

基于构型设计的非标包装箱力学行为数值研究

郭光亮, 蒲亨林, 金明峰, 刘朝成, 萧晶才
(东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 成都 611731)

摘要: **目的** 深入认识非标包装箱承力钢结构框架的力学特性, 避免发生包装箱失效事件。**方法** 基于弹塑性力学, 利用数值计算软件建立足尺度产品-框架互作用非线性有限元模型, 研究框架在不同工作环境下的力学特性。**结果** 包装箱采用六吊点起吊与采用四吊点起吊相比, 采用六吊点起吊框架安全性更高、疲劳寿命更长、变形量更小。当产品载荷接近包装箱设计载重时, 六吊点起吊方式为优选方案。起吊和堆码工况框架失效均主要体现为强度失效, 危险位置为型钢对接尖角应力集中处, 对该位置进行局部加强可提升框架的载重能力。**结论** 所研究非标包装箱能够满足项目的装箱和运输需求, 与常规装箱运输方案相比, 具有明显的经济效益, 建议研究对象起吊加速度小于 $1g$ 。

关键词: 非标包装箱; 力学行为; 有限元; 起吊方式; 经济效益

中图分类号: TB485.3; TH114 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)07-0314-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.07.037

Numerical Simulation on Mechanical Performance of Non-standard Packaging Box Based on Configuration Design

GUO Guang-liang, PU Heng-lin, JIN Ming-feng, LIU Chao-cheng, XIAO Jing-cai

(Dongfang Boiler Co., Ltd., Chengdu 611731, China)

ABSTRACT: The work aims to deeply understand the mechanical performance of the load-bearing steel structural frame of non-standard packaging box, so as to avoid the failure of packaging box. Here, a non-linear finite element (FE) model of the product-frame interaction was established based on the elastoplastic mechanics by numerical software, and the mechanical performance of the frame under different working environments were studied. In the packaging box, the frame with six lifting points had higher safety, longer fatigue life and less deformation than that with four lifting points. When the product load was close to the designed load of the packaging box, the lifting method with six lifting points was the best choice. The frame failure under lifting or stacking conditions was mainly reflected in strength failure, and the dangerous position was the stress concentration of the butt sharp angle of the section steel, and the load capacity of the frame could be improved by local strengthening at this position. The non-standard packaging box proposed can meet the packaging and transportation requirements of the project, and has obvious economic benefits compared with the conventional packaging and transportation scheme. It is suggested that the lifting acceleration of the research object should be less than $1g$.

KEY WORDS: non-standard packaging box; mechanical performance; finite element (FE); lifting method; economic benefits

收稿日期: 2022-08-19

基金项目: 东方电气集团东方锅炉股份有限公司研发项目 (3522002)

作者简介: 郭光亮 (1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为设备完整性和电站锅炉现代设计与仿真。

产品包装箱是保护产品不受或少受自然界环境和力学环境影响的重要手段,包装箱对安全防护来说相当重要。木材、金属和复合材料是包装箱的常见材料,以金属材料为代表的标准集装箱具有坚固、耐用、使用方便的特点,在运输领域得到广泛应用。近年来,受疫情影响,国内对集装箱空箱的需求大幅增加,供需失衡导致集装箱市场出现了前所未有的高运价局面^[1],同时,标准集装箱并不能满足所有产品的装箱需求。为此,提出了利用非标包装箱对特殊产品进行装箱的方案,该方案通过优化包装箱用料和提高产品充填率的耦合方式降低包装和运输成本。

