

装备与成套技术

工作缸柱塞连接形式对锻造液压机的影响

刘艳妍¹, 王 勇¹, 何琪功²

(1. 兰州交通大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州兰石能源装备工程研究院有限公司, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 针对上压式双柱自由锻造液压机的结构特性和工作状态, 分析了工作缸与活动梁连接球铰副的工作条件, 阐述了横向偏心锻造与纵向偏心锻造的成形过程, 分析了偏载工况下柱塞与缸体的接触状态。结合上压式双柱自由锻造液压机工作缸与活动梁的典型连接形式, 研究了工作缸柱塞与活动梁连接形式的工作机理, 明确了工作缸柱塞与活动梁的不同连接形式对液压机的影响, 确定了适合大型上压式双柱自由锻造液压机的结构形式, 研究了合理控制液压机偏心锻造的条件, 制定了液压机的偏载控制策略, 提出了液压机最大允许锻造偏心距的确定思路, 为大型上压式双柱自由锻造液压机的结构设计和安全使用提供了理论依据。

关键词: 液压机; 偏心锻造; 球铰连接; 锻造偏心距; 偏载

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.03.024

中图分类号: TG315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 03-0170-05

Influence of working cylinder plunger connection form on forging hydraulic press

Liu Yanyan¹, Wang Yong¹, He Qigong²

(1. School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Lanzhou LS Energy Equipment Engineering Research Co., Ltd., Lanzhou 730050, China)

Abstract: In view of the structural characteristics and working conditions for upward pressure double-column free forging hydraulic press, the working conditions of ball hinge pair connecting working cylinder and movable beam were analyzed, the forming processes of transverse eccentric forging and longitudinal eccentric forging were explained, and the contact state between plunger and cylinder body under the condition of eccentric load was analyzed. Then, combined with the typical connection form of the working cylinder and the movable beam for the upward pressure double-column free forging hydraulic press, the working mechanism of the connection form for the the working cylinder plunger and the movable beam was studied, and the influences of different connection forms for the working cylinder plunger and the movable beam on the hydraulic press were clarified. Furthermore, the structure form suitable for the large-scale upward pressure double-column free forging hydraulic press was determined, and the conditions for the reasonable control of eccentric forging for hydraulic press were studied. Finally, the eccentric load control strategy of hydraulic press was formulated, and the determination thoughts of the maximum allowable forging eccentricity for hydraulic press was proposed, which provided a theoretical basis for the structural design and safe use of the large-scale upward pressure double-column free forging hydraulic press.

Key words: hydraulic press; eccentric forging; ball hinge connection; forging eccentricity; euentric load

双柱自由锻造液压机主机的结构形式主要分为斜置下拉式和斜置上压式两种, 大型双柱自由锻造液压机主要采用斜置上压式的结构形式。其工作缸由3个柱塞缸组成, 包括1个主缸和2个侧缸, 工作缸柱塞与活动梁一般采用单球铰或双球铰连

接^[1], 不同的连接形式对液压机的工作原理有着重要的影响。

针对双柱自由锻造液压机工作缸的连接球铰形式, 文献[1]对双柱自由锻造液压机的结构特点和技术参数进行了全面分析, 并认为铰接式短摇杆轴的自适应性转动, 可使柱塞缸导套和密封处所承受的水平推力减小, 延长其使用寿命。文献[2]基于球铰自锁条件分析了柱塞缸的工作状态, 研究了连接球铰副挤压工件时的自锁偏心距, 明确了柱塞缸连接球铰副的运动条件。文献[3]研究了上推式快锻液压机工作缸支撑球铰的摩擦阻力矩和摩擦圆半径, 分析了液压机柱

