

## 双柱液压机下横梁预紧结构特性分析

栾大为<sup>1,2,3</sup>, 贾 鋈<sup>1,2,3</sup>, 杨 晋<sup>4</sup>, 马学鹏<sup>1,2,3</sup>, 张鸿飞<sup>1,2,3</sup>, 李 晶<sup>5</sup>

- (1. 兰州兰石重工有限公司, 甘肃 兰州 730314; 2. 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;  
3. 甘肃省大型快锻液压设备技术创新中心, 甘肃 兰州 730314; 4. 兰州交通大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730070;  
5. 兰州兰石能源装备工程研究院有限公司, 甘肃 兰州 730314)

**摘要:** 针对大型快速锻造液压机组合下横梁接合面开缝问题, 对组合下横梁预紧结构进行了理论分析, 并提出拉杆垂直于下横梁接合面的预紧思路, 对比了其与拉杆沿工作台方向预紧方法的优劣。通过分析正载和扩孔工况下机构的受力情况, 建立组合下横梁的简化力学模型, 得出两种工况下组合下横梁拉杆预紧力的计算方法。利用有限元方法分析了两种工况下下横梁拉杆预紧力及接合面的开缝情况, 计算结果表明: 在两种工况下, 组合下横梁采用垂直于接合面的预紧方法, 其结构强度、刚度及接合面开缝均满足要求, 验证了预紧力理论分析的合理性, 为大型快速锻造液压机组合下横梁的预紧力结构设计提供了新的思路和方法。

**关键词:** 液压机; 组合下横梁; 预紧力; 接合面; 开缝

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.08.024

**中图分类号:** TG315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2024) 08-0167-07

## Characteristics analysis on preload structure for lower beam of double-column hydraulic press

Luan Dawei<sup>1,2,3</sup>, Jia Yun<sup>1,2,3</sup>, Yang Jin<sup>4</sup>, Ma Xuepeng<sup>1,2,3</sup>, Zhang Hongfei<sup>1,2,3</sup>, Li Jing<sup>5</sup>

- (1. Lanzhou LS Heavy Machinery Co., Ltd., Lanzhou 730314, China;  
2. Key Laboratory of Intelligent Control of Metal Plastic Forming Equipment, Gansu Province, Lanzhou 730314, China;  
3. Gansu Large Fast Forging Hydraulic Equipment Technology Research Center, Lanzhou 730314, China;  
4. School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;  
5. Lanzhou LS Energy Equipment Engineering Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730314, China)

**Abstract:** Aiming at the slit problem of joint surface for combined lower beam of large-scale rapid forging hydraulic press, the preload structure of combined lower beam was theoretically analyzed, proposed the preload idea that the pull rod is perpendicular to the joint surface of lower beam, and the advantages and disadvantages of the preload method that the pull rod is along the workbench direction were compared. Then, by analyzing the force situations of the mechanism under the normal load and reaming working conditions, a simplified mechanical model of combined lower beam was established, and the calculation methods for the preload force of combined lower beam pull rod under two working conditions was obtained. Furthermore, the preload force of lower beam pull rod and the slit of joint surface under two working conditions were analyzed by the finite element method. The calculation results show that under the two working conditions, the preload method that the combined lower beam perpendicular to the joint surface is adopted, and the structural strength and stiffness as well as the slit of joint surface meet the requirements, which verifies the rationality of the theoretical analysis on the preload force, and provides a new idea and method for the preload force structure design of combined lower beam for large-scale rapid forging hydraulic press.

**Key words:** hydraulic press; combined lower beam; preload force; joint surface; slit

随着大型和超大型锻造液压机的需求逐渐增加,

设备的大型化将对其生产制造提出更高的要求<sup>[1-2]</sup>。下横梁作为预应力机架的关键受力部件, 其结构的合理性需重点考虑。由于大型整体式下横梁的体积和质量, 导致铸造及运输均较为困难, 因此, 大型液压机下横梁将采用分体结构, 通过预应力拉杆将其组合为一个整体, 下横梁拉杆预紧力的大小及接

收稿日期: 2024-03-20; 修订日期: 2024-06-10

作者简介: 栾大为 (1987-), 男, 学士, 工程师

E-mail: 752317245@qq.com

通信作者: 贾 鋈 (1983-), 男, 学士, 高级工程师

E-mail: lsjiayun@sina.cn

合面的接触刚度不足导致的开缝问题成为设计难点。

针对上压式快速锻造液压机分体下横梁,文献[3]表明,设备的工作载荷与跨高比是影响临界预紧力的关键因素,并给出其最佳比值。文献[4]和文献[5]运用等效梁长法和叠加修正法对组合结构梁的临界预紧力进行理论分析计算,提出临界开缝判断依据,得出更精确的组合结构梁临界预紧力的计算公式。文献[6]由100 MN锻造液压机的静力学分析得出预紧系数与机架开缝之间的关系,确定预紧力,并对结构进行优化分析,为大型快速锻造液压机提供设计思路。

