

煤气化高压黑水角阀冲蚀磨损过程数值计算

陈 志 飞

(中国石化长城能源化工(宁夏)有限公司,宁夏 银川 750000)

摘 要:针对煤气化高压黑水角阀内件冲蚀磨损严重的问题,根据煤气化高压黑水角阀的介质物性参数、操作工况和三维流道结构,建立了描述阀内介质闪蒸过程、颗粒运动过程和冲蚀磨损过程的数学模型和计算方法,开展阀内颗粒冲蚀磨损过程的数值计算。结果表明:阀内冲蚀磨损严重的区域主要位于阀芯顶部以及衬套入口段,其中,阀芯顶部的冲蚀磨损率最高。数值计算结果与实际失效案例相一致,验证了计算模型和方法的准确性,研究结果可为同类阀门的失效分析及结构优化提供参考。

关键词:煤气化;黑水角阀;冲蚀磨损;阀门失效

中图分类号:TH117.1

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2018)03-0213-05

Numerical simulation on erosion wear process in coal water slurry valve with high pressure during coal gasification

CHEN Zhifei

(SINOPEC Great Wall Energy and Chemical(Ningxia)Co.,Ltd.,Yinchuan 750000,China)

Abstract: Aiming at the serious erosion wear on components of coal water slurry valve with high pressure during coal gasification, based on the fluid physical parameters, operation conditions and three-dimensional flow structure of coal water slurry valve, the mathematical model and calculation method are constructed to describe the process of flashing, particles movement and erosion wear. Then the numerical simulation on the erosion wear in the valve is carried out. The results show that severe erosion wear locate on the top of valve spool and the entrance of valve bushing. Among them, the maximum erosion rate occurs on the top surface of valve spool. The numerical results agree well with the actual failure instance, thus the accuracy of calculation model and method is verified. The research results can provide the reference for failure analysis and structural optimization of the similar valves.

Key words: coal gasification; coal water slurry valve; erosion wear; valve invalidation

0 引 言

煤气化工艺是煤炭深加工的主流核心技术之一,目前我国宁夏、新疆、内蒙古等多个国家级煤化工基地开展示范推广应用^[1]。与石化装置相比,目前对于煤化工关键承压设备的耐流动腐蚀设计规范、校核准则、操作运行等方面的经验仍较为匮乏,设备的运行和维护成本很高^[2]。例如,煤气化高压黑水角阀系统的冲蚀失效十分严重,存在阀芯磨损、缓冲罐底部及侧壁减薄泄漏、阀瓣卡塞等多种形式的失效,严重制约了装置的安全和长周期运行^[3-4]。

针对上述失效现状,国内众多高校和科研机构

从阀内件涂层、表面硬化技术、阀内介质流动分析和流道结构改进等方面开展了大量的防控优化和延寿技术研究^[5-6]。在材料表面硬化涂层处理方面,目前阀芯多数采用碳化钨整体铸造,并采用超音速火焰喷涂、激光火焰重熔等技术在阀座及阀门出口文丘里扩管的表面喷涂不同类型的硬质涂层^[7]。在冲蚀磨损预测和优化研究方面,FORDER 等^[8]在修正颗粒冲击-反弹恢复系数的基础上,对调节阀的冲蚀磨损进行仿真分析,提出阀门磨损率的大小主要取决于介质流速,在限定进出口压差的条件下可通过降低最高流速来优化阀门结构。MAZUR 等^[9]基于汽轮机主机阀的冲蚀磨损仿真分析,提出了阀

收稿日期:2017-11-20;责任编辑:代艳玲 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2018.03.035

作者简介:陈志飞(1982—),男,浙江衢州人,工程师。Tel:0951-3098834,E-mail:czf0570@163.com

引用格式:陈志飞. 煤气化高压黑水角阀冲蚀磨损过程数值计算[J]. 煤炭科学技术,2018,46(3):213-217,32.

CHEN Zhifei. Numerical simulation on erosion wear process in coal water slurry valve with high pressure during coal gasification[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(3): 213-217, 32.

