

搭载反应釜的钢框架结构动力性能分析与设计建议

王福明¹, 万嘉祺¹, 陈镜丞², 蒋友宝^{1*}, 郁晨羽¹, 罗孝宇¹

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 长沙 410114; 2. 中国建筑第五工程局有限公司, 长沙 410004)

摘要: 反应釜工作时会对搭载其的钢框架施加较大的高频动荷载, 但是目前此类钢框架结构的设计主要采用静力方法, 忽略了反应釜运转对其的影响。提出了一种质量点和梁单元结合的模拟反应釜动力体系及其与钢框架连接的简化方法, 可高效获得反应釜运转时钢框架的动力响应。基于现行标准《容器支座 第4部分: 支承式支座》(NB/T 47065.4—2018), 分析了反应釜支座底部节点与整体框架的承载能力, 以及不同反应釜搅拌叶片旋转方向下的动力响应, 并进行了该类结构的优化设计研究。结果表明: 按现行标准设计的反应釜支座与连接节点为结构的薄弱部位, 而基于钢材 S-N 疲劳曲线进行优化设计的支座能够使结构在正常工作范围内保持弹性; 采用“相邻各异”的搅拌方向可以使反应釜搭载结构具有最小的弹性变形。研究结果可为相关设计工作提供参考。

关键词: 反应釜; 高频动荷载; 容器支座; 钢框架; 动力响应; S-N 疲劳曲线; 优化设计

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)04-0024-11

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20231106001

Dynamic Performance Analysis and Design Recommendations for Steel Frame Structure Supporting Reactors

WANG Fuming¹, WAN Jiaqi¹, CHEN Jingcheng², JIANG Youbao^{1*},
YU Chenyu¹, LUO Xiaoyu¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. China Construction Fifth Engineering Bureau Co., Ltd., Changsha 410004, China)

*Corresponding author: jiangybseu@163.com

Abstract: Steel frame with the reactor is subjected to large and high-frequency dynamic load when the reactor is stirring. However, the design of this kind of steel frame structure usually adopts the static design method, and the static analysis cannot accurately describe the dynamic effect of the reactor acting on the structure. In order to efficiently research the dynamic effect of the steel frame supporting the reactor during the operation of reactor, a simplified modeling method is proposed in this paper to connect the reactor dynamic system with the steel frame using mass points and beam elements. Based on the current standard *Vessel Supports—Part 4: Supporting Supports* (NB/T 47065.4—2018), the performance of the bottom joint of the reactor support, the overall structure, and the dynamic response of the reactor stirring blade under different rotation directions are studied, and the optimization design research on this type of structure is conducted. The results show that the vessel supports and joints designed according

收稿日期: 2023-11-06

基金项目: 长沙市自然科学基金(2022cskj025), 湖南省自然科学基金(2022JJ40494), 国家自然科学基金(52378126)

作者简介:

王福明(1987—), 男, 博士, 讲师, 主要从事钢结构力学性能方面的研究。E-mail: wangfuming@csust.edu.cn。

万嘉祺(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事钢结构性能分析方面的研究。

通信作者:

蒋友宝(1982—), 男, 博士, 教授, 主要从事钢结构分析与设计研究方面的研究。E-mail: jiangybseu@163.com。

to the current standard are the weak parts of the structure, while the optimization design of the support based on the S-N fatigue curve of steel can ensure the structure remain within the elastic limit during normal operation. The method of "opposite of adjacent" used on setting the rotation direction of the reactor stirring can make the load-bearing structure have the minimum elastic deformation. This study provides some reference for the related design and research work.

Keywords: reactor; high-frequency dynamic load; reactor support; steel frame; dynamic response; S-N fatigue curve; optimization design

钢制立式圆筒形容器是化工设备中常见的机械类型,如分离塔、过滤器、加热炉、反应釜等。此类容器支承支座的設計主要依据《容器支座 第4部分:支承式支座》(NB/T 47065.4—2018)^[1],将支座视为两端铰接的轴向受压杆件。该方法将地震、风等荷载等效成轴向力进行拟静力分析,因此对于承受较大水平荷载的容器支座,这种方法的适用性有待商榷,如大型搅拌反应釜,在最大容重工作状态下,高速旋转的液体产生的动荷载通常大于其重力荷载^[2],且荷载方向绕反应釜搅拌轴高速变化。因此,采用静力方法无法准确分析这种情况下支座和钢框架的动力性能。此外,该动荷载为高频循环荷载,还需考虑结构的金属疲劳问题^[3],而目前相关规范并未考虑。

钢框架结构被广泛应用于搭载反应釜的工业建筑中。目前国内外关于反应釜产生的动荷载对搭载它的钢框架影响的研究较少。此外,依据现行规范^[1]设计的容器支座与钢框架在实际应用中是否能够有效承受反应釜运转的高频循环动荷载,尚未有明确结论。

PIERALISI等^[4]针对切线流搅拌容器流体表面振荡的研究表明:周期性旋转波为搅拌动荷载产生的主要原因,并会导致对结构不利的周期性应力;BUSCIGLIO等^[5-6]针对流体振荡研究了搅拌容器构造、振荡频率和振幅、搅拌速度之间的关系,并进一步研究了搅拌容器周期性旋转波的类型与产生机理;李小虎^[7]采用ANSYS软件

