



移动扫码阅读

王 洁, 赵显昆, 姜 彪, 等. 基于 AHP-模糊模型的液压支架试验台中梁销轴节点优化研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 250-259.

WANG Jie, ZHAO Xiankun, JIANG Biao, *et al.* Research on middle beam pin shaft node of hydraulic support test bench based on AHP-Fuzzy analysis model[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 250-259.

## 基于 AHP-模糊模型的液压支架试验台中梁销轴节点优化研究

王 洁<sup>1,2</sup>, 赵显昆<sup>1</sup>, 姜 彪<sup>3</sup>, 张建卓<sup>1</sup>, 郭 昊<sup>1</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 机械工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 重庆文理学院 智能制造工程学院, 重庆 402160;

3. 山东兖矿智能制造有限公司, 山东 邹城 273500)

**摘 要:** 大吨位液压支架试验台加载试验中梁销轴节点端部孔壁区域峰值载荷过大, 为改善销轴变形导致应力作用范围非连续性的状况, 基于赫兹接触理论建立试验台销轴节点变形后峰值接触应力的数学理论模型, 利用 ANSYS 软件对销轴节点模型仿真分析并与理论模型进行比对。结果表明: 模拟结果与理论数据具有良好的 consistency。结合实际工程现场应用, 确定了降低销轴节点孔壁接触区域应力峰值的 5 个主要指标, 即: 轴孔缝隙、轴套管厚度、节点板厚、倒角长度、倒角角度, 运用 Minitab 软件对 3 个评价指标: 应力、切应力和应变建立主效应云图; 根据模糊数学理论建立 3 个评价指标的隶属度函数, 利用层次分析法(AHP)确定评价指标的权重向量, 结合模糊综合评价和最大隶属度原则得到 5 个主要指标的最优解参数组合, 并对该参数组合进行模拟。结果表明: 优化后的销轴节点立柱峰值应力降比 58.77%, 耳板节点峰值应力降比 12%。最优解参数组合在 50 MN 液压支架试验台的设计研发中得到了现场应用, 验证了该优化参数的合理性, 有效提升液压支架试验台加载试验时中梁销轴的使用寿命。进而证明: 通过对销轴节点增设斜坡倒角, 设置合理的初始间隙以及板材厚度, 能够很大程度上减少销轴节点峰值载荷, 并改善应力作用范围长度, 为重型设备插拔定位销轴组件设计的实际工程应用提供了参考。

**关键词:** 液压支架; 销轴节点; 赫兹接触理论; 模糊数学; 层次分析法; 最大隶属度原则

中图分类号: TD35 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2023)08-0250-10

### Research on middle beam pin shaft node of hydraulic support test bench based on AHP-Fuzzy analysis model

WANG Jie<sup>1,2</sup>, ZHAO Xiankun<sup>1</sup>, JIANG Biao<sup>3</sup>, ZHANG Jianzhuo<sup>1</sup>, GUO Hao<sup>1</sup>

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. School of Mechanical Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China; 3. Shandong Yankuang Intelligent Manufacturing Co., Ltd., Zoucheng 273500, China)

**Abstract:** In order to improve the situation of discontinuity in the range of stresses caused by pin deformation, the mathematical theoretical model of peak contact stresses after pin node deformation in the test rig was established based on the Hertzian contact theory, and the pin node model was simulated and analysed using ANSYS software and compared with the theoretical model. The results show that the simulation results are in good agreement with the theoretical data. Combined with the actual engineering field application, five main indicators for reducing the peak stress in the contact area of the pin node hole wall were determined, namely: shaft hole gap, shaft casing thickness, node plate thickness, chamfer length, chamfer angle, and the use of Minitab software to establish the main effect cloud diagram for the three evaluation indicators: stress, tangential stress and strain; establish the affiliation function of the three evaluation indicators according to the fuzzy mathematical theory, and use the hierarchical Analysis of Hierarchy (AHP) was used to determine the weight vector of the evaluation indexes, and the optimal combination of parameters for the five main indexes was obtained by combining fuzzy comprehensive

收稿日期: 2022-07-18 责任编辑: 周子博 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1145

基金项目: 国家自然科学基金联合基金资助项目(U1908222); 辽宁省博士科研启动基金计划资助项目(2020-BS-254)

作者简介: 王 洁(1981—), 女, 内蒙古乌兰浩特人, 副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: sunny\_jiewang@163.com

evaluation and the principle of maximum subordination, and the combination of parameters was simulated. The results show that the optimized pin node column peak stress reduction ratio is 58.77%, and the peak stress reduction ratio of the trunnion node is 12%. The optimal combination of solution parameters was applied in the field in the design and development of the 50 MN hydraulic support test stand, which verified the reasonableness of the optimised parameters and effectively improved the service life of the centre beam pin during the loading test of the hydraulic support test stand. It was further demonstrated that by adding slope chamfers to the pin nodes, setting reasonable initial clearances and plate thicknesses, the peak pin node loads could be reduced to a large extent and the length of the stress range improved, providing a reference for the practical engineering application of the design of plug-in and plug-out positioning pin assemblies for heavy equipment.

**Key words:** hydraulic support; pin shaft node; Hertz contact theory; fuzzy mathematics; AHP-method; principle of maximum affiliation

## 0 引 言

销轴是机械设备连接中常用的单向铰接件,在大型、重型设备中,销轴的设计尺寸大,承载力高,其力学性能直接影响整机的稳定性和可靠性<sup>[1-3]</sup>,国内外针对设备的销轴设计均制定了严格的标准<sup>[4-7]</sup>。而液压支架试验台对液压支架整机的受力状况、强度和安全性等参数提供测定手段,是液压支架结构的可靠性和井下作业安全性的重要保证<sup>[8-10]</sup>。在对液压支架进行强度和疲劳寿命试验时,首先支架顶梁所受到的外力作用于移动中梁上,再通过 4 根销轴将加载力传递到液压支架试验台的 4 根承载立柱上,承载立柱与底梁相连。在试验台对液压支架进行内、外加载试验中,特别是进行偏载、扭转加载试验中,销轴受力更加恶劣,销轴受力后出现挠曲变形,进而在轴套管的端部出现挤压变形,造成局部区域的应力集中现象。在现场调研中发现,中梁销轴在加载试验出现严重变形、断裂等恶劣情况的发生,容易造成安全事故,因此,重型设备开发过程中销轴的应力分析成为设计的关键环节。

