

大型液压启闭机活塞杆挠度影响因素数值研究

董家, 赵建平, 严根华, 侍贤瑞

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 采用有限元的方法,对液压启闭机油缸及活塞杆整体进行受压稳定性分析,研究影响液压缸活塞杆整体挠度的因素。通过对不同形式和断面的油缸和活塞杆进行模型试验和数值仿真研究,综合分析了液压缸导向套形式、导向套材料、支座布置位置(尾部、端部及中间支座)、液压缸布置方式(倾斜、竖直、水平)以及液压缸支座和活塞杆吊头摩擦系数等因素对活塞杆挠度的影响。结果表明,液压缸导向套形式、导向套材料对活塞杆挠度影响甚微;液压缸支座布置位置(尾部、端部及中间支座)对活塞杆整体挠度及临界压力影响明显,头部支承方式在挠度和临界力方面优于中部和端部支承;液压缸布置方式(倾斜、竖直、水平)对活塞杆挠度也有明显影响;油缸支座及活塞杆吊头的摩擦系数能有效的限制活塞杆的挠度。

关键词: 液压启闭机;活塞杆;挠度;支承方式;布置形式;摩擦系数

中图分类号: TV743

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)05—0192—06

Numerical Simulation on Influence Factors of the Bending of the Large-scale Hydraulic Hoist Cylinder Piston

DONG Jia, ZHAO Jianping, YAN Genhua, SHI Xianrui

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China)

Abstract: Through analyzing the bulking behavior of the hoist cylinder piston, the influence factors of the bending of the hoist cylinder piston are analyzed in this paper. Based on the experiment and simulation of different formations and sections hydraulic hoists, the factors with guide - sleeve formations and material, support location (back, middle and front), layout (incline, vertical, horizontal) and also friction factor on the support and hoist are considered to analyze the influence on the bending of the piston. The results indicate that the formations and material affect the deflection of piston little; the support location (back, middle and front) is with the large - scale effect on the bending of the piston and the front support formation exceling other formations with the respects of bending and critical pressure; the layout (incline, vertical and horizontal) also affects the deflection; the friction factor on the support and hoist restricts the deflection of piston effectively.

Keywords: hydraulic hoist; piston; bending; support; layout; friction factor

水工闸门在运行中,启闭机作为其唯一的运动控制装置,其工作的安全可靠对于水工枢纽的安全运行十分重要。启闭机本身面临的外荷载和约束条件较多,其中重要的一点就是闸门对启闭机的作用。在没有水流作用的条件下,闸门对于启闭机的

作用比较稳定;在不同水流组合作用下,闸门对启闭机的作用将不再稳定,甚至可能产生破坏性结果。在闸门与启闭机连接部位-启闭机活塞杆杆端(吊头)的荷载变化将最直接的表现出闸门给启闭机的反作用,以及启闭机对闸门的作用。

收稿日期:2020-06-04

修稿日期:2020-07-01

基金项目:水工液压启闭机整体受压稳定试验研究修购专项“水工液压启闭机试验平台升级改造”(Y111012)

