

# 气锤冲击作用下含螺栓连接组合结构 加速度响应研究

顾晨钰, 于纪言, 王晓鸣

(南京理工大学 智能弹药技术国防重点学科实验室, 南京 210094)

**摘要:** 为了获得组合结构在高过载环境中的加速度响应规律, 进行了气锤过载冲击实验, 得到带螺栓连接组合结构不同位置的加速度响应, 并使用 ABAQUS 有限元软件对实验动态冲击过程进行仿真研究, 验证了数值仿真的可靠性。利用验证的有限元模型对高过载环境中螺栓预紧力、气锤冲击速度对组合结构不同位置加速度的影响进行仿真分析。结果表明螺栓预紧力较小时, 组合结构对加速度“削弱”明显, 当 1# 和 2# 位置螺栓预紧力达到 10 kN 和 15 kN 时, 组合结构对加速度“削弱”作用减小并趋于稳定; 初始冲击速度增加, 相邻位置加速度差值增加, 差值基本呈线性关系, 斜率分别为 0.025 66 和 0.013 57。以上结论为实际工程应用抗过载设计提供参考依据。

**关键词:** 螺栓连接; 组合结构; 高过载; 冲击; 加速度

**本文引用格式:** 顾晨钰, 于纪言, 王晓鸣. 气锤冲击作用下含螺栓连接组合结构加速度响应研究[J]. 兵器装备工程学报, 2016(4): 51-55.

**Citation format:** GU Chen-yu, YU Ji-yan, WANG Xiao-ming. Analysis of Acceleration Response of Multi-Body with Bolted Under the Drop Hammer Impact[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016(4): 51-55.

中图分类号: TJ03

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2016)04-0051-05

## Analysis of Acceleration Response of Multi-Body with Bolted Under the Drop Hammer Impact

GU Chen-yu, YU Ji-yan, WANG Xiao-ming

(Intelligence Ammunition of Ministerial Key Laboratory,  
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to obtain the acceleration response discipline of multi-body structure in high overload environments, we conducted hammer overload impact test, and obtained the different positions of acceleration response of multi-body structure with bolted and studied the experimental dynamic impact process simulation by using ABAQUS finite element software, and verified the reliability of the numerical simulation. Using the finite element model with certification, we simulated and analyzed the effect of bolt preload the impact velocity of steam hammer in high overload environment to the acceleration of different positions. The results indicate when the bolt preload is smaller, the composite structure of the acceleration is “weakened” obviously, and when the bolt preloads on 1# and 2# positions reach 10 kN and 15 kN, the composite structures for acceleration “weakening” effect is reduced and stabilized; and when the initial impact velocity is increasing, the acceleration difference between adjacent positions increased, and the difference basically appeared linear relationship, the slopes are 0.025 66 and 0.013 57, respectively. These conclusions provide reference for practical engineering application design of anti-overload.

**Key words:** bolt connection; composite structure; high overload; impact; acceleration

收稿日期: 2015-10-23; 修回日期: 2015-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(11402121)

作者简介: 顾晨钰(1989—), 硕士, 主要从事弹丸的膛内动力学响应研究。

螺栓连接广泛运用于制造、军工等领域,尤其在军工领域中,组合结构在高过载环境中通常采用螺栓加固。国内外学者在相关方面已经做出了很多研究,Nassar<sup>[1]</sup>提出更精确的解析模型解释螺栓连接自松弛现象,建立了考虑螺纹的三维有限元模型,用降温法加载预紧力,为螺栓连接的有限元建模提供了一种思路;丁问司<sup>[2]</sup>通过建立气动冲击机构的数学模型并进行仿真计算,对各冲击参数研究;胡绍巧<sup>[3]</sup>通过改变仿真中落锤的高度、落锤的质量,研究炸药内部的动态响应特征,在一定程度上给本研究的实验仿真提供了思路;杨书仪<sup>[4]</sup>对多部件的移动硬板进行了跌落冲击仿真,考虑了多部件结构在冲击过程中的相互影响;Karagiozova<sup>[5]</sup>应用有限元研究了低速冲击和高速冲击下的金属圆柱壳的响应历程;汪玉<sup>[6]</sup>对 V6 柴油机冲击状态下的应力响应,得出该组合结构的冲击特性是非线性的。尽管相关的研究已经比较充分全面,但是针对高过载环境中组合结构自身不同位置的加速度响应及其影响因素的研究并不多见。