结构的优化改造方案,计算结果表明可降低约 50% 的磨损率,但缺少试验或案例验证;HAUGEN 等^[10]通过对碳钢、316L 不锈钢、碳化钨、陶瓷等 28 种不同材料开展气固冲蚀磨损试验,将试验数据处理得出的相对磨损模型方程应用到仿真计算中,并按仿真优化后的几何模型制造样阀进行磨损试验,表明该方法对优化阀门结构、降低磨损率,准确预测磨损位置具有重要的指导意义;张亮等^[11]通过计算获得了煤液化减压阀内的速度场和湍动能分布,以湍动能来表征阀门磨损率,得出 45° 冲击角下冲蚀磨损最严重。由上述研究可知,阀内的冲蚀磨损机理较为复杂,涉及到流道结构、颗粒含量、介质物性、壁面材料特性等一系列因素。针对不同的工艺过程及操作条件,需构建不同的数学模型、计算方法和边界条件。尤其是煤气化高压黑水角阀内还涉及到介质的气液相变问题,导致阀内流场和颗粒运动更加复杂。笔者针对煤气化高压黑水角阀的工艺过程和操作条件,计算获得阀内介质的物性参数。采用蒸发-凝结模型、颗粒运动模型、冲击反弹恢复系数模型分别描述介质的闪蒸过程,颗粒群运动过程以及颗粒与壁面的碰撞过程,从而预测高压黑水角阀流道内的冲蚀磨损规律。通过与实际失效案例的对比,以验证数值计算模型和方法的准确性。

1 高压黑水角阀结构及物性参数

高压黑水角阀位于碳洗塔及高压闪蒸罐之间,用于调节进入碳洗塔的黑水介质流量,其几何结构如图 1 所示。

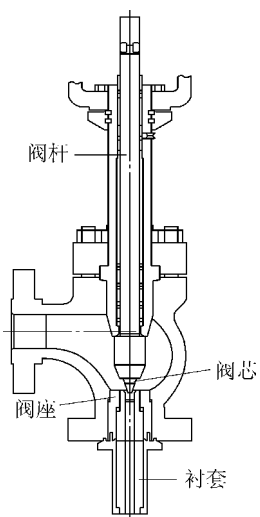


图 1 高压黑水角阀的几何结构

Fig. 1 Geometrical structure of high pressure coal water slurry valve

高压黑水角阀主要包括阀芯、阀杆、阀座、阀腔以及出口衬套。其中,阀杆与气动执行机构相连接,用于控制阀门开度;阀芯与阀座配合构成节流段。高压黑水角阀进出口管道的公称通径分别为 15.24 cm(6 英寸)和 20.32 cm(8 英寸)。高压黑水角阀的出口先后与文丘里扩管和缓冲罐相连接,如图 2 所示。目前,采用二路阀门同时运行的方式,在极端工况下,阀门的开度约为 10%。



图 2 高压黑水角阀、出口文丘里扩管和缓冲罐

Fig. 2 Venturi pipeline and buffer tank and high pressure coal water slurry valve

为延长高压黑水角阀系统的整体使用寿命,高压黑水角阀的阀芯和阀座均采用碳化钨整体铸造,文丘里扩管表面熔覆有 WC-Co 涂层。采用 ASPEN PLUS 工艺计算平台,获得高压黑水角阀内气-液-固三相流介质的物性参数见表 1。角阀操作温度为 246 °C,进口压力为 6.33 MPa,出口接高压闪蒸罐,其出口压力为 0.5~0.8 MPa。由于进出口压差较大,黑水介质在流动过程中会大量闪蒸,导致流速迅速提高。同时,考虑到黑水介质内含有高浓度的固体颗粒,极有可能导致阀内件发生严重的冲蚀磨损。

表 1 高压黑水角阀介质的物性参数

Table 1 Fluid physical parameters of high pressure coal water slurry valve

项 目	气 相	液 相	固 相
饱和蒸汽压力 P/MPa	—	3.714 5	—
动力黏度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	1.503×10^5	1.39×10^4	—
密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	4.56	649.0	1 400
颗粒平均粒径/ μm	—	—	75
质量分数/%	—	—	10~12