作者简介:董家(1987—),男,山东巨野人,博士研究生,研究方向为水工结构流激振动。E-mail:tian.e.hu@163.com

通讯作者:严根华(1956—),男,上海人,教授级高级工程师,博导,主要从事高速水力学及水工结构流激振动方面的研究工作。

E-mail:ghyan@nhri.cn

以往的研究多从压杆稳定的角度开展启闭机液压缸的研究。虽然压杆稳定本身是一个较为经典的课题^[1-2],国内外针对压杆进行的研究较多,但大多数是对非组合杆件施加静荷载,与工程中液压缸实际工作的现状相比较有很大的差异,因此,研究成果的应用有一定的局限性。林荣川等^[3]、丁问司等^[4]和殷勇华等^[5]基于小挠度理论分析了组合杆件的临界荷载问题,但计算没有考虑液压缸自重、间隙、摩擦等因素的影响;魏晓红^[6]、郭应龙等^[7]采用组合杆件计算模式,考虑了活塞杆间隙、自重的影响,基于受压简支梁的挠度及临界力的计算模式导出液压缸组合杆件的挠度和临界力,但是在计算模式中将油缸和活塞杆作为刚性连接处理,这样在计算中增加了受压件的长度,计算的挠度偏大而临界力偏小。刘礼华等^[8]在文献[7]研究的基础上,考虑了液压缸支座位置处和活塞杆吊头处约束的作用(如摩擦约束等),在简支梁计算模式的上,两端增加了附件力矩以考虑支座及吊头处约束的作用。周志雄等^[9]研究了两端耳环与支座轴销之间的摩擦对启闭机承载了的影响,分析认为增大摩擦系数能够有效的提高启闭机的承载力。刘旭辉等^[10]总结了我国液压启闭机稳定分析的方法以及存在的问题。姚宇坚^[11]提出了液压启闭机抗震问题,而张思林^[12]探讨了液压启闭机可靠性设计的问题,都对未来启闭机的发展提出了展望。在实际工程中,如由活塞杆、缸筒等组合成的液压缸整体时,许多原先可以通过理论假定的约束、荷载、材料均质性、预挠度、间隙等新的问题将逐一展现,实际工程中的启闭机液压缸整体作为纵向受压的组合杆件^[13],表现出一些与刚性组合杆件纯理论设计时更不利的情况。因此,在前人研究的基础上,综合采用基于接触有限元方法的三维有限元仿真以及试验研究的方法综合分析研究影响启闭机活套杆挠度的因素。

1 研究的方法

1.1 有限元数值仿真

稳定问题一般为几何或材料非线性问题,由于液压缸失稳时材料强度一般在屈服强度以内,因此液压缸稳定分析采用几何非线性静力有限元理论模型。

1.1.1 三维模型的构建

(1) 几何模型构建。试验液压缸均处于全伸状态即最大工作行程(2 700 mm)位置;吊耳和铰轴都

是通过轴套分别连接中间轴和支座。根据试验中液压缸的几何工况和边界条件,针对三套试验缸分别建立三维几何模型(见图1—图3)。

(2) 材料模型。试验液压缸由多种材料构成,主要部件的材料特性:

缸体、活塞一、活塞杆:材料45钢,弹性模量210 000 MPa,密度7 850 kg/m³,泊松比0.288,45钢抗拉强度为600 MPa,屈服强度为355 MPa^[14]。

活塞及挡圈:材料Q235A,210 000 MPa,密度7 850 kg/m³,泊松比0.288。

导向套^[15]:材料ZCuAl10Fe3,弹性模量110 000 MPa,密度7 450 kg/m³,泊松比0.335。

非金属导向环^[15]:材料聚氟乙烯与锡青铜复合材料(PTFE)。

O型密封圈^[15]:材料橡胶,弹性模量7.84 MPa,密度1 100 kg/m³。

1.1.2 计算控制条件

在液压缸几何模型建立的基础上,考虑到边界条件的模糊性(是完全的铰接还是有一定抗弯刚度的弹性铰连接),我们建立了不同几何边界条件的有限元模型:

(1) 模拟完全的铰接:在吊耳处采用辐条结构形式代替中间轴,采用短梁取代铰轴伸出的耳部,并取消支座,通过施加特定的节点约束(辐条的刚度远大于材料刚度,辐条的汇聚节点六自由度约束释放沿吊耳轴旋转的自由度)。模拟完全铰。或者在吊耳处采用单节点代替吊耳与轴的连接,以短梁的形式连接活塞杆;支座处取消伸出的耳部,以短梁替代。

(2) 模拟弹性铰:对试验中的几何边界条件不加处理,边界仍然为吊耳-轴套(关节轴承)-中间轴连接和铰轴-轴套-支座连接,只是在建立有限元模型时在吊耳的内表面和中间轴的外表面及铰轴耳部的外表面和支座的内表面施加一层无厚度、有摩擦的接触单元,设定不同的摩擦系数 μ 值模拟不同抗弯刚度的弹性铰约束。具体的摩擦系数^[15]见表1,结构接触形式见图3(c)。