基于上述原因,本研究基于过载冲击试验平台,自主设计带螺栓连接组合结构,并在其典型部位安装加速度传感器,研究其在高过载冲击条件下,组合结构不同部位的过载响应,通过仿真建模分析组合结构在高过载环境下冲击响应的影响因素,找出组合结构对高过载的不同过载响应规律,为实际工程应用提供参考依据。

## 1 高过载环境下含螺栓连接组合结构冲击响应特性实验研究

### 1.1 实验平台简介和实验布置及过程

冲击实验台为美国 AVEX 公司的 SM-105-MP 气锤,冲击过程中能量损失少,并且可以进行重复性实验,可在较小的高度获得极大加速度,最大过载可达 30 000 g。

实验设备主要由冲击系统、被撞击系统和测试系统组成。冲击系统由上冲击部、基座及自设计夹具组成。被撞击系统由下冲击部和气锤底座组成。测试系统由夹具及实验台上不同部位的加速度传感器及测试放大电路系统构成,加速度传感器在 2 000 g 左右触发。气罐经充气作为前端压力输送经过干燥机作用于气锤冲击部,用以抬高气锤及高速驱动气锤冲击。过载冲击台试验原理及实物如图 1 和图 2 所示,试验中夹具外径为 100 mm,内径为 30 mm 的圆盘,套筒高度为 200 mm,直径为 50 mm,壁厚为 3.5 mm;圆柱形基座直径为 200 mm,高度为 100 mm;试验中所采用的螺栓为英制 3/8-16 粗牙螺栓,螺栓预紧力通过数字力矩扳手确定为 15 kN。

1 号传感器安装在夹具上(1 通道),2 号传感器安装在套筒上(2 通道),3 号传感器安装在平台上(3 通道),三轴传感器安装在夹具上(4 通道)。传感器安装如图 3 所示。(注:由于不同传感器之间触发机理不同会导致所得加速度峰值和脉宽有差别。)

实验分为 3 组,如表 1 所示预冲击高度定为 50 cm,设定冲击气压为 0.8 MPa、0.9 MPa 和 1.0 MPa。试验过程中上下

冲击部初始为贴合状态,后上冲击部经气压顶起后又在气压作用下快速冲击下冲击部,以上为一完整的冲击过程。在冲击过程中两种加速度传感器在 500 g 时触发开始记录。

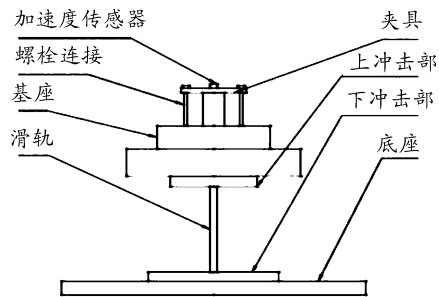


图 1 实验冲击台示意图



图 2 实验设备

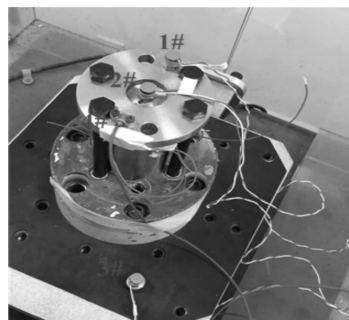


图 3 传感器位置分布示意图

表 1 实验方案

编号	高度/cm	气压/MPa	撞击次数
1	50	0.8	1
2	50	0.9	1
3	50	1.0	1

### 1.2 实验结果分析

由以上 3 组实验可知,当过载冲击实验台以固定速度撞击被冲击部时,组合结构不同部位获得不同的加速度响应。如表 2、表 3、表 4 可见 3 组实验表明 3 组传感器的加速度数值为 3# > 2# > 1#(4#),其中 1# 和 4# 为对称位置的不同加速度传感器,其测得的加速度值较为接近,对比可知实验测试