目前,有关快速锻造液压机预应力机架分析及整机的结构优化和静态分析方面的研究较为成熟<sup>[7-10]</sup>,但针对组合下横梁拉杆预紧力的研究较少。下横梁拉杆预紧力的大小是保证整体结构稳定的重要参数,预紧力过小时,下横梁拉杆结合面因刚度不足而出现开缝问题,预紧力过大则会导致下横梁局部位置出现应力集中,长期如此则会导致该区域出现裂纹或损伤<sup>[11]</sup>。

针对组合下横梁的预紧问题,本文以100 MN上压式组合下横梁拉杆为研究对象,其中横向内侧净空距为5000 mm,最大行程为3000 mm。通过分析其受力机理,研究了正载与扩孔工况下机构的载荷特点,建立了两种极限工况下拉杆的预紧力模型,提出组合下横梁拉杆预紧力的加载方法,为锻造液压机的设计与优化提供了一种新的研究思路和方法。

## 1 下横梁预应力组合结构

组合下横梁是承压部件,主要由两个子梁、拉杆和螺母组成。在不同锻造工艺下下横梁的受力情况也不同,因此,可选择在集中荷载、马架锻造等恶劣工况下对下横梁结构进行强度和刚度校核。

目前,下横梁分体结构中心部位的拉杆主要沿工作台方向进行预紧,如图1所示,该组合下横梁的长度为13000 mm、两侧宽度为2800 mm、高度为3400 mm,沿工作台方向梁的长度为6000 mm。沿工作台方向预紧拉杆的直径为 $\Phi 320$  mm、长度为7000 mm,两侧拉杆的直径为 $\Phi 200$  mm、长度为3800 mm。

双柱斜置液压机的斜置角为 $25^\circ \sim 35^\circ$ ,将沿工作台方向拉杆的预紧力分解为垂直于结合面和平行于结合面两个分力,垂直于结合面的预紧力分力只有沿工作台方向拉杆预紧力的42%~57%,平行于接

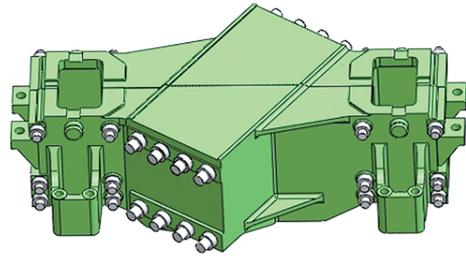


图1 下横梁沿工作台方向预紧结构简图  
Fig. 1 Preload structure schematic diagram of lower beam along worktable direction

合面的预紧力为沿工作台方向拉杆预紧力的81%~91%。该预紧方式的不足在于组合下横梁拉杆的预紧力过大,同时结合面方向的分力会导致其两个子梁的结合面有滑动趋势,需通过结合面开键槽或加工止口等措施来解决,导致键槽或止口位置的应力偏大,同时增加了加工制造成本。

针对上述组合下横梁中心部位拉杆预紧力的不足,对其进行优化设计,将对组合下横梁在垂直于结合面方向进行开孔,对下横梁内部进行重新布筋,将拉杆垂直于子梁结合面进行布置,如图2所示。该布置的优点为预紧力直接作用于结合面,结合面方向无切向力,预紧力能够全部作用于结合面。在保证结合面有同样的刚度条件下,垂直于结合面端面的预紧力比沿工作台方向的预紧力要小,即拉杆直径也会减小。而沿工作台方向预紧所需要的拉杆长度大约是垂直于结合面拉杆的两倍,因此,垂直接合面方向预紧,不仅其预紧效果优于沿工作台方向预紧,而且节约了组合下横梁中心部位预紧力拉杆的制造成本。

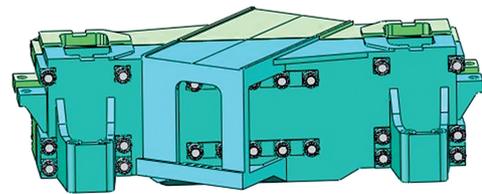


图2 下横梁拉杆垂直于结合面方向预紧结构简图  
Fig. 2 Preload structure schematic diagram of lower beam pull rod perpendicular to joint surface direction