收稿日期: 2022-05-09; 修订日期: 2022-08-12

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: 刘艳妍(1964-), 女, 学士, 教授

E-mail: liuyy@mail.lzjtu.cn

塞连接球铰的自锁条件,确定了锻造工况下液压机柱塞与活动梁连接球铰的工作状态。文献[4]分析了柱塞与活动梁球铰连接的结构特性,研究了主缸柱塞与活动梁的连接形式,分析了单、双球铰连接的自锁特性。文献[5]根据球铰连接的结构特性,分析了工作缸柱塞球铰支撑的工作机理,提出了锻造工况下工作缸柱塞球铰支撑应处于自锁状态,明确了球铰转动的条件和球铰侧向推力对柱塞缸受力分析的重要性。文献[6]通过实验方法,研究了中间杆长度和球铰半径对柱塞与导套间侧推力的影响规律,提出了中间杆长度和球铰半径的设计准则。文献[7]针对柱塞与活动梁的不同连接形式,分析了液压机偏载工况下作用于工作缸的侧推力,研究了侧推力对工作缸的影响。文献[8]针对快锻液压机采用位移传感器测量的锻件尺寸与实际尺寸存在一定误差的问题,通过数学建模和有限元分析,研究了活动横梁受力偏转对锻件检测精度的影响规律。文献[9]研究了液压机滑块的四角调平电液系统,提出了一种基于空间任务坐标系的控制方法。

针对斜置上压式双柱自由锻造液压机,本文结合球铰自锁条件,分析工作缸柱塞与活动梁采用刚性连接、单球铰连接和双球铰连接时的结构特性,并研究了工作缸柱塞与活动梁的连接方式对液压机工作过程的影响,以及主缸和侧缸的合理连接方式,明确了双柱自由锻造液压机的机构原理,确定液压机的偏载控制策略,为上压式双柱自由锻造液压机的主机结构设计与理论分析提供了依据。

1 连接方式对工作缸工作状态的影响

为了有效研究连接方式对工作缸工作状态的影响,分别建立工作缸柱塞与活动梁采用刚性连接、单球铰连接和双球铰连接的单柱塞缸简化模型,并分析锻造工况下柱塞与缸体的接触状态,如图1所示。其中, e 为锻造偏心距, r 为球铰摩擦圆半径, M 为偏载力矩, F 为偏心载荷, p 为工作缸压力。

柱塞与活动梁采用刚性连接的示意图如图1a所示。在偏心载荷 F 的作用下,偏载力矩通过柱塞作用于缸体,柱塞与缸体的接触状态在图1所示的3种结构中最恶劣。随着锻造偏心距的增加,作用于缸体的偏载力矩越大。

柱塞与活动梁采用单球铰连接的示意图如图1b所示。由球铰副转动自锁条件^[10]可知:由于摩擦力

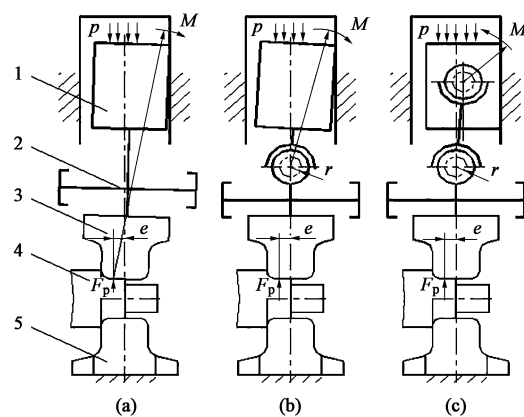


图1 工作缸连接形式

1. 柱塞 2. 活动梁 3. 上砧 4. 工件 5. 下砧
(a) 刚性连接 (b) 单球铰连接 (c) 双球铰连接

Fig. 1 Connecting forms of working cylinder

(a) Rigid connection (b) Single spherical hinge connection
(c) Double spherical hinge connection

的影响,受径向载荷作用的转动副,当外力的合力作用于摩擦圆之内时,转动副处于自锁状态。无论作用力多大,处于自锁状态的转动副均不会旋转,属刚性连接。即 $e < r$ 时,球铰处于自锁状态; $e > r$ 时,球铰满足转动条件。

由文献[3]可知,液压机球铰副的摩擦圆半径为:

$$r = \frac{3\mu R_q \sin^2 \alpha (4 - \sin^2 \alpha)}{8(1 - \cos^3 \alpha)} \quad (1)$$