国内外学者围绕销轴节点开展了大量研究:李渊等<sup>[11]</sup>探讨了销孔间隙、耳板厚度和耳板间距 3 个参数对节点疲劳性能的影响,研究显示销孔间隙对疲劳性能的影响最大,耳板间距次之,耳板厚度的影响最小。王学文等<sup>[12]</sup>建立了多销轴约束模型,分析了不同位置销轴对液压支架稳定性的影响,分析表明立柱与底座的销轴对支架的横向稳定性影响最大。姚廷强等<sup>[13]</sup>基于多体动力学和刚体有限元方法,提出三维圆柱铰间隙碰撞和动力学特性的接触动力学方法,建立等效刚体单元与梁单元有限元模型,提出统一形式的动力学方程。杨朝飞等<sup>[14]</sup>研究了 35CrMnSi 销轴的淬火热处理对其尺寸变化的影响,研究结果为销轴的尺寸设计及加工工艺设计提供指导。张泽宇等<sup>[15]</sup>采用试验研究的方法分析了销轴连接的铸钢件的力学性能,给出承载力理论计算公式的中设计强度系数取值为 1.2 的建议。李仕华等<sup>[16]</sup>基于接

触-分离模型推导出含间隙铰的多体动力学方程,并通过 ADAMS 软件对其动力学特性进行了仿真分析,分析表明重力的释放对销轴运动副的多项指标有较大影响。ANTONI<sup>[17]</sup>对带套管的销轴节点进行非线性分析,验证受力方向、初始间隙和摩擦力对销轴节点接触应力的影响。高啸等<sup>[18]</sup>将接触刚度矩阵和赫兹接触理论相结合,考虑销轴节点接触突变的特性,推导出接触应力求解方程。

研究围绕一种垂直加载载荷为 50 MN 的液压支架试验台的中梁销轴开展研究。研究销轴受力时,为了应对销轴变形导致的应力作用范围非连续性问题,基于赫兹接触理论对立柱和耳板节点进行优化;探究销轴系统的不同参数对连接节点应力、应变的影响,并对其进行了优化;对优化后的参数模型进行有限元分析,分析结果证明了优化方案的可行性。本研究为重型设备的销轴连接工程设计和实际应用提供参考。

## 1 液压支架试验台中梁销轴赫兹接触理论

### 1.1 液压支架试验台中梁销轴节点

研究设计了世界首台承压达到 50 MN 的液压支架整机试验台,液压支架试验台销轴节点如图 1 所示。试验台加载前需要将中梁移动到液压支架顶梁的上方,通过销轴将中梁与支架试验台的立柱固定,根据国家标准对掩护式支架进行结构件强度测验,

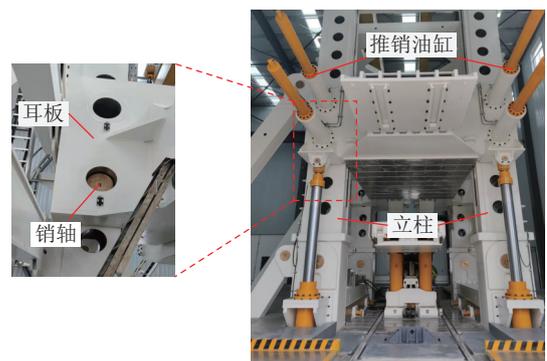


图 1 液压支架试验台销轴节点

Fig.1 Pin shaft node of hydraulic support test bench

并按1.2倍额定工作压力加载试验,试验过程中载荷通过液压支架传递至中梁,中梁带动销轴与立柱中的套管克服初始间隙后紧密接触相互挤压。故中梁销轴沿轴线向上方向产生挠曲变形,这导致销轴与立柱端部孔壁接触区域出现应力集中,易使销轴连接节点破坏<sup>[19]</sup>。

## 1.2 赫兹接触理论

销轴连接节点简图中各构件参数的几何参数如图2a所示,其中 $t$ 为立柱的厚度, $t_0$ 为耳板的厚度, $s$ 为耳板与立柱之间的间隙, $d$ 为销轴的直径, $d_0$ 为耳板销孔的直径。耳板与立柱的受力情况如图2b所示。

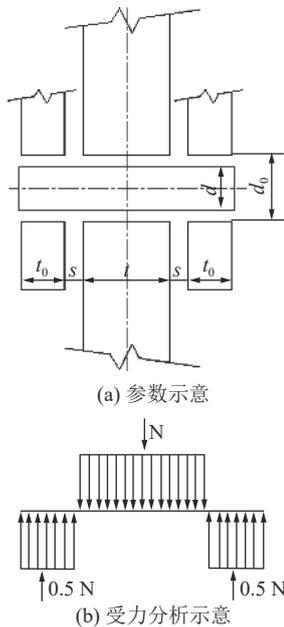


图2 销轴连接节点简图及受力分析

Fig.2 Schematic and stress analysis of pin connection node

采用赫兹接触理论对液压支架试验台中梁销轴节点进行接触分析。赫兹接触理论主要研究两物体因外部荷载相互挤压而产生接触应力的分布规律<sup>[20-21]</sup>。

销轴与耳板、立柱轴套管之间的接触可视为赫兹接触理论中的两圆柱体接触,是典型的线接触问题。接触体承受法向荷载后在接触线附近产生变形,形成矩形接触面,根据赫兹理论推导出接触面的最大接触压应力为

$$p_0 = 0.4182 \sqrt{\frac{pE(R_1 + R_2)}{R_1 R_2}} \quad (1)$$

式中: $p_0$ 为最大接触压应力,MPa; $p$ 为均布压力,MPa; $E$ 为弹性模量; $R_1$ 、 $R_2$ 为销轴和耳板开孔的曲率半径,mm;

实际工程中,销轴与轴套管之间的接触面并非光滑,销轴可能发生转动并产生滑动摩擦;其次二者的曲率接近,初始间隙较小,导致实际的接触区域比

线性接触区域大;实际的接触面积与接触应力的分布范围长度会随着外载荷的增大而减小,应力会呈现端部大中间小的不均匀分布;因此销轴与立柱、耳板轴套管之间的接触并不满足赫兹接触理论的一般性假设。为了解决该问题,张滨等<sup>[22]</sup>提出了一种基于赫兹接触理论的销轴局部接触应力峰值的修正计算公式。本文采用该应力修正计算公式,即:

$$p_r = \alpha\beta\gamma p_0 \quad (2)$$

式中: $p_r$ 为修正后的接触压应力,MPa; $\alpha$ 为摩擦修正系数,取1.02; $\beta$ 为接触应力修正系数; $\gamma$ 为结构安全系数,取1.05。