组合下横梁在长度方向两侧因穿机架拉杆,内部为空心结构,考虑结构强度,将下横梁拉杆设计分为3组。第1组为下横梁两侧各安装的一排拉杆,其关于压机中心线对称,单排高度方向的拉杆总数量为 $l$ 根,高度方向上第 $i$ 根拉杆距离下横梁上平面的距离为 $h_i$ , $i=1, 2, 3, \dots, l$ ,压机在下横梁两侧安装的拉杆共有 $k_1$ 排;第2组和第3组为下横梁中间

位置的拉杆，其设计主要考虑微粗及扩孔时结合面的预紧，因此，中间位置设置两组拉杆，距离下横梁上平面  $h_m$  处设计一组数量为  $M$  根的拉杆（第 2 组），距离下横梁上平面  $h_n$  处设计一组数量为  $N$  根的拉杆（第 3 组）。3 组拉杆的直径为  $\Phi 200$  mm、长度为 3800 mm，图 3 为组合下横梁拉杆预紧结构简图，其中， $F_i$  为高度方向上第  $i$  根拉杆的预紧力， $F'_m$  为第 2 组拉杆中第  $m$  根拉杆的预紧力， $m=1, 2, 3, \dots$ ， $M, F''_n$  为第 3 组拉杆中第  $n$  根拉杆的预紧力， $n=1, 2, 3, \dots, N$ 。

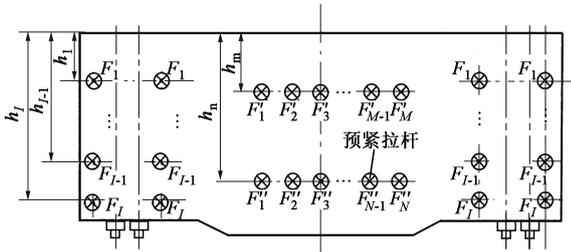


图 3 组合下横梁拉杆预紧模型简图

Fig. 3 Preload model schematic diagram of combined lower beam pull rod

## 2 预应力下横梁受力分析

为进一步分析组合下横梁拉杆预紧特点，分别建立了正载工况分析模型和扩孔工况分析模型，进行理论分析计算，对比分析两种工况下组合下横梁拉杆的预紧力。

### 2.1 正载工况下拉杆预紧力分析

在正载作用下，组合下横梁底部两对角容易开缝，若要保证组合下横梁的整体性，拉杆预紧力相对于结合面的力矩必须大于或等于载荷引起的开缝力矩，组合下横梁结合面的压应力大于或等于零。图 4 为正载工况下组合下横梁受力简图。其中， $F_p$  为压机最大中心载荷， $l_1$  为机架内侧拉杆中心距结合面距离， $l_2$  为机架外侧拉杆中心距结合面距离， $M_1 \sim M_l$  为第 1 组拉杆的预紧力作用于子梁结合面的力矩， $M_m$  为第 2 组拉杆的预紧力作用于子梁结合面的力矩， $M_n$  为第 3 组拉杆的预紧力作用于子梁结合面的力矩， $M_{l1}、M_{l2}$  为机架内侧、外侧拉杆的预紧力作用于子梁结合面的力矩， $F_L$  为机架拉杆的预紧力。

为简化下横梁拉杆的预紧力计算，假设机架的预紧拉杆为 16 根，且单根拉杆在载荷作用下的反力大小相等，在中心载荷作用下，机架拉杆的反力大小为：

$$F_L = F_p / 16 \quad (1)$$

在正载工况下，机架拉杆预紧力作用于分体下

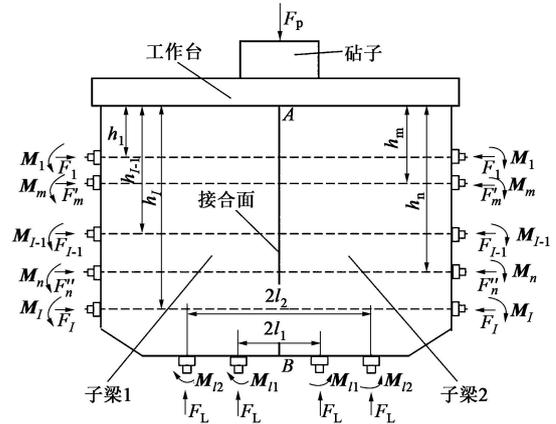


图 4 正载工况下组合下横梁受力侧视图

Fig. 4 Side view for force of combined lower beam under normal load working condition