包装箱采用外承载框架+内密封壁板形式,钢结构框架作为包装箱的重要组成部分,是包装箱的主要承载单元,钢结构框架的力学行为直接决定产品的冲击防护效应。国内外学者围绕钢结构开展了一系列的基础研究。Ran 等^[2]针对高强结构钢与低碳钢焊接后的性能差异较大的问题,通过研究发现应力三轴与洛德角相结合的韧性断裂模型,可以很好地反映出横向角焊缝的载荷-位移行为和失效模式。Zhou 等^[3]提出了一种组合疲劳载荷作用下钢结构损伤萌生和扩展计算模型,该模型可预测损伤对钢结构力学特性的影响。Guo 等^[4]考虑疲劳损伤和蠕变损伤的非线性耦合,建立了多尺度疲劳蠕变损伤模型,利用该模型能更准确地研究钢结构的疲劳退化。Yu 等^[5]基于线弹性断裂力学,改进了用于钢结构疲劳裂纹计算的 McEvily 模型。程方杰等^[6]提出一种不挖除原始裂纹缺陷的直接埋藏法来修复疲劳裂纹缺陷,发现该方法在焊接修复工程中有较强的可行性。Akyel 等^[7]通过分析修复试样的疲劳强度曲线,指出利用合适的修复方法对焊缝处的裂纹进行补焊可完全恢复其疲劳强度。Zhang 等^[8]在试验研究的基础上,利用逆向建模技术搭建腐蚀试件有限元模型,发现腐蚀对低合金钢的疲劳寿命有显著影响,会加速应力集中部位裂纹的萌生和扩展。邵永波等^[9]在试验测试时发现对包含腐蚀缺陷的 T 型管节点,采用碳纤维增强复合材料加固方法可有效改善节点静力承载力。Jennifer 等^[10]指出现有钢结构规范 EN 1993-1-8^[1]具有局限性,不能用于高性能钢的角焊缝连接设计,提出了适用于高性能钢的改进型连接方法,并通过试验证实了其可靠性。Damm 等^[11]对带有黏接接头的钢结构进行数值研究,分析了单节点和多节点局部作用黏着固有阻尼结构的动态特性。Chen 等^[12]通过试验和数值计算相结合的方法,研究了钢结构焊缝在静载和冲击载荷下的连接性能,建立了连接的塑性转动与输入冲击能量之间的简化关系。Zhang 等^[13]采用传统方法重点研究了钢结构在对称载荷作用下的横向位移模态,得到了其屈曲载荷和长度计算系数。强旭红等^[14]通过对试验结果和有限元模拟结果的分析,认为 GB 50017—2017《钢结构设计标准》对高性能钢梁整体稳定性计算的适用

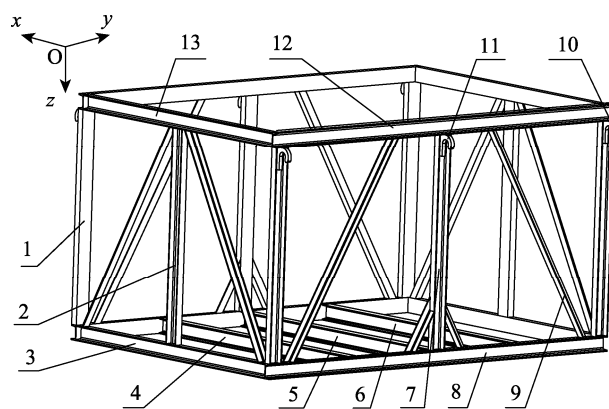
性较强。

目前,对钢结构的应用研究主要集中在机械建筑^[15-17]、能源化工^[18-20]、交通运输^[21]等领域,对包装箱的研究偏向环保^[22-23]。公开文献关于非标包装箱承力钢结构框架力学行为的研究相对较少,对钢结构框架力学特性认识不够清晰,引起的框架失效事件屡见不鲜。本文在前人研究的基础上,基于弹塑性力学,对基于产品结构设计的非标包装箱,利用数值计算软件建立足尺度产品-框架互作用非线性有限元模型,研究框架在不同工作环境下的力学特性,为非标包装箱的推广应用和失效防控提供参考。

1 分析模型

1.1 几何模型概述

为满足某海外电厂项目产品的运输要求,根据被包装产品的参数信息设计了非标包装箱。包装箱内侧壁板利用薄钢板包围,形成封闭空间,壁板主要起密封产品的作用,可忽略其对包装箱力学特性的影响,包装箱使用环境中的载荷主要由其钢结构框架承受,简化后的非标包装箱模型如图 1 所示(仅略去了包装箱的壁板)。包装箱的外形尺寸:长×宽×高为 2 863 mm×2 043 mm×1 629 mm。图 1 中立柱和横梁为槽钢(10a),支撑梁为工字钢(10),斜撑为角钢(50 mm×50 mm×5 mm)。



1.角部立柱; 2.端墙中间立柱; 3.底架端墙横梁; 4.底架第一支撑梁; 5.底架第二支撑梁; 6.底架第三支撑梁; 7.侧墙中间立柱; 8.底架侧墙横梁; 9.斜撑; 10.角部吊耳; 11.侧墙中间吊耳; 12.顶架侧墙横梁; 13.顶架端墙横梁。