根据销轴与耳板和立柱之间变形后接触应力分布的差异性,分别对立柱和耳板的峰值接触应力修正系数 $\beta_1$ 和 $\beta_2$ 进行计算。

$$\beta_1 = k_1 \frac{1 + 9.95\lambda_1 + 3.47\lambda_1^2 + 1.45\lambda_1^3}{38.54\lambda_1 + 8.66\lambda_1^2} \quad (3)$$

$$k_1 = -0.79 \frac{b_1}{d} + 7.04 \left( \frac{b_1}{d} \right)^{0.56} \quad (4)$$

$$\beta_2 = k_2 \frac{1.02 + 24.57\lambda_1^{1.2} + 0.71\lambda_2^2}{100.27\lambda_1 + 5.43\lambda_2^{0.24}} \quad (5)$$

$$k_2 = 4.47 + 3.24 \frac{b_2}{d} + 0.28 \left( \frac{b_2}{d} \right)^2 \quad (6)$$

式中: $\lambda_1 = s/t$ ;  $\lambda_2 = t_0/t$ ;  $b_1$ 、 $b_2$ 分别为立柱和耳板的孔截面半宽,当 $b/d$ 大于1.2时,取1.2。

## 2 销轴连接节点有限元分析

根据液压支架试验台中销轴连接节点的参数,利用ANSYS软件建立实体单元有限元模型,如图3

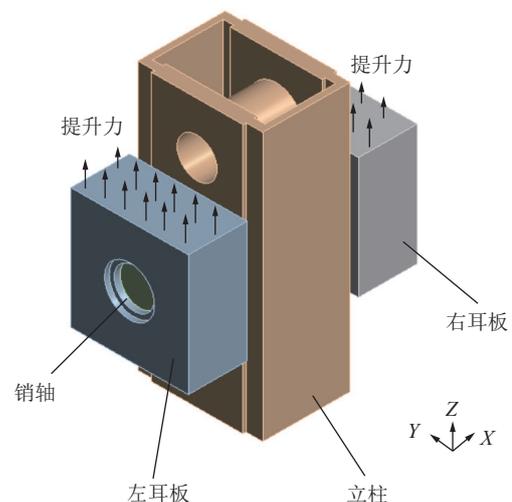


图3 销轴连接有限元模型

Fig.3 Finite element model of pin connection

所示。销轴节点由左、右耳板，立柱和销轴组成，根据图 2a 中销轴连接节点图中，各参数设置如下： $t=900\text{ mm}$ ， $t_0=630\text{ mm}$ ， $s=20\text{ mm}$ ， $d=380\text{ mm}$ ， $d_0=385\text{ mm}$ 。耳板的提升力为 12.5 MN，各个构件的材料属性见表 1。分析时销轴与耳板和立柱之间的接触设置为面-面接触；接触方式设置为摩擦，摩擦因数  $\mu=0.2$ ；提升力以均布力的形式作用于左、右耳板；同时赋予耳板与提升力方向一致的自由度模拟实际的提升状态；中间立柱的边界条件根据实际工作情况设置为固定约束。

表 1 销轴、耳板、立柱材料属性

Table 1 Material attribute of pin shaft, ear plate and column

节点	材料	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断面伸长率/%	断面收缩率/%
耳板、立柱	Q550D	750	550	16	39
销轴	35CrMnSiA	1 900	1 544	11	47

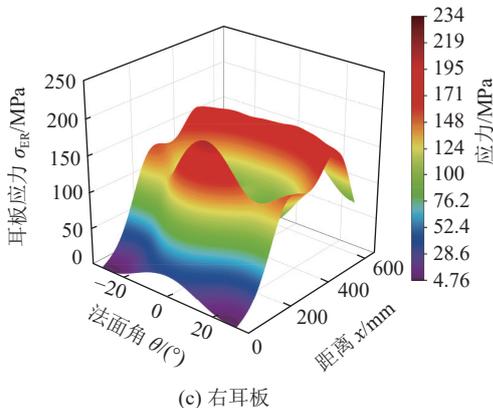
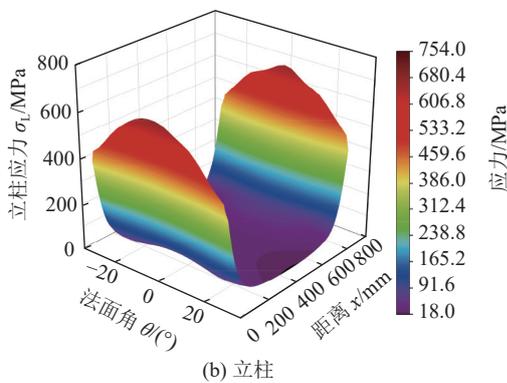
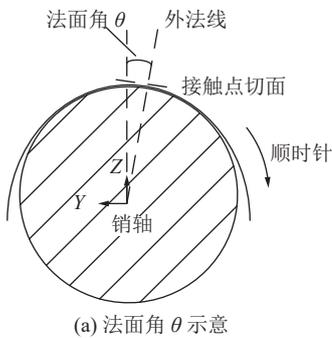


图 4 销轴节点三维接触应力云图

Fig.4 3D contact stress nephogram of pin joint node

立柱以及右耳板的接触应力的三维示意如图 4b、4c 所示。图中立柱节点的坐标原点为立柱左侧端面与销轴轴线交点处；右耳板的坐标原点为右耳板左侧端面与销轴轴线的交点处。 $x$  表示沿销轴径向方向，应力点到立柱左侧端面和右耳板左侧端面的距离；立柱和右耳板三维应力接触云图中两个坐标系共用  $x$  轴， $x$  轴与销轴轴线重合。法面角  $\theta$  为销轴剖面上各接触点的切面的外法线与竖直方向的夹角，且外法线必过轴剖面的圆心，如图 4a 所示，当  $\theta=0^\circ$  时，外法线方向竖直向上，顺时针为正。

由立柱和耳板的三维接触应力图可知，销轴与立柱、耳板间的局部接触应力峰值产生在与立柱、耳板的端部孔壁接触区域。同时，由于销轴产生弯曲变形，销轴与耳板、立柱之间的轴向的接触边界不连续，导致立柱与耳板应力分布沿  $x$  方向分布形状相异，立柱呈现两端大中间小的“U”型对称分布；耳板则为沿着  $x$  方向呈现增加、减小，随后增加、减小的“M”型应力分布。表 2 列出了有限元分析与理论分析结果及误差，立柱与耳板的峰值载荷与公式计算数值的误差较小，有限元分析设置的参数基本可靠的。