2 角阀冲蚀磨损过程数值计算

2.1 数学模型和控制方程

在计算过程中,采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟阀

内介质在高雷诺数条件下的湍流运动特征^[12]。采用VOF多相流模型模拟气、液两相流动和追踪气-液相界面^[13]。采用蒸发-凝结模型描述高温黑水介质的闪蒸过程^[14]。采用Lagrangian方法计算颗粒的运动轨迹,即将气、液两相视为连续相,将固体颗粒视为离散相,通过单个固体颗粒在连续介质中的受力分析,计算离散相与连续相间的动量传递,从而获得颗粒在流场中的运动规律^[15]。采用冲击反弹恢复系数模型对颗粒与壁面的碰撞过程进行求解^[16];采用美国腐蚀与研究中心(E/CRC)提出的半经验磨损模型计算阀内件表面的冲蚀磨损规律^[17]。阀内介质冲蚀磨损数值计算模型为

$$R = \sum_{p=1}^N \frac{mC(d_p)f(\theta)v^{b(v)}}{A} \quad (1)$$

式中: R 为单位面积的壁面磨损率; p 为颗粒数量, $p=1,2,\dots,N$; m 为冲蚀颗粒质量; d_p 为颗粒直径; $C(d_p)$ 为颗粒粒径函数; θ 为颗粒入射角; $f(\theta)$ 为冲击角函数; v 为冲击速度; $b(v)$ 为冲击速度指数; A 为壁面的冲蚀计算面积。

在模型参数中, $C(d_p)$ 、 $f(\theta)$ 和 $b(v)$ 与冲蚀条件、颗粒物性和靶材特性密切相关,且直接影响冲蚀磨损计算的准确性。在不同的冲蚀环境下,各参数差异较大。经高温颗粒冲蚀磨损试验可知^[18],针对WC-Co涂层, $C(d_p)$ 取值为 1.1×10^{-10} ; $b(v)$ 取值为 2.3; $f(\theta)$ 采用分段线性函数描述,当冲击角 θ 为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° 时, $f(\theta)$ 分别为 0、0.10、0.31、0.61、0.90、1.00、0.82。

2.2 计算域及计算方法

数值模拟的计算域包括高压黑水角阀、出口文丘里扩管、缓冲罐和出口管道区域。采用ICEM前处理软件对计算域进行网格划分,网格数量为300万。采用将网格数量翻倍的方法开展网格无关性验证。结果表明:当网格数量从300万个增加至600万个时,阀芯和阀座交界处(缩流截面)的最高流速分别为200 m/s和204 m/s,相对误差为2%,且阀内压力、湍流强度等其他关键流体动力参数并未发生明显改变。因此,认为达到网格无关性要求。

高压黑水角阀进出口的边界条件分别为压力进口和压力出口,固体壁面边界条件为绝热无滑移。根据高压黑水角阀的实际操作工况,其进、出口压力分别设置为6.43 MPa和0.60 MPa。压力和速度耦合方式采用PISO方法,湍动能、湍流耗散率、相分

率等参数均采用二阶迎风格式进行离散。为保证计算结果的稳定性和可靠性,将计算求解过程分为以下3个步骤:①采用非稳态方法,计算阀内单相(液相)流场。当流场中漩涡的结构较为稳定且高压黑水角阀的进出口质量流场的差值小于1%时,认为达到收敛条件;②在液相流场的基础上,加入气液相变方程,开展闪蒸过程的非定常计算。当出口管道处气相相分率的变化范围稳定至 $\pm 1\%$ 时,开展后续计算;③加入固体颗粒,开展气-液-固三相耦合计算,当固体颗粒相各参数的统计平均值变化率小于1%,壁面磨损的特征区域较为稳定,且磨损率极值不随计算时间的增加发生明显改变,此时,认为阀内冲蚀磨损的数值计算已经完成。

3 角阀冲蚀磨损计算结果分析

3.1 多相流介质流动分析

高压黑水角阀内介质的流线如图3所示。由图3可知,在阀芯顶部的下游区域,流动较为紊乱,存在多个流动漩涡,且漩涡区的流速较高,会对衬套入口段造成明显的冲击。受阀芯下游衬套结构的约束,介质对缓冲罐底部存在明显的撞击-反弹过程。在靠近缓冲罐底部区域,流动十分复杂,介质与缓冲罐的壁面存在多处碰撞,流动方向随之改变。最终,介质通过出口管道进入高压闪蒸罐。