横梁结合面的力矩为  $M_L$ ，其大小为：

$$M_L = 4F_L(l_1 + l_2) \quad (2)$$

第 1 组下横梁两侧预应力拉杆共有  $k_1$  排，高度方向上第  $i$  根拉杆对接合面形成的力矩大小为：

$$M_i = F_i \cdot h_i \quad (3)$$

第 1 排拉杆预紧力总和在结合面处形成的力矩  $M_a$  为：

$$M_a = M_1 + M_2 + \dots + M_{i-1} + M_i \quad (4)$$

则第 1 组下横梁预紧拉杆作用于结合面的力矩  $M_{x1}$  为：

$$M_{x1} = k_1 \cdot M_a \quad (5)$$

根据 JB/T 1229—2015<sup>[12]</sup>，为使组合下横梁拉杆预紧合理，结合面的应力分布均匀，同时为加工及安装合理，使第 1 组每根拉杆的直径相同，各排拉杆应具有相同的预紧力，则各排单根拉杆的预紧力  $F_{d1}$  为：

$$F_{d1} = F_1 = F_2 = \dots = F_{i-1} = F_i \quad (6)$$

将式 (3)、式 (4) 和式 (6) 代入式 (5) 中，得：

$$M_{x1} = k_1 F_{d1}(h_1 + h_2 + \dots + h_i) \quad (7)$$

第 2 组拉杆由一排为  $M$  根的拉杆组成，同理可得任意单根拉杆对下横梁结合面形成的力矩  $M'_m$  为：

$$M'_m = F'_m \cdot h_m \quad (8)$$

第 2 组拉杆对下横梁结合面形成的力矩  $M_{x2}$  为：

$$M_{x2} = M'_1 + M'_2 + \dots + M'_{m-1} + M'_m \quad (9)$$

考虑其预紧效果和安装工艺，使第 2 组每根拉杆的直径相同，拉杆预紧力相同，则单根拉杆预紧力  $F_{d2}$  为：

$$F_{d2} = F'_1 = F'_2 = \dots = F'_{m-1} = F'_m \quad (10)$$

将式 (12) 和式 (10) 代入式 (11)，可得：

$$M_{X2} = M \cdot F_{d2} \cdot h_m \quad (11)$$

第 3 组拉杆对接合面的力矩与第 2 组拉杆的计算方法相同, 考虑其预紧效果, 使第 3 组拉杆的直径相同, 单根拉杆预紧力相同且均为  $F_{d3}$ , 则第 3 组拉杆对下横梁接合面形成的力矩  $M_{X3}$  为:

$$M_{X3} = N \cdot F_{d3} \cdot h_n \quad (12)$$

正载工况下下横梁接合面处的力矩  $M_X$  为:

$$M_X = M_{X1} + M_{X2} + M_{X3} \quad (13)$$

下横梁接合面产生的力矩要大于或等于拉杆反力作用于下横梁接合面的力矩, 两个力矩方向相反, 为保证接合面不出现开缝现象, 需使梁接合面处的力矩平衡, 则:

$$M_L = M_X \quad (14)$$

为便于简化推导, 令各组拉杆的预紧力为  $F_d$ , 则:

$$F_d = F_{d1} = F_{d2} = F_{d3} \quad (15)$$

由式 (1)、式 (2)、式 (7)、式 (11)、式 (12)、式 (13)、式 (14) 和式 (15) 可得, 组合下横梁各拉杆的预紧力为:

$$F_d = \frac{F_p \cdot (l_1 + l_2)}{4[k_1 \sum_{i=1}^l h_i + (M \cdot h_m + N \cdot h_n)]} \quad (16)$$

## 2.2 扩孔工况下拉杆预紧力分析

扩孔工况下, 开缝位置容易出现在 A 点, 为保证其接合面部开缝, 则扩孔载荷引起的力矩要小于或等于拉杆预紧力相对于接合面的力矩。图 5 为扩孔载荷工况下组合下横梁的受力简图, 其中,  $F_{01} \sim F_{0l}$  为第 1 组拉杆对应的拉杆预紧力,  $F_{0m}$  为第 2 组拉杆中第  $m$  根拉杆对应的拉杆预紧力,  $F_{0n}$  为第 3 组拉杆中第  $n$  个拉杆对应的拉杆预紧力。 $M_{01} \sim M_{0l}$  为第 1 组拉杆预紧力作用于接合面形成的力矩,  $M_{0m}$  为第 2 组拉杆中第  $m$  根拉杆的预紧力作用于接合面形成的力矩,  $M_{0n}$  为第 3 组拉杆中第  $n$  个拉杆的预紧力作用于接合面形成的力矩,  $l_0$  为扩孔载荷距下横梁接合面的距离。

