

综述

快速锻造液压机技术现状及发展趋势

陈柏金, 刘廷君

(华中科技大学 材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 简要介绍了目前快速锻造液压机的技术现状, 对其主机结构、液压传动系统、控制系统等方面的技术特点进行了分析; 主机结构形式多样化, 以预应力结构为主, 均采用可调平面导向, 立柱与横梁采用平接式或插入式结构, 主缸多采用双球铰法兰连接等; 液压系统传动形式模式化, 形成了以高频响比例阀和伺服锻造阀组成的阀控系统, 以及正弦泵组成的泵控系统 3 种典型液压传动形式; 控制系统标准化, 均采用西门子控制器及工业以太网组成的现场网络控制系统。此外, 从绿色设计、能量回收利用、预测性维护、自动锻造以及应用新技术等方面对快速锻造液压机的发展趋势进行了阐述。

关键词: 锻造液压机; 主机结构; 液压传动; 控制系统; 机电液一体化

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.11.001

中图分类号: TG315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 11-0001-06

Technical status and development trend on fast forging hydraulic press

Chen Baijin, Liu Tingjun

(School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The current technical status of fast forging hydraulic press was briefly introduced, and the technical characteristics of its host structures, hydraulic transmission systems, control systems and other aspects were analyzed. Then, the host structure is diversified mainly pre-stressed structures, all of which adopt adjustable plane guides, columns and cross beams adopt flat-joint or plug-in structures, and main cylinders mostly adopt double-ball hinge flange connections. The transmission form of hydraulic system is standardized, forming three typical hydraulic transmission forms, namely, the valve control system composed of high-frequency response proportional valves and servo forging valves, and the pump control system composed of a sinusoidal pump. The control system is standardized and adopt on-site network control systems composed of Siemens controllers and industrial Ethernet network control system. Finally, the development trend of fast forging hydraulic presses was described in terms of green design, energy recovery, predictive maintenance, automatic forging and application of new technologies.

Key words: forging hydraulic press; host structure; hydraulic transmission; control system; integrative technique of mechanics-electronics-hydraulics

快速锻造液压机由于锻造速度快、锻件尺寸控制精度高、自动化程度高等特点, 广泛应用于机械、特殊钢、有色冶金、船舶、铁路机车、能源等行业, 适合于各种碳素钢、合金钢、有色金属等材质的锭(坯)在热态下的自由锻造, 能够完成各种自由锻造工序, 已成为自由锻造领域的主流装备。

快速锻造液压机经过近 70 年的发展, 其组成基本形成定式: 以液压油为工作介质, 采用油泵直接传动; 快速锻造液压机、锻造操作机等组成机组, 一人操作; 在每分钟锻造次数高达 80 次以上时, 能

够实现液压机与操作机的自动联动; 锻件尺寸控制精度可以达到 $\pm 1 \text{ mm}^{[1]}$ 。

快速锻造液压机由本体、液压控制系统、电气控制系统等组成, 是典型的机电液一体化装备。随着制造技术、液压技术、控制技术的发展, 快速锻造液压机在机、电、液方面均取得了显著进步, 形成了多种特色的快速锻造液压机产品。

1 主机结构形式多样化

快速锻造液压机的本体部分包括主机、移动工作台、横向移砧装置以及其他附属装置, 在快速锻造液压机的几十年发展过程中, 本体部分除主机结构外, 其他部分变化不大。

收稿日期: 2023-03-21; 修订日期: 2023-06-20

作者简介: 陈柏金 (1965-), 男, 博士, 教授

E-mail: chenbaijin@sina.com

下拉式快速锻造液压机的主机机架结构有整体式、预应力组合式和梁柱式 3 类。整体式机架为双柱整体铸钢结构，由于对铸造质量要求高，加工、运输困难，一般在 20 MN 及以下吨位的液压机中应用。部分小吨位下拉式快速锻造液压机也采用双柱梁柱式结构，中大型下拉式快速锻造液压机均采用预应力组合式机架^[2-4]，如国内进口的 Wepuko PAHNKE 的 80/100 MN 压机为双柱下拉预应力结构、进口的 SMS 的 100 MN 压机为四柱下拉预应力结构。