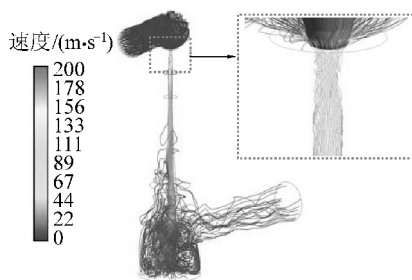


图3 高压黑水角阀介质的流线示意

Fig. 3 Streamlines of high pressure coal water slurry valve

高压黑水角阀内介质的流速分布云图如图4所示。由图4可知,在阀芯的入口处,介质流速均低于10 m/s。当介质通过阀芯与阀座的交界处,流速迅速增加。在缩流截面的最窄处,局部最高流速达到200 m/s。由于阀芯出口处装有衬套,该区域的流道较为狭窄,平均流速达到60 m/s,且流动状态很不稳定。同时,衬套出口处的高流速区域一致延伸到缓冲罐的中部。该区域内的平均流速为30~50 m/s。该高流速区域越靠近缓冲罐底部,对罐底壁

面的冲击作用越强烈。

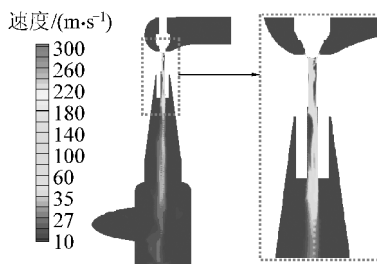


图4 高压黑水角阀介质流速分布云图

Fig. 4 Contour of flow velocity in coal water slurry valve

高压黑水角阀内部的压力分布云图如图5所示。由图5可知,介质在流经阀芯之前的压力损失较小,阀芯上游的压力与高压黑水角阀的进口压力基本相同。当介质进入缩流截面时,流速迅速提高。同时,该处压力迅速降低至介质的饱和蒸汽压以下,并出现了局部的负压区域。在缩流截面的最窄处,负压值最高。同时,在靠近阀芯顶部出现了压力恢复区,该区域的压力均值为2.0 MPa。在阀芯下游的衬套和文丘里管区域,其压力范围为1.3~2.6 MPa,低于介质的饱和蒸汽压(3.71 MPa)。因此,阀芯下游区域的液相介质会大量闪蒸,形成气液两相流。

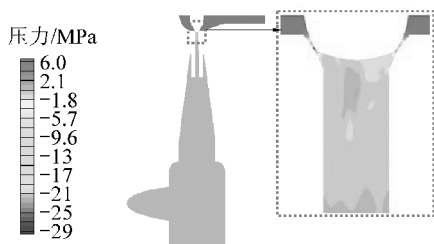


图5 高压黑水角阀介质压力分布云图

Fig. 5 Contour of pressure distribution in coal water slurry valve

3.2 介质闪蒸过程分析

阀芯下游衬套处的气相体积分数如图6所示。由图6可知,介质的闪蒸从衬套入口段开始发生,且闪蒸的初始位置靠近阀芯。在流道内作2个相互垂直的竖直截面,截面内气相体积分数云图如图7所示。由图7可知,阀内发生了剧烈的气液相变,闪蒸后生成的气相介质占据了阀芯出口衬套的下半部分、文丘里扩管、缓冲罐以及出口管道的大部分空间。在出口管道处,气相的体积分数达到96.2%,与工艺计算结果(96.7%)较为接近,验证了闪蒸过程计算的准确性。在缓冲罐区域,由于介质的流动变化较为剧烈且流动结构复杂,气相的体积分数分布不均匀。

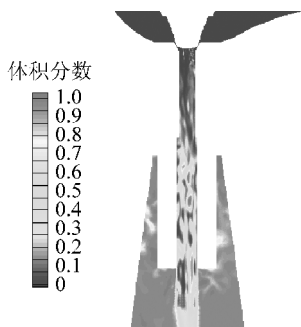


图6 衬套内气相体积分数分布云图

Fig.6 Contour of vapor phase volume fraction in the bushing

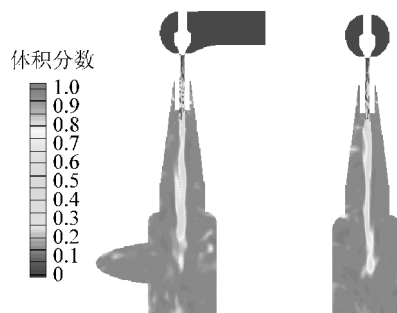


图7 高压黑水角阀气相体积分数分布云图

Fig. 7 Contour of vapor phase volume fraction in high pressure coal water slurry valve

