

基于实测数据的液压机预应力拉杆刚度分析

王宏亮^{1,2,3}, 魏海涛^{1,2,3}, 贾 鋆^{4,5}, 李 晶¹, 马志刚¹

- (1. 兰州兰石集团有限公司能源装备研究院, 甘肃 兰州 730314; 2. 兰州兰石能源装备工程研究院有限公司, 甘肃 兰州 730314;
3. 兰州兰石集团有限公司 工业设计中心, 甘肃 兰州 730314; 4. 兰州兰石重工有限公司, 甘肃 兰州 730314;
5. 甘肃省金属塑性成型装备智能控制重点实验室, 甘肃 兰州 730314)

摘要: 预应力拉杆是锻压机全预紧组合机架的重要组成部分和关键受力部件。为了研究快锻液压机实际工作时拉杆的真实变形情况及组合机架的预紧状态, 针对 45 MN 液压机在额定工况下拉杆的应变进行了贴片测试, 同时运用 Ansys 软件对与测试相同工况下的全预紧组合机架进行了静力学结构仿真, 将测试结果与仿真结果对比分析, 得出拉杆在工作中的真实应变水平和位移量, 校核了有限元分析的可信度, 为液压机设计和拉杆预紧工艺提供了理论依据和数据支撑。结合理论计算、有限元模拟、现场实测数据, 通过运用 3 种理论与实测工具方法, 互相校验验证, 分析了拉杆在工作中的真实变形状态, 掌握了机架的实际预紧水平。

关键词: 快锻压机; 组合式机架; 刚度; 应变; 位移量

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.08.023

中图分类号: TG315.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 08-0161-06

Stiffness analysis on prestressed tie rod for hydraulic press based on measured data

Wang Hongliang^{1,2,3}, Wei Haitao^{1,2,3}, Jia Yun^{4,5}, Li Jing¹, Ma Zhigang¹

- (1. Energy Equipment Engineering Research Institute, Lanzhou LS Group Co., Ltd., Lanzhou 730314, China;
2. Lanzhou LS Energy Equipment Engineering Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730314, China;
3. Industrial Design Center, Lanzhou LS Group Co., Ltd., Lanzhou 730314, China;
4. Lanzhou LS Heavy Equipment Co., Ltd., Lanzhou 730314, China;
5. Key Laboratory of Intelligent Control of Metal Plastic Forming Equipment, Gansu Province, Lanzhou 730314, China)

Abstract: The prestressed tie rod is an important part and the key force components of full preload combined frame for forging press. Therefore, in order to research the real deformation condition of tie rod during the actual working for fast forging hydraulic press and the preload state of combined frame, the strain of pull rod for 45 MN hydraulic press under the rated working condition was tested by patch test, and the static structure simulation of full preload combined frame under the same working condition as the test was carried out by software Ansys. Then, the test and simulation results were compared and analyzed, and the real strain and displacement amount of the rod in operation were obtained, which verifies the credibility of the finite element analysis and provides theoretical basis and data support for the hydraulic press design and the preload process of tie rod. Furthermore, combining the theoretical calculations, finite element simulation and on-site measured data, the real deformation state of tie rods in operation was analyzed, and the actual preload level of frame was grasped by using three theoretical and measured tooling methods to verify each other.

Key words: fast forging press; combined frame; stiffness; strain; displacement amount

锻压行业是制造业的基础, 锻造水平是衡量国家机械工业水平的重要指标。随着我国制造业的快速发展, 对大吨位快锻压机的需求越来越多, 国内外大型快锻液压机几乎均采用了全预紧组合式机架^[1], 机架内设置有多组预应力拉杆, 这种结构具

备良好的力学性能, 同时能够有效降低机架的整体质量。预应力拉杆作为机架中的关键受力部件, 承受循环交变载荷, 其实际应变状态关系到快锻液压机的疲劳寿命和安全使用^[2-3]。

