

箭(弹)级间螺栓法兰连接结构冲击失效实验与数值仿真*

袁杰红¹, 田彤辉^{1,2}, 王青文¹, 李道奎¹, 陈柏生³

(1. 国防科技大学空天科学学院, 湖南长沙 410073; 2. 中国人民解放军92341部队, 河南洛阳 471000;

3. 湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082)

摘要:基于火箭(导弹)级间螺栓法兰连接结构,简化设计并制作了一组原理性实验件,利用ABAQUS软件建立有限元模型,设计并进行了多次落锤冲击失效实验,其中包括轴向和横向两种工况,考虑了螺栓分布与非分布、螺栓直径和螺栓-栓孔间隙等不同结构特点。实验过程中采集了螺栓力时程响应数据、柱段关键点应变时程响应数据、锤头冲击力和冲击速度及连接界面开缝位移等多组数据。根据实验效果和实测数据,分析了连接结构冲击失效机理,并对比验证发现有限元模型数值模拟效果和精度与实验结果吻合较好。研究结论可为箭(弹)级间连接结构抗冲击设计提供参考。

关键词:螺栓法兰连接结构;落锤;冲击失效;承载能力;有限元模型

中图分类号:V416.2; V421 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2019)06-050-08



听语音
与作者互动
聊科研

Experimental and numerical simulation on failure of bolted flange connection structure between stages of rocket(missile) under impact load

YUAN Jiehong¹, TIAN Tonghui^{1,2}, WANG Qingwen¹, LI Daokui¹, CHEN Baisheng³

(1. College of Aeronautics and Astronautics, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. The PLA Unit 92341, Luoyang 471000, China;

3. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Based on the bolted flange connection structure between stages of rocket(missile), multiple experimental specimens were designed and manufactured, and four impact failure experiments of drop hammer were designed and carried out, which refers to the finite element model established by using the ABAQUS software. These experiments include axial and transverse two working conditions, and some structural characteristics of the specimen were different, such as the uniform and non-uniform distribution condition of the bolt group, the diameter of bolt and the gap between the bolt and bolt hole. In the process of experiments, the time history response data of bolts force, the time history response data of strain at key point of column section, impact force and impact velocity were collected. According to the experimental results and the measured data, the failure mechanism of the connection structure under impact load was analyzed, and it was verified that the numerical simulation results were in good agreement with the experimental results. The results in this research can be used as a reference for the load bearing capacity design of connection structure between stages of rocket(missile) under impact load.

Keywords: bolted flange connection structure; drop hammer; impact failure; load bearing capacity; the finite element model

级间螺栓法兰连接结构作为火箭、导弹的分离连接结构,是箭(弹)体结构的重要组成部分。由于连接结构呈强非线性特征,破坏了箭(弹)体的连续性,在承载过程中易出现局部变形过大和应力集中等问题,削弱了整体结构的强度,是易于发生故障的薄弱部位^[1]。而火箭、导弹在发射和高速飞行过程中,箭(弹)体可能受到幅值极大、空间位置极不稳定的瞬态异常荷载作用^[2]。例

如,潜射导弹出水过程中,弹体表面大量气泡与大气接触后在毫秒级时间内溃灭,形成幅值高达十几兆帕的压力脉冲。有可能导致级间连接结构失效而使火箭、导弹发射失败^[3]。因此,瞬态冲击下舱段分离连接结构失效机理研究具有重要的工程和理论意义。

由于连接结构力学性能复杂,涉及接触滑移、几何不连续等非线性问题^[4],理论分析和求解困

* 收稿日期:2018-07-03

基金项目:国防973计划资助项目(6132770201-2)

作者简介:袁杰红(1965—),男,湖南长沙人,教授,博士,硕士生导师,E-mail:yjh210048@163.com;

田彤辉(通信作者),男,助理工程师,硕士,E-mail:tiantonghui@126.com

难^[5]。现有的研究中,大多将连接结构简化为刚性连接进行计算和分析。栾宇和芦旭等针对箭体受瞬态外载的振动特性分析,将连接结构拉压刚度非线性特性纳入火箭整体动力学模型中,通过在连接面引入刚度修正的非线性弹簧,得到了能够一定程度反映实际动力响应特性的简化有限元模型^[6-9]; Von-Long 等针对螺栓法兰连接结构设计并进行了轴向单调和循环加载的准静载疲劳实验,分析了该工况下连接结构的疲劳、失效特性^[10];为研究连接结构连接界面非线性力学性质及力传播机制,Guo 等建立了对应的有限元模型,设计进行了连接结构的 SHPB 实验,验证了模型参数,实验结果揭示了冲击荷载下连接结构的振动特性及力耗散传播机理^[11]。从螺栓法兰连接结构的现有研究成果看,国内外研究人员多采用有限元模型对其动力响应及失效特点进行了多次有益的分析^[12],已进行的实验关注点多针对动荷载下连接结构振动特性及静荷载下连接结构承载特性研究。

