

# 液压拉伸器紧固螺栓的可靠性分析

王健 孙远

( 江阴兴澄特种钢铁有限公司 江苏 无锡 212400 )

**摘要:** 为解决液压拉伸器紧固可靠性分析难题, 改善人工操作精度差、连接件变形事故频发的困境, 保障压力容器平稳、安全运行, 文章简要阐述液压拉伸器结构特点和工作优势, 指出其具有载荷可测性、紧固同步性的特征。在此基础上引入模型搭建技术, 对紧固螺栓可靠性计算方法、测量器具进行探究设计, 经过案例检验可以较好地满足压力容器运行应用需求。另外, 列举了液压拉伸器紧固螺栓可靠性提升方法, 提出了加强维护保养、规范操作流程、重视校准过程等系列举措。

**关键词:** 液压拉伸器; 紧固螺栓; 可靠性

## 0 引言

液压拉伸器紧固螺栓法具有鲜明的科学性、先进性特征, 与传统液压扳手拆装方法相比, 其施加的拉伸力较为单一, 可以有效消除摩擦、螺杆转矩等造成的消耗, 保障紧固性的同时减少受力不均带来的损伤, 现阶段已经被广泛应用于发电、航空、钢铁等领域。但该方法也存在一定局限性, 操作不当很容易出现过载破坏、紧固不足等情况, 英国 UKOOA 组织发布的分析报告也印证了这一点, 报告中指出有超过 80% 的泄漏、松动与螺栓载荷设置不当有关, 极大影响了装置运行稳定性, 因此有必要进行分析和优化。

## 1 液压拉伸器结构特点和工作优势

在工业制造、生产领域, 大型螺栓连接问题至关重要。传统方式下多采用人力敲击、扳杠或者液压扳手等工具对螺栓进行拆卸安装, 很容易造成构件磨损、变形等问题, 当前工艺技术明显进步, 液压拉伸器逐步进入实践应用视域, 其装置结构如图所示。装置运行环节, 高压油泵运作并提供动力, 使液压油顺利进入活塞缸内推动活塞位移, 螺杆被带动发生弹性变形, 螺帽、机体之间由此出现空隙, 受力状态变更, 拉伸器再行施加压力完成预紧、加固。与传统方式相比, 该装置的优越性是十分明显的, 大致体现在以下几个方面:

(1) 能够确保螺栓载荷准确性。传统紧固方式下, 螺栓、螺母等构件之间是紧密贴合的, 各平面均可能产生摩擦力, 从而干扰转矩值精确性, 带来密封性下降、构件变形等风险。而使用液压拉伸器紧固螺栓时, 螺杆结构受力较为单一, 向上拉伸力不会产生额外摩擦、损耗, 有助于提升载荷精确性。

(2) 能够实现螺栓同步紧固。以往紧固操作中受技

术水平限制, 只能采用分布紧固的策略, 单个节点紧固完毕后产生的应力难以把控, 很容易影响整体的预紧力分布, 严重影响紧固质量。而液压拉伸器的出现破除了该种困境, 螺栓可以在设备支撑下, 完成同步紧固操作, 预紧力大小分布更加均匀, 受力更加合理, 有助于提升紧固效能。

(3) 能够为留存载荷检验提供便利。留存载荷是评判螺栓受力情况、连接情况的重要指标, 对后期运行使用意义重大, 使用液压拉伸器操作时, 只需要借助升压功能完成拨盘, 监测到螺母松动后中止, 并计算相应的留存载荷, 解决了旧有模式中计算难、评估难的问题。

