



兆瓦级煤矿井下压裂泵系统的研制及应用

李然 王初亮 刘波 冯彦军 姜鹏飞 陈荣明 陈敬斌 陈卓 王大龙 卢海承 郭宗凯 曹田泽 于远征 王超

引用本文:

李然, 王初亮, 刘波, 等. 兆瓦级煤矿井下压裂泵系统的研制及应用[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 372-380.

LI Ran, WANG Chuliang, LIU Bo. Research and application on megawatt level intelligent fracturing pump system in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 372-380.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0193>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤矿井下智能压裂泵系统研究

Research on intelligent fracturing pump system in coal mine

煤炭科学技术. 2022, 50(4): 264-269 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/fd2ba286-8975-44b9-8add-42676b678d41>

分段水力压裂弱化采场坚硬顶板围岩控制技术研究

Study on surrounding rock control technology for weakened hard roof of stope by staged hydraulic fracturing

煤炭科学技术. 2022, 50(8): 50-59 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/0776b09b-df68-43fc-9911-6c9b63865d6b>

井下定向长钻孔水力压裂煤层增透技术体系与工程实践

Technical system and engineering practice of coal seam permeability improvement through underground directional long borehole hydraulic fracturing

煤炭科学技术. 2020, 48(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/fbd1006f-bb80-476d-bb12-22c188a6a9f4>

三分量TEM在坚硬顶板水力压裂效果检测中的应用

Application of three-component transient electromagnetic method in hydraulic fracturing effect evaluation of directional long borehole in hard roof

煤炭科学技术. 2022, 50(8): 101-107 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/3bccb146-54e4-4ae2-82c4-98d568c1f83f>

煤矿井下定向长钻孔水力压裂瓦斯高效抽采技术

High efficiency gas drainage technology of hydraulic fracturing with directional long drilling in underground coal mine

煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/100da6c3-a65e-4274-9fe9-502c6c1c88b7>

低透气煤层超高压水力割缝与水力压裂联合增透技术

Combined permeability enhancement technology of ultra-high pressure hydraulic slot and hydraulic fracturing in low permeability coal seam

煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/51492a42-787a-4dc3-b85d-ec94592a1dda>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

李 然,王初亮,刘 波,等.兆瓦级煤矿井下压裂泵系统的研制及应用[J].煤炭科学技术,2025,53(5):372-380.

LI Ran, WANG Chuliang, LIU Bo, *et al.* Research and application on megawatt level intelligent fracturing pump system in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 372-380.

兆瓦级煤矿井下压裂泵系统的研制及应用

李 然^{1,2,3},王初亮¹,刘 波¹,冯彦军⁴,姜鹏飞⁴,陈荣明¹,陈敬斌¹,陈 卓¹,王大龙¹,
卢海承¹,郭宗凯¹,曹田泽²,于远征¹,王 超¹

(1.北京天玛智控科技股份有限公司,北京 101399;2.煤炭科学研究总院 研究生院,北京 100013;
3.煤炭智能开采与岩层控制全国重点实验室,北京 100013;4.中煤科工开采研究院有限公司,北京 100013)

摘要:为满足在坚硬难垮落顶板治理、瓦斯抽采增透等领域大面积区域压裂应用中对流量、压力的需求,研制了一套兆瓦级煤矿井下压裂泵系统。该系统将自动控制和变频技术同煤矿井下压裂泵的设计相结合,能够根据煤矿井下水力压裂的不同阶段的工况需求,动态采集压裂泵性能参数数据,实时分析压裂泵的功率匹配,实现压裂过程全自动化。重点攻克了高压大流量压裂泵特殊材料及工艺、动力端可靠性、液力端可靠性以及自动控制等关键技术瓶颈。研究了适用于压裂极端工况要求的高强度、耐冲蚀马氏体沉淀硬化不锈钢,并采用超高压自增强处理,提高压裂泵液力端疲劳寿命;研究压裂泵齿轮传动及摩擦副等关键可靠性技术,实现兆瓦级功率条件下压裂泵传动系统的高可靠运行;通过计算机仿真,优化了压裂泵液力端吸排液系统的结构、性能;攻克了深钻孔低频变流量坐封技术、煤岩层起裂自动识别技术及循环压裂控制技术,实现压裂全流程的自动化控制该系统分别在曹家滩矿 122110 特厚煤层工作面和东李煤矿 1250 瓦斯治理巷进行了工业性试验;曹家滩矿试验显示:坚硬顶板预裂弱化治理裂缝扩展压力平稳,稳压时压力最高可达 32.4 MPa,平均流量可达 100 m³/h;东李煤矿瓦斯增透试验结果显示:实施水力压裂增透工艺 10 d 后,平均瓦斯抽采纯量增大到 1.596 m³/min,约为对比验证普通钻孔抽采工艺的 29 倍。

关键词:兆瓦级;水力压裂;坚硬顶板;瓦斯抽采;区域弱化;区域增透

中图分类号:TD712.6 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2025)05-0372-09

Research and application on megawatt level intelligent fracturing pump system in coal mine

LI Ran^{1,2,3}, WANG Chuliang¹, LIU Bo¹, FENG Yanjun⁴, JIANG Pengfei⁴, CHEN Rongming¹, CHEN Jingbin¹, CHEN Zhuo¹, WANG Dalong¹, LU Haicheng¹, GUO Zongkai¹, CAO Tianze², YU Yuanzheng¹, WANG Chao¹

(1. Beijing Tianma Intelligent Control Technology Co., Ltd., Beijing 101399, China; 2. Chinese Institute of Coal Science, Beijing 100013, China;
3. State Key Laboratory of Intelligent Coal Mining and Strata Control, Beijing 100013, China;
4. Coal Mining Research Institute Co., Ltd. of CCTEG, Beijing 100013, China)