为研究瞬态冲击作用下连接结构的失效机理,同时验证有限元方法数值计算结果的准确性,本文基于火箭、导弹级间螺栓法兰连接结构简化的原理性实验件,建立了对应的冲击失效实验有限元模型,设计进行了多组落锤冲击失效实验,采集了一组具有参考意义的关键数据,分析了连接结构冲击失效机理,验证了有限元计算结果的准确性。

1 实验方案

1.1 实验件准备

根据导弹、火箭级间螺栓法兰连接结构特点,综合考虑其结构组成基本一致、尺寸便于实验研究及制作成本等因素,设计加工了四组原理性实验件。该原理性实验件结构主要由两级舱柱段、螺栓、剪力销和垫块装配组成,如图 1 所示。

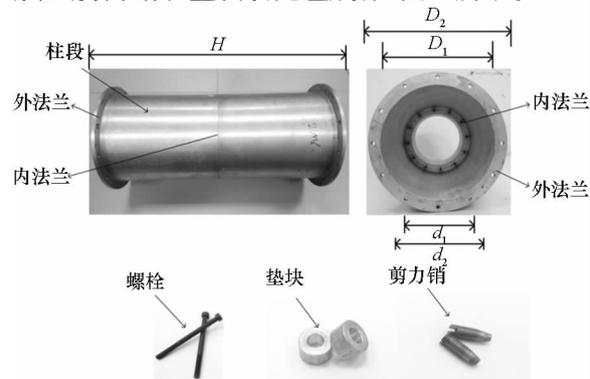


图 1 实验件

Fig. 1 Experimental specimen

其中,轴向和横向冲击失效实验分别采用直径为 M5 和 M6 的螺栓;垫块厚度 10 mm,内径 6.5 mm,外径 18 mm;剪力销柱段直径 5 mm,柱段高度 10 mm,锥段高度 6 mm,锥段锥度 $\gamma = 6.8^\circ$;柱段壁厚 4 mm,总高 $H = 350\text{mm}$;内法兰厚度 10 mm,内径 $d_1 = 225\text{ mm}$,外径 $d_2 = 295\text{ mm}$;外法兰厚度 10 mm,内径 $D_1 = 287\text{ mm}$,外径 $D_2 = 350\text{ mm}$ 。内法兰上均匀分布有 8 或 12 个螺栓孔和剪力销孔,螺栓分布的圆直径为 251 mm,螺栓孔直径有 5 mm 和 9 mm 两种,螺栓孔与剪力销孔环向分布间隔 6° ,外法兰上均匀分布 12 个直径 9 mm 的螺栓孔。

实验件柱段和垫块所用材料为 6061 铝合金,螺栓采用 8.8 级高强度螺栓,剪力销所用材料为高强合金钢 30CrMnSiNi2A,实验件总质量为 10.10 kg。对柱段 6061 铝合金材料进行了单轴拉伸实验,其余材料参数参考《金属材料手册》,实验件材料常数见表 1。

1.2 有限元模型

为评估实验工装安全、完成预期实验效果及验证仿真计算精度,采用通用商业有限元软件 ABAQUS 建立与实验一致的精细有限元模型,并通过有限元模型试算完成工装设计以及确定加载参数。建模兼顾计算效率和精度,实验件柱段采用减缩积分的四边形壳单元划分网格,法兰盘、螺栓、剪力销等采用减缩积分的八节点六面体单元划分网格。由于螺纹几何结构复杂,网格划分困难,且对计算效率影响较大,所建立的模型忽略螺纹,采用 ABAQUS 中的“绑定”约束模拟实际螺纹接触状态。根据表 1 中的材料参数,将螺栓材料失效的本构模型定义为材料塑性强化和剪切损伤,以模拟螺栓断裂效果。模型通过 ABAQUS/Standard 求解器为螺栓施加螺栓预紧力,利用 ABAQUS/Explicit 求解器模拟冲击失效过程。

1.3 加载方案分析

为了充分反映冲击荷载下螺栓法兰连接结构失效机理并为数值仿真模型提供数据支撑,设计了轴向和横向两种加载工况的落锤冲击失效实验,并针对螺栓个数、螺栓分布、螺栓直径等结构参数设计不同对比实验。四组实验编号及具体设置见表 2,螺栓分布及编号如图 2 所示,箭头方向为冲击荷载加载方向。

该原理性实验件,尺寸较大,强度较高,实现落锤冲击使结构失效需要较大的瞬时输入能量,为防止落锤直接冲击造成实验件柱段损伤,通过

表 1 实验件材料参数

Tab. 1 Material parameters of the experimental article

结构名称	屈服应力/MPa	拉伸极限/MPa	弹性模量/MPa	密度/(kg/m ³)	泊松比
6061 铝合金	300	375	70 000	2700	0.33
8.8 级高强度螺栓	640	800	210 000	7900	0.3
30CrMnSiNi2A	1256	1570	211 000	7890	0.3

表 2 实验编号及设置

Tab. 2 Experimental grouping numbers and experimental parameters

实验编号	工况	栓孔直径	栓孔个数	螺栓直径	螺栓个数	螺栓分布
A-1	轴向	M5	12	M5	6	均布
A-2	轴向	M5	12	M5	6	非均布
T-1	横向	M6	12	M6	8	非均布
T-2	横向	M6	8	M6	8	均布