上压式快速锻造液压机的主机机架有预应力组合式和梁柱式两类，梁柱式机架目前应用较少，上压式预应力组合机架有双柱式结构和四柱式结构，由于双柱式结构工艺空间和操作视野较四柱式的好，上压式快速锻造液压机的预应力组合机架较多地采用双柱式结构。

预应力组合机架如果采用方形立柱，则多采用立柱平接式结构，即上、下横梁与立柱端面平面贴合，以十字键或圆环定位，如图 1 所示。

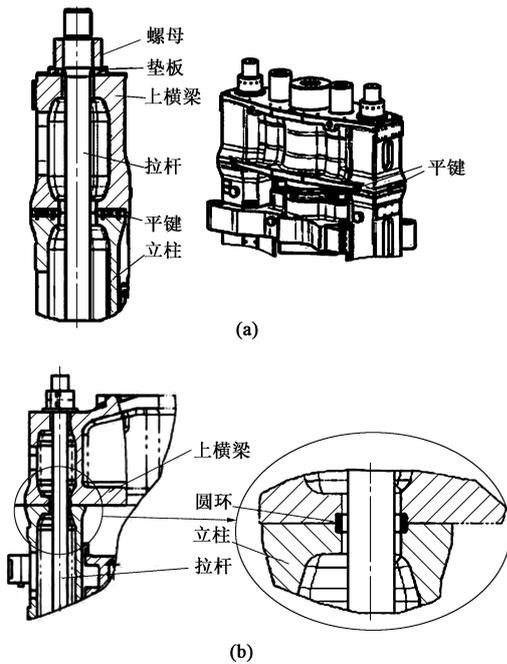


图 1 方形立柱平接式结构
(a) 十字键定位 (b) 圆环定位
Fig. 1 Square column flat-joint structure
(a) Cross key positioning (b) Ring positioning

预应力组合机架如果采用圆形立柱，则多采用插入式结构^[5-6]，如图 2 所示。

快速锻造液压机无论是双柱式还是四柱式，立柱为圆形还是方形，其立柱与活动横梁的接触面均

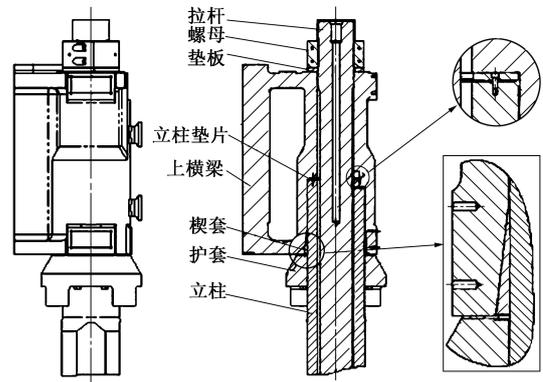


图 2 圆形立柱插入式结构
Fig. 2 Circular column plug-in structure

为平面，两者之间的导向均为可调平面导向。一般在立柱的工作面安装全行程耐磨导板，在活动横梁的上、下与立柱接触的表面安装平面导向装置。与传统圆导套相比，平面导向接触面积大、导向面压低、导向间隙可调、更换方便。

