

偏载对大型双柱预应力机架的影响

刘东林, 刘艳妍

(兰州交通大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 针对双柱上推式锻造液压机, 分析了在锻造过程中存在的偏载工况, 研究了偏载的传递路径, 明确了纵向偏载总是存在的客观性。建立了双柱预应力机架的力学模型, 分析了在偏载作用下机架的受力状态。结合对机架工作过程的研究, 确定了预应力的计算方法。实例计算结果表明: 锻造偏心距从 100 mm 增至 250 mm, 机架的预紧系数分别从横向偏载工况下的 1.12 增至 1.45、从纵向偏载工况下的 1.14 增至 1.77, 机架在纵向偏载工况下为了保证自身整体性所需的预应力更大。通过仿真分析进一步比较立柱与下梁间接合面的闭合状态, 结果表明: 相较于横向偏载工况, 机架在纵向偏载工况下更易开缝且最大缝隙更大; 对于纵向偏载工况, 立柱的纵向挠度随着预紧系数的增加显著减小, 且预紧系数增至 1.8 时, 最大缝隙趋于 0 mm, 验证了计算方法的可行性。并基于偏载工况与预应力机架的研究, 提出了在机架预应力的计算过程中有必要考虑纵向偏载产生的影响。

关键词: 双柱液压机; 预应力机架; 偏载工况; 纵向偏载; 预应力; 预紧系数

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.05.026

中图分类号: TG315

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 05-0175-06

Influence of eccentric load on large double-column prestressed frame

Liu Donglin, Liu Yanyan

(School of Mechatronic Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: For the double-column push-up forging hydraulic press, the eccentric load condition in the forging process was analyzed, the transfer path of eccentric load was studied, and the objectivity that the vertical eccentric load always exists was clarified. Then, the mechanical model of double-column prestressed frame was established, and the stress state of frame under the eccentric load was analyzed. Combined with the research on the working process of the frame, the calculation method of prestress was determined. The example calculation results show that the forging eccentricity increases from 100 mm to 250 mm, the pretension coefficient of the frame increases from 1.12 to 1.45 under the horizontal eccentric load condition and from 1.14 to 1.77 under the vertical eccentric load condition, and the prestress of the frame is greater to ensure its integrity under the vertical eccentric load condition. Through the simulation analysis, the closed state of indirect joint surface between column and lower beam was further compared. The results show that compared with the horizontal eccentric load condition, the frame is easier to crack under the vertical eccentric load condition, and the maximum gap is larger. For the vertical eccentric load condition, the vertical deflection of column decreases significantly with the increasing of the pretension coefficient, and when the pretension coefficient increases to 1.8, the maximum gap tends to 0 mm, and the feasibility of the calculation method is verified. Based on the study of eccentric load condition and prestressed frame, it is suggested that it is necessary to consider the influence of vertical eccentric load in the calculation process for the frame prestress.

Key words: double-column hydraulic press; prestressed frame; eccentric load condition; vertical eccentric load; prestress; pretension coefficient

锻造能力是衡量一个国家制造业水平的重要标准。如今, 我国在锻造液压机的设计与制造方面虽已趋于成熟, 但在设备逐渐走向大型化的进程中,

许多使从业人员困惑的问题相继出现^[1-2]。

双柱式锻造液压机的应用十分广泛, 根据驱动系统的位置不同可将其分为上推式与下拉式, 根据机架的结构形式又可分为整体式与分体式, 国内的大型双柱式锻造液压机通常以上推式分体机架为主^[3-4]。双柱式锻造液压机在锻造过程中常会由于工件形状、温度偏差、材质不均等因素引起偏载^[5], 针对分体式机架, 施加合理的预应力, 保证偏载工况下机架的立柱与上、下梁之间紧密闭合, 整体性不被破坏尤为关键。

收稿日期: 2021-04-19; 修订日期: 2021-07-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51265022); 甘肃省科技计划资助项目 (145RJZA187)