该型液压机为双柱上压式, 总高度约为 13.9 m, 总宽度约为 6.6 m, 活动部分总质量为 1.978×10^5 kg, 快降速度为 $230 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 活动梁行程为 0~2300 mm, 额定锻造力为 45 MN, 额定工作

收稿日期: 2024-01-08; 修订日期: 2024-04-12

作者简介: 王宏亮 (1992-), 男, 学士, 工程师

E-mail: 1272808380@qq.com

压强为 31.5 MPa, 如图 1 所示。组合式机架由上横梁、下横梁、立柱、拉杆和圆螺母等构成, 如图 2 所示。拉杆是快锻压机结构中的关键部分, 它通过预应力将上下横梁、立柱连接在一起, 使机架有较好的整体性和刚度^[4-5]。



图 1 45 MN 液压机

Fig. 1 45 MN hydraulic press

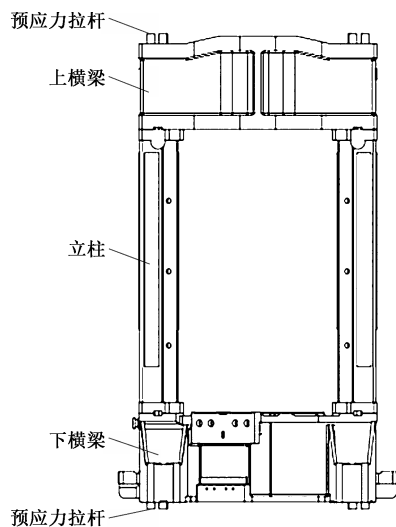


图 2 全预紧组合机架

Fig. 2 Full preloaded combined frame

机架在未加载时整体受压, 拉杆正向拉伸, 正载加压后横梁处于压弯组合状态, 立柱所受压力减小; 偏载加压后横梁处于压弯扭组合状态, 拉杆偏心受拉, 立柱偏心受压。如图 3 所示, 拉杆两端设有大螺母, 大螺母上配有小螺钉, 预紧时通过拧紧小螺钉, 螺钉与横梁间的反作用力使大螺母产生远离上梁的位移趋势^[6], 拉杆的预伸长使其有回缩趋势而施加预应力。

如图 4 所示, 拉杆属于变截面杆件结构, 总长度为 13310 mm, 直径为 $\Phi 220$ mm 段的长度为 11208 mm, 直径为 $\Phi 200$ mm 段的长度为 700 mm,

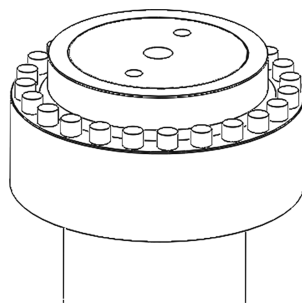


图 3 拉杆端部圆螺母

Fig. 3 Round nut at end of tie rod

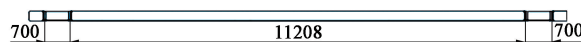


图 4 拉杆结构

Fig. 4 Structure of tie rod

拉杆实际工作长度为 3 段之和, 即 12608 mm, 其余部分未参与预紧, 故不在考虑范围内。正载锻造工况下, 拉杆在压机工作和非工作状态下均处于单向拉伸状态, 外侧立柱导向区域有 6 个构造孔, 在下部构造孔进行应力贴片测试, 取得拉杆在工作时的应变数据。同时, 对预紧机架在工作和未工作时的两种工况进行静力仿真。

1 空载状态拉杆应变分析

拉杆长期承受交变载荷, 会产生疲劳损伤和塑性蠕变, 同时考虑到立柱的刚度和截面积, 在综合各种因素后选取预紧力系数为 1.5。由于各拉杆所处位置和预紧次序不同, 内力状态存在差别, 图 5 和表 1 分别为 10 根拉杆的位置和预紧后的内力水平。预应力组合机架所承受的载荷为 10 根拉杆的预紧力和自重, 拉杆最大预紧力为 7670 kN、最小预紧力为 6300 kN, 合计预紧力为 69680 kN。由于拉杆自身变形和与机架的刚性位移^[7], 预应力损失约为 20%, 拉杆的最大拉力变为 6210 kN。

