

文章编号:1000-582X(2009)09-1028-04

大型挂载起吊系统特种螺栓强度分析

唐倩,裴林清,陆波

(重庆大学机械传动国家重点实验室,重庆 400030)

摘要:通过建立挂载起吊系统力学模型,并采用有限元分析方法对系统进行计算,得出特种螺栓应力分布以及系统各部件之间接触面积关系。分析结果表明螺栓强度满足使用要求,螺栓预紧力对螺栓强度影响较大,圆筒重力载荷对螺栓强度影响较小,但螺栓存在严重的偏载现象。此外,对挂载螺栓进行分组起吊实验,观察各组螺栓的变形情况。结果表明,仿真结果与实验结果吻合较好。

关键词:螺栓联接;特种螺栓;预紧力;强度分析;有限元

中图分类号:TH123

文献标志码:A

Strength analysis for special bolt of large-scale hanger system

TANG Qian, PEI Lin-qing, LU Bo

(State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: By establishing the dynamic model and adopting the finite element method, the special bolt's stress distribution and the contact areas between different components of the system are obtained. According to the analysis result, the bolt's strength meets the operating requirement, bolt pre-tightening force has a great influence to the bolt strength, and gravity loads of cylinder cannot produce considerable changes of bolts, however, the phenomenon of deviation load is serious. The bolts experiment based on group of bolts is conducted to show degree of deformation. The experiment results are agreed well with the analysis results.

Key words: bolted joints; special bolt; pre-tightening force; strength analysis; finite element

螺栓联接是广泛应用于各种机械设备的一种联接形式,它具有联接可靠性高、联接强度高、可拆卸、能自锁等优点。当前结构设计朝着大型化、高精度、高可靠性方向发展,对于核心部件的联接,其强度至关重要,螺栓联接一旦出现问题,将直接关系到整个设备运行的稳定性和安全性^[1-5]。因此,开展对特种螺栓强度研究,实现结构系统整体匹配设计已经成为重要课题。目前关于螺栓联结的研究主要集中在单个螺栓的强度分析、疲劳设计、可靠性等方面,而把螺栓系统当成一个整体进行研究,涉及较少^[6-9]。

研究表明把螺栓置于一个系统进行分析,其工作载荷不仅有轴向方向的载荷,而且附带产生的复杂弯曲应力会削弱螺栓的疲劳强度,螺栓上弯曲应力的大小与螺栓自身的几何形状,特别是与螺栓上的预紧力有关^[10-15]。笔者通过建立大型挂载起吊系统力学模型,采用有限元方法对系统进行接触分析计算,重点分析特种螺栓的强度以及部件之间接触面积,研究螺栓应力分布规律,为挂载起吊系统特种螺栓联接的正确设计提供实用的参考数据。

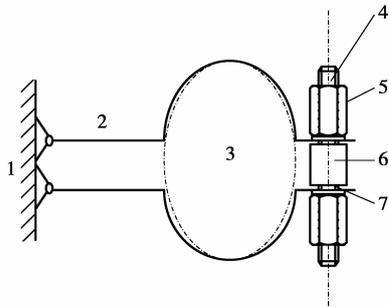
收稿日期:2009-04-12

基金项目:教育部科学技术研究重点资助项目(108107);重庆市科技攻关项目(CSTC 2008AB3057;CSTC 2006AA3010)

作者简介:唐倩(1969-),女,重庆大学副教授,博士,主要从事机械结构设计、计算机辅助设计、工业工程等方面的研究,
(Tel) 023-65111276, (E-mail) tqcqu@cqu.edu.cn.

1 大型挂载起吊系统基本结构

大型挂载起吊系统中的螺栓采用特种螺栓联接,由上下抱箍、上下螺栓、上下螺母、连接螺套组成(内圈有螺纹与螺杆外螺纹配合)。圆柱通过 2 个专用对位装置和起吊横梁对接,并通过 2 个圆弧卡环卡住圆柱重物,抱箍用圆柱销栓接到起吊横梁板上,螺栓联结上下抱箍,整个系统不会发生转动,如图 1 所示。



1. 起吊横梁;2. 抱箍;3. 圆柱重物;4. 螺栓;
5. 螺母;6. 螺套;7. 垫片

图 1 挂载起吊系统结构简图

表 1 为挂载起吊系统的部分结构尺寸,其中螺栓为特种螺栓:危险截面最小直径 21 mm,与螺套接触处直径为 36 mm,与螺母接触处直径为 45 mm,螺栓总长度 270 mm。

表 1 起吊系统部分结构尺寸 mm

圆柱物 (直径/ 长度)	抱箍 (厚/宽)	螺栓危险 截面直径	螺母 (直径/ 高度)	套筒 (直径/长度/ 厚度)
φ535/ 2728	15/105	φ21	φ45/45	φ36/60/5