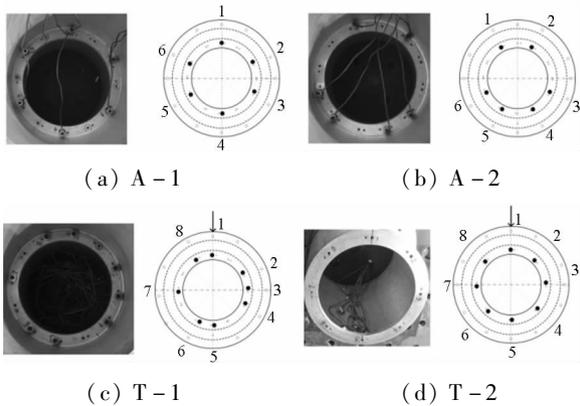


图 2 螺栓分布及编号

Fig. 2 Distribution condition and identifier of bolt

端部紧固护具,将冲击荷载传递至连接结构。实验加载示意如图 3 所示,轴向冲击失效实验中,实验件竖向安装于实验台架,试件底端紧固安装撞击底板,落锤通过冲击撞杆将冲击荷载传递到连接结构;横向冲击失效实验中,实验件横向安装于实验基座,自由端安装承载平台,落锤通过冲击承载平台将冲击荷载传递到连接结构。

落锤冲击实验在湖南大学工程结构综合防护实验室的高性能落锤实验机上进行。基于有限元模型试算,考察连接结构失效进程、失效效果及固定边界工装等因素,结合实验室现有条件,决定轴向冲击失效实验采用 380 kg 落锤以 1 m 高度冲击加载,横向冲击失效实验采用 270 kg 落锤以 2 m 高度冲击加载。实验工装两组紧固螺栓分别采用 12 × M8 和 12 × M10,以确保实现工装边界完全固支效果。

由于螺栓法兰连接的结构特点,难以实现直接粘贴应变片引线测量螺栓力时程响应数据。为

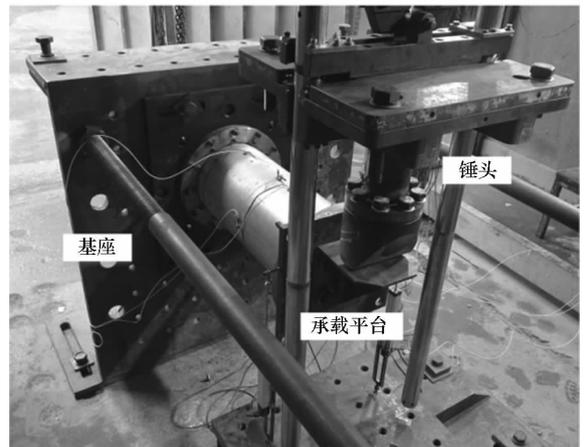
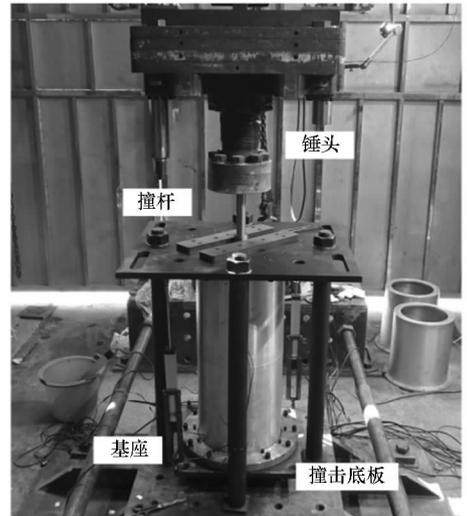


图 3 实验现场工装

Fig. 3 Diagram of experimental locale

采集螺栓力时程响应信号设计如图 4 所示传感器,在轴承钢材质套筒外表面粘贴应变片,且螺杆受拉力作用挤压套筒,二者为作用力与反作用力的关系。通过换算套筒受压力作用响应数据可以

间接得到螺杆受拉力作用响应数据。

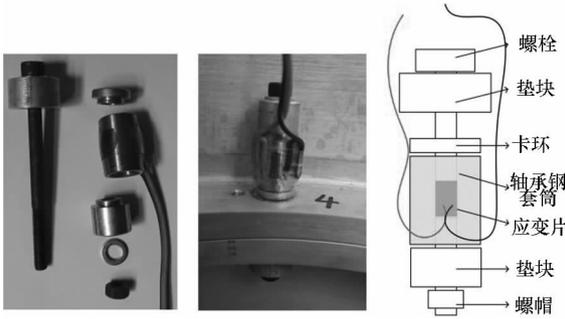


图 4 螺栓应变信号采集传感器

Fig. 4 Bolt force response signal acquisition sensor

冲击荷载作用下螺栓组失效过程非常短,时间尺度在毫秒量级,对数据信号采样频率要求非常高。实验过程中,采用美国 NI 公司研制的测量系统,配置高应变率动态应变信号采集系统(采样频率为 100 kHz)记录应变响应时程数据,其中应变信号采集位置为螺栓组力信号传感器及上下柱段关键点,四组实验柱段应变响应信号采集点为上下法兰中间位置。通过在实验件端部设置电阻式位移传感器采集连接界面开缝位移数据,设置触发式光电测速装置采集锤头冲击速度,落锤锤头设置力传感器记录冲击力时程数据。