扩孔载荷作用于子梁在接合面形成的力矩  $M_{0L}$  为:

$$M_{0L} = \frac{1}{2} F_p \cdot l_0 \quad (17)$$

第 1 组下横梁两侧预应力拉杆共有  $k_1$  排, 即单排每根拉杆对接合面形成的力矩  $M_{0i}$  为:

$$M_{0i} = F_{0i} \cdot h_{0i} \quad (18)$$

式中:  $F_{0i}$  为第 1 组拉杆中单排第  $i$  根拉杆的预紧力;  $h_{0i}$  为第 1 组拉杆中单排第  $i$  根拉杆中心距下横梁下平面的距离。

第 1 组拉杆中单排拉杆的预紧力总和在接合面

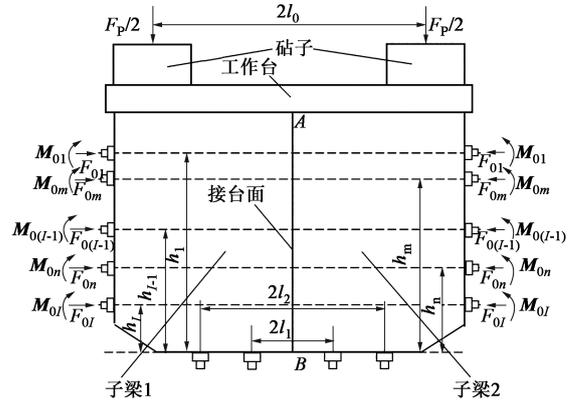


图 5 扩孔工况下下横梁受力侧视图

Fig. 5 Side view for force of lower beam under reaming working condition

处形成的力矩  $M_{0a}$  为:

$$M_{0a} = M_{01} + M_{02} + \dots + M_{0(l-1)} + M_{0l} \quad (19)$$

则第 1 组下横梁预紧拉杆作用于接合面的力矩  $M_{0X1}$  为:

$$M_{0X1} = k_1 \cdot M_{0a} \quad (20)$$

为保证下横梁接触面受力均匀, 令第 1 组拉杆具有相同的预紧力, 则各排单根拉杆的预紧力  $F_{0d1}$  为:

$$F_{0d1} = F_{01} = F_{02} = \dots = F_{0(l-1)} = F_{0l} \quad (21)$$

将式 (18)、式 (19) 和式 (21) 代入式 (20), 可得:

$$M_{0X1} = k_1 F_{0d1} \sum_{i=1}^l h_{0i} \quad (22)$$

第 2 组和第 3 组拉杆作用于下横梁接合面的力矩与扩孔载荷工况下的计算方法相同, 其考虑预紧效果和安装工艺, 使第 2 组与第 3 组拉杆的直径相同, 拉杆预紧力相同, 则第 2 组单根拉杆的预紧力为  $F_{0d2}$ , 第 3 组单根拉杆的预紧力为  $F_{0d3}$ , 第 2 组与第 3 组拉杆对下横梁接合面形成力矩  $M_{0X2}$  和  $M_{0X3}$  为:

$$M_{0X2} = M \cdot F_{0d2} \cdot h_m \quad (23)$$

$$M_{0X3} = N \cdot F_{0d3} \cdot h_n \quad (24)$$

扩孔工况下下横梁接合面处的力矩  $M_{0X}$  为:

$$M_{0X} = M_{0X1} + M_{0X2} + M_{0X3} \quad (25)$$

扩孔作用于下横梁的力矩与拉杆预紧力作用于接合面的力矩方向相反, 为保证接合面不出现开缝现象, 需使梁接合面处的力矩平衡, 则:

$$M_{0L} = M_{0X} \quad (26)$$

便于简化推导, 令各拉杆的预紧力为  $F_{0d}$ , 即:

$$F_{0d} = F_{0d1} = F_{0d2} = F_{0d3} \quad (27)$$

由式 (17)、式 (22)、式 (23)、式 (24)、式 (26) 和式 (27) 可得, 组合下横梁各拉杆的预

紧力为:

$$F_{0d} = \frac{F_p \cdot l_0}{2 \left[ k_1 \sum_{i=1}^l h_{0i} + (M \cdot h_m + N \cdot h_n) \right]} \quad (28)$$

