

基于有限元分析的混凝土泵车臂架轴套连接强度计算方法

田相玉, 吴德志, 陈 泽

(国家混凝土机械工程技术研究中心, 湖南 长沙 410013)

[摘要] 结合工程实例, 阐述了臂架轴套连接强度在臂架结构设计中的重要性, 而现有臂架设计计算规范未充分考虑轴套的连接强度。文章在理论分析的基础上, 建立实体简化数学模型, 借助于有限元分析软件ANSYS非线性接触模块对轴套的连接进行受力分析。结果表明, 该方法可精确评估轴套的连接强度, 为臂架的可靠性设计提供参考和依据。

[关键词] 混凝土泵车; 连接强度; 有限元分析; 接触非线性

[中图分类号] TH123+.3 [文献标识码] B [文章编号] 1001-554X(2019)01-0048-05

Study on calculation method of connection strength for the concrete pump truck boom based on finite element analysis

TIAN Xiang-yu, WU De-zhi, CHEN Ze

泵车臂架是典型的薄壁箱型结构, 焊接是最主要的连接方式, 焊缝强度很大程度上决定了臂架的可靠性。若设计时由于参数(或结构形式)选择不当而使轴套与腹板连接处于高应力区域, 表现为疲劳强度低。在泵车工作过程中, 若连接焊缝发生开裂未及时发现, 随着裂纹的扩展而导致结构失去承载能力而断裂, 将会产生严重的伤亡事故和经济损失。据统计, 因连接焊缝问题造成的断裂事故占臂架失效总故障的85%左右, 故在结构设计时合理地进行强度分析是提高焊接件可靠度的必要条件。

鉴于臂架结构特点, 通常设计校核时主要侧重于主体结构的强度、刚度和稳定性等。综合考虑计算效率、精确度等因素, 设计者通常采用片体(板壳+梁组合单元)有限元模型进行仿真计算, 如图1所示。历经台架试验和工程实践验证, 上述方法对于臂架结构整体的承载性能评估, 精确可靠, 简便时效。

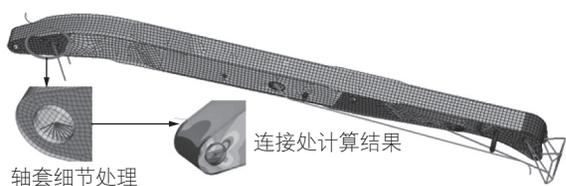


图1 臂架板梁组合有限元分析模型

分析板梁组合有限元仿真计算结果, 发现结构整体的应力分布是连续的, 但轴套与腹板连接处的应力分布是不连续的、突变的, 且局部应力峰值往往超过母材的屈服极限, 如何评价此处的计算结果, 大多数设计者选择忽略而单凭设计经验。本文在理论分析的基础上, 提出了一种基于实体有限元模型接触非线性分析的校核方法, 能对复杂的结构(或连接形式)进行分析, 对于提高结构件的可靠性设计具有一定的指导意义。

1 轴套连接强度理论计算^[1-3]

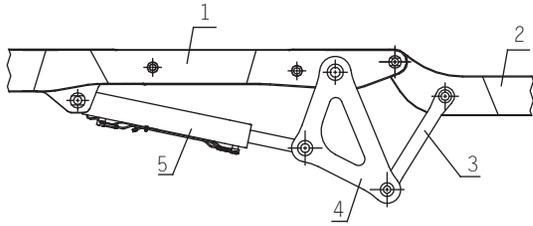
1.1 理论受力分析

臂架系统通常由多组曲柄连杆(六铰点型等)机构组成, 涉及零部件主要有变幅油缸、弯连杆、直连杆、上一节臂、下一节臂、销轴、紧固件等附件, 如图2所示。

DOI:10.14189/j.cnki.cm1981.2019.01.003

[收稿日期] 2018-09-03

[通讯地址] 田相玉, 湖南省长沙市岳麓区中联重科麓谷大道677号麓谷第一工业园研发大楼3001室



1. 三节臂 2. 四节臂 3. 直连杆 4. 弯连杆 5. 油缸
图2 臂架-连杆-油缸运动机构简图

臂架轴套是运动机构中传递力和运动的主要载体，由于泵车在工作过程中，臂架姿态组合的多样性和随机性，臂架轴套将承受复杂的交变载荷。臂架轴套与腹板的连接方式通常为焊接形式，轴套与腹板间的连接焊缝是环形对接焊缝，为主焊缝；轴套法兰端面与腹板间的焊缝是环形角焊缝，为辅助焊缝，本文主要分析主焊缝的受力情况，如图3所示。