式中: α 为球面最大张角, ($^\circ$); R_q 为球面半径, m; μ 为球面摩擦因数。

当球铰转动时,球铰的摩擦转矩 M_f 为:

$$M_f = \mu F_p r \quad (2)$$

式中: F_p 为球铰径向载荷, N。

目前,国产和进口锻造液压机的工作缸连接球铰副均选用了钢-铜和钢-球墨铸铁的匹配,国产设备选用钢与球墨铸铁的匹配居多。钢与铜的无润滑静摩擦因数为0.19,而钢与球墨铸铁的无润滑静摩擦因数为0.30^[11]。对于双柱自由锻造液压机,工作缸连接球铰的较大半径和较高摩擦因数使得球铰的摩擦圆半径显著增大,这一特点为液压机在球铰自锁状态下进行锻造提供了条件。

柱塞与活动梁采用双球铰连接的示意图如图1c所示。双球铰连接同样满足单球铰连接的运动条件,具备单球铰连接的运动特性;不同点在于柱塞与缸体的接触状态在图1所示的3种结构中改善最为明显,而偏载力矩的方向与单球铰连接相反。

由图1所示3种结构比较可知:在挤压工件时,图1b和图1c有1个必备的工作条件,即 $e < r$ 。

2 连接方式对液压机的影响分析

斜置上压式双柱自由锻造液压机的工作过程包括快速下降、对工件挤压的锻造过程和快速回程。由于快速下降和快速回程的负荷相对锻压工况要小很多,为便于分析,将快速下降和快速回程定义为空载运动。液压机的空载运动由回程缸控制,而锻造过程由工作缸作用的。

在双柱自由锻造液压机的锻造过程中,作用于上砧的偏心载荷可分为横向偏载和纵向偏载,如图2所示。横向偏载主要是由操作不当而产生的,具有一定的不确定性;而纵向偏载是由锻造工艺所决定的,是液压机锻造工件的必要条件。在现有的文献^[1,12-13]中,更多的是以横向偏载研究液压机的相关问题,而忽视了纵向偏载对液压机工作的影响。

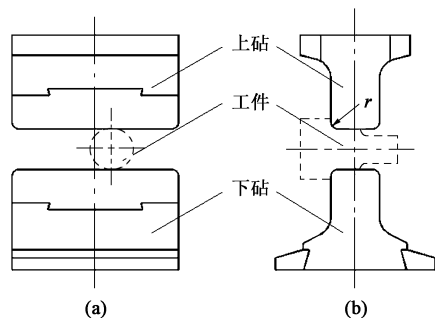


图2 偏载工况示意图

(a) 横向偏载 (b) 纵向偏载

Fig. 2 Schematic diagrams of eccentric load conditions

(a) Lateral eccentric load (b) Longitudinal eccentric load

锻造过程中,在锻造力的作用下,机架会产生较大的变形,且立柱的变形更为显著,如图3所示。双柱自由锻造液压机的活动梁通过导向装置沿立柱做上下运动。在锻造工况下,立柱变形对活动梁运动的影响尤为突出。

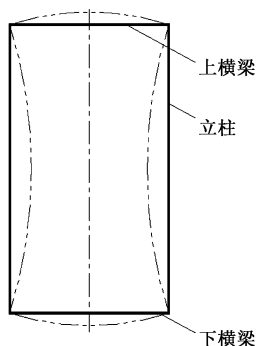


图3 横向偏载工况下机架变形简图

Fig. 3 Schematic diagram of frame deformation under lateral eccentric load

双柱自由锻造液压机工作缸由3个柱塞缸组成,包括1个主缸和2个侧缸;两个回程缸控制工作缸柱塞的复位。为了有效分析斜置上压式双柱自由锻造液压机的结构特性,在原理分析时假设液压机的斜置角度为零。图4与图5为两种典型的上压式自由锻造液压机的结构形式。