表 2 销轴节点有限元分析与理论分析数值对比

Table 2 Numerical comparison between finite element analysis and theoretical analysis of table pin joint

节点	$P_s$ /MPa	$P_t$ /MPa	$e$ /%
立柱	753.55	747.523	0.81
耳板	242.49	239.512	1.2

注： $P_s$ 为有限元仿真分析中节点接触应力峰值； $P_t$ 为式(2)计算结果； $e$ 为相对误差。

### 3 基于 AHP-模糊模型的优化分析

销轴节点应力集中区域为孔壁接触区域，实际工程应用中，通过在孔壁区域增设倒角来降低应力，但倒角参数角度  $\theta$ 、长度  $L$  的取值以及对应力幅值的影响目前并未有相关的研究，此外，孔壁间隙、板材厚度的大小也会影响应力幅值，故影响接触区域应力指标的参数主要为轴孔缝隙、板材厚度和销轴孔的倒角长度和角度。AHP (Analytic Hierarchy Process) 层次分析法是一种常用的优化体系方法，旨在建立影响目标层因子的层次结构基础上，量化因子

间权重,得到最优因子的权重<sup>[23]</sup>。本章在正交试验分析的基础上,采用模糊分析方法对销轴节点进行AHP-模糊多目标参数优化分析。

### 3.1 正交试验设计与分析

销轴连接节点的组成结构及参数如图5所示。图中各参数分别为轴孔缝隙  $H$ 、轴套管厚度  $T_1$ 、节点板厚  $T_2$ 、倒角长度  $L$ 、倒角角度  $\theta$ 。表3为5因素正交试验因素水平表 $L_{25}(5^5)$ 。

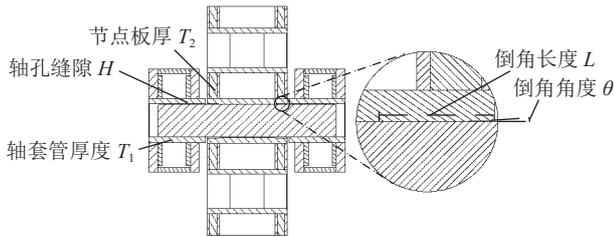


图5 销轴连接节点参数

Fig.5 Parameter diagram of pin joint node

表3 正交试验因素水平

Table 3 Orthogonal test factor level

水平	因素				
	轴孔缝隙 $H/\text{mm}$	轴套管厚度 $T_1/\text{mm}$	节点板厚 $T_2/\text{mm}$	倒角长度 $L/\text{mm}$	倒角角度 $\theta/(\circ)$
1	2	50	110	220	0.1
2	3	53	120	240	0.2
3	4	56	130	260	0.3
4	5	59	140	280	0.4
5	6	62	150	300	0.5

销轴节点结构的评价指标分别为应力  $\sigma$ 、切应力  $\tau$  以及应变  $\varepsilon$ 。应用 ANSYS 对不同销轴节点结构进行仿真分析,计算出评价指标  $\sigma$ 、 $\tau$  和  $\varepsilon$  相应的数值,分析结果见表4。

在正交试验中,不同因素对结果的影响的比重

表4 不同参数节点参数评价指标计算结果

Table 4 Calculation of parameter evaluation index of nodes with different parameters

编号	$H/\text{mm}$	$T_1/\text{mm}$	$T_2/\text{mm}$	$L/\text{mm}$	$\theta/(\circ)$	$\sigma/\text{MPa}$	$\tau/\text{MPa}$	$\varepsilon/\text{mm}$
1	2	50	110	220	0.1	593.98	327.58	$3.46 \times 10^{-3}$
2	2	53	120	240	0.2	575.23	308.72	$2.87 \times 10^{-3}$
3	2	56	130	260	0.3	558.22	280.45	$2.88 \times 10^{-3}$
4	2	59	140	280	0.4	635.67	318.81	$3.03 \times 10^{-3}$
5	2	62	150	300	0.5	724.17	363.81	$3.45 \times 10^{-3}$
6	3	50	120	260	0.4	589.49	295.37	$2.81 \times 10^{-3}$
7	3	53	130	280	0.5	665.12	333.75	$3.17 \times 10^{-3}$
8	3	56	140	300	0.1	640.19	347.02	$3.88 \times 10^{-3}$
9	3	59	150	220	0.2	571.16	307.7	$3.18 \times 10^{-3}$
10	3	62	110	240	0.3	544.67	281.11	$2.75 \times 10^{-3}$
11	4	50	130	300	0.2	595.36	317.95	$3.11 \times 10^{-3}$
12	4	53	140	220	0.3	534.9	287.39	$3.01 \times 10^{-3}$
13	4	56	150	240	0.4	592.7	296.87	$2.82 \times 10^{-3}$
14	4	59	110	260	0.5	640.55	324.26	$3.07 \times 10^{-3}$
15	4	62	120	280	0.1	625.22	346.4	$3.92 \times 10^{-3}$
16	5	50	140	240	0.5	615.25	326.43	$3.02 \times 10^{-3}$
17	5	53	150	260	0.1	639.02	354.27	$3.99 \times 10^{-3}$
18	5	56	110	280	0.2	603.41	336.75	$3.61 \times 10^{-3}$
19	5	59	120	300	0.3	569.95	298.35	$3.19 \times 10^{-3}$
20	5	62	130	220	0.4	576.13	288.49	$2.75 \times 10^{-3}$
21	6	50	150	280	0.3	558.04	298.24	$3.06 \times 10^{-3}$
22	6	53	110	300	0.4	602.67	302.23	$3.10 \times 10^{-3}$
23	6	56	120	220	0.5	597.68	310.31	$2.96 \times 10^{-3}$
24	6	59	130	240	0.1	666.98	362.37	$4.18 \times 10^{-3}$
25	6	62	140	260	0.2	617.55	331.66	$3.59 \times 10^{-3}$

是不相同的,故引入极差来描述不同因素对结果影响的比重,极差越大,该因素对某一指标的影响程度就越大。通过 Minitab 对不同评价指标建立主效应云图,通过主效应云图来检查一个或者多个因素的水平均值之间的差值,进而确定该评价指标下最优的试验方案。

