螺栓连接球柱壳结构撞击行为的数值分析

刘占芳,张 凯,颜功兴 (重庆大学工程力学系,重庆 400030)

摘 要:为对螺栓数目和预紧力大小设计提供指导,对螺栓连接球柱壳结构抗撞击性能进行数值分析.数值分 析时采用动力松弛法确定螺栓连接球柱壳结构的静态初始变形和初始应力,再通过动力分析获取结构在撞击载 荷下的响应.计算得到的法兰面上的接触压力历程描述存在预紧的球壳和柱壳的接触运动,这种相对运动可引 起螺栓预紧力的变化.测试点的应变响应描述了应力波的传播过程,反映了弹靶接触面和法兰接触面的压力变 化.结果表明了螺栓连接球柱壳结构撞击行为数值分析方法的合理性.

关键词:螺栓连接球柱壳结构;动力松弛法;撞击响应;应力波传播
 中图分类号:0347.5
 文献标志码:A
 文章编号:0254-0037(2011)11-1607-06

螺栓连接结构广泛应用于机械工程、航空航天、汽车工业和造船工业领域,由于碰撞造成的结构失效 常见于实际工程中. 撞击载荷作用下,螺栓连接结构的响应涉及应力波在螺栓连接结构中的传播,即应力 波在含预应力结构中的传播^[1-2]. 螺栓预紧力在螺栓连接结构中产生预应力,应力波的传播过程会造成螺 栓内初始预紧力的振荡、影响螺栓连接结构稳定. 探讨撞击载荷作用下螺栓连接结构的动力响应,可为确 定螺栓连接结构的螺栓数目和螺栓预紧力提供关键设计参数.

本文选取了一类典型螺栓连接结构即螺栓连接球柱壳结构,采用动力松弛法计算螺栓连接球柱壳结构的静态初始变形和初始应力,进而计算结构的撞击响应.研究了结构在撞击载荷作用下弹靶接触面上的压力历程和法兰面上的接触压力历程,考察了螺栓预紧力变化情况和应力波的传播过程.

1 有限元模型

螺栓连接球柱壳结构的几何尺寸见图 1,点 1 和 2 为测试点,对称轴为轴向,向上为正.螺栓为 4 个, 螺栓预紧力为 17.3 kN.螺栓和球柱壳材料为碳素钢,数值计算材料模型选为各向同性线弹性力学模型, 材料参数:弹性模量为 206 GPa,泊松比为 0.3,密度为 7 850 kg/m³.采用 8 面体实体单元对结构进行网格 划分,单元总数为 6 720 个,节点总数为 10 311 个,有限元模型见图 2,其中柱壳底端法兰面固支.

本文选取 2 种计算工况,工况 1 和工况 2 分别对应不同弹体对螺栓连接球柱壳结构进行撞击.工况 1 情况下的弹体为长 50 mm、直径 25 mm 的平头弹,撞击方式为外冲;工况 2 情况下的弹体为长 50 mm、直径 25 mm、头部半径 12.5 mm 的圆头弹,撞击方式为内冲.弹体材料与球柱壳相同,弹体速度均为 20 m/s.

该撞击问题涉及几对接触面的处理,包括弹体和球壳体之间的接触、两法兰面之间的接触、螺栓和螺 母与法兰之间的接触,本文选用面面自动接触类型,接触面动摩擦系数为0.10,静摩擦系数为0.12.

2 求解静态问题的动力松弛法

由于螺栓预紧作用,结构在冲击前含有预应力,因此求解应分解为2个计算步:第一步为静力计算获

收稿日期: 2009-05-08.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10572158).

作者简介:刘占芳(1963一),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师.

(2)











取结构的初始变形和初始应力;第2步进行动力计算,得到冲击载荷下结构的响应。静力计算通常采用隐 式求解方法,但为保持与接下来的动力计算的一致性,本文采用显式动力方法进行静力计算,即应用动力 松弛法^[3-7]求解静力问题.

对于静力问题首先建立动力方程. 第 n 个迭代步时,有

$$Ma^n + Cv^n + Q(d^n) = 0 \tag{1}$$

$$\boldsymbol{Q}(d^n) = \boldsymbol{F} - \boldsymbol{P}(d^n)$$

其中,M为系统质量矩阵;C为阻尼矩阵;aⁿ为加速度矢量;vⁿ为速度矢量;dⁿ为位移矢量;F为外载荷;P 为内力.