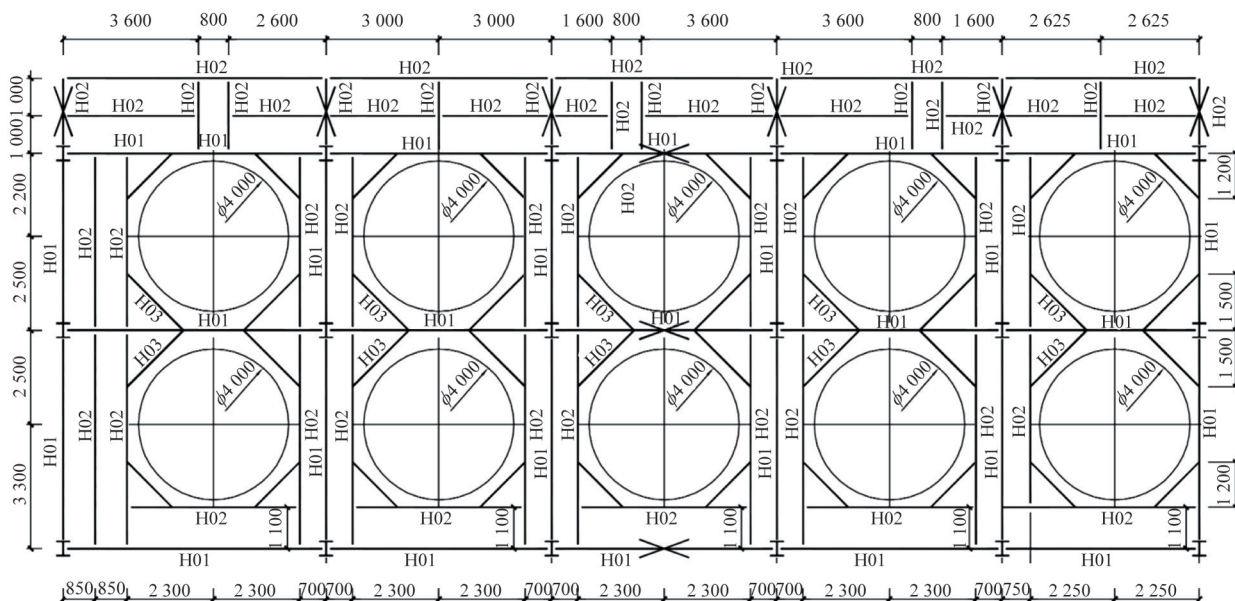
对一台大型搅拌反应釜模型进行了动力分析,结果表明其薄弱部位为封口和支承支座处。以上研究表明,在设计承载具有较大动荷载容器的建筑物时,需对其动力承载性能进行分析,以避免因结构设计缺陷而导致的安全隐患。

本文针对该研究领域空缺,基于某反应釜钢平台实际工程的钢结构设计,采用有限元软件ABAQUS进行建模分析。首先研究了基于《容器支座 第4部分:支承式支座》(NB/T 47065.4—2018)^[1]设计的容器支座节点的抗弯性能,并据此建立了适用于整体分析的半刚性节点模型,提出了一种适用于反应釜承载结构动力分析的有限元建模方法,开展了反应釜工作状态下钢框架结构的动力响应研究,并提出了设计优化策略,为完善容器支座标准设计、相关工程应用以及结构优化提供了参考。

1 工程概况

1.1 钢框架结构

该工程为集搅拌反应釜、换热器、过滤器等化工设备一体的工业流水线,这些机械设备中只有搅拌反应釜会产生较大的水平荷载,且对搭载反应釜的结构部分与其他部分进行了隔断处理,因此选取搭载反应釜部分的钢框架进行分析。该部分建筑为单层3榀5跨且一边带2 m悬挑梁的钢框架结构,结构整体设计如图1所示,钢材截面型号如表1所示。



a) 钢平台平面布置

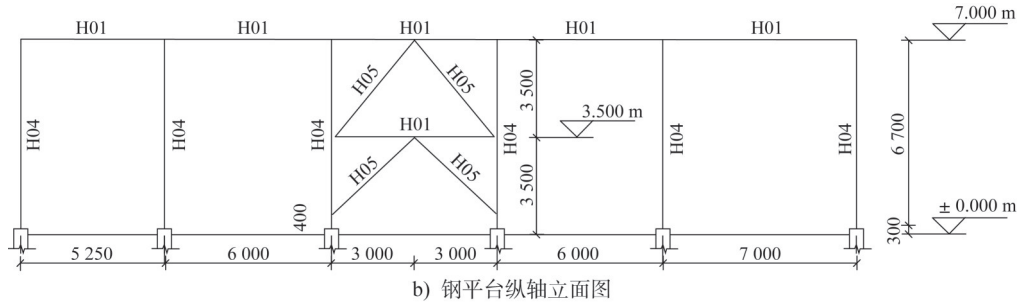


图1 钢框架结构(单位:mm)

Fig. 1 Steel frame structure (unit: mm)

表1 钢材截面型号

Table 1 Steel section specification

截面编号	构件型号/mm	材质
H01	HN500×200×10×16	Q235B
H02	HN400×200×8×13	Q235B
H03	HM340×250×9×14	Q235B
H04	HW250×250×9×14	Q235B
H05	HW150×150×7×10	Q235B

1.2 反应釜结构

钢框架搭载了10个直径为4000 mm、容积为75.9 m³的切线流搅拌反应釜,单个反应釜净重为16 215 kg,允许的最大容积物料净重为82 880 kg,工作状态下搅拌叶片的旋转角速度102 rpm,设计最大动荷载为1 550 kN。反应釜的支承式支座设计参考《容器支座 第4部分:支承式支座》(NB/T 47065.4—2018)^[1],支座由圆钢管、垫板、底板和地脚螺栓组成,圆钢管采用10号钢,底板钢材牌号采用Q235B,支座上部垫板与容器壳体之间采用连续焊,支座下部底板对角处采用2颗M24地脚螺栓进行固定,具体尺寸如图2所示。

2 反应釜支承支座节点抗弯曲线

2.1 反应釜支承支座有限元模型

现行相关规范^[1]中,反应釜支承式支座的简化设计基

于两端铰接的轴向受压杆件,将偏心荷载、水平地震荷载、水平风荷载等效为轴向力进行考虑,并默认支座底部节点的抗弯承载力满足要求。而实际工程中,反应釜支座以及底部节点受弯作用较为显著,因此在分析中,需将反应釜支座的力学模型视为两端半刚性连接且受压弯作用的梁单元模型,并对节点抗弯承载力进行验算。该支座采用上焊下栓的节点连接方式,且支座底部通常为结构受弯最大的位置。采用有限元软件ABAQUS建立模型,以研究支座底部节点的抗弯承载力和弯矩-转角曲线。

按照与实际工程1:1的比例对支座进行建模,如图3所示,其中地脚螺栓采用《地脚螺栓》(GB/T 799—2020)^[8]中的C型地脚螺栓,锚固长度符合《机械工业厂房结构设计规范》(GB 50906—2013)^[9]的规定。分析考虑螺栓与地基之间的接触,地基中螺栓的预埋部位采用挖空的方式进行建模,该建模方式的适用性在相关研究^[10-13]中已得到了验证,网格划分选取HyperMesh软件进行联合仿真,所有部件均采用C3D8R单元模拟。