图1 包装箱钢结构框架

Fig.1 Steel structural frame of packaging box

1.2 基本假设

研究的重点是包装箱自身力学特性,略去次要因素的影响,分析过程做如下假设:包装箱壁板对包装箱力学特性无影响;型钢之间焊接固连,整个包装箱无缺陷;产品固定在底架支撑梁上,载荷均布在底架

支撑梁上表面;包装箱起吊过程为匀速运动,每个吊耳受力相当;堆码状态,上层产品的载荷均布在下层包装箱顶架上表面。

1.3 数值模型

为了研究包装箱在起吊过程和堆码状态下的力学特性,建立足尺度产品-框架相互作用非线性有限元数值计算模型,采用六面体单元通过协调分片算法对包装箱钢结构框架材料进行离散,框架被划分为 49 560 个单元,302 181 个节点,如图 2 所示。框架各部件力学参数如表 1 所示。模型边界条件分 2 个工况分别设定如下:

1) 起吊过程。框架受箱内产品重力载荷和框架自身重力载荷,框架仅保留平移自由度,通过吊耳的牵引可沿任意方向运动。

2) 堆码状态。固定底架底面,上层产品压力直接作用在框架顶架上表面。

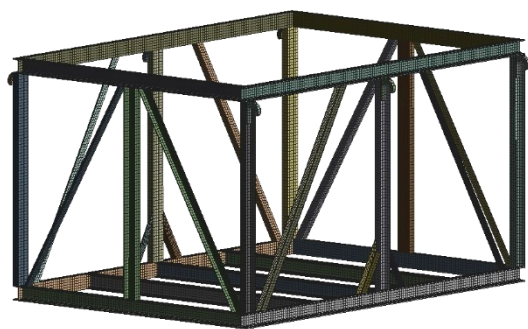


图 2 包装箱钢结构框架网格单元模型

Fig.2 Finite element model for steel structural frame of packaging box

表 1 包装箱框架主要力学参数
Tab.1 Major mechanical parameters of packaging box steel structure frame

型钢	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模 量/GPa	屈服强 度/MPa	极限强 度/MPa	泊松比
工字钢	7 850	206	345	470	0.3
槽钢	7 850	206	345	470	0.3
角钢	7 850	206	235	375	0.28

通过上述数值计算模型,分析不同工况下钢结构框架的力学特性。

2 结果分析

被包装产品可看成等体积不同密度的单一固体,产品质量分为 3 种规格,即:4、6 和 8 t,包装箱钢结构框架自身重量通过重力边界条件施加。起吊过程和堆码状态是本文分析对象的 2 个典型工况,下面针对这 2 个工况进行讨论。

2.1 起吊过程力学响应

起吊时,根据包装箱框架上吊耳的使用数量,将起吊过程分为 2 种情况,即:六吊点起吊(通过图 1 中角部立柱上的 4 个吊耳和侧墙中间立柱上的 2 个吊耳共同起吊)和四吊点起吊(仅通过图 1 中角部立柱上的 4 个吊耳起吊)。

2.1.1 强度分析

当产品质量为 8 t 时,起吊过程包装箱框架的受力分布见图 3。图 3a 和图 3b 分别为六吊点起吊和四吊点起吊时框架的应力分布情况,可以看出,图 3a 中底架支撑工字钢的最大应力与图 3b 的相当,约为 130 MPa。六吊点起吊时框架的最大应力约为 234 MPa,四吊点起吊时框架的最大应力约为 292 MPa,最大应力均出现在底架型钢对接尖角应力集中处,且均未超过底架梁的材料屈服强度。就最大应力而言,四吊点起吊时框架的安全系数比六吊点起吊时的低 24.8%。