## 2 液压拉伸器紧固螺栓可靠性设计与判断

### 2.1 模型搭建与计算

为方便分析和判断, 本文采用模型搭建方式描述液

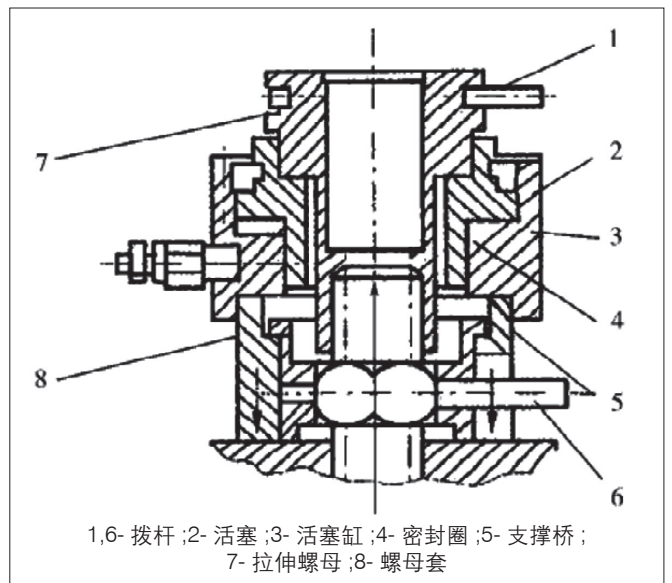


图 液压拉伸器装置结构

压拉伸器紧固螺栓受力情况,当螺栓联结结构处于轴向静载荷状态下,强度值应当呈现正态分布规律,且受到载荷分布、几何尺寸等因子的影响。当液压拉伸器作用于目标部位,螺栓、联结件均在外力影响下出现弹性变形,那么总拉力可以用如下公式表达:

$$F_2 = F_0 + F \frac{C_b}{C_b + C_m} = K_{F0}F + K_cF \quad (1)$$

式中:  $F_0$  - 预紧力;

$F$  - 工作拉力;

$C_b$ 、 $C_m$  - 分别代表螺栓、联结件刚度,用螺栓刚度除以二者之和,即可以得到相对刚度  $K_c$ ;

$K_{F0}$  - 预紧力系数。

在总拉力计算结果的基础上,还应考虑螺栓承受的切应力情况,这主要是由扭转操作引发,力矩  $T$  作用于各组成构件,使得螺栓、联结件之间产生额外作用力,即预紧力  $F_0$ ,其中拧紧力矩的产生是难以避免的,主要用于克服多项摩擦力矩。其中螺旋副摩擦力矩最为关键,计算公式为:

$$T_1 = F_0 \frac{d_2}{2} \tan(\psi + \phi_v) = F_0 K_1 d \quad (2)$$

式中:  $F_0$  - 预紧力;

$d$  - 螺纹公称直径;

$d_2$  - 螺纹实际中径;

$\psi$  - 螺纹中径升角;

$\phi_v$  - 螺纹副摩擦角;

$K_1$  - 修正系数。

得到总拉力和拧紧力矩后,还需要关注工作载荷大小、预紧力大小等,最后归一化处理得到复合应力的计算标准差计算公式,即:

$$\begin{aligned} \sigma_{\sigma_{ca}} &= \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{\delta}_{ca}}{\partial \delta}\right)^2 \sigma_{\sigma}^2 + \left(\frac{\partial \bar{\delta}_{ca}}{\partial \tau}\right)^2 \sigma_{\tau}^2} \\ &= \sqrt{\frac{\bar{\delta}^2 \sigma_{\sigma}^2 + (\sqrt{3}\bar{\tau})^2 (\sqrt{3}\sigma_{\tau})^2}{\bar{\delta}^2 + (\sqrt{3}\bar{\tau})^2}} \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_{\sigma_{ca}}$  - 复合应力标准差;

$\bar{\delta}_{ca}$  - 复合应力均值;

$\delta_{ca}$  - 复合应力;

$\tau$  - 扭转切应力;

$\bar{\delta}$  - 危险截面处螺纹拉应力均值。

据此,根据螺栓材料强度分布情况、压力条件等,即可间接推断可靠性量化参数。至此,有关液压拉伸器螺栓紧固可靠性与螺栓材质之间的理论模型就已搭建完毕。然而除构件材质之外,螺栓残余拉伸量也是影响可靠性的重要因素,液压释放可能造成变形能的损失,从而压缩残余拉伸量空间,制约后期装置的正常运行和使用。基于此,引入虎克定律对拉伸量情况进行分析,

计算公式为:

$$\Delta L = \frac{F_s \times L}{E \times A} \quad (4)$$

式中:  $\Delta L$  - 螺栓伸长量;

$F_s$  - 轴向载荷;

$L$  - 螺栓有效长度;