表1 吊头与支座处摩擦系数 μ 组合

吊耳处摩擦系数 μ	0.01	0.01	0.05	0.05	0.10
支座处摩擦系数 μ	0.01	0.05	0.05	0.10	0.10

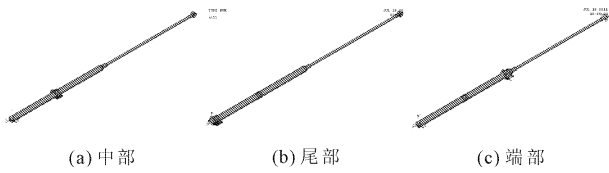


图 1 液压缸不同支座位置几何模型

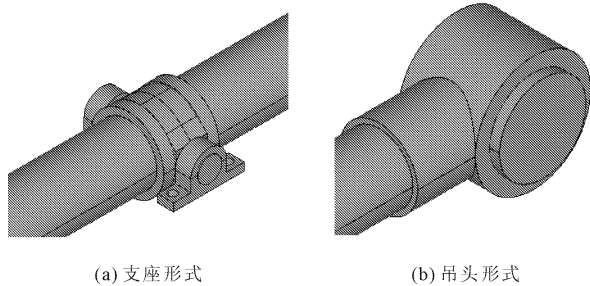


图 2 液压缸几何模型局部构造

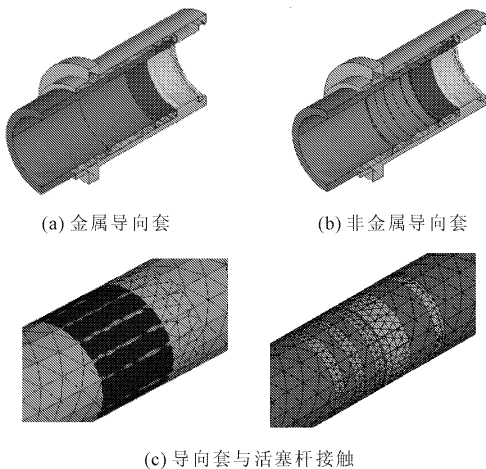


图 3 导向套局部构造与局部接触模型

1.1.3 导向套与缸体及导向套与活塞杆关系处理

活塞导向套与缸体及活塞杆导向套与活塞杆之间存在的是相对滑动接触连接而非解析理论中的固结关系。为了模拟这种关系,模型中并没有将其处理为简单的固结关系而是在活塞导向套的外表面和缸体的内表面及活塞杆导向套的内表面和活塞杆的外表面之间建立一层可以相对滑动的接触单元。这种处理虽然可能导致结构本身计算的不收敛,也并不完全符合液压缸本身摩擦产生的原理,但在一定的加压范围内(材料处于弹性范围),摩擦单元的处理还是可以模拟液压缸的摩擦阻尼的,也可以提高计算的可靠性。

1.2 解析计算模型

解析计算的基本假设源于材料力学处理压弯构件的基本假定:(1)材料为理想弹塑性材料;(2)小挠曲变形假定;(3)平截面假定。解析计算采用阶

梯杆模型,具体的计算方法可参考文献[6-7],本文不再赘述。

2 结果与分析

2.1 液压缸导向套形式对活塞杆挠度的影响

在同一液压缸相同的支座布置位置、支座及吊头摩擦条件以及相同的倾斜布置条件下,针对液压缸不同的导向材料(金属和非金属)、不同的导向距离因素分析计算其对活塞杆挠度的影响。计算试件为 106#试件(实心杆试件),计算结果见图 4。