基于评价指标  $\sigma$  的主效应力图如图 6 所示,从图中可以看出,倒角角度  $\theta$  的极差为 95.4,是 5 个因

素中最大的,因此,倒角角度  $\theta$  对评价指标  $\sigma$  的影响程度更高,其次是倒角长度  $L$ 、轴套管厚度  $T_1$ 、节点板厚  $T_2$  以及轴孔缝隙  $H$ 。而评价指标  $\sigma$  为望小型指标,故根据主效应云图确定出基于评价指标  $\sigma$  的最优方案为轴孔缝隙  $H=4$  mm、轴套管厚度  $T_1=50$  mm、节点板厚  $T_2=120$  mm、倒角长度  $L=220$  mm、倒角角度  $\theta=0.3^\circ$ 。

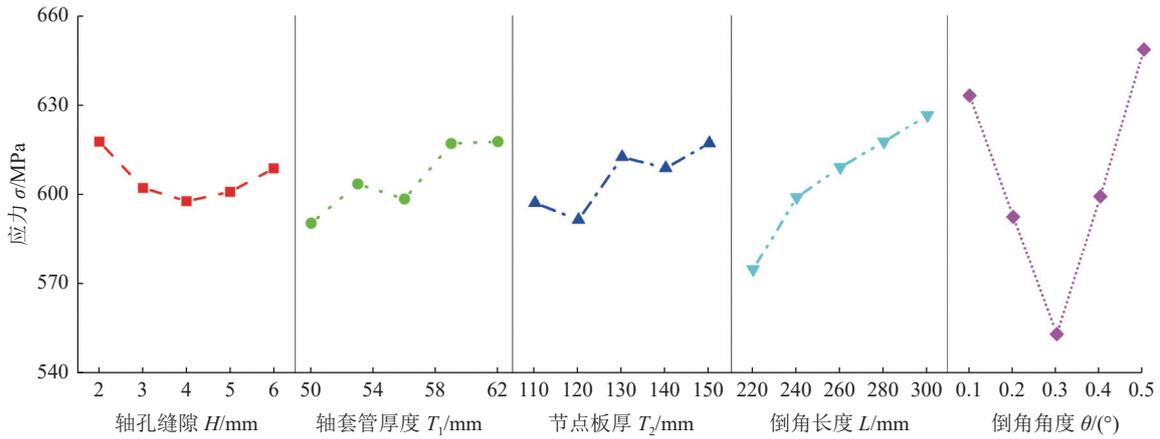


图 6 基于应力  $\sigma$  的均值主效应力图  
Fig.6 Nephogram of mean main effect based on stress

基于评价指标  $\tau$  的主效应力图如图 7 所示,从图中可以看出,倒角角度  $\theta$  的极差为 58.4,是 5 个因素中最大的,因此,倒角角度  $\theta$  对评价指标  $\tau$  的影响程度更高,其次是倒角长度  $L$ 、节点板厚  $T_2$ 、轴套管厚度  $T_1$  以及轴孔缝隙  $H$ 。而评价指标  $\tau$  为望小型指标,故根据主效应云图确定出基于评价指标  $\tau$  的最优方案为轴孔缝隙  $H=3$  mm、轴套管厚度  $T_1=50$  mm、节点板厚  $T_2=120$  mm、倒角长度  $L=220$  mm、倒角角度  $\theta=0.3^\circ$ 。

基于评价指标  $\varepsilon$  的主效应力图如图 8 所示,从图中可以看出,倒角角度  $\theta$  的极差为  $9.84 \times 10^3$ ,是 5 个因素中最大的,因此,倒角角度  $\theta$  对评价指标  $\varepsilon$  的影响程度更高,其次是倒角长度  $L$ 、轴孔缝隙  $H$ 、轴套管厚度  $T_1$  以及节点板厚  $T_2$ 。而评价指标  $\varepsilon$  为望小型指标,故根据主效应云图确定出基于评价指标  $\varepsilon$  的最优方案为轴孔缝隙  $H=2$  mm、轴套管厚度  $T_1=50$  mm、节点板厚  $T_2=120$  mm、倒角长度  $L=220$  mm、倒角角度  $\theta=0.4^\circ$ 。

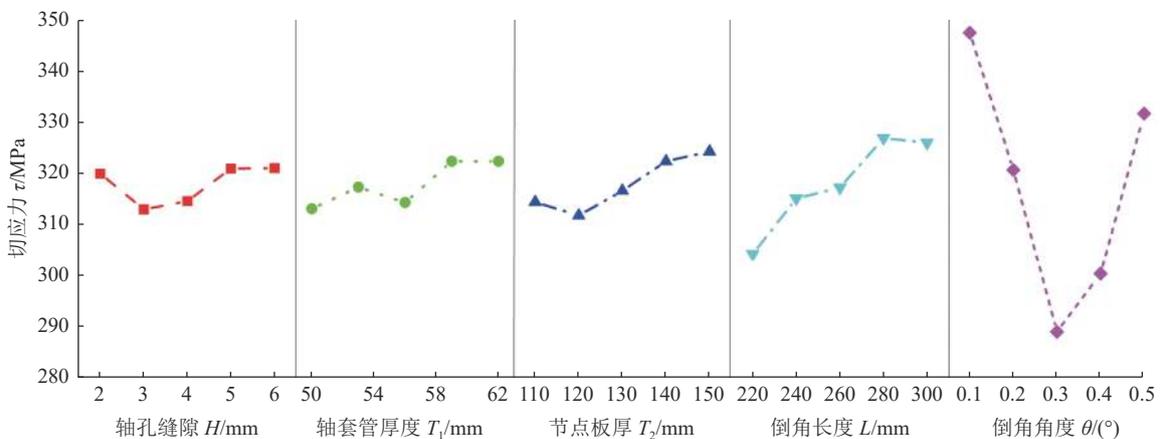


图 7 基于切应力  $\tau$  的均值主效应力图  
Fig.7 Nephogram of mean main effect based on shear stress