2 实验效果分析

轴向和横向冲击失效实验效果及仿真对比如图 5 和图 6 所示。

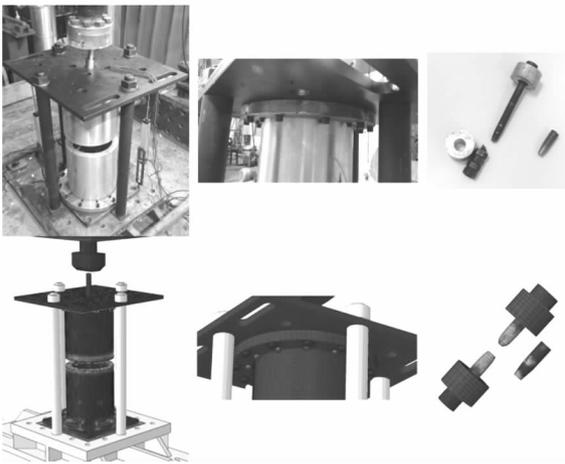


图 5 轴向冲击失效效果对比

Fig. 5 Comparison of axial impact failure effect

轴向冲击失效实验中,失效位置是实验设计关心的连接结构螺栓组,螺栓组螺栓全部断裂失效。由于法兰盘“杠杆效应”,螺杆明显弯曲变形,断裂位置为强度薄弱的螺杆与螺帽交界面,实际失效模式为拉弯耦合失效。垫块未见明显压痕

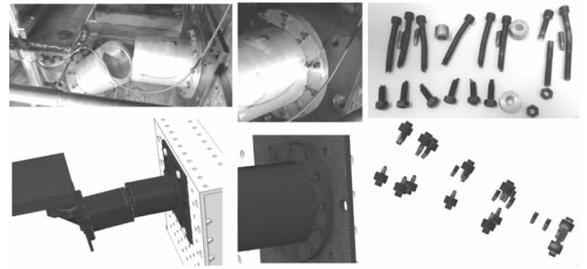


图 6 横向冲击失效效果对比

Fig. 6 Comparison of transverse impact failure effect

和变形,工装边界未见变形或松动,法兰盘未见变形或裂口。实验与数值仿真效果对比可见、仿真模拟螺栓组螺栓同时失效,工装边界和法兰盘未发生变形破坏,螺杆可见弯曲变形,与实验效果基本一致。

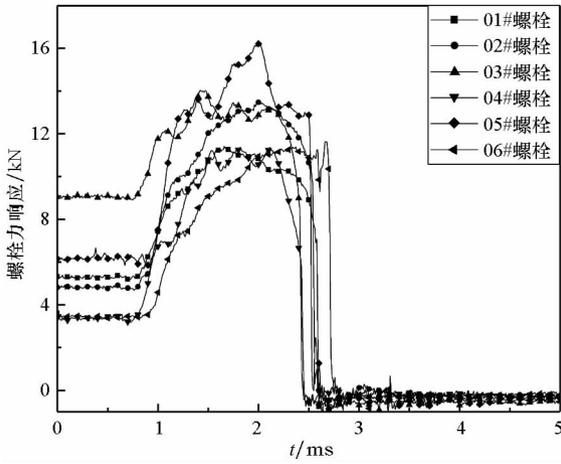
横向冲击失效实验中,失效位置同样是实验设计关心的连接结构螺栓组,除下半部分个别螺栓由于实验工装限制未完全断裂外,其余螺栓依次承载断裂,呈序列失效特点。单个螺栓断裂位置同样为螺栓与螺帽交界面,螺杆弯曲变形程度较轴向冲击失效实验更明显,实际失效模式为拉剪耦合失效。垫块未见明显压痕和变形,工装边界未见变形或松动,连接界面最下侧螺栓连接部位法兰盘可见明显变形,其余位置未见明显变形或裂口。实验与数值仿真效果对比可见,仿真模拟螺栓组同样呈序列失效特点,螺杆可见明显弯曲变形,断裂位置同样为螺杆中面,工装边界未发生变形破坏,仿真模拟失效效果与实验吻合较好。