2.2 工况选取说明

支座节点的受弯推覆曲线反映了转角与弯矩之间的关系。在试验和仿真过程中,转角与弯矩值通常通过加载点的力与位移间接计算得出,该位移包括了以下3个部分:节点域变形引起的位移;螺栓预埋接触界面滑移引起的位移;钢管支座变形引起的位移。实际所求的节点转角仅包含前两个部分,它们之间的关系如图4所示,因

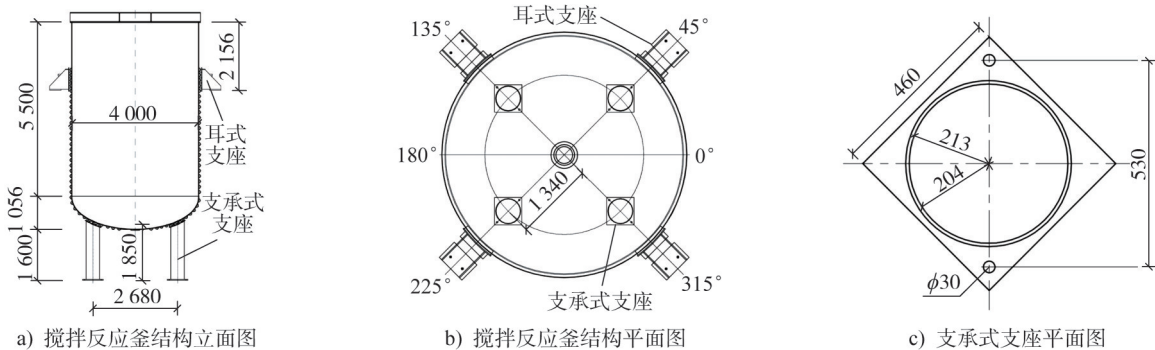


图2 搅拌反应釜结构及支承式支座(单位:mm)

Fig. 2 Stirred reactor structure and bracket support (unit: mm)

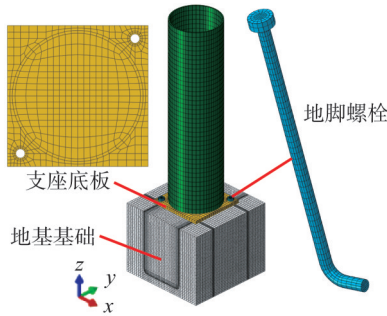


图3 支座模型

Fig. 3 Model of support

此需要将第3部分位移剔除,并将支座设定为准刚性材料进行分析。其中,节点域变形包括以下3个部分:支座底板变形;地脚螺栓变形;地基基础变形。

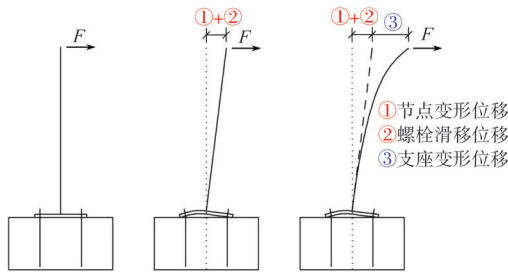


图4 变形示意模型

Fig. 4 Model of deformation schematic

针对上述节点域变形的差异,建立3个工况进行对比分析:工况1为只考虑螺栓变形与底板变形,忽略地基变形与螺栓滑移的影响;工况2为在工况1的基础上额外考虑螺栓滑移的影响;工况3为在工况2的基础上额外考虑地基变形的影响。具体如图5所示。

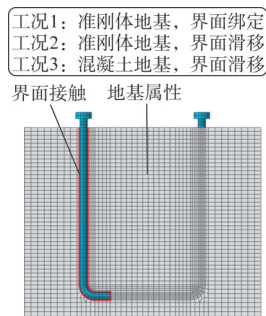


图5 不同工况说明

Fig. 5 Description of different load cases

2.3 材料与接触本构关系

不考虑变形的部件均采用大质量准刚体本构;支座底板参照标准^[1]选用Q235钢,屈服强度为235 MPa;地脚螺栓参照规范^[8]选用5.6级M24螺栓,屈服强度为

300 MPa;钢材本构均采用随动强化模型^[14];考虑变形的地基基础采用混凝土损伤塑性本构^[15];地脚螺栓与地基之间的界面滑移采用符合Maximum nominal stress损伤初始判定准则的Cohesive单元进行模拟,界面剪切应力 τ 和滑移 δ 的关系曲线参考WANG等^[16]的研究,如图6所示,关系式为:

$$\tau = \begin{cases} \frac{\tau_u}{\delta_1} \delta & 0 \leq \delta \leq \delta_1 \\ -\frac{\tau_u - \tau_r}{\delta_2 - \delta_1} \delta + \frac{\tau_u \delta_2 - \tau_r \delta_1}{\delta_2 - \delta_1} & \delta_1 < \delta < \delta_2 \\ \tau_r & \delta \geq \delta_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: τ_u 为界面峰值黏结应力; τ_r 为界面摩擦黏结应力, δ_1 和 δ_2 分别为 τ_u 、 τ_r 对应的界面滑移。

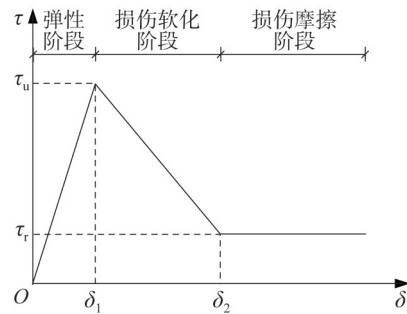


图6 剪切应力-滑移关系曲线

Fig. 6 Shear stress-slip relationship curve

Cohesive单元相关参数采用BENMOKRANE等^[17]完成的拉拔试验数据,取 $\tau_u=14.5$ MPa, $\tau_r=3.7$ MPa, $\delta_1=2.9$ mm, $\delta_2=10.6$ mm。参考规范^[18],选用其中的5.6级M24螺栓,确保将应力的70%作为螺栓预紧力施加于地脚螺栓的地表截面处。边界条件为地基基础的侧面与底面完全固定,在支座顶面施加一个水平推力。

2.4 反应釜支承支座节点弯矩-转角曲线

抗弯曲线能够较好地反映支座节点的变形能力及抗弯承载力,提取加载点的力-位移关系并通过计算得到3种工况下支座节点的弯矩-转角关系曲线,如图7所示。由图可知,按照标准^[1]设计的支座节点在弹性阶段的最大抗弯承载力约为55 kN·m,当转角达到0.01 rad时其抗弯承载力约为68 kN·m,是否考虑螺栓滑移对支座节点抗弯承载力的影响差异较大,而地基变形对支座节点抗弯承载力的影响差异较小。