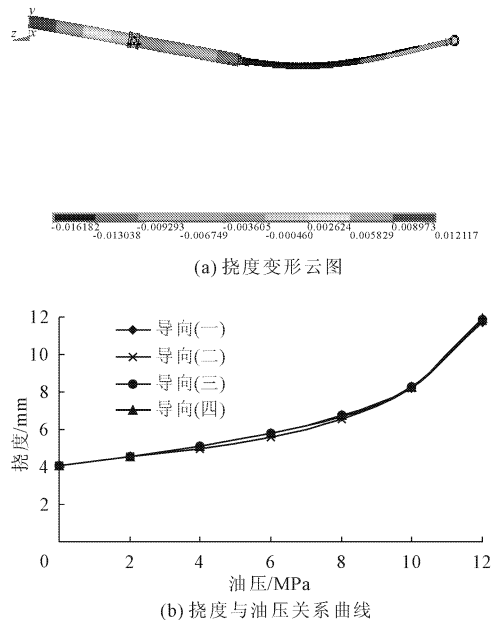


图 4 挠度变形/随油压的变化关系

根据 106#试验缸以及结合其他试验缸(104#和 105#)的计算结果分析,导向距离主要是从改善液压缸初始状态的挠度,进而提高运行过程的安全与稳定性考虑,一般需根据布置条件、受压荷载大小等因素确定,并非液压缸纵向受压稳定的影响因素;导向套的材料主要为确保导向套的局部承压应力,与液压缸纵向受压稳定问题没有关系。从计算结果不难看出,不同导向方式活塞杆挠度基本相同,但不同曲线并非重合,存在一定的偏差说明导向距离对液压缸受压稳定也是有一定的影响,不过这一偏差相对于挠度而言非常小而已。因此,难以通过改变导向距离、导向套形式及导向套材料等方面来解决纵向受压挠曲问题。

2.2 支座布置位置对活塞杆挠度的影响

针对 106#和 104#试验缸,在相同的导向套形式、相同边界约束条件及相同的倾斜度条件下,针对

支座布置对活塞杆挠度的影响进行分析计算。计算结果见图5。

根据106#和104#试验缸以及结合试验缸105#的计算结果分析,不同支承位置对应的液压缸挠度变化情况,各试验缸的变化情况基本一致。中部支承与尾部支承曲线反映的是滑动接触组合杆件纵向受压时挠度随油压变化的变化趋势,尾部支承曲线近似呈线性走势,纵向荷载产生的二次效应并不明显;而中部支承曲线解释了结构纵向受压稳定的前屈曲及后屈曲过程;端部支承曲线反映的是单一杆件纵向受压时挠度随油压变化的趋势,是典型的横向荷载与纵向荷载相互作用的过程;中部支承曲线与端部支承曲线互穿解释了液压缸不断加压过程中横向荷载与纵向荷载对挠度的影响变化情况。因而支座位置对挠度的影响最后实质性的反映在铰点间距、横向荷载的分布以及组合体系中各独立杆件刚度和长度的变化上,影响明显。

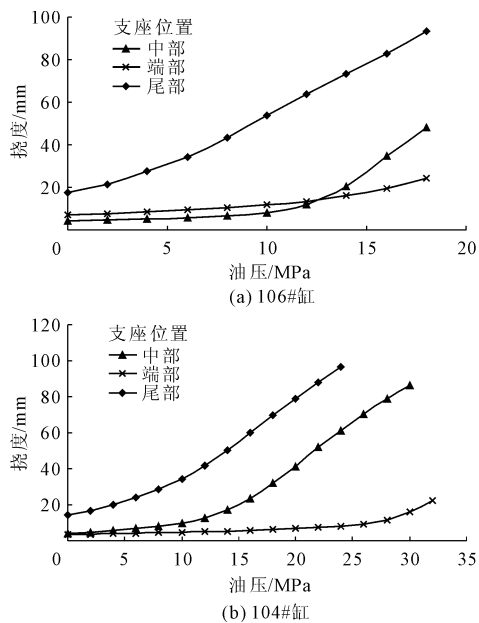


图5 支座布置位置对活塞杆挠度与油压关系的影响

2.3 液压缸布置方式对活塞杆挠度的影响

针对106#和104#试验缸,在相同的导向套形式、相同边界约束条件及相同的支座位置的条件下,针对液压缸布置形式对活塞杆挠度的影响进行分析计算。计算结果见图6。

根据106#和104#试验缸以及结合试验缸105#的计算结果分析,可以看出改变布置的倾斜角度,对挠度有影响,在油压较小(小于10MPa)以及油压较大(106#缸大于18MPa和104#缸大于24MPa)的情况下,倾角的影响较小,这两个阶段反应的是液压缸