$E$  - 弹性模量;

$A$  - 螺栓截面积。

实践中部分螺栓存在多个直径段,还需要借助分段计算得到拉伸量,最后线性相加以确保拉伸量设置科学性。

## 2.2 数据测量装置设计

得到理论计算模型后,还需要对液压拉伸器紧固螺栓伸长量进行实时测量,传统的手工记录方式局限性较大,人工误读、漏记风险较高,因此引入自动化测量采集装置。系统中增设多个位移传感器,可以对拉伸量信号进行采集、存储,并通过 A/D 转换模块对接给总控台,现场采用 CAN 总线连接方式,由 RS-232 串口统一完成传送,多路数据整合、归集进入人机交互界面,可以有效防止疏忽、失误问题。系统安装秉持安全可靠、功能完备的原则,在传感器基础上,增设数值显示表、交流电变压器、电源模块等。正式作业环节,需要将拉伸器吊装至螺栓上,待到拉伸螺栓旋紧后,进行传感器指针调节,针体伸入拉体孔,并与螺栓头部相接触,检查无误后对仪表进行调零。液压泵正常运作,压力稳步上升到设计标准线后,拉伸量会对应增大到限值,接下来借助专用拨杆卸压,传感器就会实时记录、采集相关数据。

多通道数据处理模块接口开放,可以在 CAN 总线支持下接收传感器信息,并经过相应的转换、滤波和放大处理,完成后续的逻辑计算、判断误报过程。串口 RS-232 在整个过程中主要扮演上传、下载的中间方,支持外接 USB 设备、SD 存储卡等,方便数据库容量扩容,文件以 CSV 格式存储,并生成后续的分析报告。测量软件设计过程中,主要基于 C 语言环境展开,采用宏命令 DOPSoft 编程软件辅助操作,该软件兼容性较好,WindowsXP/7/Vista 平台等都可以使用。上位机设计部分,采用 LabVIEW 可视化软件辅助处理,可以根据需求进行历史数据查询、提取。考虑到可靠性分析环节可能涉及拉伸量控制问题,还可以提前设置上限值、下限值数据,对于不合格情况及时检测告警,以提升测试准确度。

## 2.3 检测结果

为阐明定量、定性方式在液压螺栓紧固可靠性中的应用思路,文章引入某蒸汽发生器螺栓紧固案例,汽缸额定工作压力为  $(1.8 \pm 0.12)$  MPa,构件内

径为360mm，加装垫片以提升密封性，铜皮石棉材质。根据现场紧固需求，采用42CrMo钢制作的螺栓构件，经测验强度为6.9级，同时测定抗拉强度，结果为1080MPa，选取5种不同直径螺栓，在不同压力条件下开展可靠性分析。部分组别中采用逐级升高油压的方式开展操作，实现检查了螺栓表面状态，排除了损坏、毛刺等问题，统一加入润滑剂进行养护，试验结果可见下表。

表 不同压力条件下液压拉伸器螺栓紧固试验结果

序号	压力条件 /MPa	螺栓规格	泄压前伸长量 /mm	设定拉力 /kN	实际伸长量 /mm	残留预紧力 /kN
1	150	M16 螺栓	0.63	1106.09	0.32	1.54
2	145	M20 螺栓	0.63	1106.09	0.30	1.49
3	140	M24 螺栓	0.63	1106.09	0.37	1.56
4	135	M27 螺栓	0.63	1106.09	0.38	1.67
5	130	M33 螺栓	0.63	1106.09	0.39	1.61

根据表中数据计算复合应力平均值为1.60，标准差为0.074，以此为准展开可靠性分析，发现在案例工况的同压力条件下，螺栓直径的影响最为明显，其中M33螺栓的偏差程度最小，相应的可靠度也更高，实践中要综合考虑复合损耗系数的影响，总拉力不能超过螺栓材料屈服极限的0.9倍。确定运行参数时，要考虑长度、弹性模量等条件，以泄压后螺栓伸长量为准，防止变形量释放环节挤压残余预紧力，为紧固可靠性的提升奠定坚实基础。另外，有研究指出，同等规格条件下，分阶段油压稳停工艺得到的预紧效果会稍好，也可以通过该种方式的搭配使用保障作业效能。