Abstract: This paper presents the development of a megawatt-scale intelligent fracturing pump system for underground coal mines, designed to address the escalating demands for flow and pressure in large-scale regional fracturing applications, particularly in hard roof management and enhanced gas extraction permeability. The system integrates automatic control and variable frequency technology with the design of underground coal mine fracturing pumps, enabling dynamic collection of performance parameter data at various stages of hydraulic fracturing. It provides real-time analysis of the power matching for electrically driven fracturing pumps and achieves full automation of the fracturing process. Key technological challenges, such as the development of special materials for high-pressure, high-flow-rate fracturing pumps; the reliability of the transmission system and hydraulic ends for megawatt-level fracturing pumps; and intelligent con-

收稿日期:2024-02-08 策划编辑:常 琛 责任编辑:李雅楠 DOI:10.12438/cst.2024-0193

基金项目:中国煤炭科工集团科技创新基金资助项目(2020-TD-ZD015, 2023-TD-MS015);天玛智控科技创新基金资助项目(2022TM-167M)

作者简介:李 然(1984—),男,河北唐山人,研究员,博士生导师,博士。E-mail: liran@tdmaroco.com

rol technology, have been successfully addressed. The research included: Development of high-strength, erosion-resistant martensitic precipitation hardening stainless steel suitable for extreme conditions with large flow, ultra-high pressure, and sand-mixed media, along with ultra-high pressure self-reinforcing treatment to enhance the fatigue life of the hydraulic ends of fracturing pumps; Investigation of critical reliability technologies, including high-strength welding for alloy steel, high-load-bearing, high-power-to-weight ratio gear transmission technology, and wear-resistant friction pairs of aluminum bronze alloy-cast iron, to ensure the reliability of the transmission system under high-power conditions; Creation of a high-durability metal plunger-combination seal fracturing fluid sealing pair, with the application of computer simulation technologies such as virtual prototyping, FEA, CFD, and hydraulic system simulation to optimize the structure, performance, and reliability of the fracturing pump's fluid end suction and discharge systems; Mastery of technologies such as low-frequency variable flow sealing for deep boreholes, automatic identification of coal and rock layer fracturing, and cyclic fracturing control, enabling intelligent control throughout the fracturing process. The industrial trial of this system has been successfully conducted at the Caojiatan coal mine 122110 extra-thick coal mine working face for weak zone management of hard roof strata and at the Dongli coal mine 1250 gas control lane for high-efficiency extraction of anti-reflection gas in coal seam areas. Field tests demonstrated that at the Caojiatan coal mine, pre-splitting treatment for hard roofs achieved stable fracture expansion pressure with a maximum of 32.4 MPa and an average flow rate of 100 m³/h. At the Dongli Coal Mine, the gas permeability enhancement test revealed that after 10 days of hydraulic fracturing, the average pure gas extraction volume increased to 1.596 m³/min, approximately 29 times that of the conventional drilling extraction process.

Key words: megawatt level; hydraulic fracturing; hard roof; gas drainage; regional weakening; regional permeability enhancement

0 引 言

水力压裂技术在煤炭绿色安全开采中的应用日益广泛,特别是在解决硬顶板弱化、动压巷道卸压、巷道定向切顶、冲击地压解危等安全开采需求的煤岩体压裂技术^[1-2],以及在低渗煤层瓦斯强化抽采中应用的水力压裂煤层增透技术^[3-4]等方面,已成为近年来煤矿安全治理领域热点技术^[5]。在过去十年中,笔者团队一直致力于煤矿井下高压高效柱塞泵技术的研究与开发^[6-9],成功研制了变频控制的 BYW40/500B(R) 型煤矿井下智能压裂泵系统,并在陕蒙、山西等矿区推广应用,有效实现了坚硬难垮落顶板的弱化及治理^[10]。随着定向长钻孔技术的不断进步,传统的定点压裂逐渐向大面积区域压裂转变^[11],这使得更高排量、更高压力、更智能化的压裂泵系统成为行业发展的重要需求。

在煤矿井下压裂泵系统的推广应用中,主要面临以下问题:首先,在煤矿井下作业空间受限的条件下,对更高排量和压力的性能需求对压裂泵的功重比提出了严格的设计要求;其次,压裂过程中对不同流量和压力的切换需求,传统的液力变速器调速控制无法实现自动化,难以达到“无人则安”的作业标准;最后,通过状态监控数据分析,实现压裂过程中各阶段的动态控制和功率精确匹配,实现压力过程全流程智能化仍存在挑战。

针对这些问题,笔者团队将自动控制、变频技术与煤矿井下压裂泵的设计相结合,攻克了高压大流量压裂泵特殊材料及工艺、动力端可靠性、液力端可靠性以及智能控制等关键技术难题,研制出了兆瓦

级 BYW63/1000B 型煤矿井下压裂泵及自动控制系统^[12]。该成套系统分别在曹家滩煤矿 122110 特厚煤层工作面和东李煤矿 1250 瓦斯治理巷完成了工业性试验,取得较好应用效果。

1 系统的总体组成

1.1 整体参数

兆瓦级井下压裂泵系统严格按 NB/T 188《煤矿用乳化液泵》的要求进行设计^[13]。该系统配备了额定输入功率为 1 000 kW 的卧式五缸单作用柱塞泵,具备 4 种不同的柱塞等级,以适应不同流量和压力需求,压裂泵组最大流量可达到 132 m³/h,最大压力可达到 63 MPa。具体配置见表 1。

表 1 不同流量和压力组配的压裂泵参数

Table 1 Fracturing pump parameters with different flow and pressure combinations

| 工况 | 柱塞直径/ mm | 排出压力/ MPa | 排出流量/ (m ³ ·h ⁻¹) |
|----|-------------|--------------|---|
| 1 | 88.9 | 25 | 132 |
| 2 | 76.2 | 31.5 | 97 |
| 3 | 63.5 | 50 | 67 |
| 4 | 52.5 | 63 | 46 |