活塞杆初期加压阶段和活塞杆失稳的阶段,中间变化比较明显的阶段属于稳定到失稳的过度阶段。另外不同曲线的拐点几乎没有变化,但拐点后的曲线斜率有变化,倾角越小,斜率越大,说明拐点有后延的趋势。总之,倾角对活塞杆挠度有影响,影响的程度随油压的变化而变化。

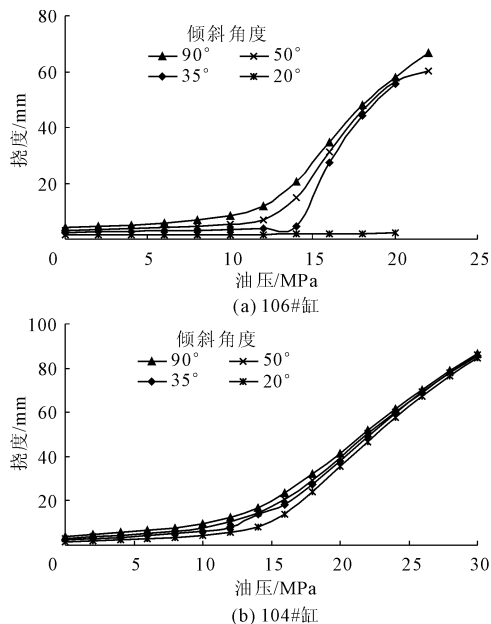


图6 液压缸布置方式对活塞杆最大挠度与油压关系的影响

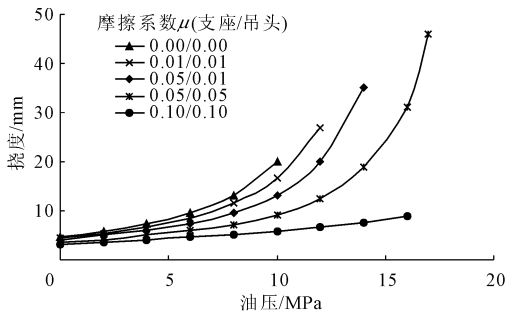
2.4 摩擦系数对活塞杆挠度的影响

针对104#试验缸,在相同的导向套形式、相同液压缸布置形式及相同的支座位置的条件下,针对边界约束条件对活塞杆挠度的影响进行分析计算。计算结果见图7。

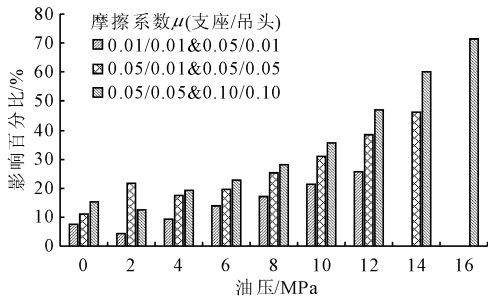
根据104#试验缸的计算结果分析,可以看出随着端部摩擦系数的增加,液压缸挠度减小;且摩擦系数扩大相同倍数的情况下,吊耳位置摩擦系数的影响较支座处大。主要原因在于吊耳端部摩擦力产生端弯矩阻止铰点的转动,减小了因活塞杆及缸体转动而导致的挠度,另外缸体的抗弯刚度大约为活塞杆刚度的23倍,在变形中缸体挠曲线基本为直线(刚体转动),比较而言支座摩擦影响要小一些。因此适当的增加摩擦因数可以显著地减小整体挠度,增大临界荷载,但摩擦阻力对于临界荷载的影响大小,由于摩擦系数取决于材料、结构、润滑条件等因素,且变化范围很大,在本研究项目中尚无法详细讨论,但可以作为工程应用的安全裕度来考虑^[16]。

