能越差,因此接触应力往对称轴处集中。

1.2 缓冲均匀性的优化

为了减小“鼓包”,提高缓冲垫等效面积对脆性件的覆盖率,从以下两点思路对缓冲均匀性进行优化。

(1) 缓冲垫和脆性结构件之间摩擦力减小。

由于加载力无法改变,因此减小缓冲垫和脆性结构件间的摩擦因数是减小摩擦力的主要途径。为了不改变缓冲垫内部性质,可以通过对缓冲垫表面改性来改变摩擦因数。针对硅胶的表面改性方法,主要分为化学改性和物理改性^[13]。化学改性是指通过反应剂与材料表面发生化学反应,使材料表面的化学结构发生改变,从而改变材料的各项性能^[14]。常用的减小摩擦因数的化学改性方法有表面碘化。而物理改性通常仅在缓冲垫表面沉积和涂覆其他物质^[15],来达到材料性能的改变。物理改性减小摩擦因数的常见方法有表面覆盖涂层^[16],如聚四氟乙烯膜。

(2) 缓冲模型结构优化。

缓冲垫在加载时,应力集中在对称轴附近,导致等效面积对脆性件的覆盖率偏小,考虑在缓冲垫应力集中

区域打孔,一方面避开应力集中部分,另一方面可以使缓冲垫向两个方向扩张,减小“鼓包”现象,即减小摩擦力对均匀性的影响。但由于缓冲垫中部打孔,缓冲垫对脆性件的实际覆盖面积也变小,因此需要通过建模仿真来确定孔径大小。

2 优化模型的仿真结果

2.1 减小摩擦因数的仿真结果

将仿真中的摩擦因数分别改为0.16、0.12、0.08、0.04、0进行仿真,分别计算其应力平均值与等效面积覆盖率,计算结果如表2所示。

随着缓冲垫与脆性件之间摩擦因数的减小,缓冲垫等效面积对脆性件的覆盖率不断增大,即缓冲垫的均匀性不断提升,由最初的67.50%提高到72.98%。由仿真结果可知,为了提高缓冲垫加载过程中底部受力的均匀性,需要尽量减小摩擦因数。

2.2 缓冲垫优化模型的仿真结果

对缓冲垫模型中心打孔优化,孔初始半径设置为1.5mm,差值设置为1.5mm,逐步递增,分别计算其应力平均值与等效面积覆盖率,计算结果如表3所示。

可以看出,当孔半径在10mm以下时,随着孔径的增大,缓冲垫等效面积对脆性件的覆盖率逐渐增大;当孔半径为10mm时,覆盖率达到最大值;当孔半径大于10mm时,覆盖率将持续变小。这是因为孔半径到达10mm后, $f_{\text{平均}}$ 已达到了该种结构的最小情况,为0.052MPa,此时等效面积覆盖率最大,为77.44%。继续增大孔的半径,只会减小缓冲垫实际覆盖脆性件的面积,同时减小缓冲垫等效面积对脆性件的覆盖率。

可见对于 $\Phi 140\text{mm}$ 的缓冲垫, $\Phi 20\text{mm}$ 的孔是使缓冲垫受到加载后,底面均匀性最优的结构。为了保证缓冲垫等效面积对脆性件的覆盖率,应该在缓冲垫中心打 $\Phi 20\text{mm}$ 的孔。

3 缓冲模型均匀性的试验验证

3.1 试验平台过程

表2 摩擦因数对均匀性的影响

摩擦因数	应力平均值 / MPa	扩张后半径 / mm	等效半径 / mm	等效面积覆盖率 / %
0.16	0.0610	72.61	65.73	67.50
0.12	0.0602	72.82	66.36	68.81
0.08	0.0595	73.04	66.96	70.05
0.04	0.0586	73.26	67.67	71.55
0	0.0578	73.48	68.34	72.98

表1 缓冲垫底部应力状态

应力平均值 / MPa	标准差	应力分布 / MPa	等效半径 / mm	对脆性件的覆盖率 / %
0.061	0.028	(0.033,0.089)	65.73	67.50

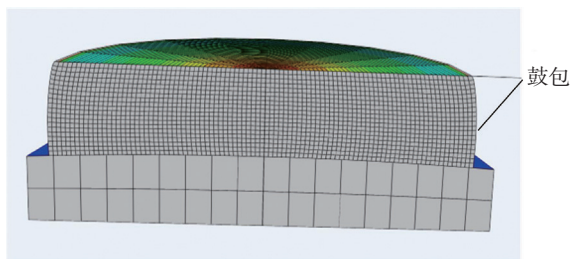


图6 有限元分析中的“鼓包”现象

Fig.6 Phenomenon of swelling in finite element analysis

缓冲模型均匀性的验证性试验是在库卡机器人上进行的,整个测试平台如图7所示。为了获得缓冲垫底部受力分布情况,使用多传感器对 $\Phi 140\text{mm}$ 缓冲垫底部受力进行采集。由于缓冲垫是轴对称结构,故将传感器平台上的传感器沿两条半径布局。