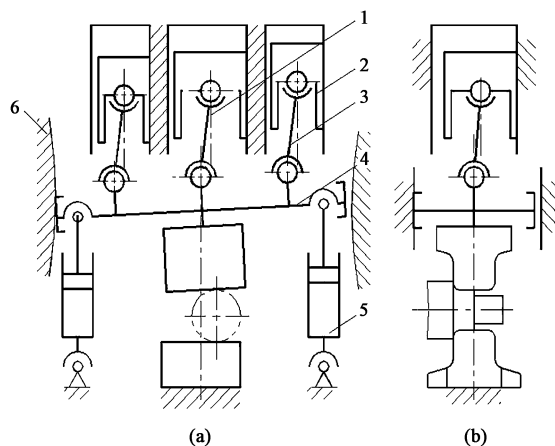


图4 双球铰连接结构简图

1. 主缸 2. 侧缸 3. 连杆 4. 活动梁 5. 回程缸 6. 立柱

(a) 工作缸正视图 (b) 工作缸侧视图

Fig. 4 Schematic diagrams of double spherical hinge connection structure

(a) Front view of working cylinder (b) Side view of working cylinder

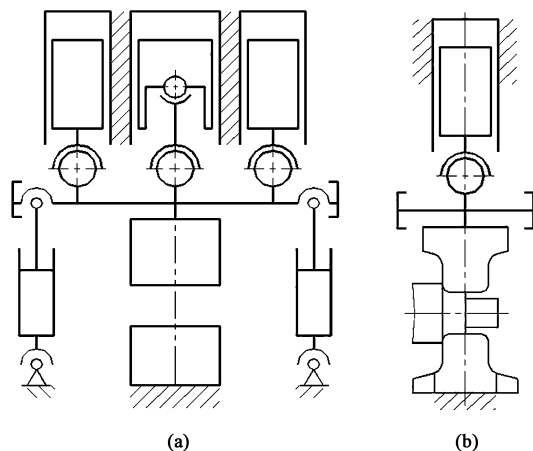


图5 单球铰连接结构简图

(a) 工作缸正视图 (b) 工作缸侧视图

Fig. 5 Schematic diagrams of single spherical hinge connection structure

(a) Front view of working cylinder (b) Side view of working cylinder

图4中,主缸与侧缸、活动梁均采用双球铰连接。两个侧缸柱塞及其连杆与活动梁组成锻造液压机的活动部件,活动部件的自由度 P 为:

$$P = 3n - (2p_1 + p_h) = 3 \times 7 - (2 \times 10 + 0) = 1 \quad (3)$$

式中: n 为机构数,本文为主缸柱塞、2个侧缸柱塞、3个连杆和活动梁,共7个机构; p_1 为低副数,

本文中为10。包括柱塞和缸体的3个滑动副、6个球铰转动副和1个活动梁与立柱的滑动副; p_h 为高副数, 本文中为0。

图4中, 根据活动部件的运动条件, 活动梁与立柱存在移动约束, 当活动部件下行时, 回程缸的行程误差会使活动梁产生偏转。一旦使活动梁导向与立柱形成如图4所示的接触并进行横向偏载锻造, 并且由于锻造工况下球铰处于自锁状态, 当挤压工件时, 并且受力后变形的机架立柱会对活动梁产生较大的侧推力, 并通过柱塞作用于缸体, 使得活塞与缸体的接触应力急剧增大, 增加工作缸的故障率。对于纵向偏载的锻造工况, 机架立柱变形的影响相对较小。

图5中, 主缸柱塞与活动梁采用双球铰连接, 侧缸柱塞与活动梁采用单球铰连接。两个侧缸柱塞与活动梁组成液压机的活动部件。其中机构包括主缸柱塞、2个侧缸柱塞、1个连杆和活动梁, 低副包括柱塞与缸体的3个滑动副和4个球铰转动副, 因此, 活动部件的自由度 P 为:

$$P = 3n - (2p_l + p_h) = 3 \times 5 - (2 \times 7 + 0) = 1 \quad (4)$$

图5所示结构的特点是活动梁与机架立柱之间不存在约束, 只要活动梁与立柱之间的间隙合理, 机架立柱与活动梁之间便不会产生相互作用。而且, 由于侧缸成为双柱自由锻造液压机活动部件的导向, 活动部件的控制精度大大提高, 增加了锻造工况的可靠性。与图4所示结构相比, 回程缸的同步误差对液压机的影响也得到了极大的改善。

在图5所示的结构中, 主缸柱塞采用双球铰连接, 两侧缸采用单球铰连接, 主缸柱塞与缸体的接触状态比侧缸合理, 承载能力更强。因此, 选择较大直径的主缸和较小直径的侧缸有利于锻造液压机的偏载工况。