2.5 有限元计算结果与解析计算结果的比较

解析计算根据1.2中内容进行,计算的结果及与数值模拟比较的数据见图8。



(a) 挠度随压力的变化曲线



(b) 不同位置摩擦对挠度影响

图 7 摩擦系数对活塞杆挠度的影响

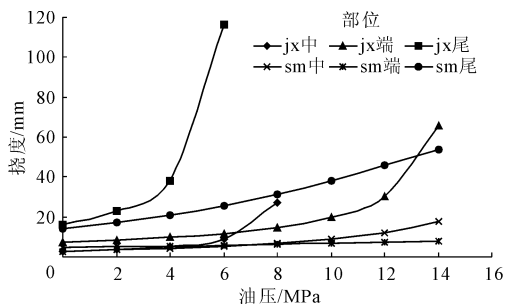


图 8 试验缸解析计算与数值模拟结果比较曲线

由图 8 可以看出解析计算相对于数值模拟有一定的差别。从挠度上来讲,在低压情况下,解析计算、无摩擦及有摩擦数值模拟挠度值差别不是很明显,较相近,误差在 60% 以内;但油压加到临界值(解析计算)附近时,解析计算方法挠度突然增加到很大,而数值模拟增加幅度较缓。原因很大程度上在于计算模型中影响因素的处理,解析计算不考虑支座及吊耳的摩擦且忽略液压缸内部摩擦的影响,导致结构计算提前失稳:初始状况或压力较小时,支承位置的摩擦阻力矩很小,对挠度影响较小,当随着压力增加摩阻力矩也增加,对挠度的影响增大;另外由于液压缸传递效率的影响,压力增加时液压缸内部的摩擦阻力增大,传递效率也会相应的发生变化(接触部位变形挤压造成),实际上加载的油压传递到活塞杆上打了一个折扣。因而在实际油缸设计中,应尽量减小液压缸内部的摩擦阻力,而适当增加端部支承的摩擦,不仅有利于减小缸筒的尺寸,而且

可以提高油缸自身的稳定性。从临界值的角度而言,无论是欧拉公式还是解析计算的超越方程,计算的结果都是偏小的,数值计算的临界值相对解析计算及欧拉公式临界值增加了 1 倍还要多。

3 结 论

从影响液压缸活塞杆挠度因素的角度考虑,通过数值模拟和解析计算的方法研究了液压缸导向套形式及材料、液压缸支座位置、液压缸布置形式以及液压缸支座及吊头处的摩擦系数等因素对液压缸挠度的影响,可以得出如下结论:

(1) 不同导向方式及材料对应活塞杆挠度基本相同,但不同曲线并非重合,存在一定的偏差说明导向距离对液压缸受压稳定也是有一定的影响,不过这一偏差相对于挠度而言非常小而已。

(2) 液压缸支座位置对液压缸整体挠度影响明显,尾部支承时挠度最大、中部支承次之,端部支承时挠度最小,在实际工程设计中,可通过改变支承位置的方式实现液压缸的最优运用。

(3) 液压缸布置形式(倾角)对活塞杆挠度有影响,影响分三个阶段:初期加压阶段(稳定阶段)和后期加压阶段(失稳阶段)倾角的影响较小,在活塞杆稳定到失稳的过度阶段,影响较大,影响的程度随油压的变化而变化。

(4) 液压缸支座及吊头处的摩擦对液压缸挠度产生较为明显的影响。改变吊耳轴及支承铰轴部位的摩擦系数,可以达到明显改变整体挠度的效果。在可能条件下适当的增加摩擦系数可以明显地减小整体挠度,提高临界压力,但考虑到摩擦系数可变化范围大,该影响因素可以作为实际工程的安全裕度来考虑。

(5) 在低压情况下,解析计算、无摩擦及有摩擦数值模拟挠度值差别不是很明显,较相近,误差在 60% 以内;但油压加到临界值(解析计算)附近时,解析计算方法挠度突然增加到很大,而数值模拟增加幅度较缓。原因很大程度上在于计算模型中影响因素的处理,解析计算不考虑支座及吊耳的摩擦且忽略液压缸内部摩擦的影响,导致结构计算提前失稳。