作者简介: 刘东林 (1993-), 男, 硕士研究生

E-mail: 18246638209@163.com

通信作者: 刘艳妍 (1964-), 女, 学士, 教授

E-mail: liuyy@mail.lzjtu.cn

在锻造工况下,可将偏载形式分为两种:工件偏离操作机中线形成的横向偏载,如图 1a 所示;工件与砧子宽度方向的不完全接触形成的纵向偏载,如图 1b 所示。

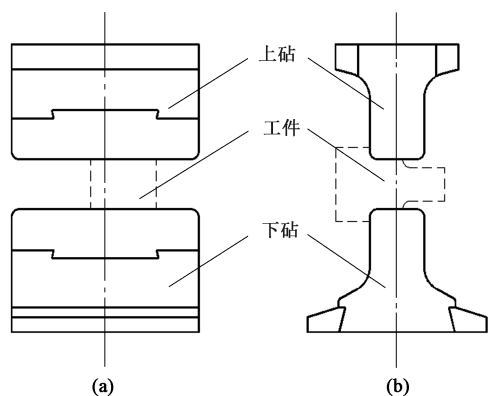


图 1 偏载工况示意图

(a) 横向偏载 (b) 纵向偏载

Fig. 1 Schematic diagrams of eccentric load conditions

(a) Horizontal eccentric load (b) Vertical eccentric load

目前,我国与之相关的文献普遍认为,“横向偏载”对机架的影响是预应力计算的加载条件。文献[6]阐述了液压机的结构特点及其设计方法,以横向偏载为条件分析了机架的受力状态;文献[7]在现有的机架受力分析模型的基础上引入了预应力,以横向偏载为条件推导了临界预应力的计算公式;文献[8]通过分析机架受横向偏载时的开缝系数、拉杆应力与立柱形变,讨论了偏心距与预应力对分体式机架接触特性的影响;文献[9]研究了主机的应力随偏心距与载荷的变化规律,分析了主机承载横向偏载的能力;文献[10]认为活动梁与机架导向装置的最佳配合间隙需满足在横向偏载工况下侧推力引起的活动梁位移。但是,锻造过程中的“纵向偏载”对主机的影响目前尚不明确,忽视纵向偏载计算机架的预应力,可能给液压机的应用带来不确定因素甚至隐患。

本文将针对双柱上推式锻造液压机,分析在锻造过程中存在的偏载工况;研究偏载在主机内的传递路径;分析机架在偏载工况下的受力状态;明确不同偏载对机架产生的影响;研究机架的工作过程并确定预应力的计算方法;为大型双柱预应力机架的设计提供参考依据。

1 偏载工况的受力分析

根据机械行业标准 JB/T 12229—2015^[11],双柱

式锻造液压机的斜置角度 β 为 22.0° 、 25.0° 、 30.0° 、 32.5° 和 35.0° ,砧子与立柱的位置关系如图 2 所示。其中, e_H 为横向偏载工况下的偏心距, e_Z 为纵向偏载工况下的偏心距。

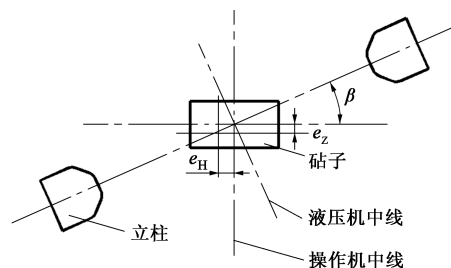


图 2 砧子与立柱斜置关系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of oblique relationship between anvil and column

考虑到球铰连接结构的自锁特性^[5],在横向偏载工况下,柱塞与上砧的受力情况如图 3a 所示;在纵向偏载工况下,柱塞与上砧的受力情况如图 3b 所示。其中, F_P 为液压机的公称载荷, F_{P1} 为主缸的公称载荷, F_{P2} 为侧缸的公称载荷, F_C 为水平侧推力, L 为侧推力作用点与上砧下表面的距离。