结果较为准确。

表2 测试1数据统计

传感器编号	过载/g	脉宽/ $\mu$ s
1#	8 667	150
2#	12 696	100
3#	16 425	30
4#	8 877	120

表3 测试2数据统计

传感器编号	过载/g	脉宽/ $\mu$ s
1#	8 667	160
2#	11 086	90
3#	15 319	34
4#	8 933	120

表4 测试3数据统计

传感器编号	过载/g	脉宽/ $\mu$ s
1#	8 667	140
2#	11 739	100
3#	14 042	40
4#	8 439	140

加速度曲线的幅值,获得不同的撞击速度,可得不同的过载值。

过载冲击台初始冲击高度为 500 mm,冲击方向为竖直向下,冲击台及组合结构材料属性如表 5 所示。充分定义模型中发生接触。数值模型采用 mm-ms-k g 单位制。模型共有 part 单位 4、单元数目 108 131。分别和实验对应的在基座、套筒、夹具上传感器位置 设置 3 个参考点并提取其冲击全过程加速度。

表5 材料属性

名称	材料	网格类型	杨氏模量/GPa	泊松比	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3})$
底座	45 钢	C3D8R	210	0.3	$7.9\text{E} - 6$
基座	45 钢	C3D8R	210	0.3	$7.9\text{E} - 6$
套筒	45 钢	C3D8R	210	0.3	$7.9\text{E} - 6$
夹板	45 钢	C3D8R	210	0.3	$7.9\text{E} - 6$

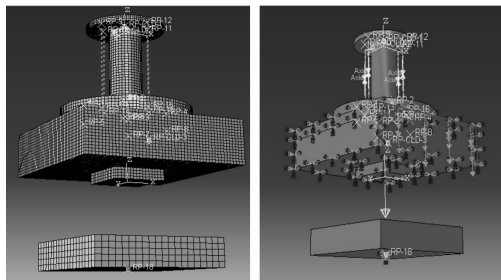


图4 有限元网格模型及边界条件

## 2 数值仿真

### 2.1 有限元模型建立

运用 ABAQUS 有限元软件,对组合结构不同位置高过载环境中加速度响应进行有限元仿真实验验证,模型参数与实验参数基本相同。图 4 中左图为冲击实验台有限元模型,为减少计算量,建立有限元模型过程中,在遵循实际模型的基础上做如下简化:① 省略对计算结果影响不大的尺寸及结构,如冲击部的圆角、凸台等;② 螺栓采用 ABAQUS 中螺栓连接器等效替代,螺栓预紧力为 15 kN,并在隐式分析步施加<sup>[7]</sup>;③ 下冲击部简化为刚体材料;④ 实验中 1# 和 4#位置的传感器是对称位置的不同加速度传感器,故仿真中仅取其中任一位置加速度。

如图 4 所示,下冲击部作为刚性体并固定,其他结构作为弹塑性体,采用 C3D8R 单元,下冲击部正上方一定高度,并固定作为初始冲击状态,设置重力场状态分析步和冲击分析步,重力场状态分析步中的试验台重力作用下应力应变状态,并将此状态加载到冲击分析步状态下;冲击分析步下,选取基座的一个面竖直向下施加作用力,通过设置平缓加速度曲线及其幅值系数使冲击台获得稳定的撞击速度,从而减小因冲击台自身的加速度造成的误差,参见图 5。可通过调节

Amplitude Data		Baseline Correction
Time/Frequency	Amplitude	
1	0	0
2	0.0001	0.1
3	0.0005	0.5
4	0.0008	0.8
5	0.001	1
6	0.005	0
7	0.02	0
8	0.08	0
9	0.1	0

图5 冲击台载荷施加条件

### 2.2 非线性有限元算法

螺栓连接组合结构在高过载环境中的撞击过程是一个短暂、复杂的过程,其撞击刚性面时与刚性面的冲击影响着整个组合结构的全部冲击响应过程,全程涉及材料非线性、几何非线性以及接触面非线性<sup>[8]</sup>。