2 大型挂载起吊系统力学模型

在工作过程中,挂载起吊系统只承受圆柱重力载荷,螺栓受到预紧力产生的轴向拉力和圆筒重力产生的弯曲力矩,是一个拉-扭合成的受力情况。联接中螺栓、螺母、抱箍、圆筒相互作用,且螺栓的拧紧过程受到端面摩擦及螺纹副摩擦状态的影响,挂载起吊系统力学模型为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F, \quad (1)$$

式中: M 为系统质量矩阵; C 为系统阻尼矩阵; K 为系统刚度矩阵; F 为外激励力向量; \ddot{x}, \dot{x}, x 为系统加速度、速度、位移向量。

3 大型挂载起吊系统三维有限元模型

根据实际使用情况得知,挂载起吊系统螺栓可断面为应力最大区域,存在着应力集中现象。在 ABAQUS 软件中,可断面区域采用二次完全积分单元模拟应力集中现象,非可断区域采用线性减缩积分单元模拟。螺栓、抱箍部件划分较密网格,圆筒为不关心区域,划分较稀网格^[16],并处理成刚体。利用软件中的 meshing 模块采用结构化和扫掠方法,生成八节点六面体实体单元,共划分为 67 684 个单元,82 625 个节点。

挂载起吊系统在实际安装中用圆柱销将抱箍与起吊横梁板栓接在一起,故抱箍约束定义为可绕圆柱销轴线转动,其他自由度约束;提升装置中,圆筒有专门的定位装置,故圆筒约束定义为垂直方向自由,其他自由度约束;抱箍与圆筒、螺栓与垫圈、垫圈与抱箍相互之间定义成接触;螺栓与螺母、螺栓与螺套的螺纹连接处理成束缚连接;圆筒定义重力载荷;螺栓定义螺栓预紧力载荷,如图 2 所示,其中 Z 轴为沿圆柱重物轴向方向, X 轴为横截面(垂直于 Z 轴)水平方向, Y 轴为横截面垂直方向。

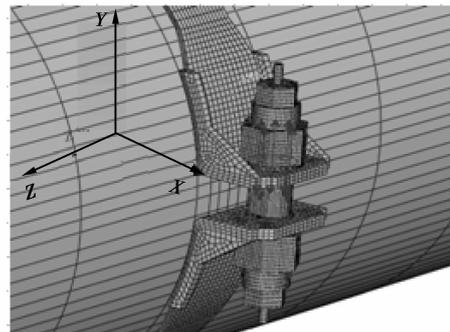


图 2 挂载起吊系统三维有限元模型

4 三维有限元接触分析

采用 ABAQUS 有限元分析软件对挂载起吊系统进行静态接触分析与仿真。模型圆筒质量 4.5 t,螺栓预紧力 150 N·m,弹性模量 E 为 206 000 MPa,摩擦系数 0.15,屈服极限 685 MPa。仿真过程分为 3 个载荷步进行(对应总仿真时间为 3.5 s),其中第 1 个载荷步定义为微小螺栓预紧力,平衡建立接触关系;第 2 个载荷步定义螺栓载荷;第 3 个载荷步定义重力载荷。通过分析得到系统应力分布,如图 3-5 所示。

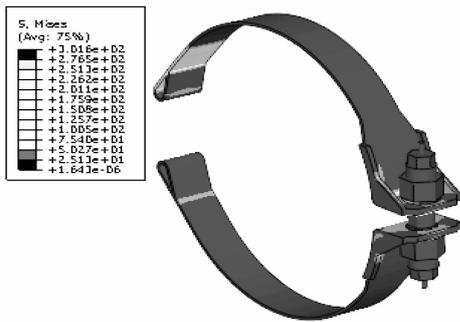
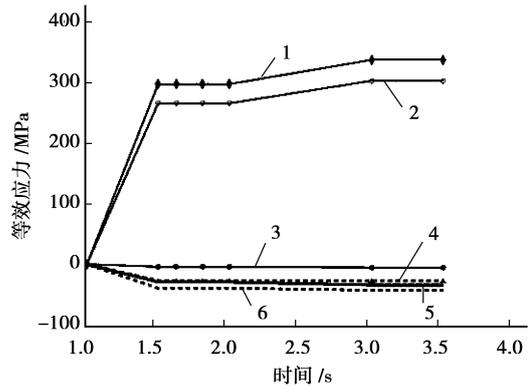


图 3 挂载起吊系统等效力云图



1. 最大主应力; 2. 等效应力; 3. 最小主应力;
4. $z-x$ 平面剪切应力; 5. $z-y$ 平面剪切应力; 6. $y-x$ 平面剪切应力
图 6 可断截面最大应力节点各应力曲线