3 反应釜-钢框架有限元模型

数值模拟应在确保计算精度的同时,优先采用最高效的建模方式。本分析中动荷载主要由周期性旋转的流体产生,其作用效应为复杂的流固耦合问题,对流体进行精

为验证该模型连接方式的可靠性,同时采用S4R单元建模进行对比分析,如图9b)所示。与B31单元模型相比,S4R单元模型中的反应釜为与实际工程尺寸和质量相同的结构,同时还构建了耳式支座与钢框架相连。S4R单元模型的动力体系同样由两个质量点RP-1与RP-2构成,其中RP-2与反应釜内壁节点通过5个自由度的 continuum coupling 连接,释放 UR3 方向的自由度。

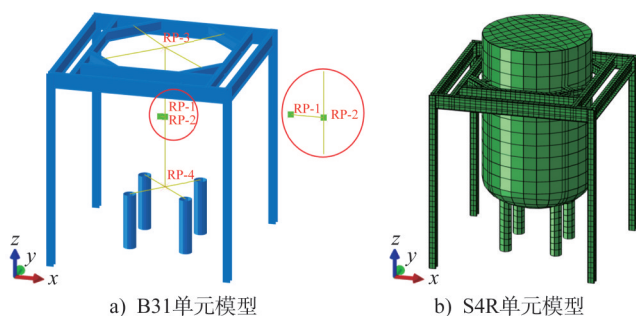


图9 单个反应釜-钢框架模型

Fig. 9 Model of single stirred reactor and steel frame

将以上两种模型的支座和钢框架底部完全固定。采用Dynamic/Implicit求解器进行分析,重力加速度为 $9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,对转动控制点RP-2施加UR3方向的角速度,在

计算前期角速度由0 rpm匀加速至102 rpm,之后保持102 rpm的角速度恒定不变。

3.3 有限元模型响应对比分析

分别提取两个模型的响应时程曲线以及钢框架、支座在最大应力时的云图进行对比,如图10、11所示。由图可知,二者响应具有较高的吻合度,响应值在全时程的平均差异小于1%,但S4R单元模型的响应峰值普遍略大于B31单元模型的响应峰值,响应时程曲线在稳定后的频率为1.7 Hz,与搅拌叶片的角速度102 rpm相匹配。提取整体结构的动能 $E_{k,w}$,结构仅受重力作用时 $E_{k,w}$ 为0 J;反应釜角速度由0 rpm匀加速至102 rpm时,由于反应釜产生的动能 E_k 与 ω^2 成正比,因此该阶段内动能时程曲线呈现出二次抛物线特征;当反应釜维持102 rpm的角速度运作时,动能基本保持不变。 E_k 的理论值可根据式(6)计算。

$$E_k = \frac{1}{2} m_1 v^2 \quad (6)$$

$$v = \omega r \quad (7)$$

式中: m_1 为反应釜内物料的质量; v 为旋转线速度。整体结构的动能 $E_{k,w}$ 为反应釜动能 E_k 与钢结构振动产生的动能的叠加,经计算,反应釜工作状态下 E_k 为 $1.27 \times 10^5 \text{ J}$,略小于 $E_{k,w}$ 的稳定值 $1.36 \times 10^5 \text{ J}$ 。

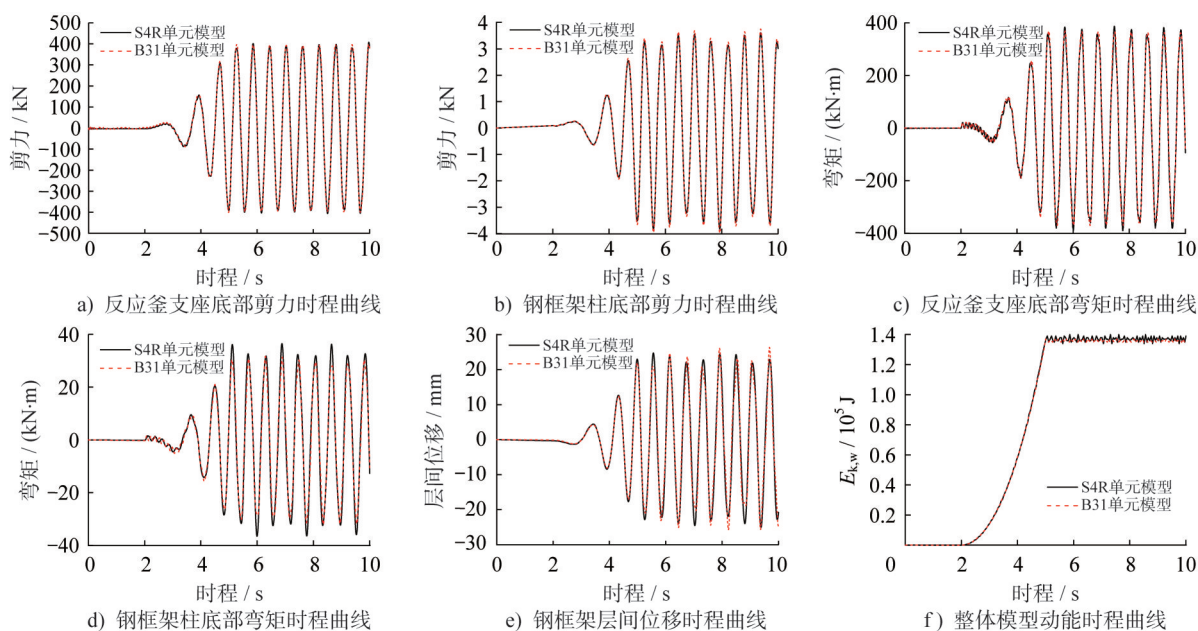


图10 动力响应时程曲线对比

Fig. 10 Comparison of dynamic response time-history curves

在结构的应力云图中,B31单元模型与S4R单元模型的钢框架最大应力基本一致,支座最大应力相差5%,其原因可能是:B31单元模型支座顶部为平截面,而S4R单元模型支座顶部为与反应釜底部表面贴合的弧形截

面,该部分结构提高了支座的抗侧移能力,减小了支座的应力。尽管模拟的支座最大应力存在误差,但在合理范围内。由上述分析可知,该模型的建模方式是可靠的。同时,结合图7可知:基于标准^[1]设计的反应釜支