1.2 系统组成及原理

兆瓦级井下压裂泵系统由变频控制系统、电驱压裂泵、状态检测系统、冷却润滑系统等组成,如图 1 所示。其中电驱压裂泵的核心部分包括变频电机、动力端总成以及液力端总成,共同确保了系统的高效及可靠运行。

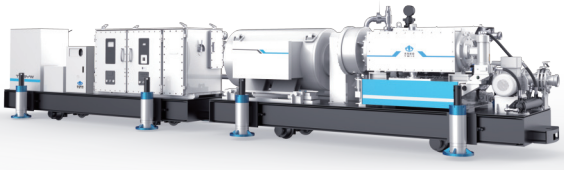


图 1 兆瓦级井下智能压裂泵系统

Fig.1 Megawatt level fracturing pumping system

1.2.1 变频控制系统

变频控制系统是本系统的核心,主要由变频器、本安型控制器、电控流量阀、本安型稳压电源、压力传感器、隔离耦合器等关键部件构成。

煤矿水力压裂的施工工艺主要分为坐封、起裂、压裂、卸压 4 个阶段。每个阶段对液体流量和系统维持压力的需求呈现出阶段差异化和实时快速变化的特点^[14]。在低压坐封阶段,变频器调节电机以低频运行,并通电控流量阀的开度控制,实现部分流量的旁路回流,以保持系统压力在设定值内,通常在 3~5 MPa 左右;进入起裂阶段后,电控流量阀关闭,变频器逐步提高输出频率,直至系统压力达到煤岩层破裂的峰值;在压裂阶段,变频器以满频率输出,确保压裂泵系统以全流量输出;在卸压阶段,电控流量阀全开,系统流量全部通过旁路回流,有效卸除系统压力。

1.2.2 电驱压裂泵

电驱压裂泵的电机与压裂泵同水平布置方式,并通过联轴器将电机和压裂泵的输入轴连接。压裂泵的动力端总成由齿轮箱和曲轴箱组成。齿轮箱内通过斜齿轮副传动,传动比为 3.59,通过优化设计确保动力的高效传递。曲轴箱内的曲轴采用六支撑结构,每个曲拐与连杆及十字头组件连接,将曲轴的旋转运动转换为连杆和十字头的往复运动。液力端总成的柱塞组件与十字头相连,通过高压填料函密封,使得液力端吸、排液阀能够周期性开启与关闭,从而实现机械能与液压能的转换。

1.2.3 状态检测系统

研制了对电机温度、压裂泵油温、油位和油压的监控系统,具备多维运行数据的实时采集功能,能够对液体流量、压力和温度等关键参数进行高精度的瞬态数据采集。通过对数据的综合分析,可实时掌握压裂区域的动态变化情况,确保压裂作业的高效与安全。

2 系统设计解决的关键问题

2.1 动力端总成设计

兆瓦级压裂泵动力端总成设计如图 2 所示。其

主要技术特点包括:①采用独立外挂齿轮箱传动技术,有效消除了传统内置单侧斜齿轮副存在的轴向分力对曲轴支撑轴承的潜在损伤,能够有效提高轴承使用寿命;②曲轴箱和齿轮箱壳体采用优质低碳合金钢材料,确保了结构的高强度和轻量化;③曲轴箱采用整体式设计,有效解决了分体式曲轴箱曲轴支撑轴承可能出现的蠕动打滑和跑圈问题;④输入齿轮轴采用螺旋密封和唇型油封密封+回油通道设计,有效解决了现有密封结构的渗漏油问题;⑤曲轴端设计了增速齿轮副,通过加装齿轮泵,与外置润滑泵结合形成双泵润滑系统,从而增强了润滑的可靠性。

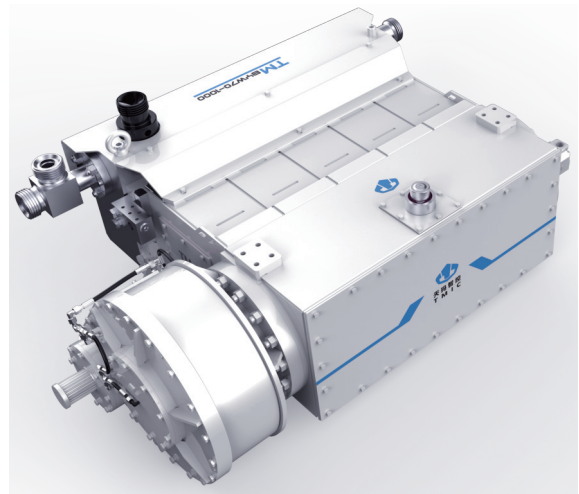


图 2 兆瓦级压裂泵动力端

Fig.2 Power end of megawatt level fracturing pump

基于往复柱塞泵动力学分析方法^[15],笔者团队求解了曲轴在转动过程中各连杆对其产生的作用力,如图 3 所示。在压裂泵的动态分析中,连杆力与第一曲拐转角之间存在显著的周期性关系。随着曲拐转角的增加,连杆力呈现出规律性的波动,这与泵的往复运动机制紧密相关。在曲拐转角的初始阶段,

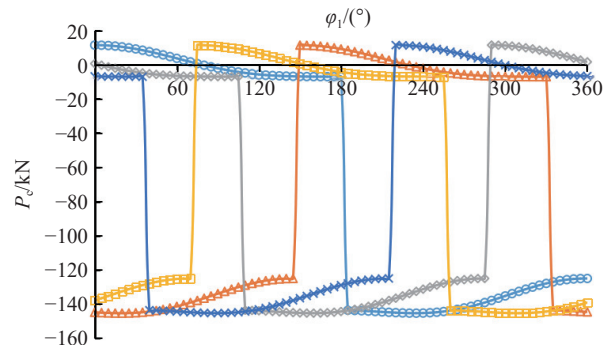


图 3 连杆力与第一曲拐转角的关系变化

Fig.3 Change in the relationship between the connecting rod force and the rotational angle of the first crank