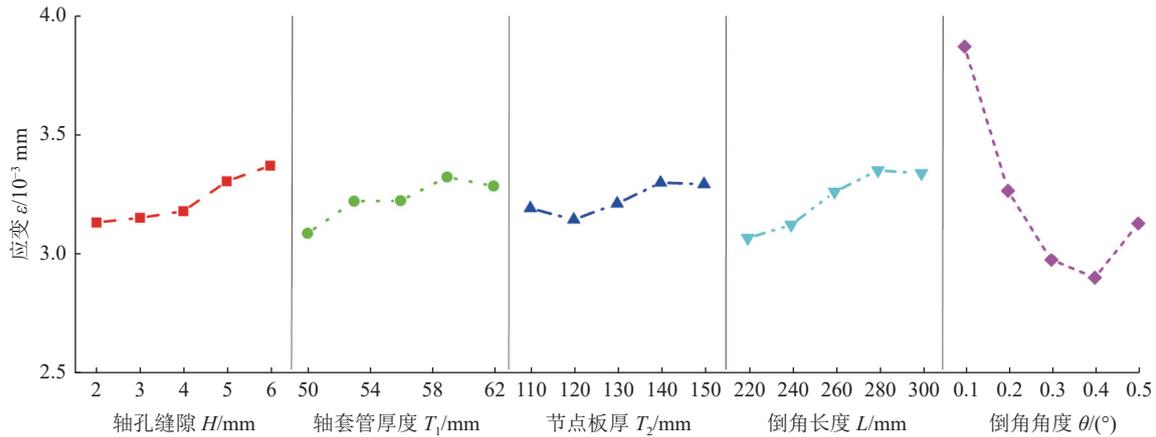


图 8 基于应变  $\varepsilon$  的均值主效应力图

Fig.8 Nephogram of mean main effect based on strain

根据上述分析,将 3 个评价指标的最优水平因素组合参数列写在表 5 中。由表 5 数据可知,销轴节点最优水平因素参数存在矛盾,而在实际工程中需要综合考虑多个因素的影响,从中找出最优的水平因素组合,故引入模糊数学理论建立模糊综合评价模型,从中得到兼顾各个水平因素的最优组合。

表 5 不同评价指标下的参数组合

Table 5 Parameter combination under different evaluation indexes

评价指标	H/mm	T <sub>1</sub> /mm	T <sub>2</sub> /mm	L/mm	θ/(°)
应力σ	4	50	120	220	0.3
切应力τ	3	50	120	220	0.3
应变ε	2	50	120	220	0.4

### 3.2 AHP-模糊模型建立与分析

模糊数学中的隶属函数根据曲线类型可分为线性和非线性 2 大类,前者有矩形、三角形和梯形等形式,而后者有  $k$  次抛物线型、 $\Gamma$  型分布、正态分布、柯西分布等形式,本次模型套用常见的梯形分布,根据前面分析可知上述 3 个指标价指标  $\sigma$ 、 $\tau$  和  $\varepsilon$  均为偏小型指标(数值越小越好),对于偏小型指标  $y_k$ ,第  $i$  次试验时,因素  $x_i$  的隶属度函数定义为  $f_{ik}$ ,其公式为:

$$f_{ik} = \begin{cases} 1, & y_k^i \leq \min_{1 \sim 25}(y_k) \\ \frac{\max_{1 \sim 25}(y_k) - y_k^i}{\max_{1 \sim 25}(y_k) - \min_{1 \sim 25}(y_k)}, & \min_{1 \sim 25}(y_k) < y_k^i < \max_{1 \sim 25}(y_k) \\ 0, & y_k^i \geq \max_{1 \sim 25}(y_k) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $k=1, 2, 3; i=1, \dots, 25; y_k^i$  为第  $i$  次试验中  $y_k$  取值;  $\max_{1 \sim 25}(y_k)$  为在 25 组试验中  $y_k$  的最大值;  $\min_{1 \sim 25}(y_k)$  为在 25 组试验中  $y_k$  的最小值。

由式(7)构造出评价指标的模糊关系矩阵  $G = (f_{ik})_{25 \times 3}$  后,还需对 3 个评价指标设定其权重值  $\omega_k$ , 保证  $\sum_{k=1}^3 \omega_k = 1$ , 根据 3 个指标的重要性,利用层次分析法对 3 个指标的权重进行选取。首先建立关于 3 个参数指标的判定矩阵  $A = (a_{ij})_{3 \times 3}$ , 基于表 6 中评价因素的标度,判定矩阵  $A = (a_{ij})_{3 \times 3}$  如式(8)所示。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 \\ 1/3 & 1 & 1/2 \\ 1/2 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

表 6 1~9 阶标度

Table 6 Scale of order 1~9

标度 $a_j(i, j=1,2,3)$	矩阵元素 $a_{ij}$ 定义
1	$i$ 因素与 $j$ 因素相同重要
3	$i$ 因素与 $j$ 因素略重要
5	$i$ 因素与 $j$ 因素较重要
7	$i$ 因素与 $j$ 因素非常重要
9	$i$ 因素与 $j$ 因素绝对重要
2,4,6,8	上述两相邻判断中间值

对于得到的判断矩阵  $A = (a_{ij})_{3 \times 3}$ , 需要进行一致性检验, 否则将不具备评价的意义。判定矩阵的一致性需要通过一致性比率 CR 进行评定:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (9)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (10)$$

式中: CR 为一致性比率; CI 为一致性指标, 见表 7; RI 为平均随机一致性指标;  $\lambda_{\max}$  为判定矩阵最大特征值;  $n$  为判定矩阵阶数。

表 7 1~9 阶正反矩阵的平均随机一致性指标

Table 7 Average random consistency index of positive and negative matrices of order 1~9

矩阵阶数	RI
1	0
2	0
3	0.52
4	0.89
5	1.12
6	1.26
7	1.36
8	1.41

由判定矩阵求得最大特征值  $\lambda_{\max}=3.0536$ ,  $CI=0.0268$ ,  $CR=0.0515 \leq 0.1$ , 具有良好的—致性。将最大特征值  $\lambda_{\max}$  所对应的特征向量  $\alpha_i$  进行归—化处理, 即可得到判定矩阵  $A=(a_{ij})_{3 \times 3}$  的权重向量  $\omega$ , 即 3 个评价指标的权重向量。

$$\omega = [0.393, 0.296, 0.311]^T \quad (11)$$

模糊综合评价指标的隶属度计算公式为

$$t = G \times \omega \quad (12)$$

式中:  $t = [t_1, t_2, \dots, t_{25}]^T$ 。各正交试验组综合评价指标隶属度值见表 8。

表 8 各正交试验组合综合指标隶属度值

Table 8 Membership values of comprehensive indexes of orthogonal test combinations

$i$	$t_i$	$i$	$t_i$
1	0.555 562	14	0.555 471
2	0.789 778	15	0.323 826
3	0.923 306	16	0.611 172
4	0.593 655	17	0.252 002
5	0.158 762	18	0.470 797
6	0.820 622	19	0.767 969
7	0.449 008	20	0.885 841
8	0.299 240	21	0.821 363
9	0.734 431	22	0.705 826
10	0.977 370	23	0.717 944
11	0.663 010	24	0.123 862
12	0.918 812	25	0.463 861
13	0.806 455		