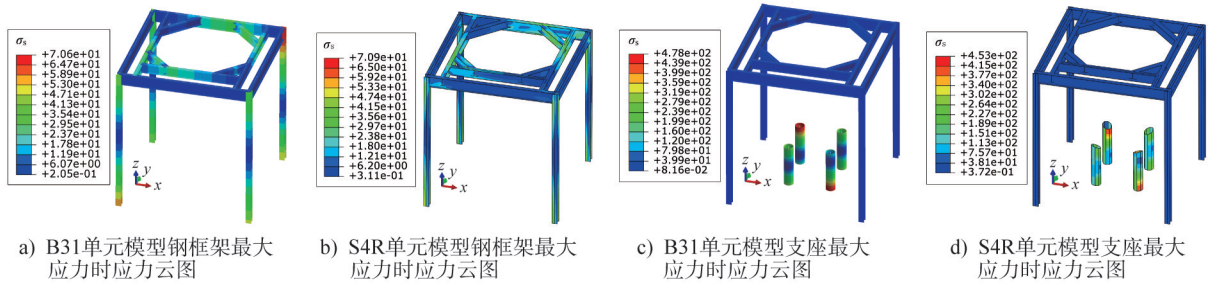


图 11 应力云图对比(单位:MPa)

Fig. 11 Comparison of stress contours (unit:MPa)

座以及支座节点抗弯承载力不足。

4 钢框架动力响应分析

4.1 钢框架设计优化及模型

采用上述建模方式对钢框架-反应釜结构进行整体建模,如图12所示。由于基于标准^[1]设计的反应釜支座以及支座节点抗弯承载力不足,且动荷载对支座的作用表现为

高频、高周次的正弦波周期性应力,为了避免结构因长期工作而发生疲劳破坏,反应釜支座的设计还应考虑金属疲劳问题。因此,本研究还根据樊俊铃^[23]提出的Q235钢S-N曲线对反应釜支座进行设计优化,将支座圆钢管截面由426 mm×9 mm更改为426 mm×30 mm,钢材类型由10号钢更改为Q235钢,支座节点则可通过增加螺栓数量或螺栓直径的方式,确保其满足抗弯承载力的要求。

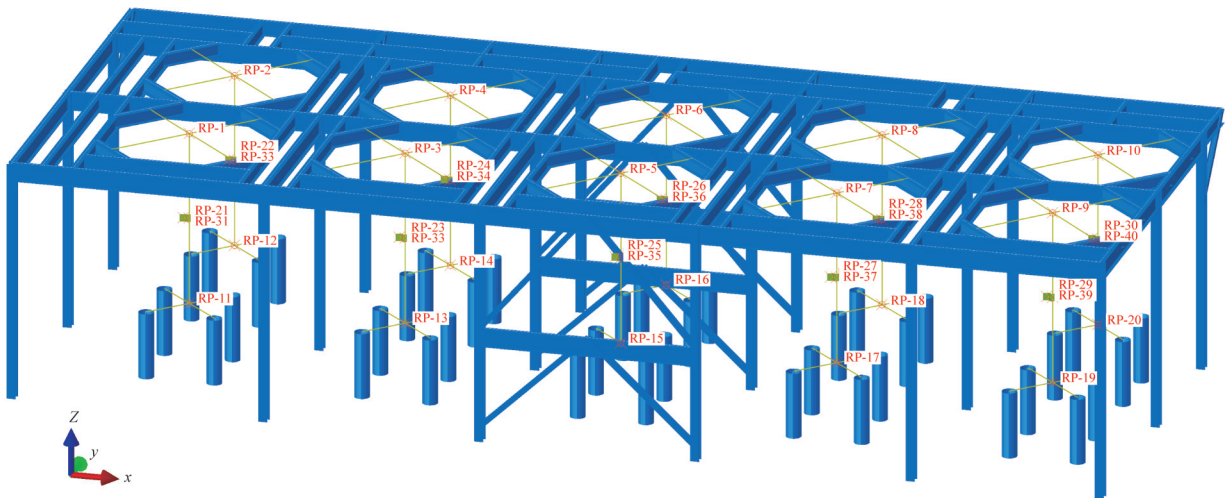


图 12 结构整体模型

Fig. 12 Overall structure model

为了对比结构设计优化前后的动力响应,本研究构建了两个模型进行分析:模型1参照标准^[1]进行设计,支座圆钢管截面为426 mm×9 mm,支座底部采用半刚性连接,建模时,使用2个 nonlinear spring 单元基于图7所示的弯矩-转角曲线定义UR1与UR2方向的抗弯刚度,具体参数如表2所示,UR3方向则设置为刚性连接;模型2为优化设计后的模型,原标准^[1]中的圆钢管支座将在反应釜最大动荷载作用下发生弯曲变形,因此将考虑了金属疲劳效应的支座圆钢管截面调整为426 mm×30 mm,材料选用Q235钢,支座底部的边界条件为刚接。两个模型均选取最不利的设备工作状态进行分析,即所有搅拌角速度方向以及质点相对转轴的位置保持一致。在分析

过程中,均考虑了材料的非线性特性。支座节点边界条件模型如图13所示。

表 2 非线性弹簧单元参数

Table 2 Parameters of nonlinear spring element

转角/rad	弯矩/(kN·m)	转角/rad	弯矩/(kN·m)
-0.009 890 0	-68.416	0.000 311 5	17.918
-0.003 640 0	-59.217	0.003 640 0	59.217
-0.000 311 5	-17.918	0.009 890 0	68.416
0	0		

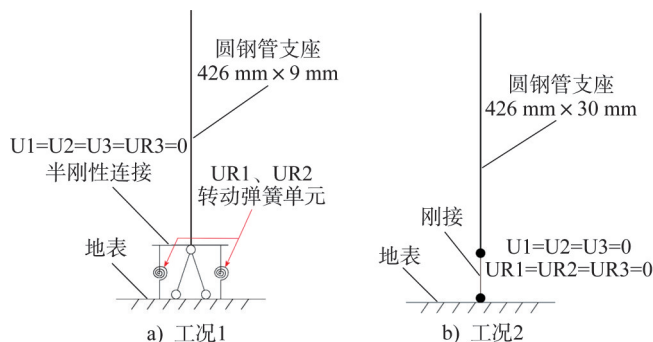


图 13 支座节点边界条件模型

Fig. 13 Boundary condition model of support joints

4.2 结果分析

在模型 1 的动力分析中,由于反应釜支座及节点抗弯承载力不足,导致所有支座陆续发生屈服,之后随着动荷载的增大,配置有柱间支撑的钢柱底部以及柱间支撑发生屈服,随后柱间支撑发生严重变形,此时中跨的应力云图如图 14 所示。随后由于整体结构刚度不足以抵抗荷载,最终导致计算终止,其失效模式与“强柱弱梁,强节点弱构件”的设计理念不符。支座失效同时也是结构整体失效的特征,因此该结构在反应釜工作状态下的抗连续倒塌性能较差。