3.3 流道磨损程度分析

阀芯和阀芯下游出口衬套的磨损率分布云图如图8所示。

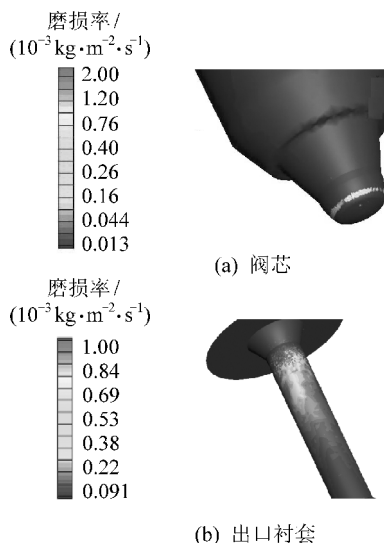


图8 高压黑水角阀内件磨损率分布

Fig. 8 Distribution of erosion wear on high pressure coal water slurry valve components

由图8a可知,靠近阀芯顶部的位置磨损率最高,磨损率的数量级为 $10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,最高磨损率为 $2.0 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。由图4可知,该位置为高压

黑水角阀内部流速最高的区域,颗粒对壁面的冲蚀速度最高,磨损率最大。由图 8b 可知,在出口衬套的入口段,存在高磨损率区域,其磨损率为 $3.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。由高压黑水角阀内部的流速分布可知,衬套区域的介质平均流速达到 60 m/s 。该区域的流动较为紊乱,颗粒与壁面存在多次冲击-反弹过程,导致磨损率较高。并且,在该开度和阀芯结构下,阀芯出口衬套处的高流速区域距离缓冲罐底部壁面较远。罐底壁面附近的平均流速均低于 10 m/s ,与阀芯前端和出口衬套入口段相比,罐底壁面的磨损率要低 2 个数量级。因此,在该运行状态下,缓冲罐底部及侧壁的冲蚀磨损不严重。

综上可知,在小开度条件下,高压黑水角阀及下游管道系统的高磨损率区域主要集中在阀芯以及出口衬套,在缓冲罐底部及侧壁并未发现明显的磨损现象。其中,阀芯前端的磨损率最高,其最大值为衬套入口段的 2 倍。

4 计算结果验证

高压黑水角阀阀芯的失效形貌如图 9 所示。由图 9 可知,角阀阀芯的前端材料流失十分严重,阀芯从底部向前端逐渐变细,阀芯原先的外形结构被改变。阀芯表面存在多处细微的冲蚀痕迹,痕迹的方向与介质的流动方向基本一致。其中,冲蚀磨损最严重的区域位于阀芯顶部。失效部位与数值计算的结果基本一致,验证了数值计算的准确性。

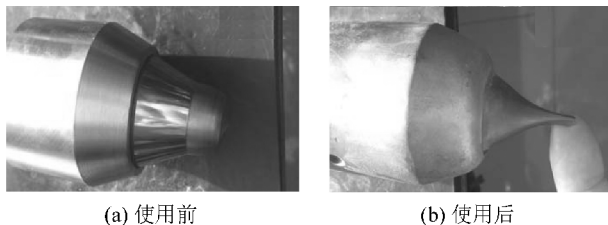


图 9 高压黑水角阀阀芯失效形貌

Fig. 9 Corrosion morphology of high pressure coal water slurry valve spool

5 结论

1) 采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型、VOF 多相流模型,蒸发-凝结模型,颗粒冲击反弹恢复系数模型和冲蚀磨损模型相结合的方法,可准确预测高压黑水角阀内介质的闪蒸和颗粒的冲蚀磨损过程。

2) 高压黑水角阀的失效机理为介质闪蒸过程

中造成的颗粒冲蚀磨损,失效严重的区域主要集中在阀芯顶部和衬套的入口段。其中,阀芯顶端的冲蚀磨损最为严重。

3) 数值计算结果与实际失效案例相吻合,验证了多相流冲蚀磨损数学模型和数值计算方法的准确性。

参考文献 (References):