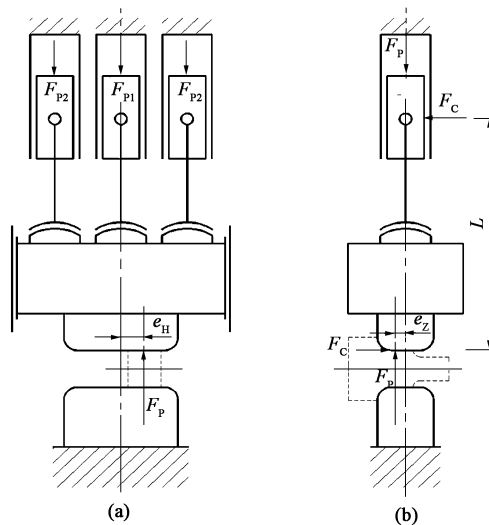


图 3 柱塞与上砧受力简图

(a) 横向偏载 (b) 纵向偏载

Fig. 3 Schematic diagrams of force for plunger and upper anvil

(a) Horizontal eccentric load (b) Vertical eccentric load

由图 3a 可知,工作缸受到 F_P 与 e_H 形成的转矩 M_H , 为:

$$M_H = (F_{P1} + 2F_{P2})e_H \cos \beta \quad (1)$$

由图 3b 可知,工作缸受到 F_P 与 e_Z 形成的转矩 M_Z , 为:

$$M_Z = [(F_{P1} + 2F_{P2})e_Z - F_C L] \cos \beta \quad (2)$$

由于锻造液压机自身的工作特性与锻件的工艺

需要, 砧子在纵向上往往难以实现满砧宽锻压, 因此, 可以认为纵向偏载几乎存在于每一次锻压中, 不断地影响着主机的各个部件。

2 机架的受力分析

横向偏载由工作缸传递至机架时, 可将机架近似看作静不定框架, 如图4所示。其中, M_a 为公称载荷作用下立柱产生的转矩, M_b 为偏心载荷作用下立柱产生的转矩, F_s 为偏心载荷作用下立柱产生的一对反方向的力, b 为机架的宽度, h 为上梁与下梁的中心距离。

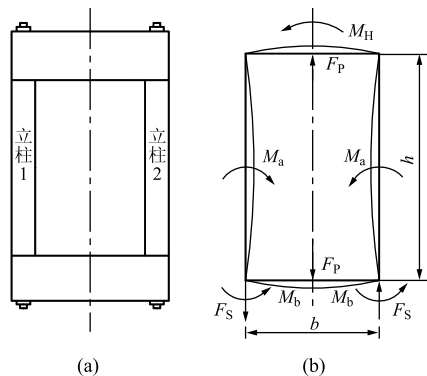


图4 横向偏载工况机架受力简图

(a) 机架横向示意图 (b) 静不定框架受力简图

Fig. 4 Schematic diagrams of force for frame under horizontal eccentric load condition

(a) Schematic diagram of frame in horizontal direction

(b) Schematic diagram of force for statically indeterminate frame

基于文献 [6] 中对机架的受力求解可以得到:

$$M_a = \frac{F_P b}{8} \left(\frac{bh + 2hI_1}{bI_2 + hI_1} \right) \quad (3)$$

$$M_b = \frac{M_H - F_S b}{2} \quad (4)$$

式中: I_1 为上梁的截面惯性矩; I_2 为立柱的截面惯性矩。

立柱产生的反向力 F_s 为:

$$F_s = \frac{3M_H}{2} \left(\frac{bI_2 + 4hI_1}{b^2I_2 + 6bhI_1} \right) \quad (5)$$

根据转矩叠加定理可知, 立柱1与立柱2 (图4a) 所受的合转矩 M_1 和 M_2 不同, 分别为:

$$M_1 = M_a - M_b \quad (6)$$

$$M_2 = M_a + M_b \quad (7)$$

不同于横向偏载, 由于双柱预应力机架的下梁固定于地面, 且机架的纵向宽度远小于横向宽度, 因此, 纵向偏载传递至机架时, 影响主要体现在机

架的上梁与立柱沿纵向的摆动与倾覆, 立柱出现弯曲变形与底面受力不均, 如图5所示。其中, F_D 为纵向偏载作用下立柱的底面受力, N; H 为侧推力作用点与立柱底面的距离, mm。