Δt 为时间增量,采用中心差分格式,结合式(1)和式(2),为确保显式积分的中心差分格式, M 和 C 应 为对角矩阵, 假定

$$\boldsymbol{C} = \boldsymbol{c} \cdot \boldsymbol{M} \tag{3}$$

则有

$$d^{n+1} = d^{n} + \Delta t \left(\frac{2 - c\Delta t}{2 + c\Delta t}\right) v^{n-1/2} + \frac{2(\Delta t)^{2}}{2 + c\Delta t} M^{-1} (F - Kd^{n})$$
(4)

ş

$$\alpha = \frac{2\Delta t^2}{2 + c\Delta t}, \ \beta = \frac{2 - c\Delta t}{2 + c\Delta t}, A = M^{-1}K$$

A 为系统特征矩阵,式(4)可以改写为

$$\boldsymbol{d}^{n+1} = \boldsymbol{d}^n + \boldsymbol{\beta}(\boldsymbol{d}^n - \boldsymbol{d}^{n-1}) + \alpha \boldsymbol{M}^{-1} \boldsymbol{F} - \alpha \boldsymbol{A} \boldsymbol{d}^n$$
⁽⁵⁾

定义误差矢量为

$$\boldsymbol{e}^{n} = \boldsymbol{d}^{n} - \boldsymbol{d}^{*} \tag{6}$$

其中 d^* 为真实解,有 $Ad^* = M^{-1}F$,将式(6)代入式(5)得 $e^{n+1} = [(1+\beta)I - \alpha A]e^n - \beta e^{n-1}$ (7)

令 $e^{n+1} = \kappa e^n$, $|\kappa|$ 表示误差矢量衰减的谱半径,式(7)改写为

$$\left[\left(\frac{\kappa^2-(1+\beta)\kappa+\beta}{\alpha\kappa}\right)I+A\right]e^n=0$$
(8)

因此

(9)

这与 A 的特征值方程形式相同,即 $[-\lambda I + A]e^n = 0$,其中 λ 为 A 的特征值.

$$\kappa^2 - (1 + \beta - \alpha \lambda) \kappa + \beta = 0$$

对于阻尼系统,系统阻尼为临界阻尼时自由振动衰减最快,即κ最小.

计算能否快速收敛取决于系统阻尼选取的合理性,最优的阻尼值与结构的特征频率相关,当式(9)取 重根时系统阻尼为临界阻尼,这时有

$$1 + \beta - \alpha \lambda = \pm 2\sqrt{\beta} \tag{10}$$

式(10)对于系统的任意特征值均成立,假定 λ_0 和 λ_m 分别为系统最小和最大特征值,则有

$$c = 2 \sqrt{\frac{\lambda_0 \lambda_m}{\lambda_0 + \lambda_m}} \tag{11}$$

对于结构力学问题通常有 $\lambda_0 \ll \lambda_m$,式(11)则变为

$$c \cong 2 \sqrt{\lambda_0} \tag{12}$$

对于系统最小特征值的获取,若采用 Rayleigh 商^[8]来估算,有

$$\lambda_0 \cong \frac{(\boldsymbol{W}^n)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{S}^n \boldsymbol{W}^n}{(\boldsymbol{W}^n)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{M} \boldsymbol{W}^n}$$
(13)

式中 W^n 为权重矢量,取为 $v^{n-1/2}$. 对于 \overline{S}^n , n 个时间步后, 有

$$\overline{S}_{i}^{n} = \frac{F_{i}^{n} - F_{i}^{n-1}}{\Lambda t \cdot v^{n-1/2}} = \frac{m_{i}(a_{i}^{n} - a_{i}^{n-1})}{\Lambda t v^{n-1/2}}$$
(14)

在每个时间步,阻尼系数 c 自动调整.

当系统的当前动能小于系统的初始动能的设定倍数 0.001 倍时,计算收敛.

接触动力学问题的接触力可表达为^[2] $F_c = K \delta^{3/2}$ (15)

其中, F_c 为接触力; δ 为接触变形;K为接触系数,与结构的静态初始变形和初始应力相关联.

3 螺栓球柱壳结构撞击响应数值模拟

对前面提到的2种计算工况,重点考察弹靶撞击面、法兰面的接触压力历程和螺栓预紧力变化情况, 同时追踪应力波的传播过程.

对于工况 1,首先观察弹靶接触面压力历程,即 弹靶撞击向结构中输入的冲击脉冲(见图 3),弹靶接 触从 50 μs 持续到约 170 μs,弹靶接触时间约为 120 μs,最大接触压力为 139 kN.

其次,观察法兰接触面压力演化过程. 撞击脉冲 到达法兰接触面之前,法兰接触面压力保持恒定,其 值约为70 kN,基本与4个螺栓预紧力之和69.2 kN 保持一致,显示动力松弛算法可有效求解静态问题. 这表明在动态分析中能有效地维持法兰面上螺栓静 态预紧加载的状态.