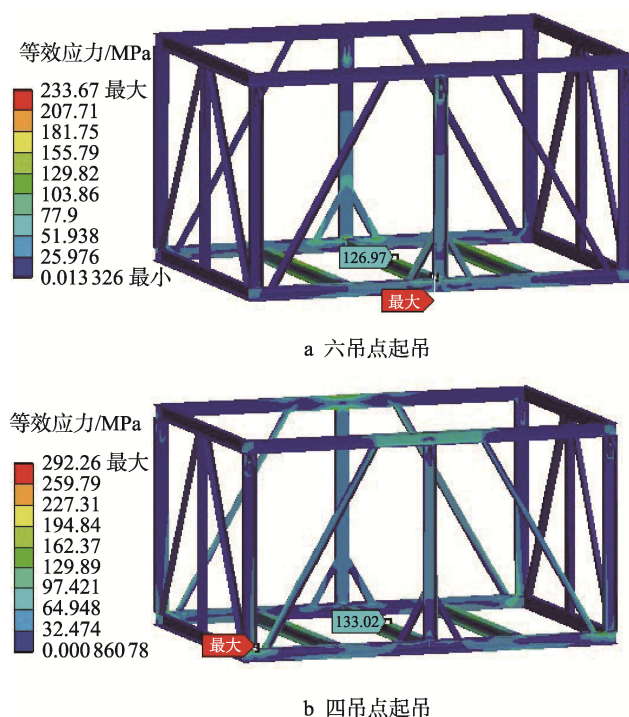


图 3 起吊过程框架应力分布云图

Fig.3 Stress distribution state of frame during lifting

包装箱钢结构框架为各向同性材料。当应力集中处的峰值应力超过屈服强度时,材料进入强化阶段,发生塑性变形,应力重新分配而不继续增大,增加的外载荷由截面未屈服部分承担,截面其他点的应力增大,最终使应力分布均匀;当应力集中处的峰值应力不超过材料的强度极限时,可不考虑应力集中对框架强度的影响。应力集中对构件的疲劳寿命影响很大,对图 3 中的应力结果进一步进行疲劳计算,设置图 4

所示的周期性幅值载荷, S-N 曲线比例系数取 1.0, 得到 2 种不同情况下包装箱框架的疲劳寿命, 结果如图 5 所示。

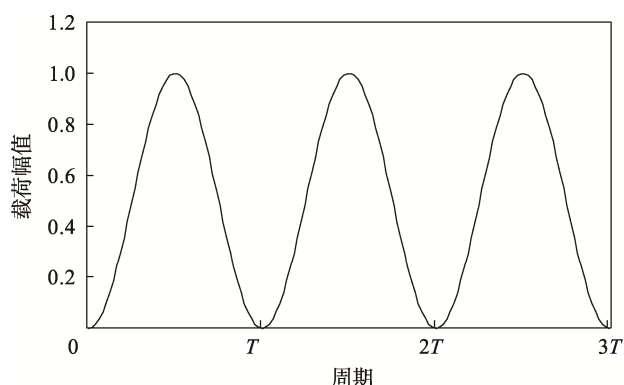
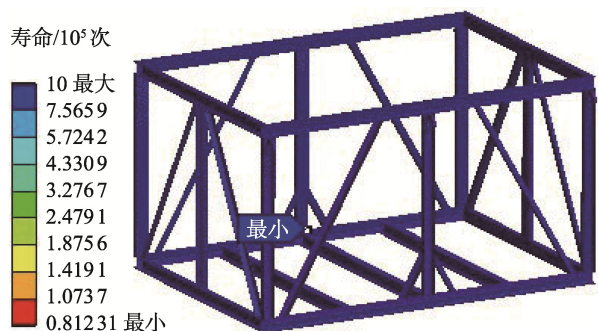
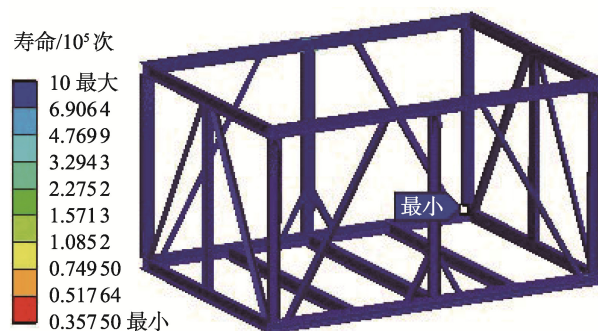


图 4 周期性无量纲载荷曲线
Fig.4 Periodic dimensionless load curve



a 六吊点起吊



b 四吊点起吊

图 5 周期性载荷下框架疲劳寿命云图
Fig.5 Fatigue life state of frame under periodic load

从图 5 中可以看出, 六吊点起吊时框架的寿命为 81 231 次, 四吊点起吊时框架的寿命为 35 750 次, 六吊点起吊时框架的疲劳寿命约为四吊点起吊时的 2.27 倍。