在下横梁设计过程中,可通过两种工况的计算方法得到其拉杆预紧力,并根据设计安全系数及屈服强度可得到其拉杆直径,最终取两种工况下的最大预紧力为组合下横梁拉杆的预紧力  $F_{zd}$ , 即:

$$F_{zd} = k \cdot \max(F_d, F_{0d}) \quad (29)$$

式中:  $k$  为预紧系数, 取值为  $1.2 \sim 1.5$  [11]。

### 3 组合下横梁预应力分析仿真验证

由上述力学分析,提出了组合下横梁在两种工况下的拉杆预紧力确定思路。在此基础上,对 100 MN 上压式快速锻造液压机机架进行有限元分析,固定机架基础梁,主机机架预紧通过工程载荷的 1.5 倍施加预紧力。正载工况下,以 100 MN 压力作用于下砧,施加的油缸压力为 31.5 MPa; 扩孔工况以设备对某产品的最大扩孔力 (70 MN) 作用于马架进行校

核,对应的油缸压力为 22.05 MPa,以验证在垂直于接合面的预紧方式下,拉杆预紧力分析的合理性。

#### 3.1 组合下横梁模型前处理

组合下横梁材料为 ZG25Mn 钢,拉杆材料为高强度合金钢。拉杆采用杆单元进行替代,并通过 APDL 命令编程输入组合下横梁拉杆的预紧力,确保下横梁每根拉杆的预紧力相同,网格采用面网格控制尺寸,整体采用四面体网格划分,三维网格满足雅可比、长宽比的要求,以保证其子梁接合面的网格节点相对应,可有效保证计算模型前处理带来的误差。为保证下横梁拉杆的预紧力及接合面的开缝情况,分别对两种工况进行有限元仿真分析,并进行对比。

#### 3.2 有限元计算结果

图 6 为两种工况下组合下横梁的等效应力云图。通过有限元计算可得到组合下横梁的强度、刚度及开缝情况。在中心载荷作用下组合下横梁的最大等效应力为 134 MPa,扩孔载荷作用下组合下横梁的最大等效应力为 138 MPa,最大位置出现在下横梁底部的过渡位置。

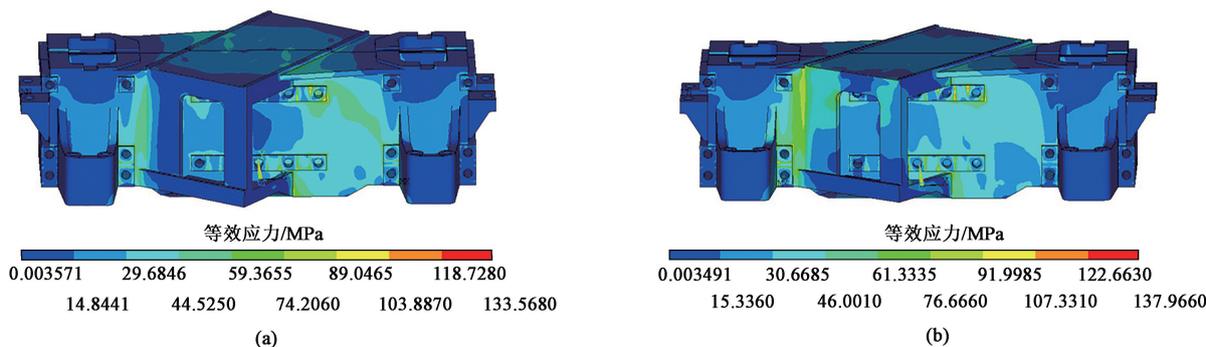


图 6 两种工况下组合下横梁等效应力云图

(a) 正载工况 (b) 扩孔工况

Fig. 6 Equivalent stress nephograms of combined lower beam under two working conditions

(a) Normal load working condition (b) Reaming working condition

图 7 为两种工况下竖直方向的位移云图。主要通过分析其立柱间下横梁竖直方向的变形挠度以判断组合下横梁的刚度,在中心载荷作用下组合下横梁在立柱间的最大变形挠度为 1.279 mm,扩孔载荷作用下组合下横梁在立柱间的最大变形挠度为 1.599 mm。

通过组合下横梁开缝的大小可判断拉杆预紧力是否能保证下横梁的整体刚度。目前,关于组合下横梁开缝大小无准确的定性标准,正载工况下的最大开缝为 0.046 mm,扩孔工况下的最大开缝为 0.041 mm,而组合下横梁上平面位置均有较小的开缝,根据开缝位置

及开缝大小可以对下横梁拉杆的位置进行更加合理的优化,根据实际设备工况,可以调整其预紧拉杆的直径及位置,其接合面开缝云图如图 8 所示。

以我国液压机行业工程经验为参考 [11],通过对有限元仿真计算结果进行分析,组合下横梁的材料为 ZG25Mn 钢,其屈服强度为 270 MPa,最大应力点安全系数为 1.97,主要受力位置安全系数均在 2 以上,满足强度要求。根据 JB/T 12229—2015 [12],下横梁立柱间每米跨度上的挠度小于或等于 0.16 mm,故要求下横梁的最大静挠度值小于 0.16 mm,满足刚度要求。两种工况下,拉杆预紧力均能够保证组