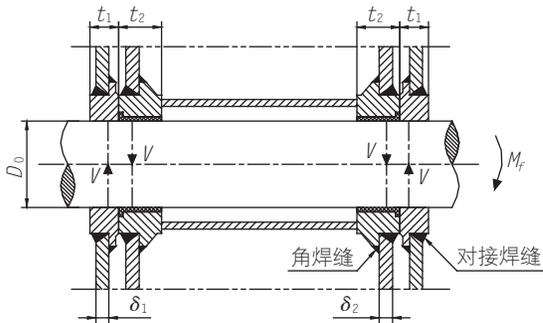


图3 铰接处轴套受力分析

$$V = r_f \cdot \frac{F}{2} \quad (1)$$

$$M_f = V(t_1/3 + t_2/3) \quad (2)$$

$$\sigma_f^M = \frac{M_f}{W_f} \quad (3)$$

$$W_f = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D} \quad (4)$$

$$d = D - 2h_e \quad (5)$$

$$\sigma_f^M = \frac{16 \cdot D \cdot r_f \cdot F \cdot (t_1/3 + t_2/3)}{\pi \cdot [D^4 - (D - 2h_e)^4]} \quad (6)$$

$$\sigma_f^V = \frac{V}{h_e l_w} = \frac{r_f \cdot F}{h_e \cdot \pi \cdot d} \quad (7)$$

连接焊缝受拉侧应力

$$\sigma_f = \sigma_f^M + \sigma_f^V = \frac{16 \cdot D \cdot r_f \cdot F \cdot (t_1/3 + t_2/3)}{\pi \cdot [D^4 - (D - 2h_e)^4]} + \frac{r_f \cdot F}{h_e \cdot \pi \cdot d} \quad (8)$$

连接焊缝受压侧应力

$$\sigma_f = \sigma_f^M - \sigma_f^V = \frac{16 \cdot D \cdot r_f \cdot F \cdot (t_1/3 + t_2/3)}{\pi \cdot [D^4 - (D - 2h_e)^4]} - \frac{r_f \cdot F}{h_e \cdot \pi \cdot d} \quad (9)$$

式中 F 为集中力； r_f 为载荷不均匀系数，取1.2； h_e 为等效焊缝厚度，取板厚 δ_1 或 δ_2 ； M_f 为集中力 F 产生的弯矩； W_f 为焊缝截面的抗弯模量； σ_f^M 为弯矩 M_f 产生的弯曲应力； σ_f^V 为集中力 F 产生的拉应力或压应力。

臂架展、收臂时，曲柄连杆机构中的部件相互间通过铰接销轴传递力和运动，则运动副之间产生摩擦力，轴套承受切向摩擦力，对于轴套与腹板的连接焊缝，承受由摩擦力偶产生的扭矩 T_f （见图4）。

$$F_f = V \cdot \mu \quad (10)$$

$$T_f = V_f \cdot \mu \cdot D_0 \quad (11)$$

$$\tau_f = \frac{T_f}{W_t} \quad (12)$$

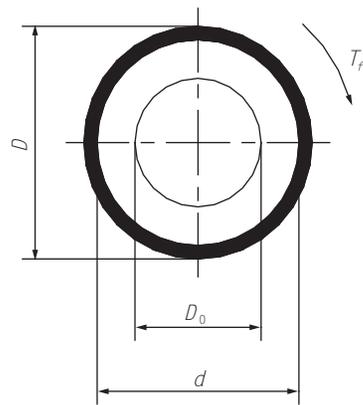


图4 轴套焊缝等效截面图

$$W_t = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{16 \cdot D} \quad (13)$$

$$\tau_f = \frac{T_f \cdot r}{I_p} = \frac{8 \cdot D \cdot r_f \cdot F \cdot \mu \cdot D_0}{\pi \cdot (D^4 - d^4)} \quad (14)$$