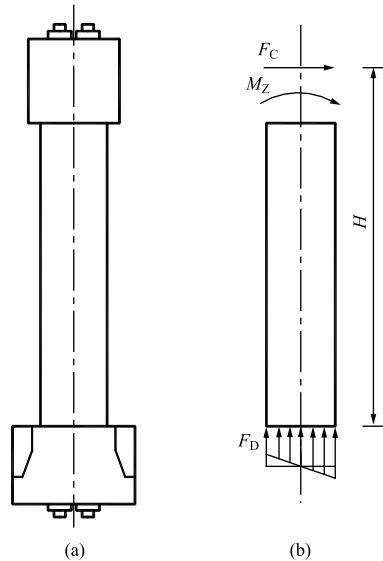


图5 纵向偏载工况机架受力简图

(a) 机架纵向示意图 (b) 单根立柱受力简图

Fig. 5 Schematic diagrams of force for frame under vertical eccentric load condition

(a) Schematic diagram of frame in vertical direction

(b) Schematic diagram of force for single column

由图5可知, 立柱1、2承担的纵向偏载相同, 参考悬臂梁承弯原理, 可知单根立柱受到的最大转矩 M_3 为:

$$M_3 = \frac{F_C H + M_Z}{2} \quad (8)$$

3 机架预应力的计算方法研究

由于大型双柱预应力机架自身高度较高, 且上梁为机架传递偏载的初始位置, 因此, 立柱与下梁间的接合面在偏载的作用下始终紧密闭合成为主机正常工作的必要条件, 机架的工作过程如图6所示。其中, F_Y 为机架的预应力, F_1 为立柱的残余预应力, F_2 为拉杆受到的拉力。非工作状态时, 如图6a所示, 立柱与拉杆均仅受 F_Y ; 承受公称载荷后, 如图6b所示, 立柱受压有所缓解, 受力减至 F_1 , 拉杆则进一步被拉伸, 受力增至 F_2 。对于中心载荷工况, 只需 $F_1 \geq 0$ 即可满足机架的整体性。

基于文献 [12] 中对螺栓预应力的推导过程, 得到机架的预应力为:

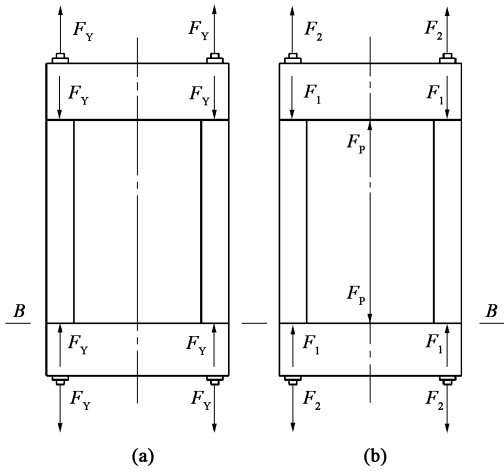


图 6 预应力机架受力简图

(a) 非工作状态 (b) 工作状态

Fig. 6 Schematic diagrams of force for prestressed frame

(a) Non-working condition (b) Working condition

$$F_Y = 2F_1 + \frac{C_1}{C_1 + C_2} F_P \quad (9)$$

式中: C_1 为立柱的材料刚度; C_2 为拉杆的材料刚度。

因此,在横向偏载工况下,立柱受到残余预应力与横向偏载的共同作用,对于结合面 $B-B$ (图 6),可以得到立柱 1 与立柱 2 受到的拉应力 σ_{HL1} 与 σ_{HL2} 分别为:

$$\sigma_{HL1} = \frac{F_1 + F_S}{A} - \frac{M_1}{W_1} \quad (10)$$

$$\sigma_{HL2} = \frac{F_1 - F_S}{A} - \frac{M_2}{W_1} \quad (11)$$

同理,在纵向偏载工况下,单根立柱受到的拉应力 σ_{ZL} 为:

$$\sigma_{ZL} = \frac{F_1}{A} - \frac{M_3}{W_2} \quad (12)$$

式中: A 为单根立柱的截面积; W_1 为横向偏载工况下单根立柱的抗弯截面系数; W_2 为纵向偏载工况下单根立柱的抗弯截面系数。

由式 (10) 和式 (11) 可知, $\sigma_{HL1} > \sigma_{HL2}$, 为了保证机架在两种偏载工况下的整体性, 必须满足式 (13):

$$\begin{cases} \sigma_{HL2} \geq 0 \\ \sigma_{ZL} \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

由式 (9)、式 (11) ~ 式 (13) 可以求解得到: 在横向偏载工况下, 机架所需的预应力 F_{HY} 为:

$$F_{HY} \geq \frac{C_1 F_P}{C_1 + C_2} + \frac{2AM_2}{W_1} + 2F_S \quad (14)$$

在纵向偏载工况下, 机架所需的预应力 F_{ZY} 为:

$$F_{ZY} \geq \frac{C_1 F_P}{C_1 + C_2} + \frac{2AM_3}{W_2} \quad (15)$$

对于大型双柱预应力机架而言, 理论上施加的预应力不应小于 $\max[\min(F_{HY}), \min(F_{ZY})]$ 。

在实际中, 机架的预应力 F_Y 常采用预紧系数与公称载荷乘积的方法确定:

$$F_Y = \eta F_P \quad (16)$$

式中: η 为机架的预紧系数, 常取 1.2~1.5。

由式 (14)~式 (16) 可以进一步求解得到在横、纵向偏载工况下机架的预紧系数 η_H 、 η_Z 分别为:

$$\eta_H = \frac{F_{HY}}{F_P} \quad (17)$$

$$\eta_Z = \frac{F_{ZY}}{F_P} \quad (18)$$

以公称载荷为 63 MN、允许锻造偏心距为 500 mm 的双柱上推式锻造液压机的结构参数为依据, 对机架的预紧系数进行计算, 计算结果如表 1 所示。

表 1 预紧系数对比

Table 1 Comparison of pretension coefficients

偏心距/mm	η_H	η_Z
100	1.12	1.14
150	1.21	1.33
200	1.29	1.46
250	1.45	1.77

根据表 1 的数据可知, 相比于横向偏载工况, 纵向偏载工况在允许锻造偏心距内为保证机架整体性所需的预紧系数更大, 即在机架预应力的计算过程中, 不仅要考虑横向偏载对机架的影响, 纵向偏载的影响同样不容忽视, 应将两者分别计算并加以对比与分析, 进而选择更合理的机架预应力。

对于现役的大型双柱式锻造液压机, 虽然在纵向上机架整体性被破坏的情况极为罕见, 其原因可能为: 锻造过程中纵向偏心距未达到允许锻造偏心距的上限, 但这不能说明纵向偏载不会给大型预应力机架的使用带来隐患, 应给予允许锻造偏心距、砧子宽度等参数更多的设计标准。

4 仿真分析

为进一步分析不同偏载对机架的影响, 建立主机实体模型, 如图 7 所示。经 Hypermesh 软件完成网格划分与载荷施加后, 导入 Ansys 软件进行运算与分析。根据理论计算结果, 若仅以横向偏载为条

件计算机架的预应力, 应对主机模型施加的预应力为 1.45 倍公称载荷, 考虑到其他影响因素, 取 1.5 倍公称载荷作为机架的预应力。

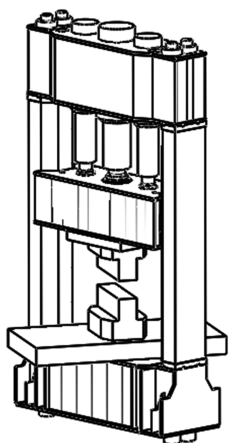


图7 主机实体模型示意图

Fig. 7 Schematic diagram of host entity model

根据仿真结果可知, 当偏心距足够大时, 机架的整体性能能够被偏载破坏, 使立柱与下梁间的接合面产生开缝, 最大缝隙 d_{\max} 随偏心距 e 的变化关系如图8所示。数据表明, 对于相同偏心距, 接合面在纵向偏载工况下的最大缝隙明显更大, 即在允许锻造偏心距内, 纵向偏载对机架整体性的影响大于横向偏载。