根据模糊数学理论的分析方法, 对各水平因素进行模糊综合评价隶属度  $t_i$  做极差分析, 见表 9, 从表中可以看出, 5 个水平因素对综合评价的影响程度从大到小依次是: 倒角角度  $\theta$  (48.72%)、倒角长度  $L$  (20.68%)、轴套管厚度  $T_1$  (11.8%)、节点板厚  $T_2$  (11.11%)、轴孔缝隙  $H$  (7.69%)。通过模糊综合评价隶属度的极差最大值来确定最优参数的组合, 即: 轴孔缝隙  $H=3$  mm、轴套管厚度  $T_1=50$  mm、节点板厚  $T_2=120$  mm、倒角长度  $L=220$  mm、倒角角度  $\theta=0.3^\circ$ 。

表 9 模糊综合评价水平因素隶属度极差分析

Table 9 Analysis of membership degree range of horizontal factors in fuzzy comprehensive evaluation

隶属度和	$H$	$T_1$	$T_2$	$L$	$\theta$
$\sum g_{j1}$	3.02	3.47	3.27	3.81	1.56
$\sum g_{j2}$	3.28	3.12	3.42	3.31	3.13
$\sum g_{j3}$	3.27	3.22	3.05	3.02	4.41
$\sum g_{j4}$	2.99	2.78	2.89	2.66	3.81
$\sum g_{j5}$	2.83	2.81	2.77	2.60	2.49
$\max \sum g_{ji}$	3.28	3.47	3.42	3.81	4.41
极差	0.09	0.138	0.13	0.242	0.57
占比/%	7.69	11.80	11.11	20.68	48.72

注:  $\sum g_{ji}$  为  $x_j$  在第  $l$  水平时的试验组的模糊综合评价指标隶属度  $t_i$  的总和;  $i=1, 2, \dots, 25; j=1, 2, \dots, 5$ 。

### 3.3 优化结构参数有限元分析

将上一小节得到的最优参数组合进行有限元仿真分析, 立柱和耳板的三维应力力图如图 9 所示。由图 9 可知, 销轴与立柱节点的接触应力峰值显著降低, 其峰值位置依然位于销轴与立柱端部的孔壁接触区域。此外, 销轴与立柱轴套管之间的线性接触区域增加, 改善销轴受力方式, 避免小区域出现大的应力载荷和切应力载荷。对于耳板而言, 应力峰值降比幅度较小, 但增加了销轴与耳板内的轴套管的接触区域, 使得受力面积增加。销轴节点优化前后应力峰值见表 10。

### 3.4 优化结构参数现场应用

将优化的结构参数结果应用到液压支架试验台中, 对支护高度 10 m, 工作阻力 29 000 kN 的大型掩护式液压支架完成了包含内外加载的强度测验及耐久性项目试验, 如图 10 所示, 现场试验未出现销轴断裂以及销轴节点零部件损坏情况, 试验结果表明结构优化参数设计合理。

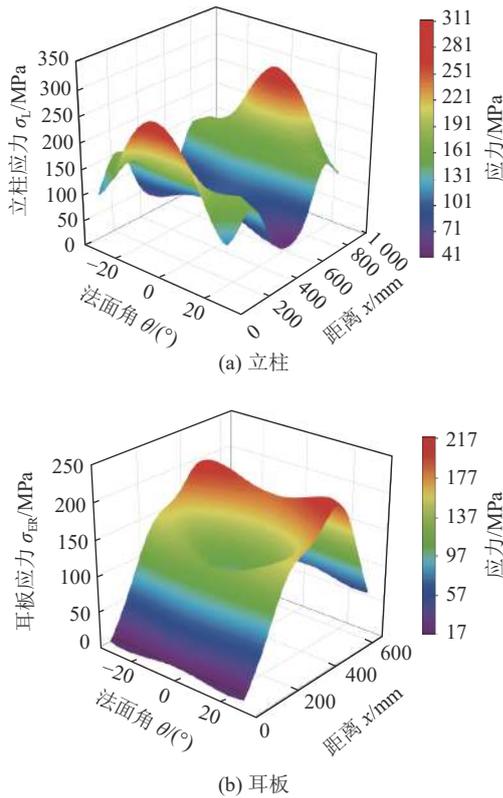


图9 销轴节点参数优化模型三维接触应力

Fig.9 3D contact stress nephogram of pin joint parameter optimization model

表10 销轴节点优化前后应力峰值对比

Table 10 Comparison of stress peak value before and after pin joint optimization

节点	峰值应力/MPa		降比/%
	优化前	优化后	
立柱	753.55	310.67	58.77
耳板	242.49	213.53	11.94



图10 两柱掩护式支架加载试验

Fig.10 Two-post covered bracket loading test

## 4 结 论

1)分析液压支架加载试验台中梁销轴的实际工

况和结构特点,基于赫兹接触理论,分析销轴连接节点峰值应力,得到修正后的应力计算公式。

2)研究立柱、耳板节点应力分布情况,利用 ANSYS 软件建立三维实体销轴连接节点的有限元模型,并根据实际加载工况进行仿真分析,将仿真分析结果与理论计算结果进行对比,结果表明应力峰值误差不超过 2%,故有限元模型参数的设置是可靠的,为后续多目标参数优化研究分析提供基础。

3)基于正交试验分析建立了销轴节点的多水平因素关于应力、切应力以及应变的正交分析模型;采用 AHP-模糊分析模型对多评价指标优化模型建立判定矩阵,求出不同评价指标的影响权重,对不同水平因素求出多评价指标的隶属度值,得到最优参数解;根据所获得最优解参数建立有限元仿真模型,得到立柱节点应力峰值降比为 58.77%,耳板节点降比为 12%,并将优化结果应用到现场试验,验证了优化设计结果的合理性。