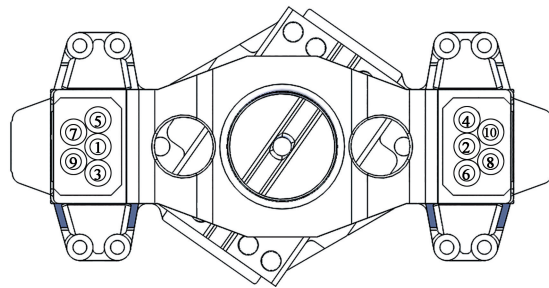


图 5 拉杆位置与编号

Fig. 5 Position and numbering of tie rod

表 1 各拉杆的内力 (kN)

Table 1 Internal forces for each pull rod (kN)

拉杆编号	初始预紧力	剩余预紧力
1, 2	7670	6210
3, 4	7300	5860
5, 6	6950	5520
7, 8	6620	5240
9, 10	6300	4940

1.1 拉杆理论伸长量

拉杆理论伸长量的表达式为：

$$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 = \frac{F_1 L_1}{EA_1} + \frac{F_1 L_2}{EA_2} = 10.04 \text{ mm} \quad (1)$$

式中： ΔL 为拉杆的总伸长量； ΔL_1 为直径为 $\Phi 220$ mm 段的伸长量； ΔL_2 为直径为 $\Phi 200$ mm 段的伸长量； F_1 为初始预紧力； L_1 为直径为 $\Phi 220$ mm 段的拉杆初始长度； L_2 为直径为 $\Phi 200$ mm 段的拉杆初始长度； E 为弹性模量； A_1 、 A_2 分别为直径为 $\Phi 220$ 和 $\Phi 200$ mm 段的拉杆截面积。

1.2 拉杆理论应变

直径为 $\Phi 220$ mm 段的拉杆的微应变 ε_1 为：

$$\varepsilon_1 = \frac{F}{EA_1} = \frac{5860000}{206000 \times 37994} = 7.49 \times 10^{-4} \quad (2)$$

直径为 $\Phi 200$ mm 段的拉杆的微应变 ε_2 为：

$$\varepsilon_2 = \frac{F}{EA_2} = \frac{5860000}{206000 \times 31400} = 9.06 \times 10^{-4} \quad (3)$$

因两段拉杆的截面属性不同，造成抗拉刚度存在差异，施加预紧力时直径为 $\Phi 200$ mm 段的拉杆的应变比直径为 $\Phi 220$ mm 段的拉杆的应变大。

1.3 拉杆仿真应变

在 SolidWorks 中对锻压机机架完成等比例三维建模，在 Ansys Workbench 中对机架结构进行有限元建模，整体应用四面体网格控制，机架网格尺寸为 100 mm，拉杆网格尺寸为 50 mm，网格质量优秀。确定结构的边界条件，包括约束、载荷和接触等，空载时机架的受力状态如图 6 所示。

(1) 约束条件：压机机架由锚钉穿过基础梁（底座），固定于地基，因此，在基础梁底面施加固定约束，限制面上节点的三向平动和三向转动自由度。立柱上导向最高位置施加 1 mm 间隙约束，模拟活动梁对立柱水平方向的限位作用。