连杆力逐渐增大,直至达到最大值,这对应于泵在压裂过程中施加最大压力的时刻。随后,随着转角的进一步增加,连杆力开始减小,直至下一个循环开始。这种力与角度的关系对于优化压裂泵的设计和操作系统,提高其在实际作业中的性能和耐久性具有重要意义。通过精确控制曲拐转角,我们可以确保压裂泵在高效能和高可靠性下运行,从而实现更有效的顶板岩层弱化和瓦斯抽采。

结合动力学分析的结果,针对低速重载条件下曲柄-连杆机构的最危险工况进行了有限元强度计算^[16]。图 4 展示了在最大载荷下,六支撑曲轴的最大 von Mises 应力云图。最大应力值达到了 326.35 MPa,主要集中在曲轴的关键承载区域,而最小应力值则低至 43.428×10^{-3} MPa。这种应力分布的不均匀性更说明了在曲轴设计中对应力集中区域进行优化的重要性。通过精确的应力分析和结构优化,我们能够有效地提高曲轴的耐久性,确保其在高压和高负荷工况下的性能稳定。这一发现对于指导压裂泵动力端的设计与制造,以及提高整个系统的可靠性具有重要意义。

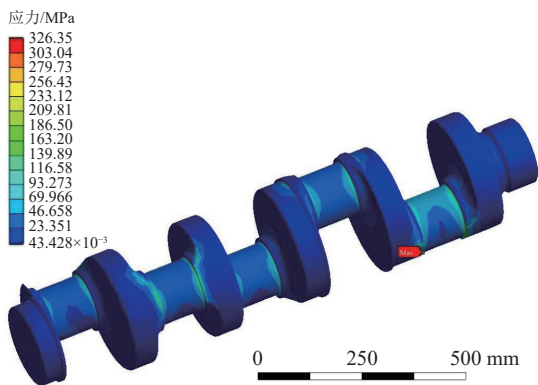


图 4 最大载荷下六支撑曲轴的最大应力云图

Fig.4 Maximum stress nephogram of six supported crankshaft under maximum load

利用专业齿轮设计分析软件 Kisoft^[17],对斜齿轮副的啮合载荷分布和传递误差进行了深入分析,由图 5a 可知,随着齿轮旋转角度的增加,法向载荷呈现出周期性的变化。这种周期性变化是齿轮啮合过程中的典型特征,反映了齿轮在啮合和脱离过程中载荷的动态变化。图中法向载荷的数值从 0 开始,随着角度的增加而增加,达到峰值后逐渐减小,然后再次增加,形成周期性的波动,斜齿轮副啮合区域沿齿宽方向载荷分布均匀,最大单位长度载荷达到 80.63 N/mm。图 5b 为斜齿轮副在不同旋转角度下的传递误差。

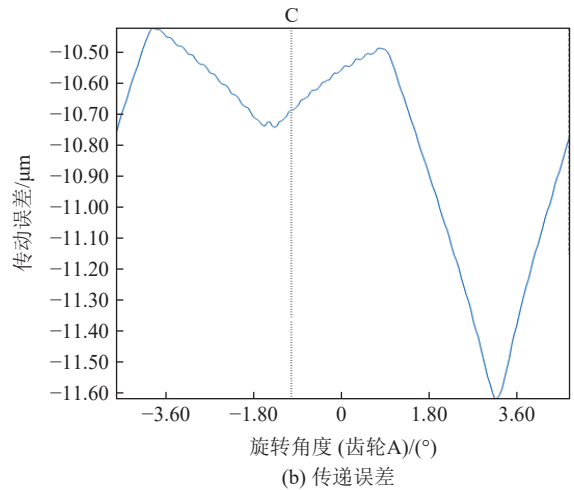
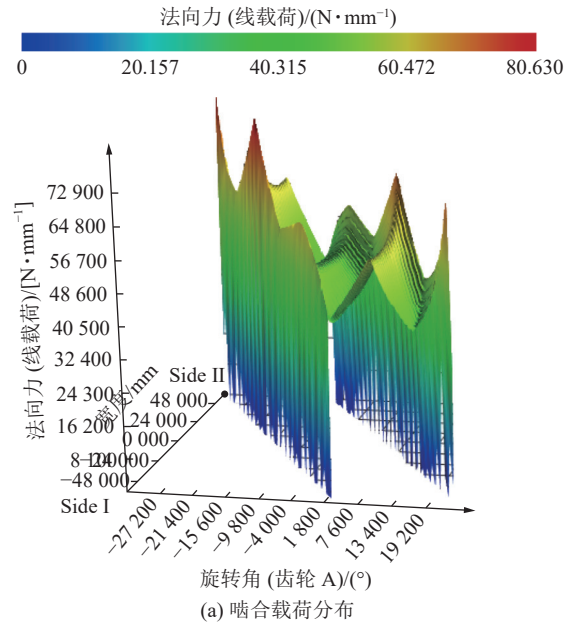


图 5 斜齿轮副在不同旋转角度下的传递误差
Fig.5 Transmission error of helical gear pairs at different rotational angles