ABAQUS/explicit 提供了两种接触增强约束方法:动力学法与罚函数法。动力学法使用加速度修正来改善接触侵入关系。而主从 - 平衡接触算法会将主从面置换后的情况也考虑在内,具体说就是计算考虑其中一个面是主面时的修正值大小,同时计算同一个面是从面时的修正值大小,这两个值将按照权重值加以平均。ABAQUS 会使用两次修正使得各节点建立接触关系。

就接触约束的增强效果来说,罚函数法不及动力学法,但罚函数法具有更为广泛的接触应用场合,允许两刚体部件之间发生接触。又如,罚函数法允许接触的表面同时与其他元素有约束或绑定关系。由于罚函数法会在整个模型中额外增加刚度,将对稳定增量步长产生一定的影响。

### 2.3 仿真计算结果分析

由仿真结果可知,两组螺栓预紧力均为 10 kN,加速幅值系数 5 k,在此状态下对刚性被冲击部进行冲击,冲击瞬间应力云图如图 6。提取加速度的三位置整体过载曲线如图 7。

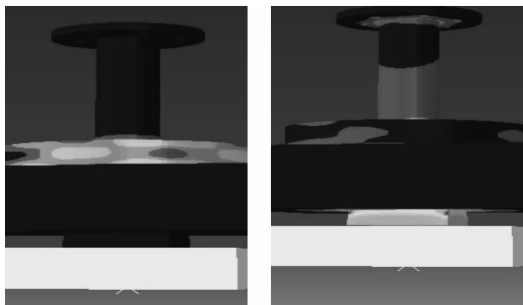


图 6 冲击瞬间应力云图

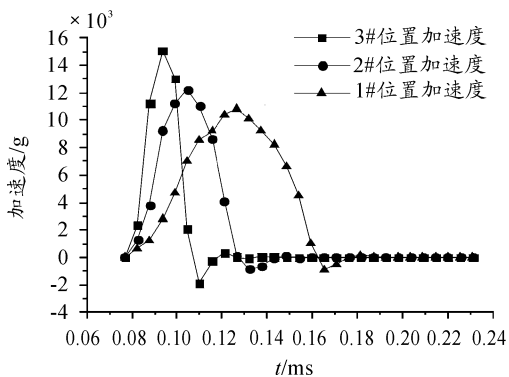


图 7 三位置加速度-时间曲线

采用上述有限元模型及材料参数,对过载冲击实验台的冲击响应过程进行数值仿真。

由应力云图可清楚看到随着撞击的发生,冲击台整体的应力变化和加速度曲线吻合并沿着撞击部位逐渐向上传递。冲击速度与实验撞击速度基本一致,并获得相当的加速度。

由加速度时间曲线可知,提取加速度的三点峰值越大脉宽越窄,趋势和规律符合实验测试结果。3#的仿真结果为 15 052 g 和测试结果接近,1#和2#的差值分别为 10 827 g 和 12 234 g,由于传感器灵敏度、实验中螺栓松紧等不确定性因素,虽然稍大于实验结果,但是整体仿真结果已经表明组合结构在高过载环境中的响应规律,同时,从其中可以看出仿真中的加速度曲线的脉宽由 3#、2#、1#位置逐渐增大,这是由于高过载在组合体间传递、响应等作用增大了加速度的触发的脉宽。

综上仿真结果知,提取的 3 个不同位置的加速度值呈现出距离撞击部越近加速度值越近的现象,即 3# > 2# > 1#,符

合了实验前的猜想,组合结构对加速度的响应随组合结构的增加使加速度的传递逐渐减弱,并使加速度曲线的脉宽增加,使加速度“缓冲”。由实验结果和过载冲击台时间-过载曲线可知,采用限元过载冲击台模型是合理的,并可以以此为参考进行参数化研究和分析。