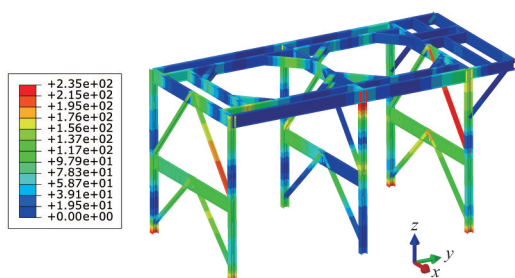


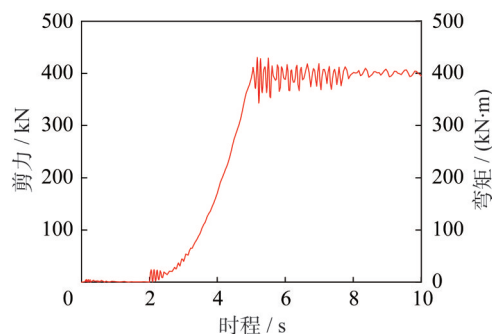
图 14 中跨 4.28 s 应力云图(单位:MPa)

Fig. 14 Stress contour at 4.28 s of mid-span (unit:MPa)

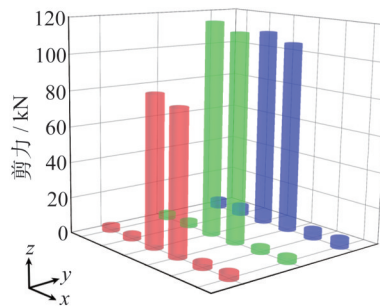
模型 2 在整个分析过程中均处于弹性阶段,最大应力出现在支座处,为 158 MPa,低于 Q235 钢疲劳寿命设计所允许的最大强度^[23]。参照图 12 的结构整体模型,沿 y 轴正向提取所有钢柱底部、反应釜支座底部的剪力以及合力矩如图 15 所示,图中的动力响应结果分别对应结构的 3 榀框架。结果表明:所有反应釜支座底部的剪力、合力矩变化幅值几乎一致;是否安装柱间支撑的钢柱底部的剪力幅值差别较大,合力矩幅值也各不相同。由此表明反应釜支座为承受动荷载的主要受力构件,通过安装柱间支撑能够有效地传递抗侧向剪力,从而充分利用钢柱的抗剪性能,验证了该优化设计方案的可行性。

5 反应釜搅拌旋转方向优化

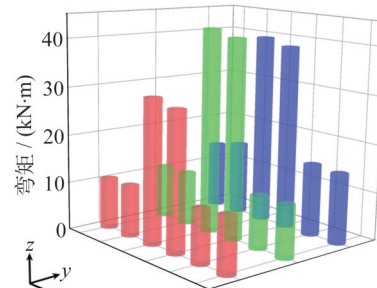
动力在一定程度上的叠加会产生抵消或增幅效应,



a) 反应釜支座底部剪力及合力矩



b) 钢框架柱底部剪力幅值



c) 钢框架柱底部合力矩幅值

图 15 动力响应结果

Fig. 15 Dynamic response results

反应釜搅拌叶片的旋转方向通常为单向设计,不同的旋转方向设置会对承载结构造成不同的作用效应。此外,上述分析只考虑了最不利的设备工作状态,而实际工作中所有反应釜内流体质心相对转轴的位置具有随机性。针对上述问题,设计了 4 种反应釜搅拌旋转方案,并设置了 10 组完全随机的流体质点初始相对角度,以模拟实际工程中反应釜的工作状态。采用统计学方法对比同方案下的动力响应结果,从而获得最优的反应釜搅拌旋转方向设置方案。

5.1 搅拌旋转方向设置方案及工况

反应釜搅拌旋转方向设置方案如图 16 所示,工况编号为 FN01~FN10,由随机指令生成的 10 组流体质点初始极坐标角度如表 3 所示。在 4.2 节中模型 2 的建模基础上,每种方案均根据表 3 中的数据更改每个反应釜流体质点相对旋转轴的极坐标初始角度 θ ,建立合计 40 组有限元动力时程分析工况。

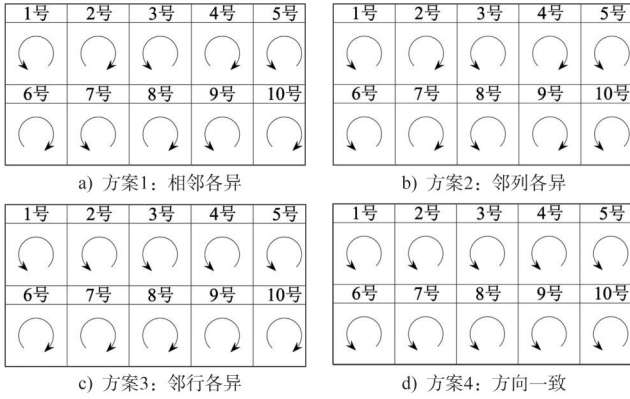


图16 反应釜搅拌旋转方向设置方案

Fig. 16 Setting schemes for stirring rotation direction of stirred reactor

5.2 动力响应分析结果

针对40组动力时程分析工况,提取并计算了4种动

力响应数据:最大层间位移 u_{xy} 、平均层间位移 $u_{xy,a}$ 、最大弹性应变能 E_{es} 、平均弹性应变能 $E_{es,a}$ 。结果如图17所示。

层间位移常用于评估框架结构在地震作用中的损伤程度^[19,24-25],因此同样适用于评估钢框架在弹性阶段的宏观水平变形。其中,最大层间位移 u_{xy} 为顶层钢梁的水平位移最大值,通常由动荷载叠加效应导致的应力集中所产生。平均层间位移 $u_{xy,a}$ 为所有圆柱顶部最大水平位移的平均值,反映了钢框架整体的水平位移程度。弹性应变能为结构从弹性变形状态恢复至初始状态时所释放的能量,因此能够反映整体结构所有微观弹性变形的总和。其中,最大弹性应变能 E_{es} 表示整体结构的最大弹性变形程度。平均弹性应变能 $E_{es,a}$ 为时程分析中5~10 s内弹性应变能的平均值,反映了正常工作状态下整体结构的平均弹性变形程度。通过以上4种数据的对比,评估方法能够较好地反映不同方案的结构承载性能优劣。