法兰接触面上的压力从约 90 μs 始形成一个演 化过程(见图 3),通过接触压力的变化展示了有预紧





力存在的 2 个接触弹性体(球壳和柱壳)的相对运动过程. 波峰部分表示接触增强(压紧运动),波谷表示 接触降低(分离运动),在 1 ms 时间内产生了 4 次接触振荡,最大接触压力约为 220 kN,最小接触压力为 24 kN. 由于撞击造成法兰预紧接触压力的降低达 34%,而增强达到 3.14 倍. 球壳和柱壳的接触碰撞过程 本质上是球柱壳结构的动能和势能的动态转化过程,并受到螺栓预紧的约束.法兰接触压力的动态变化 滞后于弹靶撞击脉冲,反映了应力波在球壳中的传播.

考察沿轴向即 z 轴方向的应变演化,观察应力波的传播过程(见图 4 和图 5).首先观察第 1、2 测试点 的动态应变,其变化曲线与法兰面上的接触压力变化基本吻合.一方面,可从测试点信号出现顺序观察到 应力波的传播过程,根据第 2 测试点信号出现的时间,计算得到应力波的传播速度为 6 km/s 左右,接近理 论纵波波速.法兰面上撞击受压过程产生柱壳内轴向应变出现负值,法兰面的回弹过程导致柱壳内轴向 应变出现正值.计算结果较好地表示了应力波的传播过程.



图 4 工况 1 下螺栓连接球柱壳结构点 1 的轴向应变



对于工况 2,观察弹靶接触面压力历程,确定弹 靶撞击在结构中内冲的冲击脉冲(见图 6),弹靶接触 从 50 μs 持续到约 235 μs,弹靶接触时间约为 185 μs, 最大接触压力为 85.2 kN.相对工况 1 的情况,接触 时间显著增加,接触压力显著降低.

观察法兰接触面压力演化过程,撞击脉冲到达法 兰接触面之前,法兰接触面压力保持恒定,其值约为 70 kN,基本与4个螺栓预紧力之和69.2 kN保持一 致,同样表示在动态分析中能有效地维持法兰面上螺 栓静态预紧加载的状态.

法兰接触面上的压力从约 90 μs 始形成一个演 化过程(见图 6),接触压力的变化展示了有预紧力存 在的 2 个接触弹性体,即球壳和柱壳的相对运动过程.波峰部分表示压紧运动或接触增强,波谷表示分离 运动或接触降低,在1 ms 内产生了1次接触振荡,最大接触压力约为 220 kN,最小接触压力为 21.5 kN. 撞 击造成法兰预紧接触压力的降低达 31%,而增强达到 3.14 倍.由于螺栓预紧力的存在,撞击脉冲加载后, 球壳和柱壳的相对运动需克服螺栓预紧力作用,使法兰接触面压力值降低,表现为法兰接触面压力历程的 第1个波谷,持续时间为 450 μs,为克服螺栓预紧力而导致更长时间的分离运动.相对于工况1,法兰面接 触压力历程的第1个压力脉冲的持续时间要长很多,这是由于与工况1的弹体冲击方式的不同,弹靶撞击 脉冲加载使法兰接触面产生一个附加的压力,而无需克服螺栓预紧力的作用.法兰接触压力的动态变化

滞后于弹靶撞击脉冲,同样反映了应力波在球壳中的传播. 考察沿轴向即 z 轴方向的应变演化,观察应力波的传播过程(见图 7 和图 8).观察第1、2 测试点的动态应变,其变化曲线与法兰面上的接触压力变化基本吻合.一方面,可从测试点信号出现顺序观察到应力 波的传播过程,根据第 2 测试点信号出现的时间,计算得到应力波的传播速度为 6 km/s 左右,接近理论纵 波波速.法兰面上撞击受压过程产生柱壳内轴向应变出现负值,法兰面的回弹过程导致柱壳内轴向应变 出现正值.计算结果只表示了应力波的传播过程,没有涉及波的反射.



图 5 工况 1 下螺栓连接球柱壳结构点 2 的轴向应变

Fig. 5 Axial strain history at point 2 ofspherical-cylinderical shell structure in the first load case



图 6 工况 2 下螺栓连接球柱壳结构接触力历程 Fig. 6 Contact force history at contact surfaces of sphericalcylinderical shell structure in the second load case



图 7 工况 2 下螺栓连接球柱壳结构点 1 的轴向应变







4 结束语

数值分析螺栓连接球柱壳结构在撞击载荷下的动力行为,可为确定螺栓数目和预紧力提供有效方法. 采用动力松弛法获得由于螺栓预紧加载造成法兰面上的接触压力与螺栓预紧力基本一致,表明静力计算 合理.弹靶内外撞击均获得了撞击面上典型的撞击载荷脉冲.法兰面上的接触压力变化描述了有预紧的 球壳和柱壳的接触运动,这种相对运动能引起螺栓预紧力的降低.在给定的工况下,可降低到1/3,即法兰 面上仍维持了一定压力,可根据设计要求判断结构稳定性.内冲造成球壳和柱壳较长时间的分离运动,外 冲则形成球壳和柱壳之间多次压紧和分离的振荡.