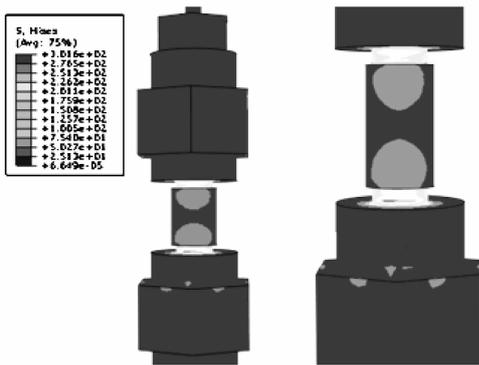


图 4 螺栓等效应力云图

由图 6 可知,螺栓最大主应力为 335.9 MPa,等效应力为 301.6 MPa,最小主应力为 5.4 MPa,3 个截平面方向($z-x, z-y, y-x$)剪切应力分别为 27.3、34.3、42.8 MPa。由载荷施加条件知,1~2 s 为螺栓预紧力施加阶段,螺栓等效应力为 264.4 MPa,2.0~3.5 s 为在螺栓预紧力作用下重力施加载荷步,螺栓等效应力为 301.6 MPa。分析得知重力对螺栓应力影响较小,其增长幅度为 14.07%,故螺栓应力主要与预紧力有关,预紧力越大,螺栓等效应力增加越明显;重力对螺栓的影响主要为偏载现象,圆筒重力载荷产生附加弯矩使螺栓弯曲,产生少量弯曲应力。通过分析系统各部件之间接触面积(总面积为 801.1 m^2),研究螺栓应力截面偏载现象,得出各接触面偏载情况,如表 2 所示。

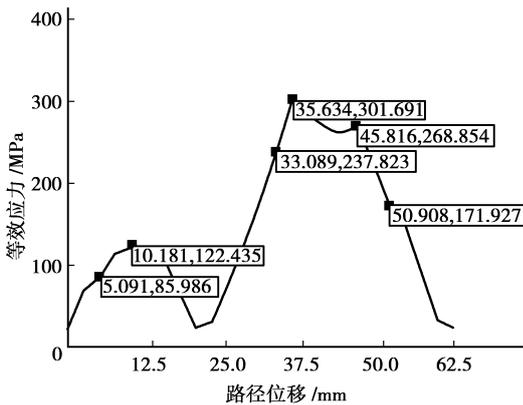


图 5 螺栓水平剖面等效应力及路径曲线图

表 2 系统各部件之间接触面积

部件名称	接触面积/ m^2	偏载比/%
上垫圈与螺栓	470.415	41.28
下垫圈与抱箍	286.588	64.23
下垫圈与螺栓	393.573	50.87

挂载起吊系统等效力为 301.6 MPa,位于螺栓可断截面处,靠近圆筒侧,如图 3、4 所示。沿着螺栓可断截面处取圆周路径,绘制等效应力曲线,曲线呈双波峰状,波峰区域为靠近圆筒侧,螺栓承受的压应力以及远离圆筒侧的拉应力分别为 301.6、122.4 MPa,整个可断截面等效应力分布呈严重的偏载现象,如图 5 所示。

选取螺栓可断截面最大应力节点,研究螺栓在加载情况下的各种应力大小情况,如图 6 所示。

通过上述分析,考虑螺栓联接结构系统的接触特性和预紧特性,得到特种螺栓联接情况下的应力分布情况,反映了螺栓联接中可断截面的应力水平以及结构接合面在工作载荷下的真实状态。

5 挂载起吊实验

根据实际工作环境,把螺栓实验分为 2 组,第 1 组加载实际载荷,第 2 组另加额外配重载荷 500 kg,吊车型号为 QYT12,实验结束后,观察各组螺栓变形情况,实验结果如表 3 所示。

表3 螺栓负重起吊实验

螺栓组	起吊次数	加载情况	起吊时间/s	结果
1	1	两圆筒重物 共 9 t	360	螺栓 安全
	2		366	
	3		370	
	4		386	
	5		420	
2	1	两圆筒重物共 9 t 配重 500 kg	351	螺栓 安全
	2		361	
	3		374	
	4		399	
	5		422	

从表3可以看出,在螺栓实际工况作用下,强度满足要求,螺栓均处于安全状态;而第2组额外配重实验表明,螺栓的强度仍有富余,螺栓的安全性较高。经验表明在实际使用过程中螺栓内侧存在偏载现象,与分析结果相符。