2.2 液力端总成设计

兆瓦级压裂泵液力端总成设计如图 6 所示。其

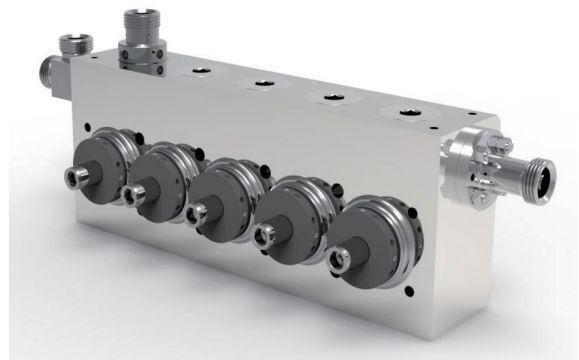


图 6 兆瓦级压裂泵液力端
Fig.6 Liquid end of megawatt level fracturing pump

主要技术特点:①吸、排液阀采用金属+高分子凡尔体双材料,锥面密封具备微自旋自行修复功能,有效延长阀组使用寿命,并且适用于携砂作业环境;②吸、排液阀的同轴分布式设计,简化了维护和更换流程,提高了操作的便捷性;③采用高耐磨硬质合金喷漆柱塞,并配合高耐磨、高防腐性的聚合盘根材料进行密封,确保了系统的耐久性和可靠性,同时维护工作也更加方便。

采用专业的机电液系统建模、仿真和分析软件AMESim^[18-19],建立了压裂泵的系统仿真模型。这一模型对于吸、排液阀的动态响应特性及参数优化具有重要的指导意义,从而有效提高阀芯的耐久性。图7a—图7b分别为吸液阀和排液阀阀芯的位移及速度变化情况。

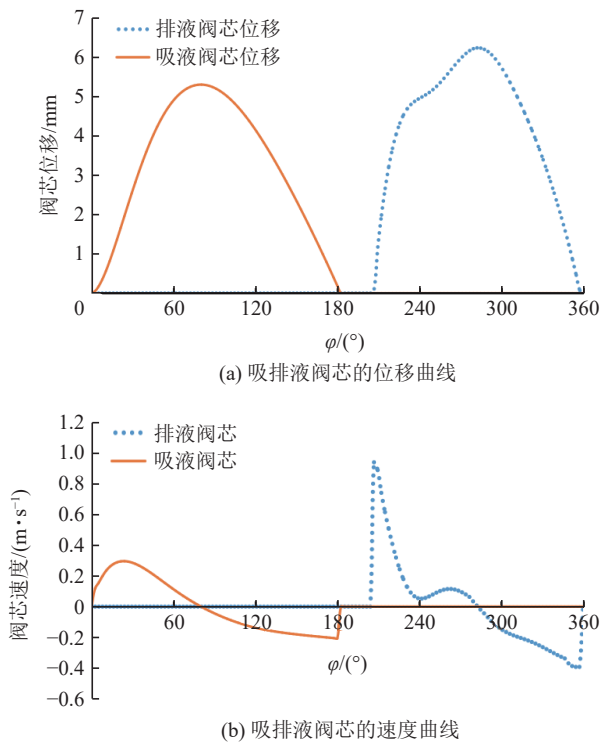


图7 吸排液阀阀芯的位移及速度变化情况

Fig.7 Displacement and velocity changes of the suction valve spool and the discharge valve spool

2.3 煤矿井下压裂泵控制系统设计

电气系统采用多电压等级集成供电模式,仅需单根主动力电缆即可为系统供电。通过矢量控制变频器高能驱动主电机,并利用多回路组合式电磁启动器驱动辅助电机。通讯架构结合了现场工业总线与工业以太网,实现了传感数据的远程高速传输和控制数据的冗余安全,确保操作人员能够在安全区域内实时、高效地对压裂作业进行监控。

控制系统设置了多重安全保护机制。开发了压裂泵的故障安全保护系统,具有故障自诊断功能;研发了针对长距离高压管路爆管检测保护系统,能够在高压管路发生爆管时实现快速卸压及关断,有效降低高压液泄漏安全风险。

3 系统关键技术

3.1 压裂泵特殊材料及特殊工艺

在材料选择上,为了适应兆瓦功率、大流量、超高压以及混砂介质的极端工况,液力端采用了高强度、耐冲蚀的马氏体沉淀硬化不锈钢。该不锈钢材料具有优越的力学性能,其抗拉强度 $\geq 1\ 100\ \text{MPa}$,屈服强度 $\geq 900\ \text{MPa}$,断面收缩率 $\geq 50\%$,冲击功 $\geq 21\ \text{J}$ 。

在工艺方面,压裂泵液力端泵头体采用自增强处理,以应对超高工作内压引起的拉应力与残余压应力,这种处理方法可以有效降低内腔平均应力并使其分布更加均匀,显著提高了泵头体的疲劳寿命。

3.2 压裂泵动力端高承载高功重比技术

为满足在超高压条件下结构强度要求,曲轴箱和齿轮箱均采用高强度合金钢焊接技术。曲轴采用六支撑轴承结构,采用专业轴承强度仿真软件对受力状态及寿命进行精确评估,确保了轴承的高耐久性,如图8所示。同时,采用了内外双置的冗余设计,以保证滑动轴承在超高压下的油膜承载能力。

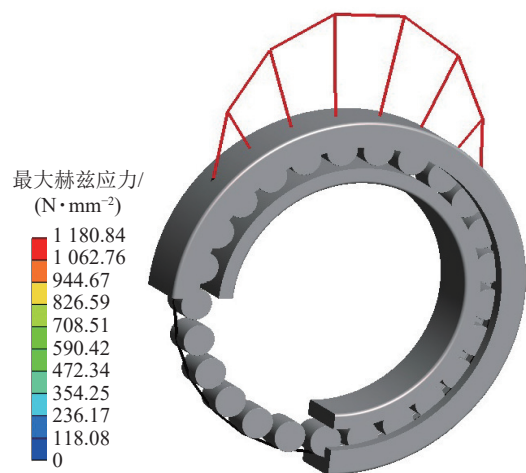
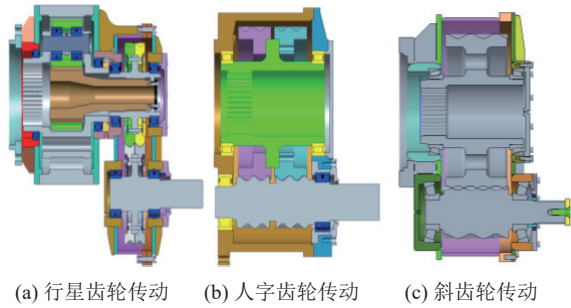