快速锻造液压机主缸均采用双球铰结构，以前多采用中间杆及长螺杆连接，目前多采用双法兰连接^[7-8]，图 3 为法兰连接的双球铰安装结构。

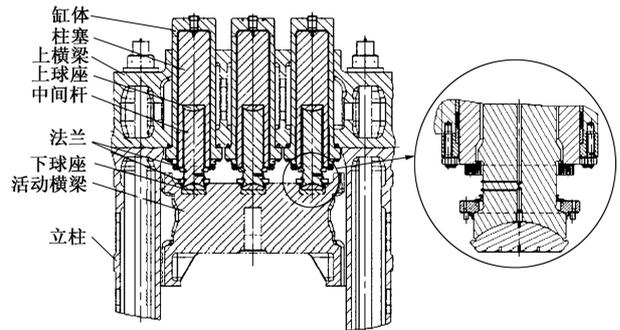


图 3 法兰连接双球铰主缸安装结构
Fig. 3 Double-ball hinge master cylinder installation structure of flange connection

2 液压传动系统形式模式化

随着液压技术的发展，快速锻造液压机中所用的泵、阀等元件已集中到少数厂家，根据所使用的液压元件特点，目前，快速锻造液压机的液压系统已形成 3 大类液压系统：

(1) Rexroth (Bosch Rexroth, 博世力士乐) 类液压系统^[1]。采用博世力士乐通用的泵、阀组成各种配置的液压系统。定量泵、变量泵或定量泵加变量泵组合作为系统动力源，采用如图 4 所示的高频响比例阀及插装阀进行液压机流量的分配及控制；采用低压充液罐或高位油箱为压机快下行程充液，

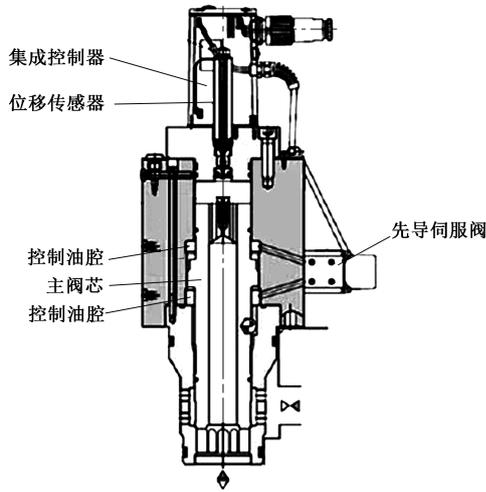


图 4 博世力士乐高频响比例阀控制原理

Fig. 4 Control principle of Bosch Rexroth high-frequency response proportional valve

采用蓄能器（小型压机直接采用阀控）实现压机的快锻回程动作。图 5 为这类系统的工作原理示意图。

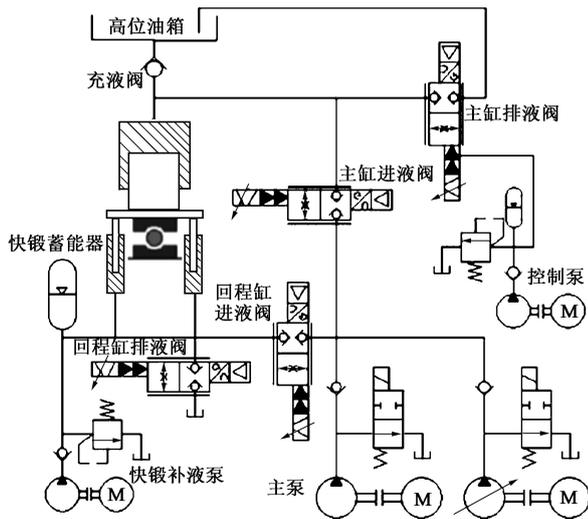


图 5 高频响比例阀控制的快速锻造液压机工作原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of working principle for fast forging hydraulic press controlled by high-frequency response proportional valve

国外 SMS、辛北尔康普的压机液压系统均采用博世力士乐产品直接选型、设计、制造；其他如 ZDAS 等液压系统也多为博世力士乐产品；国内如兰州兰石重工有限公司、西安重型机械研究股份公司、青岛海德马克智能装备有限公司、太原重型机械集团有限公司、天津天锻压力机有限公司等的压机液压系统原理、元件选型等基本与国外这类系统类似。