轴套连接焊缝强度校核计算公式

$$\sigma_j \leq [\sigma_h] \quad (15)$$

$$\tau_j \leq [\tau_h] \quad (16)$$

对于焊缝中正应力和剪应力都较大的地方，

焊缝的等效应力则按式(17)进行计算

$$\sqrt{\sigma_f^2 + 2\tau_f^2} \leq [\sigma_h] \quad (17)$$

式中 μ 为摩擦系数，取值0.2； τ_f 为扭矩产生的剪切应力； W_t 焊缝截面抗扭模量； $[\sigma_h]$ 为焊缝的许用弯曲应力； $[\tau_h]$ 为焊缝的许用剪切应力。

1.2 许用应力计算

(1) 对于 $\sigma_s/\sigma_b < 0.7$ 的钢材，其基本许用应力为材料的屈服极限应力 σ_s 除以强度安全系数 n ，见表1。

表1 强度安全系数 n 和钢材的基本许用应力 $[\sigma]$

| 载荷组合 | 基本载荷 | (基本+附加)载荷 | (基本+附加+特殊)载荷 |
|---------------------------|---------------------|-----------------|-----------------|
| 强度安全系数 n | 1.48 | 1.34 | 1.22 |
| (拉伸、压缩和弯曲)许用应力 $[\sigma]$ | $\sigma_s/1.48$ | $\sigma_s/1.34$ | $\sigma_s/1.22$ |
| 剪切许用应力 $[\tau]$ | $[\sigma]/\sqrt{3}$ | | |
| 承压应力 $[\sigma_{cd}]$ | $1.4[\sigma]$ | | |

注：(1) 在一般非高危险的正常情况下，高危险系数 $r_n=1$ ，安全系数就是强度系数；
(2) σ_s 根据钢材的厚度选取，见GB/T 700和GB/T 1591。

(2) 对于 $\sigma_s/\sigma_b \geq 0.7$ 的高强度钢材，基本许用应力计算公式

$$[\sigma] = \frac{0.5\sigma_s + 0.35\sigma_b}{n} \quad (18)$$

(3) 在焊缝连接的设计中，焊缝应具有同

母材同等的综合机械性能。焊缝承受拉伸、压缩时，许用应力不应超过焊缝纵向拉、压许用应力 $[\sigma_h]$ ，承受剪切时，不应超过焊缝的剪切许用应力 $[\tau_h]$ ，根据焊接条件、焊接方法和焊缝质量等级，焊缝的许用应力见表2。

表2 焊缝的许用应力

| 焊缝形式 | | 纵向拉、压许用应力 $[\sigma_h]$ | 剪切许用应力 $[\tau_h]$ |
|------|---------|------------------------|------------------------|
| 对接焊缝 | 质量分级 | B、C级 | $[\sigma]/\sqrt{2}$ |
| | | D级 | $0.8[\sigma]/\sqrt{2}$ |
| 角焊缝 | 自动焊、手工焊 | / | $[\sigma]/\sqrt{2}$ |

注：(1) 焊缝质量分级按GB/T 19418；
(2) $[\sigma]$ 为母材的基本许用应力；
(3) 施工条件较差的焊缝或受横向载荷的焊缝，焊缝许用应力宜适当降低。

2 非线性接触有限元仿真分析^[4]

对于简单的焊缝形式，可采用材料力学理论计算公式和强度理论进行校核，但对于复杂的焊缝形式，若采用常规的计算手段校核，计算过程将非

常复杂，且计算结果对结构设计的指导作用有限。然而现行的CAE计算规范基于片体(板壳+梁组合单元)有限元模型，无法精确评估臂架轴套处的应力分布。针对此种情况，本文提出了一种基于非线性接触实体有限元模型对轴套焊缝的应力分布进行