测试点的应变响应描述了应力波的传播过程,可认为是弹靶接触面和法兰接触面载荷变化的直接反 映. 从螺栓连接结构的实际尺寸来看,应力波1次传播所需时间约为100 μs,实际考察时间为1 ms,因此 在结构内部大致应有5次波振荡.

参考文献:

- WHITTINGHAM B, MARSHALL I H, MITREVSKI T, et al. The response of composite structures with pre-stress subject to low velocity impact damage [J]. Composite Structures, 2004, 66(1/4): 685-698.
- [2] KHALILI S M R, MITTAL R K, PANAH N M. Analysis of fiber reinforced composite plates subjected to transverse impact in the presence of initial stresses [J]. Composite Structures, 2007, 77(2): 263-268.
- [3] PAPADRAKAKIS M. A method for the automated evaluation of the dynamic relaxation parameters [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1981, 25(1): 35-48.
- [4] UNDERWOOD P. Dynamic relaxation in computational method for transient analysis [M]. North Holland, Amsterdam: [s.
 l.], 1983: 245-263.
- [5] DAVID R O, NORMAN F K. Adaptive dynamic relaxation algorithm for non-linear hyperelastic structures, Part I. formulation
 [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1995, 126: 67-89.
- [6] SALEHI M, AGHHEI H. Dynamic relaxation large deflection analysis of non-axisymmetric circular viscoelastic plates [J]. Computers & Structures, 2005, 83(23/24): 1878-1890.
- [7] HAN S, LEE K. A study of the stabilizing process of unstable structures by dynamic relaxation method [J]. Computers & Structures, 2003, 81(17): 1677-1688.
- [8] 李士军,马大为,朱孙科. 动力松弛方法中 Rayleigh 阻尼参数取值分析[J]. 计算力学学报, 2010, 27(1): 169-172.
 LI Shi-jun, MA Da-wei, ZHU Sun-ke. Analysis of Rayleigh damp parameters in dynamic relaxation method [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27(1): 169-172. (in Chinese)

A Numerical Analysis on Impacting Behavior of Sphericalcylinderical Shell Structure Connected by Bolts

LIU Zhan-fang, ZHANG Kai, YAN Gong-xing

(Department of Engineering Mechanics, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: To give helpful guidance in designing of number of bolt and magnitude of pre-tension force by numerical analysis on spherical-cylindrical shell structure connected by bolts subjected to impact loadings. The dynamic relaxation method is adopted to calculate initial displacement and initial stress of spherical-cylinderical shell structure. The dynamical response of the structure subjected to the impact loadings is then given. The contact movement between the spherical shell and cylinderical shell, being in pre-traction state, is described through historty of contact forces on flanges. The relative movement between them turned out the changes of pre-traction in the bolts. The history of strain at the given test points revealed the stress wave propagation whereas the contact forces on the projectile-target surface and flange surface are correlated. It is proved that the numerical method is reasonable on analyzing impacting behavior of spherical-cylindrical shell structure connected by bolts.

Key words: spherical-cylinderical shell structure connected by bolts; dynamic relaxation method; impacting response; stress wave propagation

(责任编辑 苗艳玲)

(上接第1606页)

Effect of Welding Procedure on Stress Corrosion of Austenitic Stainless Steel

ZHAO Er-bing¹, ZHANG Yi-liang², CHEN Ling-zhi¹

(1. Chaoyang Special Equipment Inspection Institute of Beijing, Beijing 100122, China;

2. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of

Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: It is difficult to release residual stress for welding of austenitic stainless steel, therefore, its chlorine stress corrosion always occurs in engineering. The stress corrosion testing was done on different welding procedures of three different materials (304, 316 L of China, and 304 of German). The welding procedure includes shielded metal arc welding and flux cored CO_2 shielded arc welding through air cooling and water cooling after welding. The base metal, starting point and ending point of welding arc were tested. The better procedure is obtained through 100 samples, and the stress-life relationship of stress corrosion in boiled MgCl₂ of two types of materials are formulated. The conclusion is that life of stress corrosion of 316 L is 15 times of 304, life of the starting point is longer than the ending point of welding arc, life of the butt weld is longer than the fillet weld, and faster cooling after welding is efficient for life of stress corrosion.

Key words: austenitic stainless steel; starting point of welding arc; ending point of welding arc; water cooling treatment; chlorine stress corrosion

(责任编辑 杨开英)