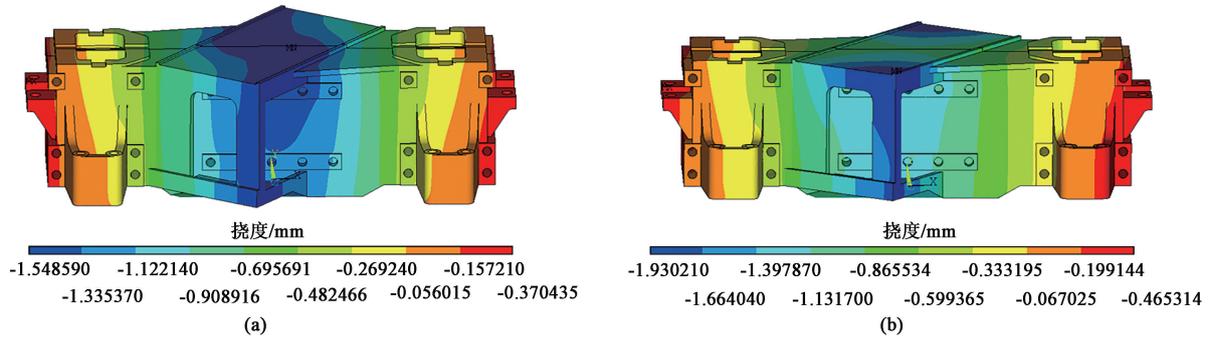


图 7 两种工况下组合下横梁的静挠度云图

(a) 正载工况 (b) 扩孔工况

Fig. 7 Static deflection nephograms of combined lower beam under two working conditions

(a) Normal load working condition (b) Reaming working condition

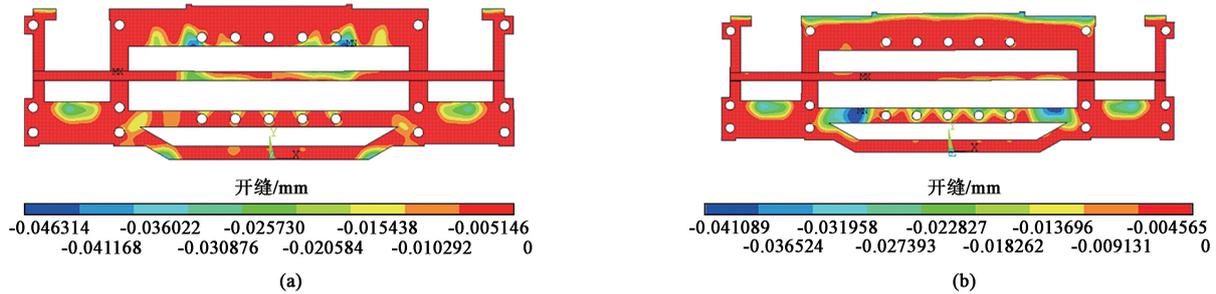


图 8 两种工况下组合下横梁开缝云图

(a) 正载工况 (b) 扩孔工况

Fig. 8 Slit nephograms of combined lower beam under two working conditions

(a) Normal load condition (b) Reaming condition

合下横梁接合面 98% 以上的接触面开缝间隙小于  $0.05 \text{ mm}^2$ ，认为组合下横梁分体结构的预紧效果良好。综上所述，两种工况下组合下横梁均满足性能要求。

## 4 结论

(1) 通过分析分体下横梁的结构特点及工作机理，研究并对比了两种分体方案对预紧力的影响，明确了垂直于接合面预紧优于沿工作台方向预紧，并且垂直于接合面预紧拉杆的重量比沿工作台方向预紧拉杆的质量减少 55%。

(2) 建立正载及扩孔两种工况下的组合下横梁拉杆预应力分析模型，提出了适合组合下横梁拉杆预紧力的计算思路及方法。结果表明，扩孔工况为恶劣工况，在组合下横梁结构设计过程需重点考虑。

(3) 通过对 100 MN 快速锻造液压机正载及扩

孔工况进行有限元仿真分析，证明了组合下横梁拉杆预紧力计算公式的可靠性，为保证预紧结构整体刚度，其组合下横梁接合面的压应力需大于等于零，开缝间隙小于  $0.05 \text{ mm}$ 。