## 3 高过载环境中其他因素对加速度响应的影响

### 3.1 螺栓预紧力对不同位置组合结构加速度峰值响应影响分析

在实际试验操作中,外加载荷是通过其他零件传递至螺栓<sup>[9-10]</sup>,对螺栓的反复冲击振动会导致预紧力逐渐减小,且人为影响因素较大,从而影响实验的测试结果。故用有限元仿真适当替代预紧力等不稳定因素较为可取,由图 8 组合结构螺栓位置知,3#位置加速度不受到螺栓连接的影响,通过有限元仿真方法,将 3#位置加速度作为可控初始条件,通过改变螺栓预紧力的大小,分析预紧力对 1#和 2#位置点加速度的影响规律。本组仿真分别针对组合结构的两组螺栓施加 5 kN,10 kN,15 kN,20 kN,25 kN 的预紧力,预紧力为  $F$  取第一个波峰值。

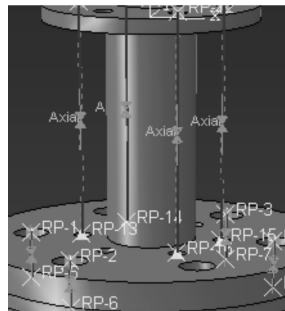


图 8 螺栓位置

相同边界条件下增加螺栓预紧力,提取点加速度峰值变化曲线如图 9。

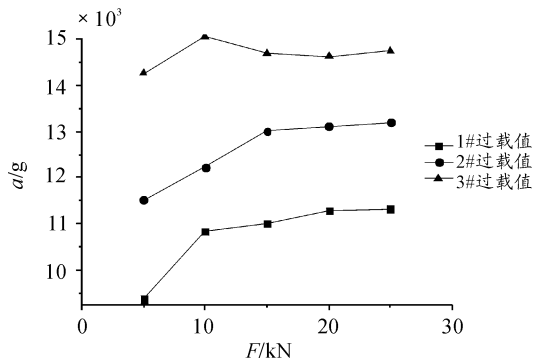


图 9 加速度峰值-螺栓预紧力关系

由仿真结果可知,初始条件 3#位置的加速度峰值稳定在 14 500 g 左右,随着螺栓预紧力的增加,提取的 1#和 2#位置

加速度峰值先逐渐增加,当预紧力达到 25 kN 时增幅明显减缓,此时对应加速度峰值为 11 300 g 和 13 200 g。

由此可知,当螺栓预紧力较小时,会较大程度影响组合结构之间的加速度响应,组合结构件加速度“衰减”明显;当 1#和 2#的螺栓预紧力达到 10 kN 和 15 kN 时,带螺栓连接的组合结构在高过载环境中受预紧力的影响作用达到“饱和”。可为机械结构的抗过载结构设计提供参考依据。

### 3.2 冲击速度对组合结构不同位置加速度差异响应影响分析

在保持螺栓预紧力等外界条件不变的情况下,通过改变上冲击部加速度曲线的幅值达到增加初始速度的目的,从而增大上冲击部加速度值。本组仿真分别设置加速度曲线幅值系数为 5 k, 10 k, 15 k, 20 k, 25 k, 30 k, 35 k。通过有限元仿真分析不同加速度过载情况下提取点的加速度“衰减”规律。

在相同边界条件下,由先前的实验结果知,组合结构的加速度值由距离冲击部由近向远逐渐减小,即 3# > 2# > 1#,故分别对不同幅值系数仿真组中 3#和 2#, 2#和 1#的加速度峰值做差。如图 10 所示。