6 结论

以大型挂载起吊系统为研究对象,建立了螺栓-螺母-螺套-抱箍-圆筒三维有限元模型,应用ABAQUS软件对模型进行了有限元接触分析,得到了特种螺栓联接系统在预紧力作用下的应力分布情况以及系统各部件接触面积。结果表明,螺栓强度满足使用要求,螺栓应力主要取决于预紧力,预紧力越大,螺栓等效应力增加越明显;圆筒重力载荷对螺栓的贡献不大,主要表现为产生偏载现象以及少量的弯曲应力,并通过与实验结果进行对比,验证了分析的正确性。通过对挂载起吊系统强度特性的研究,直观地分析了特种螺栓在工作载荷下的真实状态,为进一步开展特种螺栓结构设计打下基础。

参考文献:

- [1] 张永杰,孙秦.带预紧力受剪螺栓连接刚度分析[J].强度与环境,2007,34(4):22-25.
ZHANG YONG-JIE, SUN QIN. Sheared bolt joint stiffness analysis with pre-tightened force[J]. Structure & Environment Engineering, 2007,34(4):22-25.
- [2] 张红兵,杜建红.用有限元法对螺栓联接进行抗疲劳设计[J].华北工学院学报,1999,20(3):207-209.
ZHANG HONG-BING, DU JIAN-HONG. Anti-fatigue design on bolt connection with finite element method[J]. Journal of North China Institute of Technology, 1999, 20(3): 207-209.
- [3] 何英,韩秀杰,鱼胜利,等.应用有限元法对起吊螺栓的随机应力分析[J].机床与液压,2005,23(3):56-58.
HE YING, HAN XIU-JIE, YU SHENG-LI, et al. Random stress analysis for connective bolt by ANSYS[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2005, 23(3): 56-58.
- [4] 方治华,贾宏玉,顾永强.重物起吊过程两种动力学模型比较研究[J].机械研究与应用,2007,20(5):24-25.
FANG ZHI-HUA, JIA HONG-YU, GU YONG-

- QIANG. Comparing research of two mechanical models in hoisting a weight[J]. Mechanical Research & Application, 2007, 20(5): 24-25.
- [5] 方栋,陈继志.高强度螺栓螺纹根部应力集中的有限元分析[J].材料开发与应用,2007,22(2):37-39.
FANG DONG, CHEN JI-ZHI. Finite element analysis of stress concentration at the root of screw thread of high strength bolt[J]. Development and Application of Materials, 2007, 22(2): 37-39.
- [6] TSERPES K I, PAPANIKOS P, KERMANIDIS T. A three-dimensional progressive damage model for bolted joints in composite laminates subjected to tensile loading[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2001, 24(10): 663-675.
- [7] KNEZ M, GLODEZ S, KRAMBERGER J. Numerical analysis of the crack growth in a high loaded bolt connection[J]. Advances in Fracture and Damage Mechanics VI, 2007, 348/349(9): 625-628.
- [8] ABID M, HUSSAIN S. Bolt preload scatter and relaxation behavior during tightening a 4 in-900JHJflange joint with spiral wound gasket[J]. Journal of Process Mechanical Engineering, 2008, 222(2): 123-134.
- [9] AL-KHATAB Z, BOUCHAR A. Analysis of a bolted T-stub strengthened by backing-plates with regard to Eurocode 3[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(12): 1603-1615.
- [10] SHI Y J, SHI G, WANG YQ. Experimental and theoretical analysis of the moment-rotation behaviour of stiffened extended end-plate connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(9): 1279-1293.
- [11] DING K, DHANASEKAR M. Flexural behaviour of bonded-bolted butt joints due to bolt looseness[J]. Advances in Engineering Software, 2007,38(8/9): 598-606.
- [12] KUKRETI A R, ZHOU F F. Eight-bolt endplate connection and its influence on frame behavior[J]. Engineering Structures, 2006, 28(11):1483-1493.
- [13] SAWA T, NAGATA S, TSUJI H. New development in studies on the characteristics of bolted pipe flange connections in jpvrc[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2006, 128(1): 103-108.
- [14] ZHANG O Q. Discussions on behavior of bolted joints tension[J]. Journal of Mechanical Design, 2005, 127(3): 506-510.
- [15] 朱爱珠,郭耀杰,程超,等.螺栓连接变电构架柱结构分析[J].重庆建筑大学学报,2008,30(1):72-76.
ZHU AI-ZHU, GUO YAO-JIE, CHENG CHAO, et al. Structural analysis of the bolting truss-column of substation[J]. Journal of Chongqing Jianshu University, 2008, 30(1):72-76.
- [16] 边弘晔,李鹤,闻邦椿. Hyper Mesh有限元前处理关键技术研究[J].机床与液压,2008,36(4):160-164.
BING HONG-YE, LI HE, WEN BANG-CHUN. Study on the key techniques of finite element preprocessing based on hyper mesh[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008, 36(4): 160-164.

(编辑 张 葶)