## 参考文献(References):

- [1] 韩晨怡,倪凯旋,马辉,等.约束边界和销轴简化对液压支架强度影响[J].哈尔滨工业大学学报,2021,53(1):78-86.  
HAN Chenyi, NI Kaixuan, MA Hui, *et al.* Effects of constraint boundaries and simplified pin joints on strength of hydraulic support[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(1): 78-86.
- [2] 梁朝虎,沈功田,张琨,等.游乐设施剩余寿命评估方法研究[J].安全与环境学报,2019,19(4):1296-1301.  
LIANG Chaohu, SHEN Gongtian, ZHANG Kun, *et al.* An evaluation method for the remaining life of the amusement ride[J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(4): 1296-1301.
- [3] 魏景生,任怀伟.销轴连接对液压支架稳定性及可靠性的影响[J].煤炭科学技术,2010,38(1):72-75.  
WEI Jingsheng, REN Huaiwei. Pin shaft connection affected to stability and reliability of hydraulic powered support[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(1): 72-75.
- [4] GB/T 880-2008,无头销轴[S].
- [5] 胡杰,周安全.液压挖掘机工作装置用销轴.中国:ZL202597373U[P].2012-12-12.
- [6] 中交公路规划设计院有限公司.公路钢结构桥梁设计规范[M].人民交通出版社,2015:28-72.
- [7] European Committee for Standardization. Eurocode 3: design of steel structure: part 1-8: design of joints: EN 1993-1-8: 2005[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [8] 肖永惠,潘一山,陈建强,等.巷道防冲支架吸能构件屈曲吸能可靠性研究[J].采矿与安全工程学报,2022,39(2):317-327.  
XIAO Yonghui, PAN Yishan, CHEN Jianqiang, *et al.* Buckling energy absorption reliability of energy absorption component of roadway rockburst preventing support[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2022, 39(2): 317-327.

- [ 9 ] 潘一山, 高学鹏, 王 伟, 等. 冲击地压矿井综采工作面两巷超前支护液压支架研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(6): 1-12.  
PAN Yishan, GAO Xuepeng, WANG Wei, *et al.* Research of hydraulic powered supports for entries' advanced support in fully-mechanized working face of rock burst mine[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(6): 1-12.
- [ 10 ] 潘一山, 代连朋, 李国臻, 等. 煤矿冲击地压与冒顶复合灾害研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 112-122.  
PAN Yishan, DAI Lianpeng, LI Guozhen, *et al.* Study on compound disaster of rock burst and roof falling in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 112-122.
- [ 11 ] 李 渊, 胡 帅, 刘宇雄, 等. 空间结构销轴节点销轴常幅疲劳数值模拟[J]. 太原理工大学学报, 2021, 52(5): 822-829.  
LI Yuan, HU Shuai, LIU Yuxiong, *et al.* Numerical simulation on constant amplitude fatigue performance of the pin in pinned connection in space structure[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2021, 52(5): 822-829.
- [ 12 ] 王学文, 崔 涛, 谢嘉成, 等. 考虑销轴间隙的液压支架运动虚拟仿真方法[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(2): 186-193.  
WANG Xuewen, CUI Tao, XIE Jiacheng, *et al.* Virtual simulation method of hydraulic support motion considering pin shaft clearance[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 186-193.
- [ 13 ] 姚廷强, 陈锐搏, 王立华, 等. 考虑三维圆柱铰间隙碰撞的空间机构柔性多体动力学分析方法[J]. 振动与冲击, 2021, 40(1): 297-307, 316.  
YAO Tingqiang, CHEN Ruibo, WANG Lihua, *et al.* Flexible multi-body dynamic analysis method of spatial mechanisms considering 3-D cylindrical hinge clearance collision[J]. Vibration and Impact, 2021, 40(1): 297-307, 316.
- [ 14 ] 杨朝飞, 朱永战. 35CrMnSi销轴淬火后长度变化研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(S2): 47-49.  
YANG Chaofei, ZHU Yongzhan. Study on length change of 35CrMnSi pin after quenching[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(S2): 47-49.
- [ 15 ] 张泽宇, 姜 涛, 罗尧治. 销轴连接的铸钢件接触承压试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(11): 138-143.  
ZHANG Zeyu, JIANG Tao, LUO Yaozhi. Experimental study on steel casting with pin connection under contact pressure[J]. Journal of Building Structure, 2016, 37(11): 138-143.
- [ 16 ] 李仕华, 冯伟波, 秦 利, 等. 不同重力环境下含间隙铰位置和碰撞力[J]. 机械工程学报, 2015, 51(17): 52-58.  
LI Shihua, FENG Weibo, QIN Li, *et al.* Effect of different gravity environment on the position and collision force of joint with clearance[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(17): 52-58.
- [ 17 ] ANTONI N. A study of contact non-linearities in pin-loaded lugs: separation clearance and frictional slipping effects[J]. International Journal of Non-linear Mechanics, 2014, 58: 258-282.
- [ 18 ] 高 啸, 田锡天, 朱 军, 等. 基于弹性接触的销轴结构应力分析[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(3): 322-325.  
GAO Xiao, TIAN Xitian, ZHU Jun, *et al.* Analyzing structural stress of elastic contact pin[J]. Mechanical Science and Technology, 2014, 33(3): 322-325.
- [ 19 ] 梁 颖, 秦东晨, 高占喜, 等. 大吨位液压支架试验台及其关键零件的设计计算研究[J]. 科学技术创新, 2021(14): 145-146.  
LIANG Ying, QIN Dongchen, GAO Zhanxi, *et al.* Research on design and calculation of large-tonnage hydraulic support test-bed and its key parts[J]. Science and Technology Innovation, 2021(14): 145-146.
- [ 20 ] 郝负洪, 张飞龙, 宣姣羽, 等. 涂层风沙冲蚀损伤表面分形维数预测模型[J]. 表面技术, 2022, 51(4): 127-138, 156.  
HAO Binghong, ZHANG Feilong, XUAN Jiaoyu, *et al.* Fractal dimension prediction model of coating damage surface by wind-sand erosion[J]. Surface Technology, 2022, 51(4): 127-138, 156.
- [ 21 ] 于 洲, 余家欣, 袁卫锋, 等. 脆性材料在韧性域内的往复纳米划痕深度预测研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(15): 246-254.  
YU Zhou, YU Jiaxin, YUAN Weifeng, *et al.* Analytical prediction of reciprocating nanoscratch depth for brittle materials in the ductile regime[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(15): 246-254.
- [ 22 ] 张 滨, 孙文波. 基于赫兹理论的销轴连接修正设计方法研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(S1): 410-417.  
ZHANG Bin, SUN Wenbo. Modified design method of pinned connection based on Hertz theory[J]. Journal of Architectural Structure, 2018, 39(S1): 410-417.
- [ 23 ] 赵安新, 张育刚, 韩 安, 等. 基于层次分析法的煤矿分级分层安全状态评估方法[J]. 煤炭技术, 2021, 40(3): 162-165.  
ZHAO Anxin, ZHANG Yugang, HAN An, *et al.* Evaluation method of coal mine classification and layered safety state based on analytic hierarchy process[J]. Coal Technology, 2021, 40(3): 162-165.