### 3 液压拉伸器紧固螺栓可靠性提升方法

#### 3.1 加强维护保养

液压拉伸器综合性能优良，但与传统的紧固工具相比，构造要更加复杂，因此日常应用维护过程中，要尽可能加强保养。从常见故障类型来看，油缸漏油是最为典型的表现，多由密封圈磨损、老化引发，放任不管很容易造成内部结构污染，加剧能源损耗的同时，影响紧固拉伸力控制精准度，带来严重的安全隐患。因此，要定期检查拉伸器内部的密封元件，备好更换、拆卸工具和器件，装附后及时放净空气，防止破坏内部真空环境。油箱液位不宜过高，通常维持在3/4即可，检查时顺带观察加油滤网的状态，尽可能保持清洁，使用的油液也要洁净，杂质含量不能过多且牌号要保持一致。现阶段工业化、现代化趋势愈发明朗，对构件的要求也愈发严格，对于不同部位螺栓液压拉伸器，要依照说明书所述做好对应管理，防止混用螺纹相同而油缸面积不同的装置，影响操作装配合理性。如果

在拆装过程中发现法兰等构件轻微的摩擦、刮蹭损伤，且瘢痕面积不超过25%，则可以出于应急角度进行简单维修，若检查后发现损伤较为严重，则必须进行镗孔等专业处理。构件镗孔后孔径发生变化，紧固螺栓也必须重新加工和装配，按照前述方法计算复合应力情况，推断预紧力参数，保障目标装置的平稳、顺利运行。

#### 3.2 规范操作流程

液压紧配螺栓拆卸安装过程中，要仔细阅读液压拉伸器使用说明，掌握各阶段操作技术及上次安装参数，拆卸环节逐步增大液压油压力值，待其达到安装既定值后方可停止，尝试施加拉力取出螺母，如果此时仍无法松动，可以尝试增加10%左右的压力，若情况仍未好转，则要及时暂停操作并寻找原因，严禁无依据地随意增大压力，防止油泵损坏、密封件损伤等问题。若加压达到规范上限仍旧未能脱出，则要根据实际情况选用热熔法等手段，对螺栓杆进行拆卸，注意不能影响到周围构件的完整性。安装环节，需要逐一检查连接部位，包括装置内孔、锥套、螺栓锥部等，借助专用清洁剂仔细清理，防止其表面附带油脂杂物、毛刺等，清洁完毕后涂抹润滑油、防咬剂，锥套放入方向应与拉伸方向一致，完成后绕到另一侧装配螺栓，依次安装止动板、液压拉伸器等。观察自动化仪表数值变更情况，当压力到达设计标准后，及时卸压完成拉伸，并卸去拉伸器和止动板。至此所有的轴向拉伸工作完成，实践操作环节，也可以借助金属拔棍辅助操作，螺母紧固完成后装设拉伸螺纹，待到压力达标后再行拧紧螺母，为保障受力均匀性，可以结合情况采用对角两两配对的顺序。

#### 3.3 重视校准过程

液压拉伸器紧固螺栓环节，校准操作精确性至关重要，直接影响着数据的真实程度，引入应用环节要科学选择压力表，在满足工艺需求的条件下，对仪器等级、成本、量程等进行合理控制。没有特殊要求的情况下，拉伸器误差要控制在±0.3%以内，相应地，压力表不能低于1.6级，同时给予最小工作压力更多关注，通常不能低于量程的1/3，可以通过校准试验提升量程适配性。标准测力仪同样是校准过程的重要装置，常用的测力传感器共两种，即拉向力传感器和环形测力传感器，前者的检测方式较为直接，且结构简单、精度较高，但1MN以上装置较为少见，主要是因为制造施工难度大，超过1.5MN拉力值的装置，还会出现溯源困难的问题。相比之下环形测力传感器结构更加紧密，且结果精确度与受力均匀程度关联较大，匀称性不佳时很容易造成误差。基于此，在量程允许范围内，推荐优先使用