为了确定包装箱的最大装箱能力, 计算得到了 4、6、8 和 9 t 等 4 种产品质量下, 通过六吊点方式起吊时框架的最大应力 (框架应力集中处的峰值应力) 和底架支撑工字钢上的最大应力, 如图 6 所示。

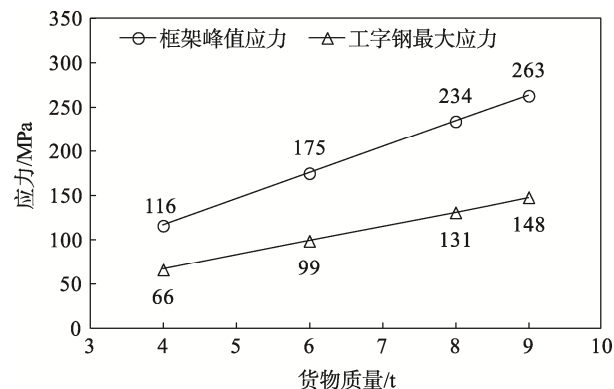


图 6 产品质量与应力的关系
Fig.6 Relationship between load and stress

分别对图 6 中框架峰值应力和支撑工字钢上最大应力进行线性拟合, 得到框架峰值应力表达式见式 (1), 支撑工字钢最大应力表达式见式 (2)。

$$f(x) = 29.424x - 1.6102 \quad R^2 = 1 \quad (1)$$

$$f(x) = 16.339x + 0.7119 \quad R^2 = 0.9999 \quad (2)$$

式中: $f(x)$ 为最大应力; x 为载荷; R^2 为可靠性。

结合式 (1) — (2) 和材料的力学性能参数分析可知, 框架因峰值应力产生强度失效的最小理论载荷约为 16.0 t。因工字钢屈服导致框架发生强度失效的最小理论载荷约为 21.1 t, 则包装箱不发生强度失效的极限装箱质量为 16 t (四吊点起吊的极限装箱质量约为 12.8 t)。

2.1.2 稳定性分析

当产品质量为 8 t 时, 起吊过程框架变形情况如图 7 所示。图 7a 和图 7b 分别为六吊点起吊和四吊点起吊时框架的变形情况。从图 7 中可以看出六吊点起吊时框架的最大变形量约为 6.1 mm, 四吊点起吊时框架的最大变形量约为 7.7 mm, 最大变形位置均出现在底架支撑工字钢的中部, 四吊点起吊比六吊点起吊时框架的最大变形量约大 26.2%, 六吊点起吊框架的刚度更好。

包装箱起吊时, 当等效载荷增加到某一数值后, 包装箱框架的平衡状态开始发生变化, 这时框架结构处于破坏的临界状态, 若等效载荷继续增加, 则框架结构彻底破坏, 这种现象称之为结构失稳, 引起平衡状态发生变化的载荷值称为临界载荷。通过非线性屈曲分析, 可以研究框架在特定载荷下起吊过程的稳定性, 以及框架失稳的临界载荷。当产品载荷为 8 t 时, 分别分析了六吊点起吊和四吊点起吊过程框架的稳定性, 提取了前 3 阶屈曲载荷系数, 如图 8 所示, 结果表明 1 阶屈曲载荷系数最小。临界载荷为屈曲载荷系数与分析载荷的乘积, 六吊点起吊和四吊点起吊时框架的临界载荷分别为 30.9 t 和 30.7 t, 表明六吊点起吊时框架的稳定性更好。