3 实验数据分析与对比

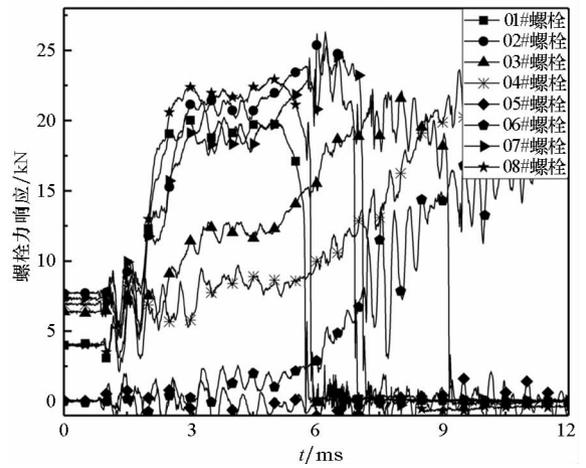
3.1 螺栓力时程响应

连接结构螺栓组螺栓力时程响应是反映连接结构冲击失效机理的关键数据,四组实验采集螺栓响应数据如图 7、图 8 所示。特别地,实验过程中螺栓预紧力通过普通的扭力扳手手动施加,因此螺栓组中不同的螺栓预紧力水平不同,螺栓力时程响应曲线初始值即为对应该螺栓的预紧力。

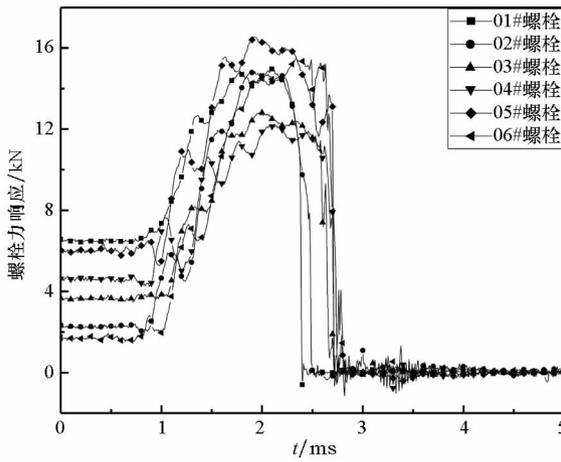
轴向冲击失效实验螺栓力时程响应曲线显示,在 A-1 组实验中,螺栓组螺栓从承载到断裂时程约 1.5 ms,6 个螺栓几乎同时承载同时失效,承载幅值在 11 kN 到 16 kN 之间。单个螺栓力响应波动是由冲击加载过程中应力波的传播和结构振动引起的。非均布实验 A-2 组螺栓组螺栓从承载到断裂时程约 1.5 ms,由于螺栓组非均布分布,1 号和 2 号螺栓位于一侧半圆面,3 号到 6 号 4 个螺栓位于另一侧半圆面,1 号和 2 号 2 个螺栓较其



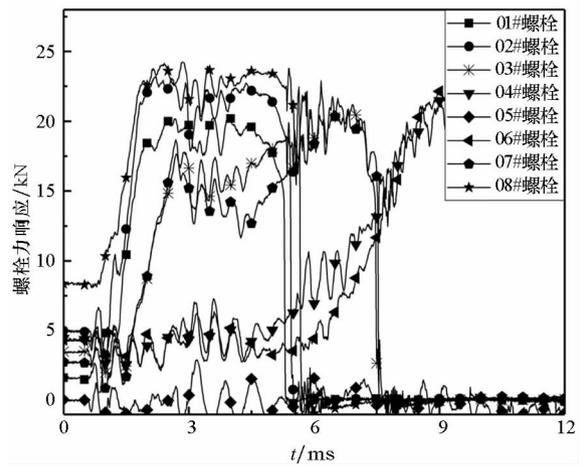
(a) A-1



(a) T-1



(b) A-2



(b) T-2

图 7 轴向实验螺栓力时程响应曲线

Fig.7 Time history response curve of bolt force of axial experiment

图 8 横向实验螺栓力时程响应曲线

Fig.8 Time history response curve of bolt force of transverse experiment

余 4 个螺栓提前断裂,其余 4 个螺栓分布集中,增加了局部承载,冲击加载过程中法兰盘局部变形较大,表现在螺栓力时程曲线为响应时程较长。

横向冲击失效实验螺栓力时程响应曲线显示,在 T-1 组实验中,螺栓组呈序列失效特点,螺栓从其分布圆平面的受拉半面向受压面依序承载断裂。T-1 组螺栓相对螺栓组分布圆平面非均匀分布,特点为左右半圆面相异,1 号螺栓位于分布圆平面最上方,右侧 2、3、4 号螺栓分布较集中,左侧 6、7、8 号螺栓分布较分散。1 号螺栓首先开始承载并断裂,时程约 5 ms,5 号螺栓为螺栓分布平面最下侧螺栓,由于实验台限制最终并未断裂,整个螺栓组失效时程约 20 ms。8 号螺栓位于分布面上侧,几乎与 1 号螺栓同时承载失效,其次是 2 号和 7 号螺栓。需要说明的是,7 号螺栓与 3 号螺栓相对分布面左右对称,但由于 2 号螺栓承载的缘故,7 号螺栓先于 3 号螺栓承载并失效。由于 2、3、4 号螺栓分布较集中,增加了局部承载,加

载过程中法兰盘变形较大,反映在螺栓力时程响应上响应时程较其他位置螺栓更长。同样地,位于分布面最下侧的 6 号螺栓连接局部,由于冲击加载减缓及结构惯性,法兰盘存在明显变形,相应的螺栓力响应时程较初始承载失效螺栓更长。因此,由实验现象及螺杆断口特点可知,位于分布面上方螺栓连接局部法兰盘在冲击加载过程中由于冲击加载快、幅值高和应力波的传播特点导致变形较小,螺栓脆断效果更明显。