(2) Wepuko PAHNKE 类液压系统^[9-10]。采用 Wepuko PAHNKE 公司的专用泵作为动力源，其特点是液压泵为双向变量泵（正弦泵）。双向变量泵

采用油缸驱动偏摆机构，油缸由伺服阀控制，油缸位移由位移传感器检测，伺服阀、油缸、位移传感器组成闭环控制系统，其控制原理如图 6 所示，其中 U 为电压， Q 为输出流量， O 为原点。油泵的输出流量及方向由控制系统根据动作要求进行控制，应用在换向频繁的快速锻造液压机上时，其输出流量可以根据压机的动作要求呈正弦规律进行输出。

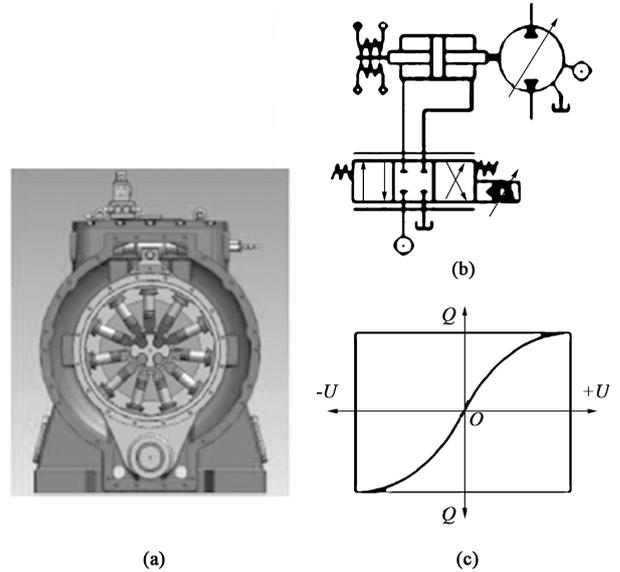


图 6 正弦泵控制原理图

(a) 结构简图 (b) 控制原理 (c) 输出特性

Fig. 6 Control principle diagrams of sinusoidal pump

(a) Structural diagram (b) Control principle (c) Output characteristic

这种泵组成的液压系统为其公司专有的 PAHNKE 修正正弦直接驱动 PMSD (Pahnke Modified Sinus Direct Drive) 泵控系统，如图 7 所示，其他厂家一般不采用这类系统。

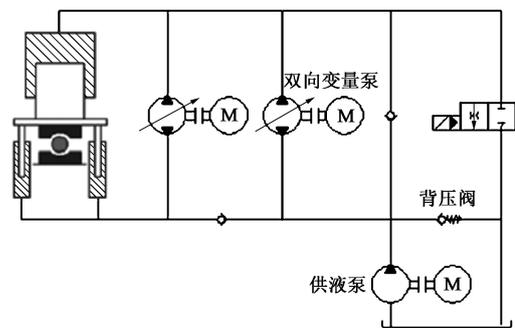


图 7 正弦泵控制的快速锻造液压机工作原理示意图

Fig. 7 Schematic diagram of working principle for fast forging hydraulic press controlled by sinusoidal pump

(3) Oilgear 类液压系统^[1]。液压系统的泵、阀均为 Oilgear 公司产品，快速锻造液压机上使用其专用的伺服锻造阀，如图 8 所示，其中，A 和 B 为阀