分析的方法。

2.1 计算假设条件

由于制造水平的不同，实际臂架轴套连接焊缝的形状和质量等级存在差异，且工作时连接焊缝承受的外载荷较为复杂，故本文为了便于仿真计算，对分析模型作如下假设：

(1) 焊接残余应力、焊接缺陷等对连接强度无影响；

(2) 焊缝材质特性与母材相同；

(3) 连接处的应力是均布的，以平均应力计算；

(4) 轴对称问题，臂架结构几何形状、约束条件和外载荷关于水平中心线对称；

(5) 盖板、腹板、销轴、铜套、连接套等均作为理想刚体；

(6) 忽略输送管偏置、臂架折弯等引起的扭矩。

2.2 有限元分析模型

综合考虑臂架结构、外载荷等轴对称特点和计算效率，本文选取臂架根部（含两组铰孔）模型的一半。将臂架简化三维模型导入前处理软件Hyper Mesh中进行网格划分，材料属性定义，接触对创建，单元类型选用八节点六面体实体单元SOLID45，见图5所示。网格划分时，在销轴与铜套（或轴套）接触区域细化网格。模拟焊缝、腹板和轴套间采用刚性连接，轴套与对应嵌套铜套采用绑定（Bonded）接触类型。

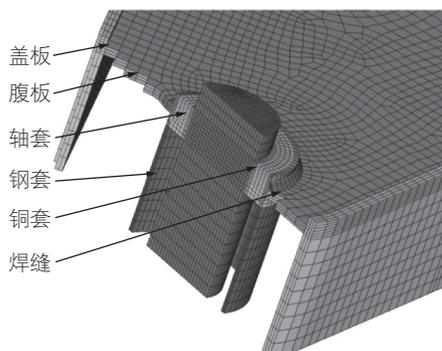


图5 有限元分析模型

2.3 边界条件

将ADAMS多体动力学分析求解的铰点力（矢量，集中载荷）简化为均布载荷施加于销轴承载表

面 110° 角度范围空间内，且关于集中力作用线中心对称。在简化模型的对称剖切面上施加对称约束，在简化模型后断面上施加固定约束，在销轴端面施加横向固定约束，释放其他自由度，见图6所示。

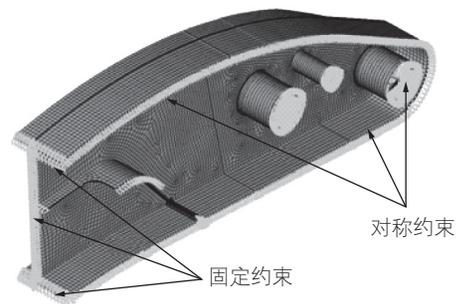


图6 模型施加边界条件约束

2.4 面-面接触单元的建立

接触问题的解决有多种方法，本文主要采取接触单元法，其基本点是把接触点的位移和接触力，根据接触条件表示成单元的形式，这种单元被称为“接触单元”。这种辅助单元包含有接触面上接触状态的特性。接触单元可以和其它普通单元一样，直接组装到刚度方程中去，对于不同的接触状态，通过改变形成单元的某些参数来实现^[3]。

接触问题分为两种基本类型：刚性体—柔性体接触，柔性体—柔性体接触。本文在分析过程中认为销轴与轴套（或铜套）的接触为刚性体—柔性体接触，且因销轴的表面硬度大于铜套，故把销轴的外表面作为刚性目标面，用目标单元TARGET170模拟；把轴套（或铜套）的内表面作为柔性接触面，用接触单元CONTA173模拟，如图7所示。



图7 面-面接触有限元模型

前处理完毕，将分析模型导入ANSYS中进行求解和后处理，选用增强的拉格朗日乘子接触算法，定义接触面单元法向接触刚度因子为1.0，选

代计算允许穿透因子为0.1。接触求解过程中必须满足接触界面条件，即不可贯入条件、法向接触力为压力的条件、切向摩擦力等条件，属于单边约束问题，此特点决定了接触问题采用试探-校核的迭代方法进行求解。