相比于 T-1 组横向冲击失效实验,T-2 组实验螺栓组螺栓与栓孔之间存在 3 mm 间隙,初始螺栓承载和失效时程约 5 ms,螺栓组整体失效时程约 20 ms,呈序列失效特点。最先承载失效的螺栓为分布面上侧 1、2、8 号螺栓,决定了连接结构的承载能力。该组实验螺栓力响应表现出明显的按螺栓组分布面左右对称特点,2 号与 8 号螺栓、3 号与 7 号螺栓、4 号与 6 号螺栓几乎分别同时承载和失效。

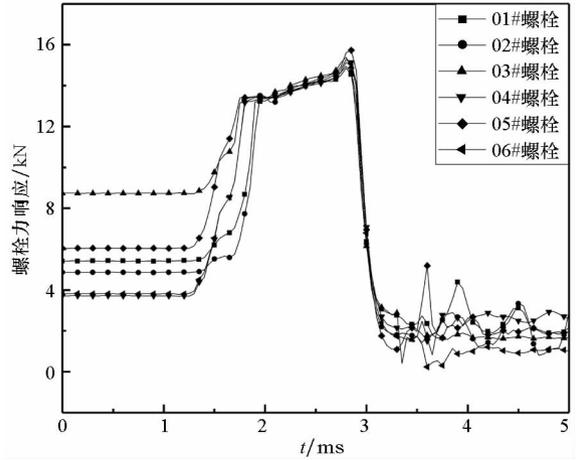
3.2 仿真模拟效果对比

为对比数值仿真精度,验证仿真能否反映瞬态荷载下连接结构失效机理,分别建立了四组实验对应的有限元模型,螺栓组螺栓力响应是反映响应机理的关键数据,分别输出各组实验有限元模型计算螺栓力时程响应结果,对比分析实验与仿真计算异同。实验采集螺栓组螺栓初始预紧力水平见表 3,为对比分析仿真精度,仿真模型中施加与实验一致的预紧力水平。个别螺栓未采集到初始预紧力,仿真模型预紧力按照机械设计标准施加 6 kN。

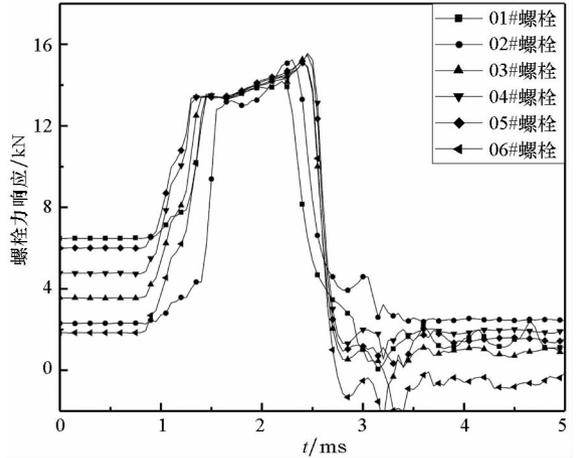
图 9 所示为轴向冲击失效实验对应的有限元模型输出数据。由 A-1 组曲线可见,仿真模拟螺栓组螺栓初始承载时刻略有差异,但螺栓组螺栓同时失效,整个连接结构从承载到失效时程约 1.5 ms,响应幅值约 15 kN,这与实验结果一致。A-2 组响应曲线表明,螺栓组螺栓整体响应时程约 1.5 ms,响应幅值约 15 kN,同样与实验结果吻合较好。单个螺栓从承载到失效的时程略有差异,3 号至 4 号 4 个螺栓分布较集中,增加了局部连接刚度,1 号和 2 号 2 个螺栓分布较分散,因而失效断裂略先于其他螺栓,实验数据反映了相同的响应特点。需要说明的是,仿真计算响应曲线最终不归零,是由于输出位置选择了模型中未删除的单元,其存在残余应变。

图 10 所示为横向冲击失效实验有限元模型输出的螺栓力时程响应曲线。以 T-1 组实验为例,由仿真螺栓响应曲线可见,螺栓组单个螺栓响应幅值在 20 kN 左右,实测螺栓响应幅值约为 21 kN,误差约为 5%,初始失效螺栓(1 号)响应时程约为 3 ms,实测约为 4 ms,误差约为 25%,整体响应时程约为 12 ms,实测结果约为 20 ms。对比可知,实验实测与仿真模型在螺栓力时程响应上吻合较好,在初始承载螺栓失效时