整个缓冲均匀性验证系统由计算机、机器人、PLC控制系统与测试平台构成,如图8所示。先调整好机器人位置,控制施力气缸输出一个 0.05MPa 的等效力加载弧高为 2mm 的传感器平台,再使用 0° 的 $\Phi 140\text{mm}$ 硅胶缓冲垫进行缓冲,采集传感器的数据,比对验证仿真获得的应力分布与实际测试得到的应力是否具有一致性。

表3 孔径对均匀性的影响

孔半径 / mm	应力平均值 / MPa	扩张后半径 / mm	等效半径 / mm	等效面积覆盖率 / %
1.5	0.060	72.618	66.280	68.63
3	0.058	72.606	67.355	70.89
4.5	0.057	72.587	67.853	71.94
6	0.056	72.565	68.332	72.96
7.5	0.055	72.538	68.791	73.94
9	0.053	72.501	69.875	76.29
10	0.052	72.489	70.402	77.44
12	0.052	72.453	70.064	76.70
13.5	0.052	72.421	69.770	76.06
15	0.052	72.369	69.450	75.36

性。

3.2 缓冲基本模型均匀性的试验验证

根据7个传感器所受接触应力与传感器距中心点距离,在传感器平台中心建立垂直于传感器平台的对称轴,以传感器位置到对称轴的距离为 X 轴,传感器测得的接触应力为 Y 轴,绘制传感器的接触应力与传感器位置距对称轴距离的关系图(图9)。

仿真与试验结果对比如表4所示,可以看出相同加载条件下,缓冲垫实际平均应力值略小于仿真值,等效面积略大于仿真时得到的等效面积,但两者加载时所反映的接触应力分布关系图线基本一致,因此建立的加载缓冲有限元模型是有效的。

3.3 减小摩擦因数的试验验证

同样的加载过程,在缓冲垫和脆性件之间覆盖聚



图8 缓冲均匀性验证系统

Fig.8 Verification system of buffering uniformity

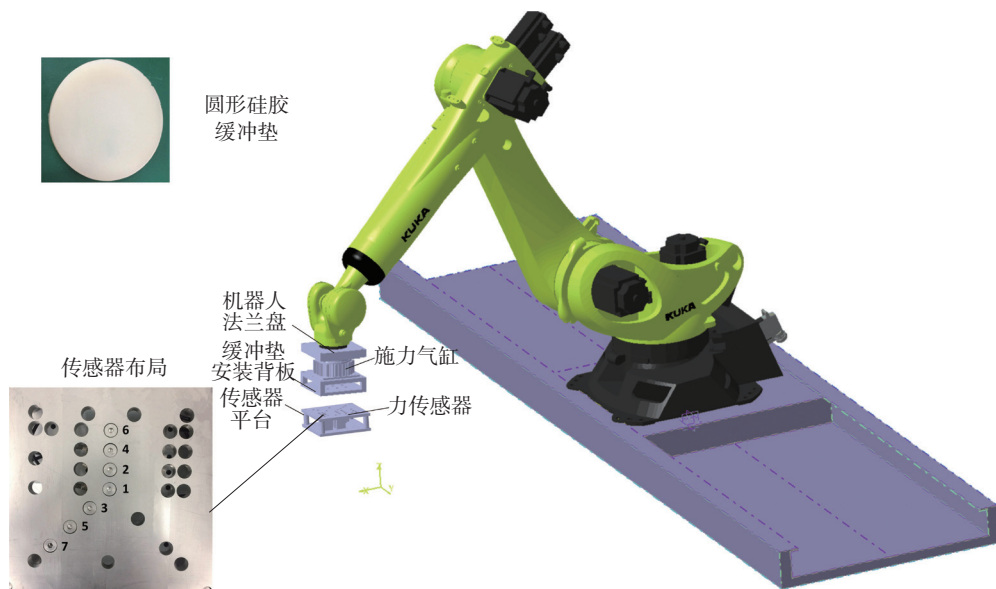


图7 测试平台

Fig.7 Test platform

四氟乙烯膜以减小摩擦,聚四氟乙烯膜的摩擦因数为0.04,采集传感器数据,验证摩擦因数对缓冲垫底部受力分布的影响。

通过仿真与试验结果对比可知,使用聚四氟乙烯膜覆盖缓冲垫减小摩擦,的确减小了平均应力,提高了均匀性(表5)。但实际底部受力分布的变化并没有仿真结果明显,这可能是因为聚四氟乙烯膜的表面能比较低,未经过表面离子体活化或化学腐蚀时,表面活性不够,与缓冲垫的贴合程度不好,跟理想的仿真情况有异。