图8 曲轴滚动轴承最大赫兹应力分布

Fig.8 Maximum Hertz stress distribution of the roller bearing on the crankshaft

结合实际工况要求,设计了行星齿轮传动、人字齿轮传动^[20]和斜齿轮传动3种减速箱设计方案,如图9所示。通过对比分析各方案在承载能力、功重比、工艺性及可维护性等方面的性能,确定了最优设



(a) 行星齿轮传动 (b) 人字齿轮传动 (c) 斜齿轮传动

图 9 兆瓦级压裂泵 3 种减速箱设计方案

Fig.9 Three reduction gearbox design schemes for megawatt level fracturing pumps

设计方案。

攻克了合金铸铁高耐磨表面处理技术、冷压装配技术以及薄壁零件高精度加工技术。创新设计了具有高耐磨性和低摩擦系数的合金铸铁缸套,以及高强度高耐磨性铸铁十字头摩擦副,如图 10 所示。这些设计不仅提升了部件的使用寿命,还优化了整体系统的运行效率。



图 10 高耐磨十字头摩擦副

Fig.10 High wear-resistant cross head friction pair

3.3 压裂泵液力端高可靠性技术

攻克了用于压裂泵金属柱塞的高强度、高耐磨性 WC/Ni 金属陶瓷表面喷焊技术,使得柱塞表面硬度达到 650 HV 以上,粗糙度控制在 0.4 以下。开发了“氟橡胶+填充聚四氟乙烯”组合式密封,以满足在超高压力和混砂介质环境下的密封要求。设计了液力端的润滑冷却结构,以提高组合式密封的耐久性。

采用 ANSYS Workbench 和 Fluent 软件对液力

端泵头体进行了结构有限元和计算流体动力学仿真分析^[21-22],如图 11 所示。通过这些分析计算出泵头体的应力集中区域,并通过对结构参数的优化分析和迭代,确定了最优设计。

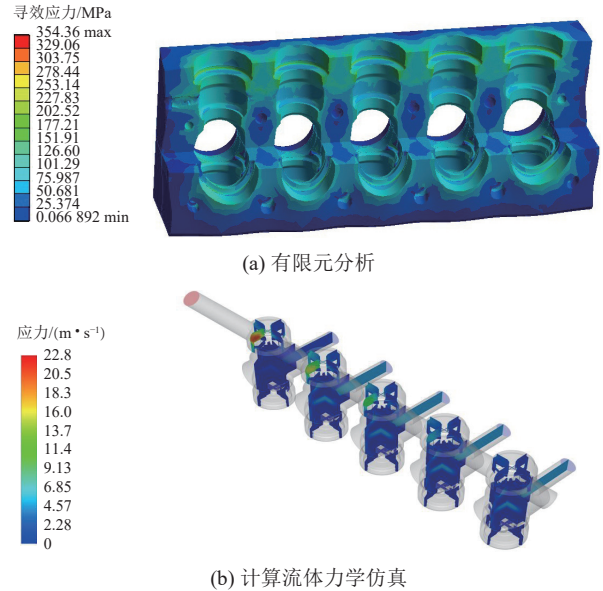


图 11 兆瓦级压裂泵液力端的仿真分析

Fig.11 Simulation analysis of the liquid end of the megawatt level fracturing pump

研制了一种高耐磨表面改性型高耐蚀性不锈钢阀座和阀芯,以提高吸排液阀的可靠性及耐久性。通过采用非线性有限元专业软件 ABAQUS 对阀芯阀座进行冲击仿真模拟^[23],并结合 AMESim 仿真分析,优化了弹簧刚度,有效降低了阀芯下落速度,从而减少了阀芯的冲击应力,如图 12 所示。

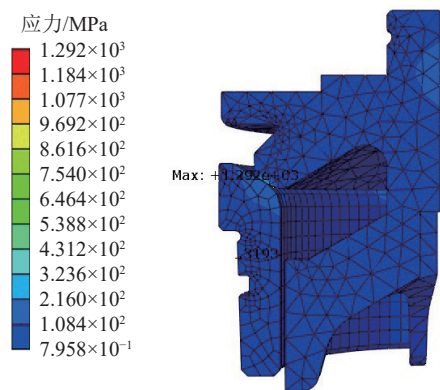


图 12 排液阀芯阀座碰撞有限元分析

Fig.12 Finite element analysis of collision between discharge valve core and valve seat

3.4 自动能控制技术

1)深钻孔低频变流量坐封技术:通过压裂管路向钻孔深处坐封器注入压裂介质,利用监控主机控

制变频器从最低频率开始逐渐增速,结合实时系统压力监测和旁路电控阀的精确调节,保持低压小流量坐封。这一技术解决了封孔压力突变导致坐封失败的问题,同时避免了过高的坐封压力对封孔器造成的损害,实现了“一键”自动坐封的工艺流程。

2)煤岩层起裂自动识别技术:研发了系统压力和流量实时匹配关系算法,攻克了煤岩层起裂效果自动识别技术。结合变频 PID 调节算法,系统能够实时调整压裂压力目标值,解决了起裂过程人工监控不及时同步的问题,实现了注水起裂过程全自动控制。

3)循环压裂控制技术,根据分段压裂工艺的具体要求,研发了分段循环压裂控制算法。该技术能够动态调整各段压裂压力和流量值,并自动生成压裂数据报表,为压裂过程提供了高效的数据分析支撑。