程上存在一定差异,这主要是由于仿真模型通过输出螺栓中面外侧单元积分点上的应力响应换算力响应,而外侧单元失效删除略先于螺栓整体。



(a) A-1



(b) A-2

图 9 轴向实验仿真螺栓力响应

Fig.9 Time history response curve of bolt force of axial simulation

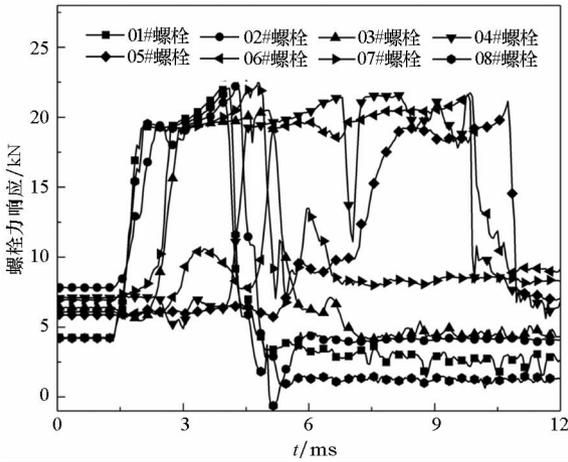
图 11 所示为两组横向冲击失效实验采集的连接界面开缝位移时程数据,位移响应曲线呈线性上升趋势,仿真模型计算得到的开缝位移与实验采集数据吻合较好,两组实验最大开缝位移误

表 3 螺栓组预紧力水平

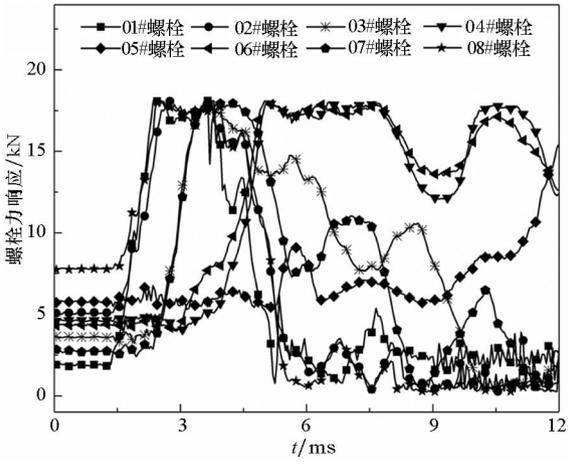
Tab.3 Pre-tightening force of bolts

kN

实验编号	01#螺栓	02#螺栓	03#螺栓	04#螺栓	05#螺栓	06#螺栓	07#螺栓	08#螺栓
A-1	5.289 7	4.816 9	9.043 9	3.359 6	6.185 3	3.446 2		
A-2	6.496 7	2.256 6	3.638 2	4.600 0	6.015 8	1.692 3		
T-1	4.064 3	7.722 5	6.370 8	6.925 6			7.324 3	3.977 6
T-2	1.266 7	5.668 0	1.988 2	4.095 7		4.340 5	1.913 2	1.392 0



(a) T - 1



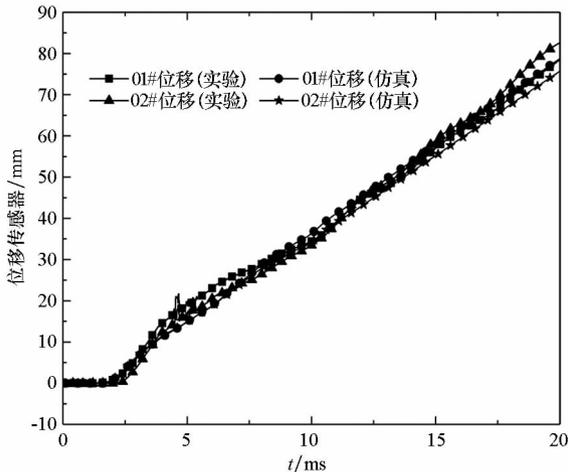
(b) T - 2

图 10 横向实验仿真螺栓力响应

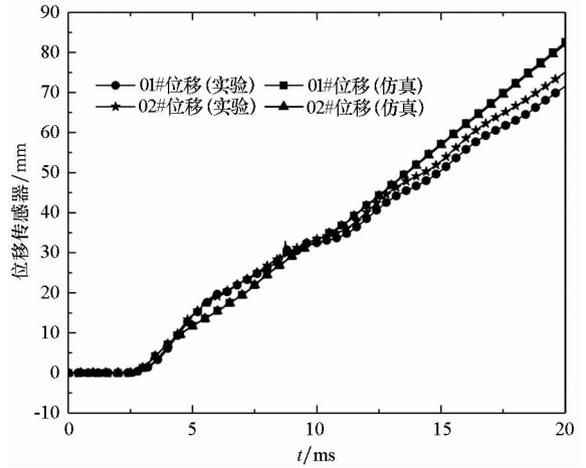
Fig. 10 Time history response curve of bolt force of transverse simulation

差均在 5% 以内。

综上,仿真模拟在连接结构响应时程和幅值上与实验实测结果吻合较好,在实际设计和工程应用中,可以认为有限元方法数值计算结论是可靠的。



(a) T - 1



(b) T - 2

图 11 连接界面开缝位移(横向实验)

Fig. 11 Slit displacement of connecting interface transverse experiment

4 结论

对级间螺栓法兰连接结构简化的原理性实验件建立冲击失效的有限元模型,设计并进行了多组轴向和横向冲击失效实验,得到以下结论:

1)从实验效果看,轴向冲击荷载作用下,螺栓法兰连接结构螺栓组同时失效,由于法兰盘“杠杆效应”,单个螺栓呈拉弯耦合失效特点。横向冲击荷载作用下,连接结构螺栓组序列失效特点,螺栓分布平面上侧螺栓中单个螺栓由于法兰盘“杠杆效应”呈拉弯耦合失效,分布面下侧螺栓承受较大剪切载荷作用。

2)通过对比螺栓组螺栓失效力时程曲线特点,分析得到螺栓分布平面上部三个螺栓为冲击下最初承载螺栓,决定了连接结构承载能力。

3)为采集连接结构冲击荷载作用下单个螺栓响应数据,利用轴承钢套筒设计了螺栓响应信号采集传感器,实验结果表明,传感器采集的信号质量高且稳定,能够在一定程度上反映连接螺栓的实际响应特点。

4)通过对比实验实测和仿真模型计算的螺栓力时程响应数据发现,基于有限元方法建立的仿真模型有很好的计算精度,模拟失效规律与实验效果吻合良好,在实际工程设计和应用中,可以认为利用有限元模型计算得出的结论是可靠的。

参考文献 (References)

[1] Otegui J L, Fazzini P G, Márquez A. Common root causes of recent failures of flanges in pressure vessels subjected to dynamic loads [J]. Engineering Failure Analysis, 2009,

- 16(6): 1825 - 1836.
- [2] 张朝晖, 由小川, 吕海波, 等. 火箭级间段连接螺栓失效数值模拟[J]. 强度与环境, 2007, 34(4): 49 - 57. ZHANG Zhaohui, YOU Xiaochuan, LYU Haibo, et al. Numerical simulation for the failure of connector bolts of rocket mid-stages[J]. Structure & Environment Engineering, 2007, 34(4): 49 - 57. (in Chinese)
- [3] 尤天庆, 王聪, 曹伟, 等. 考虑接触非线性的航行体出水结构动力学分析[J]. 振动与冲击, 2011, 30(8): 28 - 31, 50. YOU Tianqing, WANG Cong, CAO Wei, et al. Dynamic analysis of underwater launched vehicle during water exit considering contact nonlinearity[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(8): 28 - 31, 50. (in Chinese)
- [4] 栾宇, 刘松, 关振群, 等. 小变形下螺栓法兰连接结构的静刚度非线性特性[J]. 强度与环境, 2011, 38(3): 29 - 35. LUAN Yu, LIU Song, GUAN Zhenqun, et al. The nonlinear character of static stiffness in the structure with bolted flange connection under small deformation [J]. Structure & Environment Engineering, 2011, 38(3): 29 - 35. (in Chinese)
- [5] 秦谊, 侯晓, 何高让, 等. 弯曲荷载作用下固体火箭发动机裙端连接螺孔受力分析[J]. 固体火箭技术, 2011, 34(3): 369 - 372. QIN Yi, HOU Xiao, HE Gaorang, et al. Force analysis of joint bolt holes in solid rocket motor skirt subjected to bending load[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2011, 34(3): 369 - 372. (in Chinese)
- [6] Lu X, Zeng Y, Chen Y, et al. Transient response characteristics of a bolted flange connection structure with shear pin/cone[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 395: 240 - 257.
- [7] Luan Y, Guan Z Q, Cheng G D, et al. A simplified nonlinear dynamic model for the analysis of pipe structures with bolted flange joints[J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331: 325 - 344.
- [8] 芦旭, 王平, 王建男, 等. 含剪力销(锥)螺栓法兰连接结构非线性特性[J]. 计算力学学报, 2015, 32(4): 503 - 511. LU Xu, WANG Ping, WANG Jiannan, et al. Nonlinear behavior of bolted flange connections containing shear pin (cone) [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2015, 32(4): 503 - 511. (in Chinese)
- [9] 芦旭, 张宇航, 陈岩, 等. 含剪力销(锥)螺栓法兰连接结构弯剪扭耦合振动研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(2): 139 - 146, 184. LU Xu, ZHANG Yuhang, CHEN Yan, et al. Coupled vibration of bolted flange connections containing shear pins (cone)[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(2): 139 - 146, 184. (in Chinese)
- [10] Long H V, Jaspert J P, Demonceau J F. Behaviour of bolted flange joints in tubular structures under monotonic, repeated and fatigue loadings I: experimental tests [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 85: 1 - 11.
- [11] Guo Y, Wei Y, Yang Z, et al. Nonlinearity of interfaces and force transmission of bolted flange joints under impact loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 109: 214 - 223.
- [12] 王青文, 袁杰红, 周仕明. 典型冲击载荷下螺栓法兰连接结构失效模拟[J]. 强度与环境, 2017, 44(5): 21 - 27. WANG Qingwen, YUAN Jiehong, ZHOU Shiming. Numerical simulation for the failure of bolted flange connection structure under typical impact load [J]. Structure & Environment Engineering, 2017, 44(5): 21 - 27. (in Chinese)