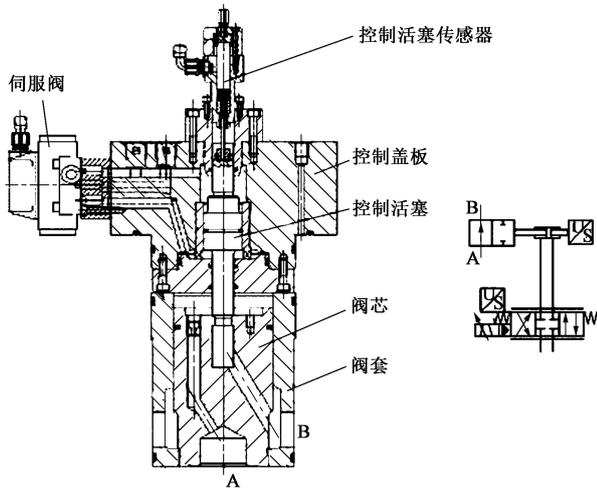


图 8 伺服锻造阀结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of structure for servo forging valve

的两个油口，U/S 表示配有位移传感器，可以将位置信号转变为电信号。伺服锻造阀配备专用的控制器进行卸载控制，其他原理如同博世力士乐类系统。

采用伺服锻造阀组成的快速锻造液压机系统工作原理如图 9 所示。

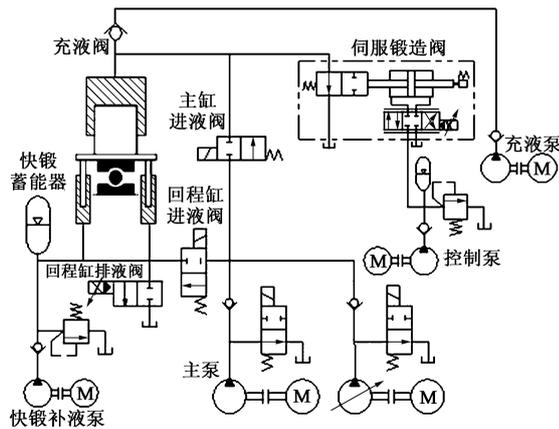


图 9 伺服锻造阀控制的快速锻造液压机工作原理示意图

Fig. 9 Schematic diagram of working principle for fast forging hydraulic press controlled by servo forging valve

目前只有 Oilgear 公司采用伺服锻造阀系统。

3 控制系统标准化

快速锻造液压机的控制系统必须满足其高速、高可靠性及尺寸精度控制要求，并适应锻造现场十分复杂的工作环境。

快速锻造液压机组结构庞大，分为地上、地下多个单元，且控制和监测对象多、动作复杂，控制系统需要完成机组多种信号的连锁与控制、锻造参

数设定、锻件尺寸位置闭环控制等多种功能。控制系统的体系结构经历了早期的数字控制系统、分布式控制系统和现场总线控制系统，目前基本上均采用基于工业以太网的现场总线控制系统，该控制系统结构简单、组态灵活，实时运算处理能力强，并具有很好的扩展性、兼容性，真正实现了集中监控、分散管理、分散控制。

快速锻造液压机组控制系统的控制器均采用西门子 S7 系列控制器，目前普遍采用 S7-1500PLC 控制器，控制总线由前些年的 Profibus-DP 现场总线转变为 Profinet 工业以太网控制总线^[1]。

许多液压技术公司、自动化产品公司均推出了支持 Profinet 接口的相关产品，如液压系统的变量泵控制器、比例阀控制器、各种位移检测传感器、操作主令手柄、智能计量电表等，这些元器件直接通过 Profinet 总线进行检测、反馈及控制，控制系统结构简单，完全采用数字检测与控制，实时性强、可靠性高。控制系统的组成如图 10 所示^[1]。