(2) 载荷条件：压机机架在未加载时仅受拉杆预紧力的作用，按照表 1 中各拉杆的受力数据进行加载，所有预紧力由机架承受，以立柱承压为主，

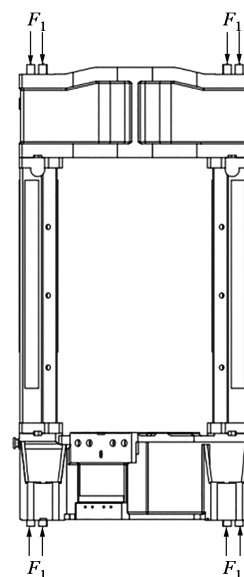


图 6 空载工况下机架受力简图

Fig. 6 Schematic diagram of force on frame under no-load working condition

横梁承弯为辅。

(3) 接触条件：接触是实现零部件之间力传递的环节，合理的接触设置是获得高精度有限元分析结果的关键。基础梁与下横梁之间为绑定装配，采用 Bonded 类型；上下横梁与立柱之间为可分离的摩擦接触，采用 Frictional 类型，摩擦因数为 0.2；圆螺母与上下横梁之间为可分离的摩擦接触，采用 Frictional 类型^[8-9]，摩擦因数为 0.3；圆螺母与拉杆之间为螺母螺杆型装配，无平动和转动自由度，采用 Bonded 类型。

模拟得到拉杆未加载时的应变数据如图 7 所示。拉杆的受力状态为正向拉伸，图 7 所示区域所取节点的平均应变为 7.56×10^{-4} ，拉杆理论计算应变为 7.49×10^{-4} ，仿真准确度为 99.1%。

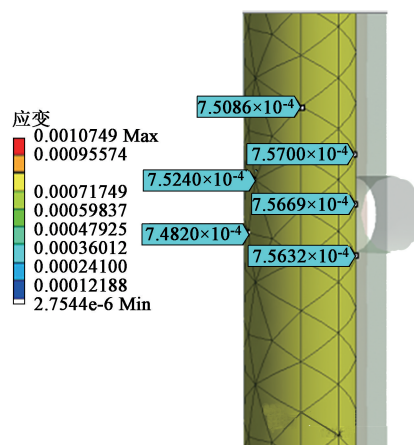


图 7 空载工况下拉杆应变

Fig. 7 Strain of tie rod under no-load working condition

2 加载后拉杆应变分析

测试所选的拉杆编号为 3 号和 4 号, 位于立柱内侧两边。测试位置在立柱侧下方构造孔内, 如图 8 所示。由于测点接近高温热料, 热辐射会影响应变片的测试精度, 同时为了消除安全隐患, 故采用绝热石棉对应变片进行隔热处理。测试采用单轴电阻应变片, 电阻应变片是用于测量应变的元件, 它能够将机械构件上应变的变化转换为电阻变化, 由直径为 $\Phi 0.02 \sim \Phi 0.05$ mm 的铜丝或镍铬丝绕成栅状, 用很薄的金属箔腐蚀为栅状, 夹在两层绝缘薄片中间(基底)制成。镀银铜线与应变片丝栅连接, 作为电阻片引线。实验中采用的应变片的采集频率可达 1 kHz, 能够实现快速且高精度的电压数据传递收集。



图 8 测点位置

Fig. 8 Location of measuring point

采集仪使用 TMR-300 小型多通道数据采集仪, 如图 9 所示, 可根据测量目的连接多种传感器测量单元, 采样频率最高达 100 kHz, 提供 USB 和 LAN 接口, 支持高分辨率模式, 可实现高频高精度应变数据采集^[10]。

2.1 测试数据分析

现场实测的工况有 5 种拔长工况、3 种镦粗工况、5 种精整工况, 取锻压力较大的工况, 即工件拔长, 取某稳定区段内的数据进行分析。所取时段内的平均压力为 19.3 MPa, 如图 10 所示, 换算为油缸作用力, 为 27.56 MN。将拉杆在油缸压力加载前和加载后两种工况下的应变做减法, 得到测试时的应变 $\varepsilon_{\text{测}}$ 为 4.87×10^{-5} 。