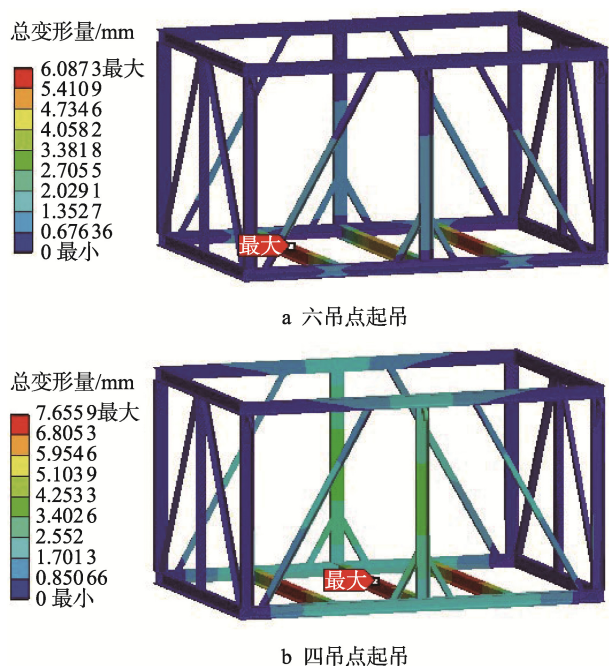


图7 起吊过程框架变形云图

Fig.7 Deformation state of frame during lifting

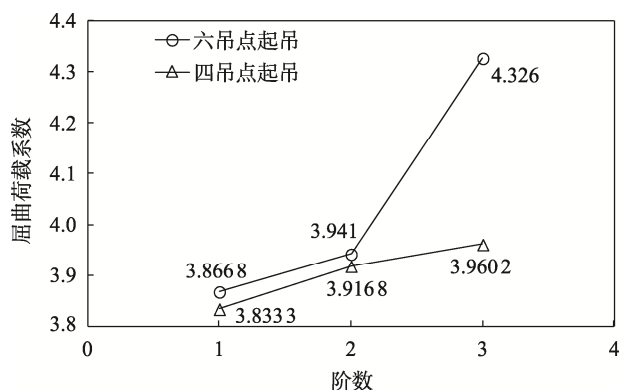


图8 起吊过程框架屈曲分析结果

Fig.8 Results of frame buckling analysis during lifting

2.2 堆码状态力学响应

限定堆码总层数不超过3层,最下层包装箱顶架上表面承受的最大载荷按17 t考虑(产品与包装箱的总质量),此时最下层包装箱框架的受力分布情况和变形情况如图9所示,最大应力约248 MPa。框架最大应力出现在顶架型钢对接尖角应力集中处,斜撑与顶架梁对接尖角应力集中处的峰值应力约107 MPa,二者未超过材料的屈服强度,类比起吊过程的分析方法,包装箱不发生强度失效的堆码极限抗压载荷约为32 t。框架最大变形量约为2.6 mm,最大变形量出现在顶架侧墙横梁上。

对包装箱框架进行堆码工况非线性屈曲分析,研究框架在特定载荷下堆码状态的稳定性,以及框架失稳的临界载荷。上层产品总载荷为17 t时,分析了框

架的稳定性,提取了前3阶屈曲载荷系数,计算得到对应的临界载荷,结果见表2。从表2可以看出,1阶屈曲载荷系数最小,框架易发生1阶屈曲失稳,对应的临界载荷为99.9 t。

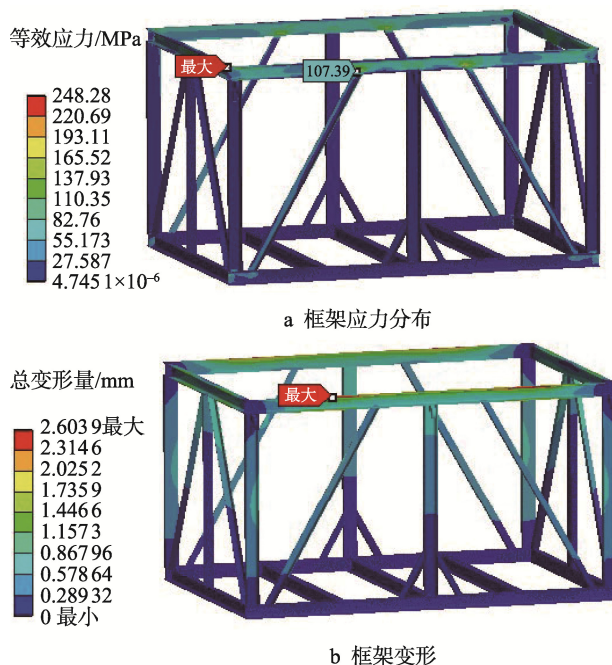


图9 堆码状态框架应力分布和变形云图

Fig.9 Stress distribution & deformation state of frame under stacking condition

表2 堆码状态下框架屈曲分析结果
Tab.2 Results of frame buckling analysis under stacking condition