4 工业性试验

在陕西煤业化工集团榆北煤业公司曹家滩煤矿 122110 工作面进行了坚硬顶板岩层弱化区域治理工业性试验,如图 13 所示。该工作面开采 2-2 煤层,埋深 290~327 m,煤层厚度 8.47~11.81 m。采用综放开采方法,割煤高度 6 m,按煤层厚度 10 m 计算,放煤高度 10 m,煤层顶板岩层分布。顶板砂质泥岩、粉砂岩强度较低,而砂岩层的强度较高且完整,煤层顶板 0~46.8 m、60~120 m 处存在厚硬岩层。



图 13 曹家滩煤矿水力压裂坚硬顶板治理工业性试验
Fig.13 Water fracturing industrial test for hard roof treatment in Caojiatan Coal Mine

曹家滩煤矿 122110 工作面工业性试验中,实时监测的流量和压力曲线如图 14 所示,压力变化范围为 16.7~33.4 MPa,裂缝扩展压力平稳,稳压时压力最高可达 32.4 MPa,稳压时流量为 95.4~102.96 m³/h,平均流量可达 100 m³/h,压裂作业平均时长为 90 min,试验结果表明该套系统的性能完全满足坚硬顶板岩

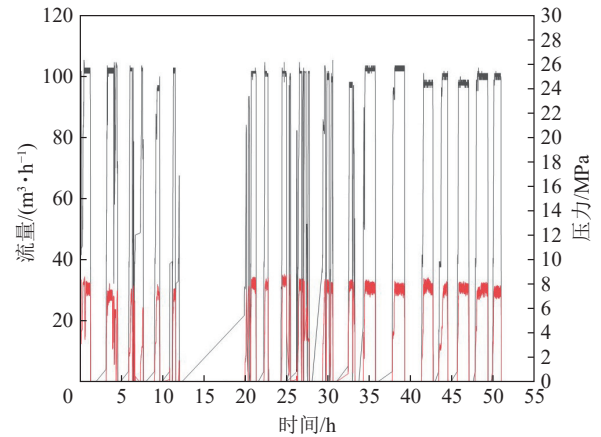


图 14 曹家滩工业性试验实时监测的流量和压力曲线
Fig.14 Flow versus pressure curves of real-time monitoring in Caojiatan industrial test

层弱化区域治理工艺要求。

在贵州邦达能源开发有限公司东李煤矿 1250 巷进行了区域瓦斯增透工业性试验,如图 15 所示。该巷二采区内 12、17、18 号煤赋存结构稳定,12 号煤平均煤厚 3.2 m,中间含有厚 0.4~1.0 m 的夹矸。17 号煤平均煤厚 4.5 m,中间不含夹矸。18 号煤平均煤厚 4.6 m,中间含有厚 0.5~1.3 m 的夹矸。12 号煤距 17 号煤层 18~22 m,平均距离 20 m。17 号煤距 18 号煤层 19~23 m,平均距离 21 m。12 号煤层瓦斯含量 6.21 m³/t,瓦斯压力 0.56 MPa。17 号煤层瓦斯含量 9.08 m³/t,瓦斯压力 0.81 MPa。18 号煤层瓦斯含量 8.92 m³/t,瓦斯压力 0.84 MPa。



图 15 东里煤矿水力压裂瓦斯增透工业性试验
Fig.15 Water fracturing industrial test for coal seam gas permeability enhancement in Dongli Coal Mine

东李煤矿共完成有效验证钻孔 3 个,在未进行水力压裂前,采用普通钻孔工艺进行瓦斯抽采,其平均瓦斯浓度为 2%,平均瓦斯抽采纯量为 0.055 m³/min。实施水力压裂增透工艺 10 d 后,平均瓦斯浓度增长为 57%,平均瓦斯抽采纯量增大到 1.596 m³/min,约为普通钻孔抽采工艺的 29 倍。这一结果表明,与未采取增透措施的普通钻孔工艺相比,协同水力压裂

增透工艺能够明显提高瓦斯抽采纯量,增透效果显著。

这些试验结果不仅验证了兆瓦级智能压裂泵系统在实际应用中的高效性和可靠性,而且展示了其在煤矿安全生产和环境保护方面的重要作用。通过这些关键技术突破,为煤矿行业提供了一种新的、高效的顶板岩层弱化和瓦斯抽采解决方案,有助于提升煤矿作业的安全性和效率。

5 结 论

1)开发设计适用于坚硬难垮落顶板治理、瓦斯抽采增透的兆瓦级煤矿井下智能压裂泵系统,压裂泵系统能够满足最大压力 63 MPa,最大压力 132 m³/h。

2)采用有限元分析、齿轮强度仿真、液压系统仿真等设计方法对兆瓦级压裂泵动力端和液力端进行了结构创新设计;并采用多电压等级集成供电模式和多重安全保护机制,设计了具有远程压裂高效操作和高压管路爆管快速卸压及关断保护功能的压裂泵智能控制系统。

3)重点攻克了特殊材料及特殊工艺,各项性能满足兆瓦级工况强度要求;解决了多点支撑高强度曲轴轴系、大功率高扭矩齿轮系统和高耐久性十字头-缸套摩擦副,以及混砂介质条件下高耐磨柱塞密封副以及高强度和高耐冲击性液力端等方面技术难题;攻克了深钻孔低频变流量坐封技术、煤岩层起裂自动识别技术和循环压裂控制技术核心技术。

4)试验证明,兆瓦级超大流量压裂泵系统能够很好满足水力压裂技术在坚硬顶板预裂弱化治理和瓦斯抽采增透等安全治理领域的工程应用。

参考文献(References):