通过对图4和图5所示结构的比较分析可知, 图5所示结构更为合理, 更有利于大型锻造液压机的应用。

3 锻造液压机的偏载控制策略

以图5所示结构分析双柱自由锻造液压机的偏载控制策略。液压机锻造过程中, 作用于上砧的偏心载荷可分为横向偏载和纵向偏载。自由锻造工艺决定了液压机的偏心锻造工况, 如图5b所示, 纵向偏载是液压机锻造工件的必要条件。柱塞与活动梁采用球铰连接时, 为了保证液压机的正常工作, 纵

向偏载的锻造偏心距必须小于球铰摩擦圆半径, 使球铰在锻造工况下满足自锁状态。

针对图5所示结构, 液压机工作缸可分为3个工作状态: 仅侧缸工作、仅主缸工作和主侧缸同时工作。由图1分析可知, 与双球铰连接相比, 单球铰连接时柱塞与缸体的接触状态和抗偏载性能更为恶劣。因此, 针对图5所示结构, 利用侧缸的最大允许偏载转矩确定主缸的结构参数更为合理。

设单球铰连接的侧缸柱塞与缸体的最大允许承载转矩为 M_1 。当双柱自由锻造液压机承载纵向偏心载荷时, 仅侧缸工作, 满足:

$$2pA_1e_1 \leq 2M_1 \quad (5)$$

$$e_1 \leq \frac{M_1}{pA_1} \quad (6)$$

式中: A_1 为侧缸的有效作用面积; e_1 为仅侧缸工作时液压机能够达到的纵向载荷锻造偏心距。

当双柱自由锻造液压机承载纵向偏载时, 仅主缸工作, 满足:

$$pA_2e_2 \leq M_2 \quad (7)$$

式中: A_2 为主缸的有效作用面积; e_2 为仅主缸工作时液压机能够达到的纵向载荷锻造偏心距; M_2 为主缸最大允许承载力矩。

由于侧缸的最大允许承载力矩小于主缸最大允许承载力矩, 为有效控制双柱自由锻造液压机偏心锻造工况, 设计主缸时取:

$$e_2 = e_1 \quad (8)$$

$$M_2 = KM_1 \quad (9)$$

式中: K 为主缸偏载力矩放大系数。

则由式(7)、式(8)和(9)可得:

$$A_2 = KA_1 \quad (10)$$

以式(6)、式(8)和式(10)确定的锻造偏心距即为主缸和侧缸同时工作的锻造偏心距。液压机的横向偏载与纵向偏载分析结果相同。

为保证液压机锻造过程中, 工作缸柱塞与活动梁连接球铰的自锁特性, 还应满足:

$$e_1 \leq r_1 = r_2 \quad (11)$$

式中: r_1 为侧缸球铰的摩擦圆半径; r_2 为主缸球铰的摩擦圆半径。

合理确定连接球铰的摩擦圆半径, 可以有效控制液压机的偏心锻造, 并对工作缸进行有效的安全保护。由上述分析可知, 液压机在直径为 $\Phi 2e_1$ 的圆内进行偏心锻造时, 属安全工作范围。国产设备习惯用 $2e_2$ 来表示液压机的最大允许锻造偏心距。

但是, 由于液压机纵向偏载产生的侧推力通过

工作缸作用于机架上横梁,使双柱自由锻造液压机机架产生一定的纵向倾覆力矩,对机架受力产生较大影响,特别是对大型预应力机架的影响尤为突出。国产双柱自由锻造液压机研究对纵向偏载的影响并未给予足够重视,也为设备的应用埋下了隐患。因此,作为双柱自由锻造液压机重要的参数,最大允许锻造偏心距应将纵向允许锻造偏心距和横向允许偏心距分别控制,适度减小纵向允许锻造偏心距有利于机架的优化设计。明确纵向允许锻造偏心距还有利于用户的工装设计,便于合理控制砧宽尺寸。

4 结 论

(1) 分析了上压式双柱自由锻造液压机柱塞与活动梁不同连接方式的结构特性,明确了偏载工况下柱塞与缸体的接触状态;结合连接球铰副的运动条件,确定了锻造工况下连接球铰副应满足自锁状态,为有效分析液压机的结构特性提供了条件。