## 参考文献:

- [1] 高峰, 郭为忠, 宋清玉, 等. 重型制造装备国内外研究与发展 [J]. 机械工程学报, 2010, 46 (19): 92-107.  
Gao F, Guo W Z, Song Q Y, et al. Current development of heavy-duty manufacturing equipments [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46 (19): 92-107.
- [2] 陈柏金. 快速锻造液压机组 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2022.  
Chen B J. Fast Forging Press [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2022.
- [3] 郭宝峰, 于琳琳, 金森, 等. 预应力组合下横梁临界预紧力影响因素研究 [J]. 中国机械工程, 2013, 24 (19): 2567-2572.  
Guo B F, Yu L L, Jin M, et al. Research on influence factors

- of critical pretension force in pre-stressed assembled lower beam [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24 (19): 2567-2572.
- [4] 董晓传, 金森, 姚阳, 等. 基于等效梁长法的组合深梁临界预紧力计算模型 [J]. 机械工程学报, 2015, 51 (15): 46-52.
- Dong X C, Jin M, Yao Y, et al. Calculation model of critical pre-load of prestressed composite deep beam based on the method of equivalent-beam-length [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51 (15): 46-52.
- [5] 董晓传, 金森, 张杰, 等. 基于叠加修正法的承弯组合结构临界预紧力研究 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2014, 45 (10): 3392-3397.
- Dong X C, Jin M, Zhang J, et al. Critical preload of bearing-bending composite structure based on superposition-correction approach [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45 (10): 3392-3397.
- [6] 刘东林, 刘艳妍. 偏载对大型双柱预应力机架的影响 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (5): 175-180.
- Liu D L, Liu Y Y. Influence of eccentric load on large double-column prestressed frame [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (5): 175-180.
- [7] 董晓传. 大型液压机组部件的临界预紧力研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
- Dong X C. Study on Critical Preload of Prestressed Composite Structures of Large Hydraulic Press [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015.
- [8] 金森, 董晓传, 邹宗园, 等. 给定预紧力下组合机架的上限载荷的计算 [J]. 中国机械工程, 2012, 23 (20): 2476-2480.
- Jin M, Dong X C, Zou Z Y, et al. Calculation of the upper-bound load for composite frame hydraulic press under the given preload [J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23 (20): 2476-2480.
- [9] 马辉, 能海强, 宋溶泽, 等. 两种工况下锻压组合机架的接触特性分析 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2013, 34 (9): 1300-1304.
- Ma H, Nai H Q, Song R Z, et al. Contact characteristics analysis of combination frame of forging press under two conditions [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2013, 34 (9): 1300-1304.
- [10] 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 on 30 MN three-beam and four-column double-action tensile hydraulic press body [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (2): 161-167.
- [11] 俞新陆. 液压机的设计与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- Yu X L. The Design and Application of Hydraulic Press [M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [12] JB/T 12229—2015, 油泵直接传动双柱斜置式自由锻造液压机 [S].
- JB/T 12229—2015, Double-Column oblique type open-die forging hydraulic press with direct drive of oil pump [S].

## 2024·“太平洋精锻杯”首届中国大学生塑性工程创新创意大赛总决赛成功举办

8月14-15日, 2024·“太平洋精锻杯”首届中国大学生塑性工程创新创意大赛总决赛在湖北省武汉市武汉理工大学举办。本次大赛由中国机械工程学会指导, 中国机械工程学会塑性工程分会主办, 武汉理工大学、华中科技大学、中国机械总院集团北京机电研究所有限公司承办, 江苏太平洋精锻科技股份有限公司冠名, 湖北三环锻造有限公司赞助, 共吸引了来自全国90余所高校的372支队伍参赛。经过资格审查和区域赛(初赛), 最终120支队伍晋级总决赛(本科生57支, 研究生63支), 近500位师生到场参加总决赛。

比赛期间, 参赛队员充分地展现了澎湃的创新激情和蓬勃的青春朝气, 围绕各自作品的创新性、合理性、应用性等进行了详细阐述, 整体水平较高; 裁判提问有的放矢, 充分考察了参赛队员对作品以及相关知识的理解和掌握, 队员们用精彩表现为“首届中国大学生塑性工程创新创意大赛”之旅画上了圆满的句号。

未来, 塑性工程分会将在中国机械工程学会的指导下, 在关注大学生成长、激发创意思维、释放创新动能、为行业培养未来人才等方面持续探索, 不断加强赛事保障、优化赛事管理, 将本赛事打造成为我国塑性工程领域的品牌赛事, 为塑性工程行业的可持续发展贡献力量。

中国机械工程学会塑性工程分会