表3 质点随机初始角度参数

Table 3 Random initial angle parameter of mass points

工况编号	初始角度/(°)									
	1号质点	2号质点	3号质点	4号质点	5号质点	6号质点	7号质点	8号质点	9号质点	10号质点
FN01	337	149	253	240	19	26	48	111	75	66
FN02	210	157	176	41	22	309	65	91	284	296
FN03	17	202	349	45	278	80	179	344	157	194
FN04	224	41	265	225	200	151	19	197	196	271
FN05	283	240	164	84	223	169	102	205	354	87
FN06	302	166	234	174	129	340	263	89	157	213
FN07	349	14	191	235	220	158	154	264	217	339
FN08	173	151	5	219	136	172	44	132	16	203
FN09	287	245	189	252	8	299	173	68	353	126
FN10	350	27	8	268	192	205	274	165	6	283

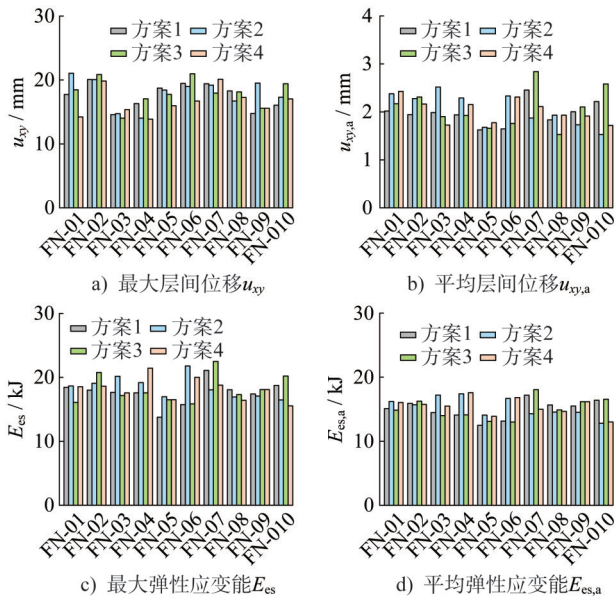


图17 动力响应值

Fig. 17 Dynamic response values

对于每组方案下的动力响应,采用中位值进行统计学对比。中位值 x_m 的计算公式为:

$$x_m = \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i\right) \quad (8)$$

式中: n 为一组响应的工况数量,本文中 n 为10; x_i 为结构在单独某一工况下的响应值,如图17所示。中位值作为动力响应分析的评估参数,其合理性与重要性已在相关研究^[26-27]中得到了验证。计算得到的4种动力响应数据的中位值对比如表4所示。

由结果可知:采用方案1“相邻各异”的设置方法能使结构具有最小的弹性变形和平均层间位移,为综合考虑的最佳方案;采用方案4“方向一致”的设置方法能使结构的最大层间位移值最小,分析其原因可能是旋转方向一致使结构偶然产生的应力集中效应降低。不同方案的动力响应中位值的最大差异均小于10%,说明不同反应釜搅拌旋转方向设置对结构的作用效应影响较小。

表4 动力响应中位值
Table 4 Median values of dynamic response

指标	方案1:相邻各异	方案2:邻列各异	方案3:邻行各异	方案4:方向一致
最大层间位移 u_{xy}/mm	17.436	17.862	17.902	16.487
平均层间位移 $u_{xy,a}/\text{mm}$	1.953	2.027	2.042	2.009
最大弹性应变能 E_{es}/kJ	17.558	18.370	18.088	18.076
平均弹性应变能 $E_{es,a}/\text{kJ}$	14.931	15.278	15.026	15.396

6 结论

为研究大型反应釜容器中机械搅拌产生的动荷载对承载结构的作用效应,基于有限元软件ABAQUS进行建模分析,提出了一种通过质量点与梁单元将反应釜动力体系与钢框架连接的简化建模方式,并与S4R单元模型对比研究了二者的动力响应差异。考虑地脚螺栓与地基之间的滑移现象,通过精细化建模分析了基于《容器支座第4部分:支承式支座》(NB/T 47065.4—2018)^[1]设计的反应釜支座底部节点的弯矩-转角曲线,并根据该关系曲线建立了非线性弹簧单元,对比研究了反应釜支座底部采用半刚性节点与刚性节点对整体结构动力响应的差异。参考实际工程的工作状态,设计了4种反应釜搅拌旋转方向设置方案,并建立了40组动力响应分析工况进行对比。得出以下主要结论:

(1) 针对承载结构上机械设备自发产生的离心动荷载作用效应研究,本文提出的质量点与一阶三维梁单元结合的建模方式具有良好的适用性和高效的建模计算效率,可为类似的工程结构有限元分析提供参考。

(2) 基于《容器支座第4部分:支承式支座》(NB/T 47065.4—2018)^[1]设计的容器支承式支座对大型搅拌反应釜产生的动荷载承载力不足,支承式支座在反应釜最大设计动荷载工作状态下会发生屈服,且支座屈服后钢框架存在连续倒塌风险,而采用金属疲劳S-N曲线对反应釜支座进行设计优化,可使此类结构满足长期工作的承载要求。

(3) 针对钢框架上承载的多个离心动荷载所存在的随机动力叠加效应,“相邻各异”的反应釜搅拌旋转方向设置方法为最佳方案。在所有反应釜均处于最大设计动荷载工作状态下,相比于其他方案,该方案可使承载结构在多个随机工况下具有统计学意义上的最小弹性变形和最小平均层间位移。