图 11 为测得的拉杆应变原始数据, 前一段较水平的曲线为应变片工作前的初始值^[11], 测试数据受环境、温度等的影响有 ± 50 的震荡。需要进行拟合



图 9 TMR-300 小型多通道数据采集仪

Fig. 9 TMR-300 small multi-channel data acquisition instrument

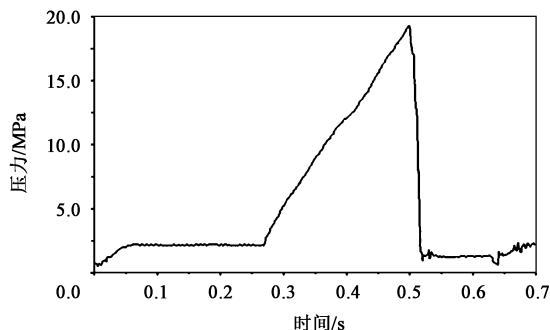


图 10 缸内的压力曲线

Fig. 10 Pressure curve in cylinder

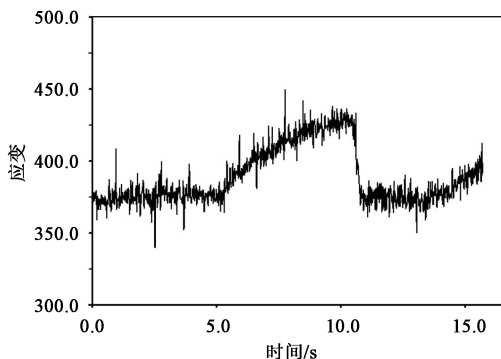


图 11 拉杆应变原始曲线

Fig. 11 Original strain curve of tie rod

处理。数字滤波是波形分析处理的重要手段, 对采集的原始信号进行加工处理, 将测试信号中无用或次要成分的波滤除掉, 使波形更容易分析判断。

运用 Python 数据处理软件对原始数据进行取杂滤波处理后^[12], 得到如图 12 所示的较光滑曲线, 提取拉杆加载前后的时段内的平均应变数据进行分析。曲线前后段为空载阶段拉杆的应变数据, 中间阶段为压机加载时的应变数据。

2.2 仿真结果分析

在 Ansys Apdl 中对机架进行有限元建模, 拉杆

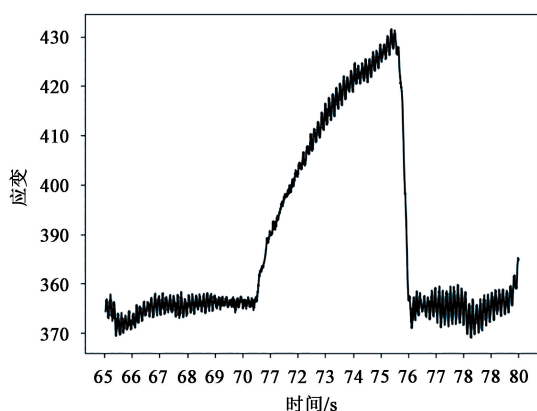


图 12 滤波后拉杆应变曲线

Fig. 12 Strain curve of tie rod after filtering

采用 Link 单元模拟, 压机的全部动力来源于 3 个液压缸, 压力通过油缸和柱塞分别传递向上和向下的作用力, 所有的压力最终均作用于机架, 横梁受弯, 立柱受压, 拉杆受拉^[13]。在 1.3 节所述的工况设置的基础上, 在上横梁油缸法兰装配面上添加 25.76 MN 竖直向上的作用力, 加载后机架的受力状态如图 13 所示, 其中, F_2 为锻造压力, 模拟与测试相同的工况, 对组合式机架进行有限元分析, 得到如图 14 和图 15 所示的分析结果。