参考文献:

- [1] 铁摩辛柯 S P, 盖莱 J M. 弹性稳定理论[M]. 北京: 科学出版社, 1965.
- [2] 陈 骥. 钢结构稳定理论与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

- [3] 林荣川,魏莎莎. 基于小挠度曲线微分方程的液压缸稳定性分析[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2009, 6(4):280-282.
- [4] 丁问司,张旭,范亚军. 细长型液压启闭机液压缸筒活塞杆挠度的计算分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2014, 42(1):17-21.
- [5] 殷勇华,王孟. 水工液压启闭机液压缸稳定性计算研究[J]. 机械制造与自动化, 2015, 44(1):29-31.
- [6] 魏晓红. 超长大型液压缸的设计与研究[D]. 长沙:湖南大学, 2016.
- [7] 郭应龙,陶亦寿,龙小乐,等. 大型卧式液压缸的挠曲与稳定性计算原理及软件研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1996, 29(6):99-103.
- [8] 刘礼华,陈五一,魏晓斌,等. 大型液压启闭机油缸活塞杆的计算分析研究[J]. 工程力学, 2010, 27(4):185-189, 207.
- [9] 周志雄,魏晓红,陈伟光,等. 摩擦与配合间隙对超长大型液压缸承载能力影响规律研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(2):47-52.
- [10] 刘旭辉,周建方,任红. 我国水工液压启闭机稳定计算方法及存在问题[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(5):39-43.
- [11] 姚宇坚. 水工金属结构发展情况及相关问题探讨[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(2):1-4.
- [12] 张思林. 液压启闭机的可靠性设计与思考[J]. 水利水电技术, 2019, 50(S2):51-55.
- [13] 水电水利工程液压启闭机设计规范: NBT 35020—2013[S]. 北京:中国电力出版社, 2013.
- [14] 优质碳素结构钢: GB/T 699—1999[S]. 北京:中国标准出版社, 2000.
- [15] 成大先. 机械设计手册:第五卷[M]. 北京:化学工业出版社, 2008.
- [16] 水利水电工程钢闸门设计规范: SL 74—2013[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2013.

(上接第191页)

- [7] Liu J G, Ma B S, Cheng Y. Design of the Gongbei tunnel using a very large cross-section pipe-roof and soil freezing method [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 72:28-30.
- [8] Jia P J, Zhao W, Du X, et al. Study on ground settlement and structural deformation for large span subway station using a new pre-supporting system [J]. R. Soc. Open Sci., 2019, 6(2):181035.
- [9] Jia P J, Zhao W, Chen Y, et al. A case study on the application of the steel tube slab structure in construction of a subway station [J]. Applied Sciences, 2018, 8(9):1437.
- [10] 赵文,贾鹏蛟,王连广,等. 地铁车站 STS 新管幕构件抗弯承载力试验研究[J]. 工程力学, 2016, 33(8):167-176.
- [11] 贾鹏蛟,赵文,关永平,等. STS 新管幕构件抗弯性能试验研究及数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(8):2738-2746.
- [12] 贾鹏蛟,赵文,郝云超,等. 不同结构参数下 STS 管幕构件力学性能的数值分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(8):1177-1181.
- [13] Jia P J, Zhao W, Guan Y P, et al. Experimental study on the flexural behavior of steel tube slab composite beams and key parameters optimization [J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 6(2):181035.
- [14] 谢欣. 沈阳地铁 STS 工法钢管混凝土横向连接正截面抗弯性能研究[D]. 沈阳:东北大学, 2014.
- [15] 赵文,姜宝峰,贾鹏蛟,等. STS 管幕结合洞桩法修建地铁车站数值模拟研究[J]. 应用力学学报, 2017, 34(4):756-762, 821.
- [16] 张超哲,赵文,刘松玉,等. 地下支护新型管幕结构横向刚度的等效方法与实例验证[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(6):1-12.
- [17] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
- [18] 东南大学,同济大学,天津大学. 混凝土结构:中册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008.