3.4 缓冲优化模型均匀性的试验验证

对优化后的缓冲垫模型进行加载测试,模型优化后,缓冲垫底部的受力分布情况如表6所示。通过比较可以发现,得出的有孔缓冲垫平均应力和仿真结果一致,等效覆盖率略高于仿真结果,但差距较小,误差在5%以内。

与无孔缓冲垫测试结果相比,有孔缓冲垫可以提高其对脆性件的等效覆盖率约15%,这个结论与仿真结果一致,因此建立的缓冲优化模型是有效的。

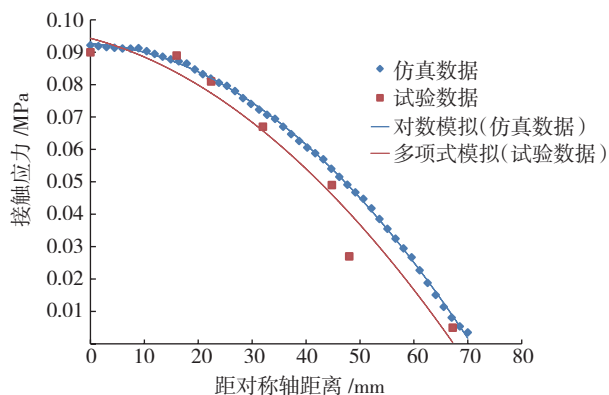


图9 试验值和仿真值对比曲线

Fig.9 Contrast curve of experimental and simulated values

表4 缓冲均匀性的仿真与试验验证结果对比

结果	应力平均值 /MPa	等效半径 /mm	对脆性件的覆盖率 /%
仿真结果	0.061	65.73	67.50
试验结果	0.059	67.05	70.24

表5 减少摩擦因数的仿真与试验验证结果对比

结果	平均应力 / MPa	等效半径 / mm	等效覆盖率 /%
仿真 μ_t 0.16	0.0610	65.73	67.50
仿真 μ_t 0.04	0.0586	67.67	71.55
基本模型	0.0592	67.05	70.24
聚四氟乙烯膜	0.0581	67.79	71.80

表6 结构优化模型仿真与试验结果对比

结果	平均应力 /MPa	等效半径 /mm	等效覆盖率 /%
仿真无孔	0.061	65.73	67.50
实际无孔	0.059	67.05	70.24
仿真 Φ 20mm 孔	0.052	70.06	77.44
实际 Φ 20mm 孔	0.052	70.55	77.77

4 结论

(1)建立了加载缓冲模型,提出了均匀性评估模型,综合考虑了影响缓冲垫底部受力均匀性的两个因素,并对缓冲模型进行了优化,最终通过 ABAQUS 实现优化仿真。

(2)试验验证表明,仿真获得的加载后缓冲垫底部均匀程度和试验获得的均匀性具有一致性;以等效面积覆盖率为评估量,仿真值和试验值的误差在5%以内。

(3)通过调整摩擦因数与模型结构,对缓冲模型进行优化仿真,结果表明:随着摩擦因数的减小,缓冲垫底部的均匀性不断增加;随着缓冲垫中心孔径的增大,缓冲垫底部的均匀性不断提高,当孔径为 Φ 20mm 时,均匀性达到最大,此时对脆性件的等效覆盖率为77.44%,其均匀性能相比无孔缓冲垫,提升了15%。因此为了提高脆性结构件受载时表面受力的均匀性,需要综合考虑摩擦因数和孔径大小这两个因素。

参考文献

[1] 沈娟,李舰.高超声速飞行器的防热材料与防热结构进展[J]. 飞航导弹,2013(1): 86-90.
 SHEN Juan, LI Jian. Development of thermal protection materials and thermal protection structures for hypersonic vehicles[J]. Winged Missiles Journal, 2013 (1): 86-90.
 [2] 张泰华,孟宪红,张行.航天器防护瓦脱落力学分析[J]. 宇航学报,2008(4): 1157-1165.
 ZHANG Taihua, MENG Xianhong, ZHANG Xing. The mechanics analysis of desquamation for thermal protection system (TPS) tiles of spacecraft[J]. Journal of Astronautics, 2008(4): 1157-1165.
 [3] 王琦,王汉鹏,李术才,等.柔性均匀布压力加载装置的研制及试验分析[J]. 岩石力学与工程学报,2012(1): 133-139.
 WANG Qi, WANG Hanpeng, LI Shucui, et al. Development and test analysis of flexible uniform pressure loading device[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012(1): 133-139.
 [4] 梁华琼,韩超,雍炼,等.高聚物黏结粉末橡胶等静压净成型技术[J]. 含能材料,2011(3): 325-329.
 LIANG Huaqiong, HAN Chao, YONG Lian, et al. Net shaping technology of polymer-bonded powder by rubber isostatic pressing[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011(3): 325-329.

(下转第97页)