- [1] 井云环,吴跃,张劲松.神华宁夏煤化工基地 3 种煤气化技术对比[J].煤炭科学技术,2013,41(S2):390-395.
JING Yunhuan, WU Yue, ZHANG Jinsong. Comparison on three kinds of coal gasification technologies in coal chemical industry base of Shenghua Ningxia coal group[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(S2): 390-395.
- [2] 饶杰.煤液化热高分调节阀空蚀/冲蚀磨损数值研究[D].杭州:浙江理工大学,2013:2-4.
- [3] 曹辉,杨胜,钱威.黑水闪蒸系统角阀损坏原因及处理[J].阀门,2014(2):41-42.
CAO Hui, YANG Sheng, QIAN Wei. Damaged causes and solutions on the black water slurry valve[J]. Valve, 2014(2): 41-42.
- [4] 颜震,汪欢,李峰,等.黑水调节阀内闪蒸现象的数值模拟与结构改进[J].化工机械,2014,41(5):642-646.
YAN Zhen, WANG Huan, LI Feng, et al. Numerical simulation of flashing and structural improvements on black water regulating valve[J]. Chemical Machinery, 2014, 41(5): 642-646.
- [5] 杨国来,张婧芳,叶建中.黑水调节阀固液两相流数值模拟及内流场分析[J].液压气动与密封,2016(12):4-6.
YANG Guolai, ZHANG Jingfang, YE Jianzhong. Analysis of black water regulating valve in solid-liquid two-phase numerical simulation and internal flow field[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2016(12): 4-6.
- [6] 李永恒.黑水调节阀失效形式分析与结构优化[D].银川:宁夏大学,2015:3-5.
- [7] 偶国富,易玉微,金浩哲,等.煤直接液化减压进料阀组数值模拟与优化[J].煤炭学报,2015,40(12):2961-2966.
OU Guofu, YI Yuwei, JIN Haozhe, et al. Numerical simulation and optimization on coal liquefaction hypobaric charge-in valve[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(12): 2961-2966.
- [8] FORDER A, THEW M, HARRISON D. A numerical investigation of solid particle erosion experienced within oilfield control valves[J]. Wear, 1998, 216: 184-193.
- [9] MAZUR Z, CAMPOS-AMEZCUA R, URQUIZA-BELTRAN G, et al. Numerical 3D simulation of the erosion due to solid particle impact in the main stop valve of a steam turbine[J]. Applied Thermal Engineering, 2004(24): 1877-1891.
- [10] HAYGEN K, KVERNVOLD O, RONOLD A, et al. Sand erosion of wear-resistant materials: erosion in choke valves[J]. Wear, 1995: 179-188.

(下转第 32 页)