(4) 研究了基于《容器支座第4部分:支承式支座》设计的反应釜支座底部节点的弯矩-转角曲线,分析考虑了真实情况下的地基变形以及地脚螺栓的界面滑移,相比于绑定接触和刚性地基的设置条件,节点弹性阶段和塑性阶段(转角达到0.01 rad时)的抗弯承载力分别降低了14%和26%。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 容器支座第4部分:支承式支座:NB/T 47065.4—2018[S].北京:新华出版社,2018.
National Energy Administration. Vessel Support—Part 4: Bracket Support:NB/T 47065.4—2018[S]. Beijing: Xinhua Publishing House, 2018. (in Chinese)
- [2] 中华人民共和国工业和信息化部. 钢制化工容器设计基础规范:HG/T 20580—2020[S].北京:北京科学技术出版社,2020.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Standard for Design Base of Steel Chemical Vessels: HG/T 20580—2020 [S]. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 2020. (in Chinese)
- [3] 雷宏刚,付强,刘晓娟. 中国钢结构疲劳研究领域的30年进展[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(增刊1): 84-91. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2010.s1.017.
LEI Honggang, FU Qiang, LIU Xiaojuan. Research progress of steel structure fatigue in past 30 years in China[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31 (Suppl. 1) : 84-91. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2010.s1.017. (in Chinese)
- [4] PIERALISI I, MONTANTE G, PAGLIANTI A. Prediction of fluid dynamic instabilities of low liquid height-to-tank diameter ratio stirred tanks[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 295: 336-346. DOI: 10.1016/j.cej.2016.03.026.
- [5] BUSCIGLIO A, SCARGIALI F, GRISAFI F, et al. Oscillation dynamics of free vortex surface in uncovered unbaffled stirred vessels [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 285: 477-486. DOI: 10.1016/j.cej.2015.10.015.
- [6] BUSCIGLIO A, MONTANTE G, KRACÍK T, et al. Rotary sloshing induced by impeller action in unbaffled stirred vessels [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 317: 433-443. DOI: 10.1016/j.cej.2017.02.099.
- [7] 李小虎. 搅拌反应釜振动分析及结构优化[J]. 化工机械, 2020, 47(1): 37-40, 53.
LI Xiaohu. Vibration analysis and structure optimization of stirred vessels [J]. Chemical Engineering & Machinery, 2020, 47(1): 37-40, 53. (in Chinese)
- [8] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 地脚螺栓: GB/T 799—2020[S].北京: 中国标准出版社, 2020.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Foundation Bolts: GB/T 799—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese)
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家

- 质量监督检验检疫总局.机械工业厂房结构设计规范:GB 50906—2013[S].北京:中国计划出版社,2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Design of Machinery Industry Workshop Structures:GB 50906—2013[S].Beijing: China Planning Press, 2013.(in Chinese)
- [10] WU T, HUANG F H, ZHANG D C, et al. Anchorage failure mechanism and uplift bearing capacity of L- & J-anchor bolts in plain concrete[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 159: 107991. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2024.107991.
- [11] YU S S, ZHU W C, NIU L L, et al. Experimental and numerical analysis of fully grouted long rockbolt load-transfer behavior[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 85: 56-66. DOI: 10.1016/j.tust.2018.12.001.
- [12] SEOK S, HAIKAL G, RAMIREZ J A, et al. Finite element simulation of bond-zone behavior of pullout test of reinforcement embedded in concrete using concrete damage-plasticity model 2 (CDPM2) [J]. *Engineering Structures*, 2020, 221: 110984. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110984.
- [13] REN W, ZHOU X H, WANG J S, et al. Pull-out behavior of the pre-installed lifting anchor with supplementary reinforcement for the precast concrete segments of wind turbine hybrid towers[J]. *Engineering Structures*, 2024, 303: 117547. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.117547.
- [14] NONAKA T, ALI A. Dynamic response of half-through steel arch bridge using fiber model [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2001, 6 (6) : 482-488. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2001)6:6(482).
- [15] GENIKOMSOU A S, POLAK M A. Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS[J]. *Engineering Structures*, 2015, 98: 38-48. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.04.016.
- [16] WANG Y J, WU Z M, ZHENG J J, et al. Three-dimensional analytical model for the pull-out response of anchor-mortar-concrete anchorage system based on interfacial bond failure[J]. *Engineering Structures*, 2019, 180: 234-248. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.11.024.
- [17] BENMOKRANE B, CHENNOUF A, MITRI H S. Laboratory evaluation of cement-based grouts and grouted rock anchors[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1995, 32 (7) : 633-642. DOI: 10.1016/0148-9062(95)00021-8.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱: GB/T 3098.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Mechanical Properties of Fasteners—Bolts, Screws and Studs: GB/T 3098.1—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.(in Chinese)
- [19] KE K, WANG F M, YAM M C H, et al. A multi-stage-based nonlinear static procedure for estimating seismic demands of steel MRFs equipped with steel slit walls [J]. *Engineering Structures*, 2019, 183: 1091-1108. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.01.029.
- [20] 王福明. 多屈服段钢结构多次地震下的抗震性能与分析方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
WANG Fuming. Study on seismic performance and analysis method of multi-yield-stage steel structures subjected to multiple earthquake motions [D]. Changsha: Hunan University, 2019.(in Chinese)
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 2016版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Seismic Design of Buildings: GB 50011—2010 [S]. 2016 ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.(in Chinese)
- [22] Federal Emergency Management Agency. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings: FEMA 273 [S]. Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency, 1997.
- [23] 樊俊铃. 基于能量耗散的Q235钢高周疲劳性能评估[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(6): 1-9. DOI: 10.3901/JME.2018.06.001.
FAN Junling. High cycle fatigue behavior evaluation of Q235 steel based on energy dissipation [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(6): 1-9. DOI: 10.3901/JME.2018.06.001. (in Chinese)
- [24] 张艳霞, 叶吉健, 杨凡, 等. 自复位钢框架结构抗震性能动力时程分析[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(7): 30-40. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2015.07.004.
ZHANG Yanxia, YE Jijian, YANG Fan, et al. Seismic behavior time-history analysis of integral steel self-centering moment resisting frame [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(7): 30-40. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2015.07.004. (in Chinese)
- [25] 刘文锋, 王来其, 高彦强, 等. 高强度钢筋混凝土框架抗震性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2014, 47(11): 64-74. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2014.11.041.
LIU Wenfeng, WANG Laiqi, GAO Yanqiang, et al. Experimental study on seismic behavior of high-strength reinforced concrete frame [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, 47(11): 64-74. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2014.11.041.(in Chinese)
- [26] CHOPRA A K. Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering [M]. 4th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2012.
- [27] CHOPRA A K, GOEL R K, CHINTANAPAKDEE C. Evaluation of a modified MPA procedure assuming higher modes as elastic to estimate seismic demands [J]. *Earthquake Spectra*, 2004, 20(3): 757-778. DOI: 10.1193/1.1775237.