(2) 根据上压式双柱自由锻造液压机的结构特点,分析了横向偏心锻造和纵向偏心锻造的形成过程,研究了柱塞与活动梁不同连接形式的结构特性,确定了适合大型上压式双柱自由锻造液压机的结构形式。

(3) 明确了纵向偏心锻造对双柱自由锻造液压机的影响,研究了合理控制偏心锻造的条件,分析了液压机最大允许锻造偏心距的确定思路,明确了柱塞与活动梁连接形式的设计思路,为大型上压式双柱液压机的结构设计和安全使用提供了依据。

参考文献:

- [1] 郭玉玺. 机械行业标准《油泵直接传动双柱斜置式自由锻造液压机》释义 [J]. 锻压技术, 2012, 37 (5): 185-194.
Guo Y X. Explanation of machinery industry standard "Double-column oblique open-die forging hydraulic press with direct drive of oil pump" [J]. Forging & Stamping Technology, 2012, 37 (5): 185-194.
- [2] 刘艳妍, 欧士浩, 刘东林. 双球铰连接柱塞缸的结构性能 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (5): 158-162.
Liu Y Y, Ou S H, Liu D L. Structural performance of plunger cylinder connected by a double ball hinge [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (5): 158-162.
- [3] 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.

- [4] 赵长财, 李文平, 周维海, 等. 液压机柱塞球面支撑的力学及机构学分析 [J]. 重型机械, 1996, (4): 15-18.
Zhao C C, Li W P, Zhou W H, et al. Hydraulic press plunger spherical connection of mechanics and mechanisms analysis [J]. Heavy Machinery, 1996, (4): 15-18.
- [5] 刘艳妍, 杨晋. 双柱锻造液压机工作缸球铰力学分析 [J]. 机械科学与技术, 2014, 33 (6): 789-791.
Liu Y Y, Yang J. The mechanics analysis of spheric joint of working cylinder for double column type forging hydraulic press [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2014, 33 (6): 789-791.
- [6] 赵石岩, 赵鑫, 金森, 等. 双球铰结构柱塞缸侧推力的实验研究 [J]. 塑性工程学报, 2015, 22 (4): 111-140.
Zhao S Y, Zhao X, Jin M, et al. Experimental study on side thrust of piston cylinder with structure [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2015, 22 (4): 111-140.
- [7] 邹春来, 黄明辉, 湛利华, 等. 巨型压机主工作缸柱塞与活动横梁连接方式的研究 [J]. 现代制造工程, 2009, (2): 101-103, 120.
Zou C L, Huang M H, Zhan L H, et al. Study on the connections between the press plunger and moving beam of largescale stamp forging hydrostatic press [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2009, (2): 101-103, 120.
- [8] 柯锋贤, 张朝壮, 陈柏金. 快锻液压机检测精度影响因素研究 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (8): 174-179.
Ke F X, Zhang C Z, Chen B J. Research on influencing factors of detection accuracy for quick forging hydraulic press [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (8): 174-179.
- [9] 熊义. 基于任务坐标系的液压机四角调平控制 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (7): 166-171.
Xiong Y. Four-corner leveling control of hydraulic press based on task coordinate system [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (7): 166-171.
- [10] 孙恒, 陈作模, 葛文杰. 机械原理 [M]. 7 版. 北京: 高等教育出版社, 2007.
Sun H, Chen Z M, Ge W J. Mechanisms and Machine Theory [M]. 7th Edition. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [11] 闻邦椿, 张义民, 鄂中凯, 等. 机械设计手册 [M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2010.
Wen B C, Zhang Y M, E Z K, et al. Machine Design Handbook [M]. 5th Edition. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [12] 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.
- [13] 吴生富, 金森, 聂绍珉, 等. 大型锻造液压机全预紧组合机架的整体性及影响因素分析 [J]. 塑性工程学报, 2006, 13 (2): 110-113.
Wu S F, Jin M, Nie S M, et al. The integration property of heavy forge hydraulic press and its influence factors [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2006, 13 (2): 110-113.