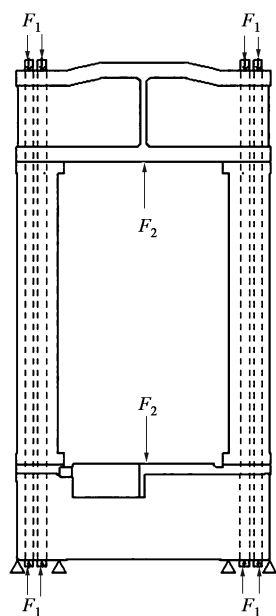


图 13 加载工况下机架受力简图

Fig. 13 Schematic diagram of force on frame under working loading conditions

一般来说, 应变分布受到加载方式影响的区域, 其长度大致为截面的横向尺寸。根据圣维南原理, 无论杆件是何种加载方式, 只要合力与杆的轴线重合,

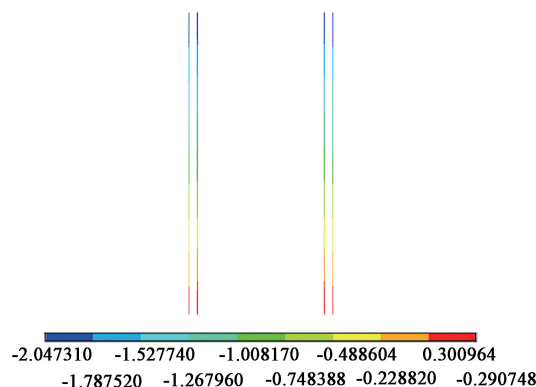


图 14 空载工况下的拉杆位移

Fig. 14 Displacement of tie rod under no-load working condition

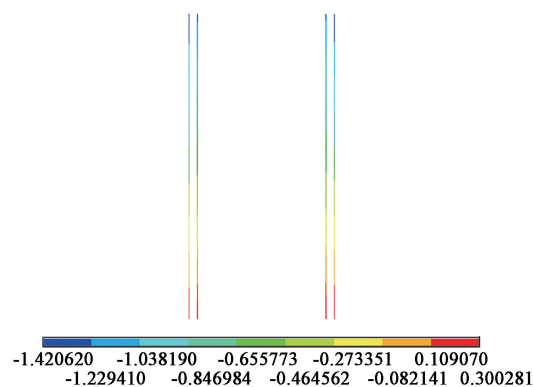


图 15 加载工况拉杆位移

Fig. 15 Displacement of tie rod under loading condition

即认为预应力拉杆仿真为典型的拉压杆计算^[14]。

Ansysis 仿真结果中的位移为刚体位置移动和柔体变形量之和, 对于单向拉伸的杆件, 受力为轴向拉力, 因此, 位置移动等于变形量, 即位移结果等于拉杆的伸长量。拉杆在机架加载后, 所受拉力增大, 拉杆继续伸长。由于下横梁接近固定约束位置, 拉杆下端位移量较小, 而上端位移较大, 拉杆总变形为两端位移差的绝对值。在仿真结果中分别提取拉杆空载和加载工况下的位移, 两种工况下的位移差值 Δu 为:

$$\Delta u = |u_{\text{空载}} - u_{\text{加载}}| = |-2.05 - (-1.45)| \text{ mm} = 0.6 \text{ mm} \quad (4)$$

即拉杆在加载后的应变 $\varepsilon_{\text{仿}}$ 为:

$$\varepsilon_{\text{仿}} = \frac{\Delta u}{L} = 4.76 \times 10^{-5} \quad (5)$$

式中: $u_{\text{空载}}$ 和 $u_{\text{加载}}$ 分别为拉杆空载和加载工况下的位移; L 为拉杆工作长度, 即 12608 mm。

对比测试应变结果 4.87×10^{-5} , 仿真准确度达到 97.7%。

3 结论

(1) 预应力组合机架在工作时, 预紧力为锻造力与立柱-横梁间作用力之和, 立柱-横梁间作用力与锻造力呈负相关。

(2) 快锻液压机在额定预紧力作用下, 拉杆理论计算应变为 7.49×10^{-4} , 施加额定工作载荷后拉杆应变为 4.87×10^{-5} , 可见加载后拉杆变形相对于空载时的变形很小, 可认为加载时拉杆不伸长。

(3) 相同工况下, 空载时进行了仿真结果与理论计算结果对比, 准确度达到 99.1%; 加载时进行了仿真结果与测试数据对比, 准确度达到了 96.7%, 证明了有限元仿真结果的准确性。

参考文献:

- [1] 贾祥际, 杨晋. 快锻压机移动工作台支架预紧结构分析计算 [J]. 重型机械, 2009 (4): 35-37, 40.
Jia X J, Yang J. Analysis and calculation of the pre-tensional structure of moving table support in quick forging hydraulic press [J]. Heavy Machinery, 2009 (4): 35-37, 40.
- [2] 陈俊, 段宏斌, 陈进, 等. 大型模锻液压机 C 形机架安装方案设计 [J]. 重型机械, 2012 (3): 65-68.
Chen J, Duan H B, Chen J, et al. Design of installation scheme of C-shaped rack on large-scale die forging hydraulic press [J]. Heavy Machinery, 2012 (3): 65-68.
- [3] 单东生, 贾向东, 赵长财. 全预紧组合框架液压机的预紧力研究 [J]. 机械工程学报, 2015, 51 (14): 86-87.
Shan D S, Jia X D, Zhao C C. Research on pre-tension force of the preloaded composite frame hydraulic press [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51 (14): 86-87.
- [4] 熊丹丹. 弹性成形液压机机身结构分析与优化设计 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
Xiong D D. Structural Analysis and Optimization of Frame for Elastoforming Press [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [5] 冯消冰, 吴任东, 袁朝龙, 等. 预应力碳纤维缠绕制造重型压机机架的强度分析 [J]. 复合材料学报, 2017, 34 (9): 2106-2113.
Feng X B, Wu R D, Yuan C L, et al. Strength analysis of heavy press frame made by prestressed carbon fiber winding [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34 (9): 2106-2113.
- [6] 贾喆, 翁直威, 张松. 基于螺栓组残余预紧力一致性的研究

- [J]. 制造技术与机床, 2023 (8): 124-132.
- Jia Z, Weng Z W, Zhang S. Study on consistency of residual pre-tightening force of bolt group [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2023 (8): 124-132.
- [7] 牛福维, 赵刚, 杨波, 等. 预应力拉杆结构在机场登机桥上的应用 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2014, 38 (6): 1355-1357.
Niu F W, Zhao G, Yang B, et al. Application of prestressed tie rod structure in airport boarding bridge [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2014, 38 (6): 1355-1357.
- [8] 张起樑. 20 MN 快锻压机预应力机架的优化设计 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2013.
Zhang Q L. Optimal Design of Prestressed Frame of 20 MN Fast Forging Press [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2013.
- [9] 樊明振. 基于虚拟样机技术的 31.5 MN 快锻液压机机液联合仿真研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
Fan M Z. Research on Hydraulic Co-simulation of 31.5 MN Fast Forging Hydraulic Press Based on Virtual Prototyping Technology [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [10] 候川江. 高精度电阻应变数据采集系统设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
Hou C J. Design of High Precision Resistance Strain Data Acquisition System [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [11] 刘涛, 熊家鑫, 范重, 等. 钢拉杆受力性能试验研究 [J]. 工程力学, 2023, 40 (S1): 126-135, 157.
Liu T, Xiong J X, Fan Z, et al. Experimental study on mechanical properties of steel tie rod [J]. Engineering Mechanics, 2023, 40 (S1): 126-135, 157.
- [12] 罗忠, 石宝龙, 张小霞, 等. 拧紧工艺的螺栓连接结构预紧力变化规律 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2023, 44 (2): 215-222.
Luo Z, Shi B L, Zhang X X, et al. Variation law of preload of bolted joint in tightening process [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2023, 44 (2): 215-222.
- [13] 刘富文, 周威豪, 李清野, 等. 30 MN 三梁四柱式双动拉伸液压机机身的有限元分析及轻量化设计 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (2): 161-167.
Liu F W, Zhou W H, Li Q Y, et al. Finite element analysis and lightweight design of 30 MN three-beam four-column double-action tensile hydraulic press [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (2): 161-167.
- [14] 徐欣. 燃气轮机周向拉杆转于中拉杆失效的计算与试验 [J]. 机械制造, 2019, 57 (12): 123-127.
Xu X. Calculation and test of failure of gas turbine circumferential tie rod in center [J]. Machinery, 2019, 57 (12): 123-127.