2.5 有限元计算结果

从图8实体与片体有限元模型的计算结果可以看出，实体模型中（左）轴套与腹板连接处的应力分布是连续的，而片体模型中（右）轴套和腹板连

接处的应力分布是跳跃性的，显然对于轴套与腹板的连接强度评估，实体模型的结果更为接近实际。

从图9实体有限元模型计算结果（内侧和外侧）可以看出，轴套A的应力较高区域位于轴套与腹板连接焊缝焊趾处、轴套与销轴接触面受压侧，且综合应力（Von Mises）峰值约为755MPa，小于材料的抗拉极限900MPa，按照第4强度理论满足设计要求。

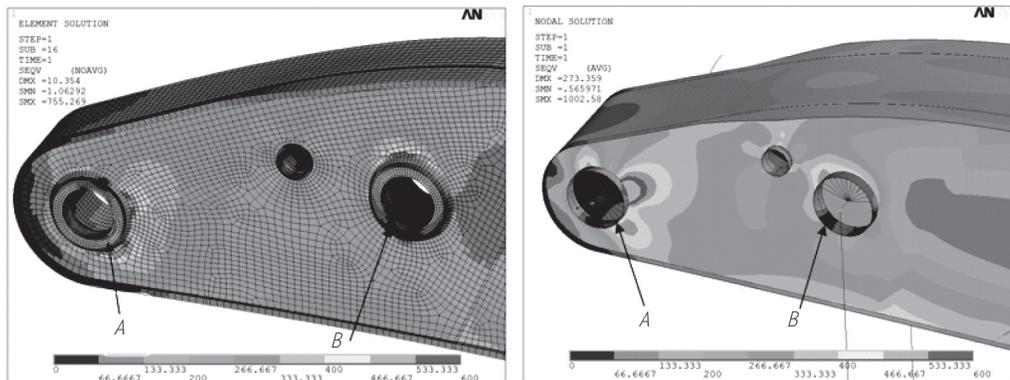


图8 实体与片体有限元模型计算结果对比

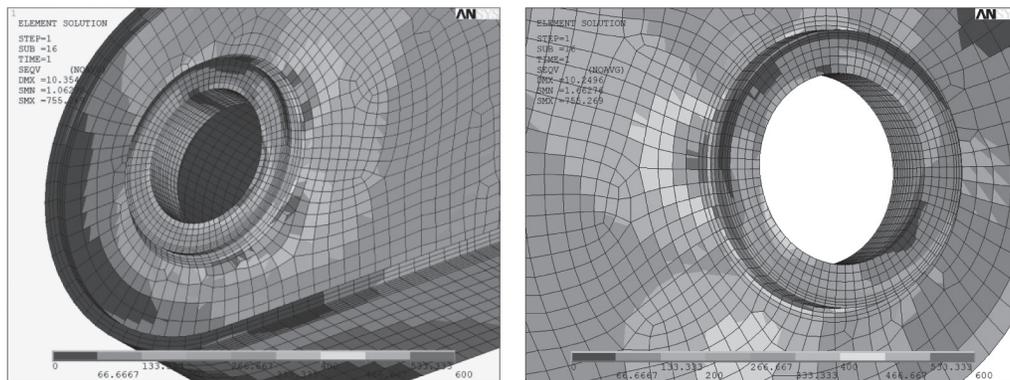


图9 轴套A与腹板连接处内、外侧应力分布

为进一步了解轴套与腹板连接处的应力状态，在ANSYS后处理时将应力计算结果以矢量的形式表达，以便于后续分析时选取相应应力状态下的许用应力进行校核。本文选取应力相对较高的轴套A与腹板连接处主应力进行分析，并以全局坐标系作为参考基准，从图10可以看出A区域和B区域主要受拉应力，C区域同时承受拉应力和压应力，拉应力峰值约为645MPa，小于材料的抗拉极限900MPa，满足设计要求。

通过实体有限元模型非线性接触仿真分析，设计者可以清晰地了解轴套本体、轴套与腹板连接处的应力分布和强度相对薄弱的部位，结合许用应力计算模型或强度理论，可对轴套本体、轴套与腹板的连接强度进行较为精确的评价。若轴套（或连接处）的应力较高或高应力范围较大，应对结构（或连接形式）进行优化设计以降低综合应力水平，同时对轴套与腹板连接处的焊缝质量等级提出相应要求。