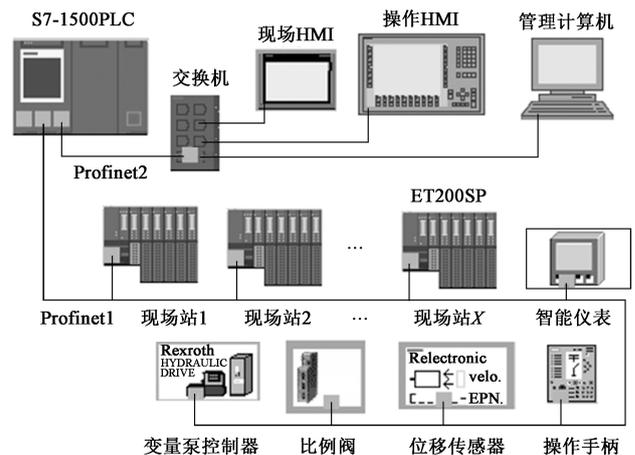


图 10 S7-1500 PLC 控制器及控制检测元件组成 Profinet 工业以太网总线控制系统

Fig. 10 Profinet industrial Ethernet bus control system composed of S7-1500 PLC controllers and control detection elements

4 发展趋势

快速锻造液压机组综合应用了机械、液压、电子、自动控制、网络通讯、传感检测、信息处理、计算机及软件编程技术，是机电液一体化的高技术装备，具有装机功率高、能耗大、技术复杂等特点。随着生产竞争的加剧，对快速锻造液压机组的经济性、可靠性、生产效率等要求不断提高，同时各种新技术的发展也促使快速锻造液压机组不断进步、

不断发展。

目前, 快速锻造液压机组的主要发展趋势有以下几个方面:

(1) 绿色设计, 研制高效节能快速锻造液压机组

快速锻造液压机组锻造速度快, 液压系统输出流量大, 以前阀控型快速锻造液压机依靠各种控制阀进行流量调节, 阀口节流造成能量损失大, 能源浪费。如近期 SMS 推出的几套快速锻造液压机, 液压系统所有的主泵均采用比例控制变量泵, 通过比例泵的输出流量来调节液压机的运行速度, 液压机处于停止状态时, 基本不输出流量, 尽量减少系统的能量损失。

辛北尔康普智能动力系统 iPS (intelligent Power System)^[11]根据工况控制比例泵的输出, 使输出流量与液压机动作匹配, 其获得专利的驱动系统已经在实践中证明其节能高达 30%。

在作者开发的 35 MN 上压式快速锻造液压机组中, 将机组液压系统的传统平面布置方式, 根据系统功能进行立体布置, 缩短系统中液体压力能的传输距离, 减少传输过程中的沿程损失和局部损失, 提高压力能的传输效率并提高液压机的响应速度; 同时, 液压系统配置部分蓄能器、增压器, 工作时系统按叠加供液方式进行工作, 减少主泵数量, 降低装机功率及运行成本^[12-15]。

(2) 能量回收利用, 提高快速锻造液压机组的能量利用率

快速锻造液压机组为大质量惯性负载, 多种能量可进行回收再利用。如 2018 年 DDS 开发出第 1 台带能量回收系统 (Energy Recovery System, ERS) 的锻造操作机, 能量回收系统有助于节省高达 70% 的先前驱动机器所需的能量, 机器消耗的总能量减少 30%^[16]。

作者在开发快速锻造液压机组中, 利用压机做功后的液压能进行冷却, 省去系统中用于油液冷却的电机及液压泵^[12]。

(3) 基于大数据的状态监测系统, 开展快速锻造液压机智能预测性维护

快速锻造液压机组系统中检测、控制、执行元器件及部件多, 锻造过程中对其可靠性要求高, 对机组的状态进行实时监测与分析, 通过预测性维护确保机组正常运行, 减少停机时间并延长机组正常使用周期。

如 Oilgear 公司为快速锻造液压机提供了一套智能监控及预测解决方案, 从液压系统的泵、阀、传感器中获取数据, 基于知识或数据驱动分析方法进

行状态检测, 依据一定模型进行健康评估, 预测机组的故障及剩余寿命, 实现预防性维护。

辛北尔康普快速锻造液压机状态监测系统“magic eye”^[17], 监测液压系统的性能数据: 主过滤器、阀门、密封件、机械导向系统、冲击运动、辅助运动、主泵和高压泵以及液压介质等, 基于大数据分析, 推进过程优化、风险控制和预测性维护, 为使用人员提供机组状态和潜在风险提示, 可在潜在风险出现前采取预防措施, 消除停机时间, 提高设备利用率, 降低维护成本。