- [1] 康红普,冯彦军,张震,等.煤矿井下定向钻孔水力压裂岩层控制技术及应用[J].煤炭科学技术,2023,51(1):31-44.
KANG Hongpu, FENG Yanjun, ZHANG Zhen, et al. Hydraulic fracturing technology with directional boreholes for strata control in underground coal mines and its application[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 31-44.
- [2] 康红普,冯彦军.煤矿井下水力压裂技术及在围岩控制中的应用[J].煤炭科学技术,2017,45(1):1-9.
KANG Hongpu, FENG Yanjun. Hydraulic fracturing technology and its applications in strata control in underground coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 1-9.
- [3] 孙四清,李文博,张俭,等.煤矿井下长钻孔分段水力压裂技术研究进展及发展趋势[J].煤田地质与勘探,2022,50(8):1-15.
SUN Siqing, LI Wenbo, ZHANG Jian, et al. Research progress and development trend of staged hydraulic fracturing technology in long-borehole underground coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(8): 1-15.
- [4] 徐雪战.低透气煤层超高压水力割缝与水力压裂联合增透技术[J].煤炭科学技术,2020,48(7):311-317.
XU Xuezhao. Combined permeability enhancement technology of ultra-high pressure hydraulic slot and hydraulic fracturing in low permeability coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 311-317.
- [5] 国家发展改革委,国家能源局.能源技术革命创新行动计划(2016—2030年)[EB/OL].(2016-04-07)/[2022-09-25].http://www.nea.gov.cn/2016-06/01/c_135404377.htm.
- [6] 李然,王伟,苏哲.高压大流量乳化液泵滑动轴承热流体动力润滑仿真分析[J].煤炭学报,2014,39(S2):576-582.
LI Ran, WANG Wei, SU Zhe. Numerical study on thermohydrodynamic performance of journal bearing in high-pressure and large-flow-rate emulsion pump[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S2): 576-582.
- [7] 李然.大采高工作面高压大流量乳化液泵的研制及应用[J].煤炭科学技术,2017,45(12):145-149.
LI Ran. Research and development as well as application of high pressure and high flow emulsion pump to large mining height face[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(12): 145-149.
- [8] 李然,张启龙,刘昊,等.煤矿用纯水介质高压大流量柱塞泵关键技术研究[J].液压气动与密封,2020,40(5):17-21.
LI Ran, ZHANG Qilong, LIU Hao, et al. Research on key technologies of plunger pump under pure water medium condition[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2020, 40(5): 17-21.
- [9] 叶健.1 250 L/min、40 MPa 高压大流量乳化液泵站[J].智能矿山,2022,3(1):36-37.
- [10] 李然,孙晓冬,刘波,等.煤矿井下智能压裂泵系统研究[J].煤炭科学技术,2022,50(4):264-269.
LI Ran, SUN Xiaodong, LIU Bo, et al. Research on intelligent fracturing pump system in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(4): 264-269.
- [11] 陈冬冬,孙四清,张俭,等.井下定向长钻孔水力压裂煤层增透技术体系与工程实践[J].煤炭科学技术,2020,48(10):84-89.
CHEN Dongdong, SUN Siqing, ZHANG Jian, et al. Technical system and engineering practice of coal seam permeability improvement through underground directional long borehole hydraulic fracturing[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(10): 84-89.
- [12] 李然,王初亮,刘波,等.压裂系统和压裂方法[P].中国专利:CN202111241528.4,2021-10-25.
- [13] 国家安全生产监督管理总局.煤矿用乳化液泵站第1部分:泵站:MT/T 188.1—2006[S].北京:煤炭工业出版社,2006.
- [14] 刘明亮,王大龙,王伟,等.一种变频水力压裂系统及其压力调节方法[S].中国专利:CN201911024405.8.2019-10-25.
- [15] 《往复泵设计》编写组.往复泵设计[M].北京:机械工业出版社,1987.
- [16] 李然,王伟,苏哲.高压大流量乳化液泵曲轴疲劳强度分析[J].煤矿开采,2014(1):45-48.

- LI Ran, WANG Wei, SU Zhe. Fatigue strength analysis of bent axle of large-flow and high-pressure emulsion pump[J]. *Coal Mining Technology*, 2014(1): 45–48.
- [17] 杨子龙, 张朵, 何新党等. 舰船齿轮传动轴模拟试验件设计方法研究[J]. *热能动力工程*, 2021, 36(5): 55–60.
- YANG Zilong, ZHANG Duo, HE Xindang, et al. Design method for the simulation parts of ship gear drive shaft[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2021, 36(5): 55–60.
- [18] LI R, WEI W S, LIU H, et al. Simulation study on liquid-end of high-pressure and large-flow-rate reciprocating pump[C]: 2019 IEEE 8th International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM). IEEE, 2019: 1008–1014.
- [19] LI R, WANG D L, WEI W S, et al. Analysis of the movement characteristics of the pump valve of the mine emulsion pump based on the Internet of Things and cellular automata[J]. *Mobile Information Systems*, 2021, 2021(1): 9032769.
- [20] 王初亮, 李然, 陈敬斌, 等. 齿轮箱和具有其的压裂泵 [S]. 中国专利: CN202321443402X. 2023–06–27.
- [21] LI R, WEI W S, LIU H, et al. Experimental and numerical study on the dynamic and flow characteristics of a reciprocating pump valve[J]. *Processes*, 2022, 10(7): 1328.
- [22] 叶文杰, 陈奎生, 湛从昌, 等. 高压压裂泵配流阀流场特性分析及结构参数优化[J]. *武汉科技大学学报*, 2021, 44(3): 207–212.
- YE Wenjie, CHEN Kuisheng, ZHAN Congchang, et al. Analysis of flow field characteristics and optimization of structural parameters for distributing valve in high-pressure fracturing pump[J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology*, 2021, 44(3): 207–212.
- [23] 张翼, 张婷, 满满, 等. 阀门导向杆撞击应力数值分析[J]. *导弹与航天运载技术*, 2018(1): 45–48.
- Zhang Yi, Zang Ting, Man Man, et al. Numerical Simulation for Impact Stress of Guide Stem in Valves[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2018(1): 45–48.