拉向力传感器,后期维修较为便捷,且便于运输和溯源,能够适应多场景下的液压拉伸器高精度校准工作。高压泵选择环节,推荐应用气动液压泵,该种装置安全性更佳,输出的压力阈值较广,且支持连续启停操作,非常适用于液压拉伸器校准。

#### 4 结语

综上所述,文章简要阐述了液压拉伸器结构组成及优越特征,指出该种装置的应用可以显著提升载荷准确度,为同步紧固、留存载荷检测提供便利。在此基础上,讨论了液压拉伸器紧固螺栓可靠性分析方法,给出了复合应力标准差、平均差计算公式,设计实现了自动化、智能化的液压拉伸器数据采集系统,内部装配多通道数据处理模块,开放CAN总线接口,可以实现高效的试验数据采集。在案例工况下运行测试,发现螺栓直径、长度、弹性模量均会对紧固可靠性产生影响,实践中应当科学计算复合损耗系数,将总拉力限制在合理范围之内,以泄压后螺栓伸长量为准设置运行参数,适

当引入分阶段油压稳停工艺对现有工艺进行改造,最大限度保障目标设备的顺畅运行。

#### 参考文献:

- [1] 彭激文,杨双哲,陈全. 液压拉伸器校准方法研究和实验验证[J]. 工业计量,2021,31(05):1-4+34.
- [2] 蔡承奇,王光培,吴小岛. 液压拉伸器校准方法及数据分析[J]. 计量与测试技术,2021,48(02):60-62.
- [3] 廖兴祥. 液压紧配螺栓的拆卸及安装实例[J]. 航海技术,2020(06):57-59.
- [4] 房田,邓强. 螺栓液压拉伸器校准过程中应注意的问题[J]. 工程与试验,2020,60(02):81-82.
- [5] 卢志勇. 液压拉伸器的应用研究[J]. 化工设计通讯,2020,46(01):82-83.

**作者简介:**王健(1985.11-),男,汉族,江苏镇江人,本科,工程师/高级技师,研究方向:机械设计及其自动化。

(上接第69页)

性维修管理系统是未来的努力方向。

对于计划排程方面目前还存在以下问题:

- (1) 手动排程耗时长、学习成本高、优化目标单一,手动排程考虑因素不周全、存在出错概率等相关不足;
- (2) 后续日常计划智能排程是未来大趋势,实现计划的快速排程,生产提供科学、可靠的生产计划,通过智能排程系统的能力平衡,完成对设备资源合理、均衡地调配,提高了生产计划的准确性和可执行性。

#### 4 结语

本文通过对日常预防性维修计划管理实践进行梳理分析,识别待优化提升项,提出了完善十三周计划管理方法,开发长周期计划管理系统、超宽限期管理模块,建立设备运行状态跟踪系统、功能设备组等管理手段,实现了资源合理配置,增强了各生产部门之间的协作配合,提高了日常预防性维修计划的管理水平。日常预防性维修计划的管理创新实践与持续探索优化,是践行创新、协调、绿色的发展理念,实现了资源合理配置、计划项目在实施前的充分准备和合理安排,提高人员、工器具的利用率,降低运维成本的效果,大幅降低机组现存缺陷数量和预防性维修项目积压数量,从而提

高计划执行率和减少系统设备离线时间,最终提高机组设备的可靠性,确保机组安全稳定地运行。

#### 参考文献:

- [1] 王雷. 核电厂预防性维修与维护计划管理[J]. 科技视界,2021(17):170-171.
- [2] INPO(美国核电运行研究所). Work Management Process Description(AP-928,工作管理流程描述)[S]. Rev. 3, 2011.
- [3] 张涛,那闻飞,张衡,等. EAM系统和13周计划在福清核电厂的应用实践和研究[J]. 科技创新与应用,2015(19):75.
- [4] 吕顺,闵凡. 方家山核电长周期生产计划体系构建[J]. 科技视界,2016(27):408-409.
- [5] 邱文锋. 核电长周期生产计划体系构建研究[J]. 中小企业管理与科技,2018(7):14-15.

**作者简介:**郭肇进(1988.10-),男,汉族,湖北咸宁人,本科,工程师,研究方向:预防性维修计划管理;冉东太(1993.05-),男,汉族,四川南充人,本科,工程师,研究方向:预防性维修计划管理。