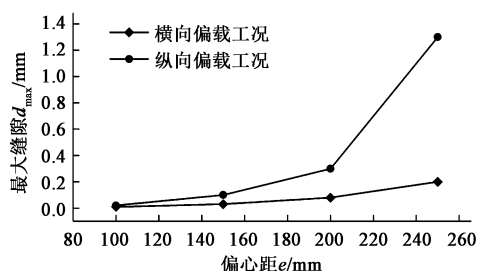


图8 最大缝隙与偏心距关系图

Fig. 8 Relationship diagram between maximum gap and eccentricity

针对纵向偏载工况, 保持偏心距 250 mm 不变, 随着机架预应力的不断增加, 立柱的纵向挠度 y 与接合面最大缝隙 d_{\max} 均显著减小, 如图9、图10和图11所示。当预紧系数增至 1.8 时, 最大缝隙趋于 0 mm, 此时, 可以认为预应力满足机架整体性需求, 验证了计算方法的可行性。

5 结论

(1) 分析了锻造过程中存在的偏载工况, 研究了偏载的传递路径, 明确了纵向偏载总是存在的客观性。

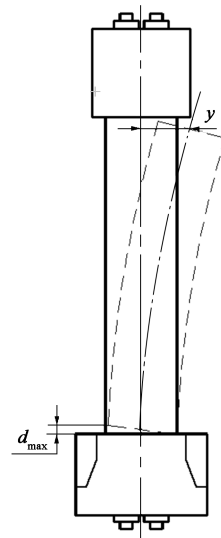


图9 纵向偏载工况的挠度与开缝示意图

Fig. 9 Schematic diagram of deflection and slit under vertical eccentric load condition