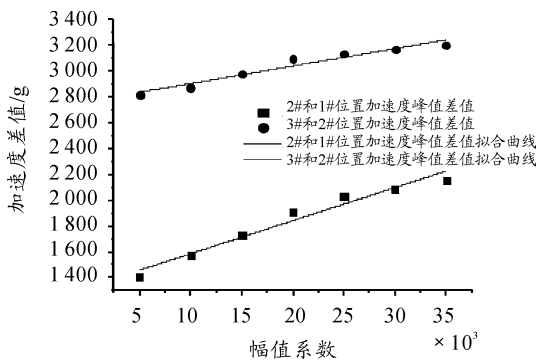


图 10 相邻位置加速度差值和加速度幅值系数关系曲线

由图 10 知,3#和 2#位置撞击加速度峰值之差整体大于 2#和 1#加速度峰值之差,两组数据均说明,随着撞击速度的增加,相邻位置加速度的差值增加。符合常识经验。随着初始撞击速度继续增大,两组差值基本呈线性关系。分别取 2#和 1#位置及 3#和 2#位置加速度差值点拟合得直线斜率  $k_1$ 、 $k_2$ ,其中  $k_1 = 0.02566$ ,  $k_2 = 0.01357$ 。该结果表明随着过载的增加,加速度过载在 2#、1#位置之间的衰减增速大于 3#、2#之间的衰减幅度。该结论可为抗过载设计应用提供一定的理论依据。

## 4 结论

本研究采用 ABAQUS 有限元仿真软件、AVEX 公司的 SM-105-MP 过载冲击实验台、自设计带螺栓组合结构结合加速度传感器,对组合结构在高过载环境中的加速度响应特性进行实验并结合仿真对比研究,发现螺栓连接体在高过载环境中不等同于刚性体,其不同位置加速度响应不同,并得出以下结论:

1) 螺栓连接组合结构在高过载冲击下仿真加速度峰值与实际实验测得加速度峰值大小基本一致,表明所采用的有限元模型进行高过载冲击动态响应分析能够较为真实反映螺栓连接组合结构高过载环境中的加速度响应机理。

2) 螺栓预紧力对组合结构的加速度响应有一定的影响,只有在预紧力较小时,加速度的峰值和预紧力呈正相关;当预紧力继续增大,加速度的峰值基本保持不变,说明预紧力对于带螺栓结构的组合结构高过载环境加速度响应仅在一定范围内起到影响作用。

3) 随着初始撞击速度增加的初始阶段,3#和 2#位置的加速度峰值之差大于 2#和 1#位置加速度峰值之差;3#和 1#组(靠近撞击部位两位置)加速度差初始增速小于(相对远离撞击部位两位置)加速度差值,当速度继续增加,两组加速度差值仍保持之前差异,增幅变小,两差值变化趋势趋向一致。

以上结论证明了实验仿真的可靠性,并且为抗过载、抗冲击设计方法提供参考依据。

## 参考文献:

- [1] YANG X, NASSAR S N, WU Z. Criterion for preventing self-loosening of preloaded cap screws under transverse cyclic excitation [J]. Journal of Vibration and Acoustics, ASME, 2011, 133(8): 1-11.
- [2] 丁问司,熊江.电驱冲击气锤冲击特性建模与仿真研究[J].振动与冲击,2012,31(19):31-25.
- [3] 胡绍巧,张奇,向聪,等.装药落锤冲击实验载荷特性研究[J].振动与冲击,2010,29(12):125-127.
- [4] 杨书仪,刘德顺,赵继云,等.基于 LS-DYNA 的移动硬盘跌落冲击耐撞性能分析[J].振动与冲击,2012,31(9):13-17.
- [5] KARAGIOZOVA D, ALVES M, JONES N. Inertia effects in axisymmetrically deformed cylindrical shells under axial impact [J]. International Journal of Impact Engineering, 2000(24):108-1115.
- [6] 汪玉,赵建华,杜俭业,等.基于多体动力学有限元计算的一种舰用柴油机抗冲击性能仿真[J].振动与冲击,2009,28(11):87-90.
- [7] 史冬岩,张亮,张成,等.冲击载荷作用下预紧力螺栓强度特性研究[J].船海工程,2012,41(2):166-169.
- [8] 王勖成.有限单元法[M].北京:清华大学出版社,2003:666-667.
- [9] 杨雪春,卢怀亮,黄树槐,等.螺栓的冲击载荷分析[J].机械强度,2003,25(6):628-631.
- [10] 周坤,刘美红.法兰螺栓连接中螺栓预紧力的计算和控制方法分析[J].新技术新工艺,2010(8):26-28.