- 巷技术研究[J].中国矿业大学学报,2015,44(4):604-611.
- HUANG Wanpeng, GAO Yanfa, WEN Zhijie, *et al.* Technology of gob-side entry retaining using concrete-filled steel tubular column as roadside supporting[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(4): 604-611.
- [12] 赵庆彪, 刘长武. 组合支架切顶巷旁自行充填矸石墙体留巷试验[J]. 煤炭学报, 2011, 36(6): 891-896.
- ZHAO Qingbiao, LIU Changwu. Remain tunnel experiment of combination support roof cutting beside of self-filling waste wall[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(6): 891-896.
- [13] 曹树刚, 陈先哲, 杨红运, 等. 沿空留巷巷旁控制技术及其适用条件分析[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(4): 27-33.
- CAO Shugang, CHEN Xianzhe, YANG Hongyun, *et al.* Analysis on roadway control technology of gob-side entry retaining and applicable conditions[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(4): 27-33.
- [14] 李 胜, 李军文, 范超军, 等. 综放沿空留巷顶板下沉规律与控制[J]. 煤炭学报, 2015, 40(9): 1989-1994.
- LI Sheng, LI Junwen, FAN Chaojun, *et al.* Roof subsidence laws and control technology for gob-side entry retaining in fully-mechanized top-coal caving face[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(9): 1989-1994.
- [15] 康红普, 牛多龙, 张 镇, 等. 深部沿空留巷围岩变形特征与支护技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 1977-1987.
- KANG Hongpu, NIU Duolong, ZHANG Zhen, *et al.* Deformation characteristics of surrounding rock and supporting technology of gob-side entry retaining in deep coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 1977-1987.
- [16] 张 农, 韩昌良, 闾甲广, 等. 沿空留巷围岩控制理论与实践[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1635-1641.
- ZHANG Nong, HAN Changliang, KAN Jianguang, *et al.* Theory and practice of surrounding rock control for pillarless gob-side entry retaining[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1635-1641.
- [17] 李国栋, 王襄禹. 沿空留巷下位岩层断裂特征数值模拟及控制技术[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(4): 50-55.
- LI Guodong, WANG Xiangyu. Numerical simulation and control technology of fracture characteristics of lower strata in gob-side entry retaining[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(4): 50-55.
- [18] 潘海兵, 李春睿, 王东攀, 等. 基于切顶卸压的钢管混凝土沿空留巷技术[J]. 煤炭技术, 2017, 38(8): 12-15.
- PAN Haijing, LI Chunrui, WANG Dongpan, *et al.* Gob side entry retaining technology by concrete filled steel tube based on roof cutting pressure relief[J]. Coal Technology, 2017, 38(8): 12-15.
- [19] 李迎富, 华心祝, 蔡瑞春. 沿空留巷关键块体的稳定性力学分析及工程应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(3): 357-364.
- LI Yingfu, HUA Xinzhu, CAI Ruichun. Mechanics analysis on the stability of key block in the gob-side entry retaining and engineering application[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(3): 357-364.
- [20] 李爱军. 深井沿空留巷关键技术研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(11): 12-17.
- LI Aijun. Research and application of key technology to deep mine gob-side entry retaining[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(11): 12-17.
- [21] 侯朝炯, 马念杰. 煤层巷道两帮煤体应力和极限平衡区的探讨[J]. 煤炭学报, 1989, 14(4): 21-29.
- HOU Chaojiong, MA Nianjie. Stress in in-seam roadway sides and limit equilibrium zone[J]. Journal of China Coal Society, 1989, 14(4): 21-29.

(上接第217页)

- [11] 张 亮, 关凯书, 王志文, 等. Fluent 模拟验证 187137-IP 减压阀阀芯失效机理[J]. 腐蚀与防护, 2008, 29(5): 284-289.
- ZHANG Liang, GUAN Kaishu, WANG Zhiwen, *et al.* Certification of failure mechanism of 187137-IP relief pressure valve spool by Fluent[J]. Corrosion & Protection, 2008, 29(5): 284-289.
- [12] JIN Haozhe, ZHENG Zhijian, OU Guofu, *et al.* Failure analysis of a high pressure differential regulating valve in coal liquefaction[J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 55: 115-130.
- [13] 金浩哲, 陈小平, 郑智剑, 等. 煤液化热高压分离器煤粉漂移特性数值模拟与优化[J]. 煤炭学报, 2016, 41(4): 1004-1010.
- JIN Haozhe, CHEN Xiaoping, ZHENG Zhijian, *et al.* Numerical simulation and optimization on pulverized coal drifting characteristics in high temperature and high pressure separator[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(4): 1004-1010.
- [14] ZHENG Zhijian, OU Guofu, YI Yuwei, *et al.* A combined numerical-experiment investigation on the failure of a pressure relief valve in coal liquefaction[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 60: 326-340.
- [15] 孙 飞, 冯永保, 胡 宇, 等. 基于 CFD 的伺服滑阀冲蚀磨损特性分析[J]. 表面技术, 2016, 45(12): 84-90.
- SUN Fei, FENG Yongbao, HU Yu, *et al.* CFD-based characteristic analysis of erosion wear of servo slide valve[J]. Surface Technology, 2016, 45(12): 84-90.
- [16] ZHENG Zhijian, OU Guofu, YE Haojie, *et al.* Investigation on the failure process and structural optimization of a high pressure let-down valve [J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 66: 223-239.
- [17] 林 哲. 闸阀内部气固两相流动及磨损研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 19-20.
- [18] 龚宝龙. 煤液化高温调节阀流动磨损预测及校核研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2014: 47-48.