阶数	屈曲载荷系数	临界载荷/t
1	5.879 2	99.9
2	5.958 5	101.3
3	5.976 8	101.6

3 工程实例及收益

以正在执行的某海外电厂项目为例,合同要求所有产品在港口集港后,装船海运发货,涉及到的部分产品需要装箱后发货,该类产品通常采用标准集装箱装箱,然而产品的自身特性会极大地限制集装箱的装箱能力。该项目开发了产品装箱新方案,采用前文所述非标钢结构框架包装箱进行产品装箱,每箱产品充实度均接近百分之百,单箱包装箱额定质量(产品质量与包装箱自身质量之和)均在8.5 t以内。起吊过程全部采用六吊点起吊方式,控制起吊加速度,使得包装箱等效额定质量不超过17 t;限定堆码总层数不超过3层,控制码放瞬时加速度,使得每层包装箱顶架上表面承受的等效最大载荷不超过32 t。产品从生

产车间到安装现场,经过多次起吊和堆放,未发现包装箱框架失效现象,进而说明本文建立的数值计算模型是可靠的。整个项目执行下来,非标包装箱的装箱成本较标准集装箱的装箱测算成本低 28.5%,因此,对于特殊项目,非标包装箱与标准集装箱相比,具有明显的降本增效优势。

4 结语

1) 包装箱框架上吊耳的使用数量影响起吊过程框架的应力分布和最大变形量。四吊点起吊与六吊点起吊相比,包装箱安全系数低 24.8%、疲劳寿命低 56%、最大变形量大 26.2%,建议起吊加速度小于 $1g$ 。当实际产品质量与包装箱设计承载质量之比超过 80%时,优选六吊点起吊方式。

2) 钢结构框架的强度危险位置为型钢对接尖角应力集中处。对接处的最小失效载荷比底架承载支撑梁的失效载荷小 24.2%,可通过局部加强提升框架承载质量的能力。

3) 钢结构框架的失效主要体现在强度失效。起吊过程失稳载荷约是断裂载荷的 1.93 倍,堆码状态失稳载荷约是断裂载荷的 3.12 倍。

4) 非标包装箱能够满足项目的装箱和运输需求,与常规装箱运输方案相比,具有明显的经济效益。

研究结论有助于深入理解钢结构框架的力学行为,为非标包装箱的推广应用和失效防控提供了参考。

参考文献:

- [1] 朱芳劼. 当前国际集装箱海运市场高运价的形成原因及对策[J]. 中国海事, 2022(3): 72-75.
ZHU Fang-jie. Causes and Countermeasures for High Freight Rates in the Current International Container Shipping Market[J]. China Maritime Safety, 2022(3): 72-75.
- [2] RAN Ming-ming, ZHONG Ya-chao, WANG Yuan-zuo, et al. Fracture Prediction in Transverse Fillet Welded Joints of High Strength Structural Steel[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 189: 1-14.
- [3] ZHOU Xu-hong, BAI Yong-tao, NARDI D C, et al. Damage Evolution Modeling for Steel Structures Subjected to Combined High Cycle Fatigue and High-intensity Dynamic Loadings[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2022, 22(3/4): 2240012-2240028.
- [4] GUO Hua-jing, SUN Bin, LI Zhao-xia. A Multi-Scale Fatigue-Creep Coupled Damage Model for Steel Structures under Extreme Cyclic Loading and Temperature[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2020, 29(4): 591-609.
- [5] YU Zuo-cai, WU Ji-yi, MA Kai-jiang, et al. Fatigue Crack Calculation of Steel Structure Based on the Improved McEvily Model[J]. Applied Sciences, 2022, 12(13): 1-15.
- [6] 程方杰, 孔康骞, 欧阳忠宇. 直接埋藏法修补疲劳裂纹缺陷的研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2020, 53(5): 502-507.
CHENG Fang-jie, KONG Kang-qian, OUYANG Zhong-yu. Repair of Fatigue Crack Defects by Direct Burial Method[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2020, 53(5): 502-507.
- [7] AKYEL A, KOLSTEIN M H, BIJLAARD F S K. Fatigue Strength of Repaired Welded Connections Made of Very High Strength Steels[J]. Engineering Structures, 2018, 161: 28-40.
- [8] ZHANG Yue-lin, FANG Cheng, WANG Wei. Experimental and Numerical Study on Cyclic Behavior of Corroded Q345 Steel[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 196: 107369.
- [9] 邵永波, 陈振明, 周子璐. CFRP 加固腐蚀 T 型管节点静力承载力试验[J]. 土木工程与管理学报, 2020, 37(5): 15-19.
SHAO Yong-bo, CHEN Zhen-ming, ZHOU Zi-lu. Experimental on Static Bearing Capacity of Corroded T-Joints Strengthened with CFRP[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2020, 37(5): 15-19.
- [10] JENNIFER S, ULRIKE K. Innovative High-strength Steel Construction Using Mixed Connections[J]. Steel Construction, 2018, 11(4): 272-277.
- [11] DAMM J, UMMENHOFER T, ALBIEZ M. Influence of Damping Properties of Adhesively Bonded Joints on the Dynamic Behaviour of Steel Structures: Numerical Investigations[J]. The Journal of Adhesion, 2022, 98(7): 934-962.
- [12] CHEN Ying, HUO Jing-si, CHEN Wen-su, et al. Elghazouli. Experimental and Numerical Assessment of Welded Steel Beam-Column Connections under Impact Loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 175: 1-15.
- [13] ZHANG Jians-heng, YANG Shu-ran, PENG Ming-xing, et al. Stability Analysis of Steel Structure Model Based On the Finite Element Method[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 252(2): 1-8.
- [14] 强旭红, 赵波森, 姜旭, 等. 高性能钢梁的整体稳定性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 642-651.
QIANG Xu-hong, ZHAO Bo-sen, JIANG Xu, et al. Global Stability of High-Performance Steel Beams[J].

- Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50(5): 642-651.
- [15] LIU Wen-ting, ZHANG Xiao-meng, REN Qing-ying, et al. Design and Mechanical Performance Analysis of V-joint of New Steel Structure[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2009(1): 1-5.
- [16] FATIMAH D, NOR S H, ZAFIRA N E M. Buckling Capacity of Cold-Formed Steel Structure Column Member with Perforation Section in Affordable House Framing System[J]. World Journal of Engineering, 2020, 18(2): 269-279.
- [17] SABERI H, SABERI V, SADEGHI A, et al. Investigation of the Occurrence of Progressive Collapse in High-rise Steel Buildings with Different Braced Configurations[J]. Civil and Environmental Engineering Reports, 2021, 31(4): 33-54.
- [18] 许定江, 练章华, 张志东, 等. 石油 K 型矿井架结构强度可靠性评价 [J]. 计算机仿真, 2016, 33(7): 189-193.
- XU Ding-jiang, LIAN Zhang-hua, ZHANG Zhi-dong, et al. The Structural Strength Reliability Assessment of K Type Oil Derrick[J]. Computer Simulation, 2016, 33(7): 189-193.
- [19] 黄志强, 纪苏丹, 张波, 等. 基于测试与有限元仿真的海洋井架安全评定 [J]. 机械强度, 2016, 38(4): 721-728.
- HUANG Zhi-qiang, JI Su-dan, ZHANG Bo, et al. Safety Assessment of Offshore Derrick Based on Testing and Finite Element Simulation[J]. Journal of Mechanical Strength, 2016, 38(4): 721-728.
- [20] 刘统亮, 孙巧雷, 张红, 等. 基于 API 极限工况下修井机井架强度计算研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(12): 66-71.
- LIU Tong-liang, SUN Qiao-lei, ZHANG Hong, et al. Study on Strength Calculation of Workover Rig Derrick Based on API Extreme Conditions[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(12): 66-71.
- [21] DEPALE B, BENNEBACH M. Residual Life of Steel Structures and Equipment: Problems and Application to Cranes[J]. Mechanics & Industry, 2020, 20(8): 2019047-2019061.
- [22] XIE Meng-wei. Discussion on the Design and Performance of the Whole Packaging Box of Environmentally Friendly Packaging Materials[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 2021: 4779965-4779977.
- [23] SILVA N, PÅLSSON H. Industrial Packaging and Its Impact on Sustainability and Circular Economy: A Systematic Literature Review[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 333: 1-13.

责任编辑: 曾钰婵