（下转第58页）

(3) 步履式挖掘机多腿步行式机构的底盘与4条支腿在缓冲着陆过程承受着较大的冲击, 尤其是在正常与极限工况下, 最大应力处均出现于右后腿与底盘铰接座, 因此在改进时需要特别注意此结构, 确保步履式挖掘机的工作安全。

本文仅是对步履式挖掘机的空投着陆过程进行仿真, 尤其是对多腿步行式行走机构的安全性及可靠性进行探究, 可以在此基础上, 进一步研究累积损伤评估的方法, 为挖掘机的使用以及保障提供依据。

[参考文献]

[1] 庄卓, 等. 基于ABAQUS的有限元分析和应用

[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.

[2] ADAMDS Mars Exploration Rover Airbag Landing Loads Testing and Analysis [C]. 45th AIAA Structural Dynamics & Materials Conference Pasadena, CA Jet propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration, 2004: 1-11.

[3] 万志敏, 陈立平. 飞行器模型着陆特性试验研究 [J]. 物理测试, 2002, (1): 16-19.

[4] 空降车着陆缓冲过程车体动态应力仿真研究 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2010, (24): 25-29.

[5] 汪恢, 黄少方, 盛锋. 工程车空投模拟试验跌落瞬态分析 [J]. 工程机械, 2013, (10): 15-19.



(上接第52页)

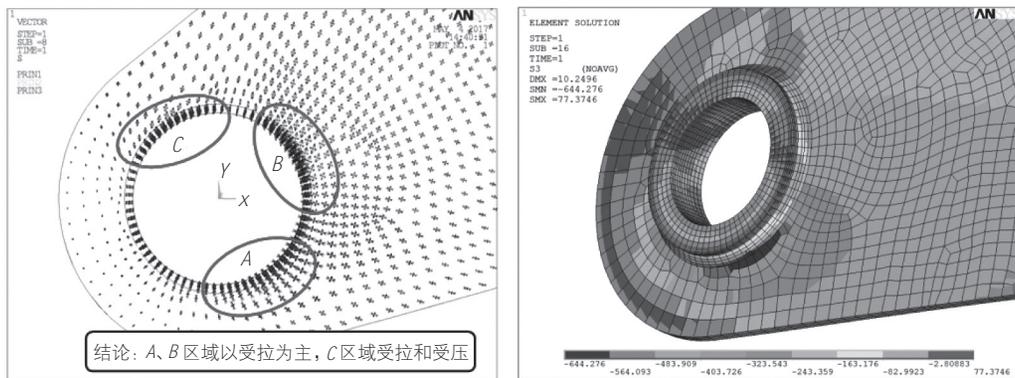


图10 轴套A与腹板连接处主应力分布

3 结束语

(1) 臂架轴套连接焊缝在工作过程中承受复杂的交变载荷, 应力分布(受拉或压)和应力峰值随臂架姿态变化, 设计者在结构设计时应进行全工况强度分析, 以焊缝的连接强度作为整体结构的强度, 充分评估其承载性能;

(2) 建立有限元模型时应充分考虑连接焊缝的结构形式和主参数, 上述分析结果充分表明采用实体非线性接触分析方法能较为精确地评估臂架轴套连接焊缝的受力状态, 对于轴套的连接设计具有较强的指导意义;

(3) 详细设计时应明确臂架轴套连接焊缝为关键焊缝, 并指定相应的质量等级, 制造过程中应

采取有效的工艺措施, 严格控制焊接质量, 减少或防止焊接缺陷的产生, 保证结构的制造质量满足设计要求。

[参考文献]

[1] 魏明钟. 钢结构 [M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 2000.

[2] 徐灏. 安全系数与许用应力 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.

[3] 董事尔, 吴伟东, 邓夕胜. 弯矩或扭矩作用下环形角焊缝的强度计算 [J]. 西南石油学院学报, 2005, (5): 95-97

[4] 赵万友. 接触问题的分析方法研究与工程应用 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.