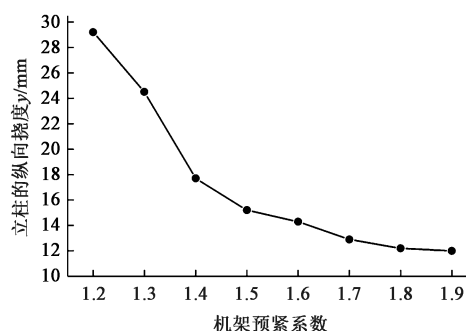


图10 挠度与预紧系数关系图

Fig. 10 Relationship diagram between deflection and pretension coefficient

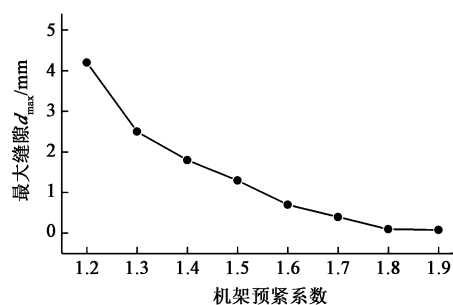


图11 最大缝隙与预紧系数关系图

Fig. 11 Relationship diagram between maximum gap and pretension coefficient

(2) 建立了机架的力学模型, 分析了机架在两种偏载工况下的受力状态, 明确了不同偏载对机架产生的影响。

(3) 结合对机架工作过程的研究, 确定了机架预应力的计算方法。经实例计算得出机架在纵向偏载工况下为保证整体性所需的预应力更大。

(4) 通过仿真分析,进一步比较了立柱与下梁间接合面的闭合状态,验证了计算方法的可行性,提出了在机架预应力的计算过程中,有必要考虑纵向偏载产生的影响。

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] 陈飞,朱华佳,李佳航,等. 金属材料热锻过程组织演化建模方法的新进展[J]. 锻压技术, 2021, 46 (9): 16-21.
Chen F, Zhu H J, Li J H, et al. New progress on modeling methods of microstructure evolution in hot forging process of metallic materials [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (9): 16-21.
- [3] 郭晓峰,成先飏,张建华. 自由锻造液压机的发展与展望[J]. 重型机械, 2012, (3): 29-32.
Guo X F, Cheng X B, Zhang J H. Development and outlook of free forging hydraulic press [J]. Heavy Machinery, 2012, (3): 29-32.
- [4] 蔡墟. 我国自由锻液压机和大型锻件生产的发展历程[J]. 大型铸锻件, 2007, (1): 37-44.
Cai Y. The developmental course of our free-forging hydraulic press and the heavy casting and forging production [J]. Heavy Casting and Forging, 2007, (1): 34-44.
- [5] 刘艳妍,杨晋,马学鹏,等. 上推式快锻液压机活动横梁转动自锁条件研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50 (8): 66-72.
Liu Y Y, Yang J, Ma X P, et al. Rotating self-locked condition research of the pushing high-speed forging hydraulic press' movable beam [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50 (8): 66-72.
- [6] 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.
- [7] 董晓传,金森. 预紧组合结构液压机临界预紧力的研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25 (9): 1158-1163.
Dong X C, Jin M. Study on critical preload of prestressed composite structure hydraulic press [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25 (9): 1158-1163.
- [8] 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.
- [9] 刘豪,宋朝省,朱才朝,等. 100 MN 锻压机偏载承载能力分析[J]. 重型机械, 2018, (3): 46-51.
Liu H, Song C S, Zhu C C, et al. Analysis of load capacity for 100 MN forging machine [J]. Heavy Machinery, 2018, (3): 46-51.
- [10] 高梦迪,刘志峰,黄海鸿,等. 液压机滑块导向装置最佳配合设计方法研究[J]. 中国机械工程, 2016, 27 (24): 3267-3272.
Gao M D, Liu Z F, Huang H H, et al. A novel method for best fit design of slide guide device in hydraulic press [J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27 (24): 3267-3272.
- [11] 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].
- [12] 濮良贵,纪名刚. 机械设计[M]. 8 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
Pu L G, Ji M G. Design of Machinery [M]. 8th Edition. Beijing: Higher Education Press, 2006.

关于中国机械工程学会塑性工程分会发展会员的通知

中国机械工程学会塑性工程(锻压)分会成立于1963年,是全国性的锻压科学技术工作者的学术性社会团体,是依法登记的法人社团。经本会理事会研究决定:凡承认本会章程并符合条件者,可申请为本会会员。

会员的权利与义务: 1. 颁发个人/团体会员证书及铜牌,铜牌由秘书处统一制作并颁发,可申请定制; 2. 参加本学会组织的年会会议费可享受适当优惠; 3. 优先参加本会组织举办的国内外有关学术活动和其他活动; 4. 优先获得本会的有关学术资料,免费获赠全年学会会刊《锻压技术》杂志; 5. 在学会网站主页进行企业宣传、logo链接; 6. 享有本会的选举权、被选举权和表决权; 7. 接受本会委托,进行论证、评议、咨询等工作; 8. 享有入会、退会的自由。

申请手续: 提交入会申请表。申请个人会员,需填写《个人会员入会申请表》,同时提交“个人身份证复印件”、“一寸免冠照片两张”。申请团体会员,需填写《团体会员入会申请表》,同时提交“法人登记证书复印件”。材料均需一式一份寄至学会秘书处,并以电子邮件方式将表格发送至我会邮箱;也可登陆学会网站,进行在线注册。经审批通过后,将及时通知申请单位或个人。会员缴纳会费后正式登记,由学会秘书处颁发会员证书。

地 址: 北京市海淀区学清路18号707室塑性工程分会

联系人: 李佳盈、秦思晓、周 林、金 红

电 话: 010-62912592 传 真: 010-62912592 邮 箱: duanya@cmes.org 网 址: <http://www.cstp-cmes.org.cn>

中国机械工程学会塑性工程分会