(4) 开发程序锻造功能, 实现智能制造, 提高生产效率

快速锻造液压机组能实现位置控制、按道次进行自动控制, 对一些较为规范的锻件进行程序自动锻造, 是技术发展的必然趋势。快速锻造液压机进行程序锻造时, 需要研发智能锻造工艺软件, 即计算机辅助智能锻造系统, 能根据坯料的初始状态、最终成形尺寸、材料性能等自动生成锻造工艺数据; 控制系统按此工艺数据进行自动锻造时, 不仅能获得所需的形状, 而且内部组织性能也满足要求^[18-19]。

SMS 快速锻造液压机配有 ForgeBase 智能技术包, 能自动生成锻造道次数据, 可使压机以最高的速度和成本效益进行自动运行; Wepuko PAHNKE 的 ForgeMaster 软件包充分考虑到其产品范围的特殊要求, 保证了最佳的锻造生产计划。

由于锻造道次数据与锻件最终的组织性能密切相关, 单纯按形状变化生成锻造道次, 对多道次锻造、不同规格、不同材料、不同温度范围的锻件效果差别大, 快速锻造液压机的程序锻造应用不理想。我国还缺乏这方面的软件包, 需研发基于锻件内部组织性能影响的智能锻造道次生成工艺软件包。

(5) 与时俱进应用新技术, 提升快速锻造液压机组性能

2020 年 SMS 在德国投入运行的 31.5/34.0 MN 快速锻造液压机, 首次在快速锻造液压机中安装了增材制造的液压阀块^[20]。3D 打印不仅可以设计通道、优化流量, 而且由于设计更加紧凑, 可以减少安装空间和质量。

5 结语

快速锻造液压机经过近 20 年的高速发展, 相关技术基本成熟, 快速锻造液压机的机械结构、液压控制技术、控制系统结构等已形成标准模式, 众多

制造厂家均具有开发系列化产品的能力,我国也具备了同国外产品竞争的實力。中小型快速锻造液压机领域,市场基本为国内所有;在大中型快速锻造液压机领域,虽然国内产品也有应用,基本元件的选型、机械、液压、电气系统的各种基本配置与国外差别不大,但主要市场依然被国外产品占据。近5年国内进口了12台套快速锻造液压机组(SMS 4套、辛北尔康普5套、Oilgear 2套、Wepuko PAHNKE 1套),国内在制造技术、成套产品开发、技术创新等方面需进一步加强,进而开发出有特色、具有竞争力的快速锻造液压机产品。

参考文献:

- [1] 陈柏金. 快速锻造液压机组——结构、原理、控制与案例 [M]. 北京:机械工业出版社, 2023.
Chen B J. Fast Forging Hydraulic Units-Structure, Principle, Control and Cases [M]. Beijing: China Mechine Press, 2023.
- [2] 郑文达, 权晓惠, 李俊辉. 锻造液压机的现状及其展望 [J]. 重型机械, 2012, (3): 2-10.
Zheng W D, Quan X H, Li J H. Development history and trend of forging hydraulic press [J]. Heavy Machinery, 2012, (3): 2-10.
- [3] 牛勇, 权晓惠, 张营杰, 等. 现代自由锻造装备技术研究现状与发展趋势 [J]. 精密成形工程, 2015, 7 (6): 17-24.
Niu Y, Quan X H, Zhang Y J, et al. Current development of free forging equipment [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7 (6): 17-24.
- [4] 张伟玮, 王小松, 王仲仁. 重型液压设备本体结构的发展与创新 [J]. 锻压装备与制造技术, 2016, 51 (2): 12-19.
Zhang W W, Wang X S, Wang Z R. The development and innovation of body structure in heavy forging equipment [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2016, 51 (2): 12-19.
- [5] 郭晓锋, 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, 306 (3): 29-32.
Guo X F, Cheng X B, Zhang J H. Development and outlook of free forging hydraulic press [J]. Heavy Machinery, 2012, 306 (3): 29-32.
- [6] 成先飏, 张建华, 郭晓锋. 国内大型自由锻造液压机的技术特点 [J]. 重型机械, 2012, 31 (3): 121-124.
Cheng X B, Zhang J H, Guo X F. Technical characteristics of large-scale free forging hydraulic press in China [J]. Heavy Machinery, 2012, 31 (3): 121-124.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 鲁苗, 陈柏金, 柳龙, 等. 泵控锻造液压机控制系统研究 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (7): 140-145.
Lu M, Chen B J, Liu L, et al. Research on control system of pump-controlled forging hydraulic press [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (7): 140-145.
- [10] Wepuko PAHNKE. The PMSD drive-Our specialty [Z]. <https://www.wepuko.de/en/hydraulic-forging-presses/products/oil-hydraulic-drives-for-forging-presses>.
- [11] Siempelkamp. New open-die forging press for fushun special steel Co.: Siempelkamp technology once again convinces customers in China [Z]. https://www.siempelkamp.com/en/latest/news/neue-freiformschmiedepresse-fuer-fushun-special-steel-co-siempelkamp-technologie-ueberzeugt-chinesi/?tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=08d01418e0f9632cd47f62f0945121f0.
- [12] 陈柏金, 马海军, 张连华, 等. 节能型35 MN快速锻造液压机组研究 [J]. 锻压装备与制造, 2022, 57 (1): 14-17.
Chen B J, Ma H J, Zhang L H, et al. Research on energy-saving 35 MN rapid forging hydraulic unit [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2022, 57 (1): 14-17.
- [13] Yan X P, Chen B J. Analysis of a novel energy-efficient system with a bidirectional supercharger for forging hydraulic press [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 286: 125520-125530.
- [14] Yan X P, Chen B J. Analysis of a novel energy-efficient system with 3-D vertical structure for hydraulic press [J]. Energy, 2021, 218: 119518-119527.
- [15] Yan X P, Chen B J. Energy-efficiency improvement and processing performance optimization of forging hydraulic presses based on an energy-saving buffer system [J]. Applied Sciences, 2020, 10 (17): 6020-6034.
- [16] Dango & Dienenthal GmbH & CO. KG. Energy recovery systems [Z]. <https://www.dango-dienenthal.de/en/stories-1/learning-from-formula-1>.
- [17] Siempelkamp. "magic eye" monitoring convinces in the Chinese market; Open-die forging press made by Siempelkamp for Pangang Jiangyou Changcheng [Z]. https://www.siempelkamp.com/en/latest/news/magic-eye-monitoring-ueberzeugt-im-chinesischen-markt-freiformschmiedepresse-made-by-siempelkamp-f/?tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=fea935eb8207dc4a13a50d6eb99cb2e4.
- [18] Wepuko PAHNKE. Process control systems [Z]. <https://www.wepuko.de/en/hydraulic-forging-presses/products/press-control-systems>.
- [19] SMS group. New high-speed open-die forging press from SMS group in operation at WST [Z]. <https://www.sms-group.com/press-and-media/press-releases/press-release-detail/new-high-speed-open-die-forging-press-from-sms-group-in-operation-at-wst>.
- [20] SMS group. First high-speed open-die forging press with 3D-printed hydraulic manifold block from SMS group goes into operation at Gustav Grimm Edelstahlwerk [Z]. <https://www.sms-group.com/press-and-media/press-releases/press-release-detail/first-high-speed-open-die-forging-press-with-3d-printed-hydraulic-manifold-block-from-sms-group-goes-into-operation-at-gustav-grimm-edelstahlwerk>.