李伟,孙自强,马彦,等.煤炭地下气化通道传热下顶板岩温度和应力研究[J].矿业安全与环保,2024,51(3):132-136.
LI Wei,SUN Ziqiang,MA Yan,et al. Study on roof rock temperature and stress under heat transfer in underground coal gasification channel[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2024,51(3):132-136.
DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.20230189

扫码阅读下载

煤炭地下气化通道传热下顶板岩温度和应力研究

李 伟[1],孙自强[2],马 彦[2],孙希奎[3],李木坤[4],隋建才[3],辛 林[4],辛 爽[2],牛茂斐[4]

(1.山东能源电力集团有限公司,山东 济南 250014; 2.山东鲁西发电有限公司,山东 邹城 273500;
3.山东能源集团有限公司,山东 济南 250101; 4.山东科技大学,山东 青岛 266590)

摘要:针对煤炭地下气化中的顶板岩稳定和气化热利用问题,建立了热—流—固耦合的流场和应力场计算模型,模拟研究了气化通道传热下顶板岩的温度、应力变化。结果表明,燃烧面前的顶板岩升温幅度低于燃烧面后的;随着燃烧面的推进,气化通道周围顶板岩的升温幅度和升温区域增大;高温可大幅增加顶板岩底部的拉应力和剪应力,最大可增加10倍以上;最大拉应力和最大剪应力发生在燃烧面所在的顶板岩底部位置,顶板岩主要发生拉伸破坏。

关键词:煤炭;地下气化;热—流—固耦合;温度场;应力场;气化通道
中图分类号:TD844 **文献标志码**:A **文章编号**:1008-4495(2024)03-0132-05

Study on roof rock temperature and stress under heat transfer in underground coal gasification channel

LI Wei[1],SUN Ziqiang[2],MA Yan[2],SUN Xikui[3],LI Mukun[4],SUI Jiancai[3],XIN Lin[4],XIN Shuang[2],NIU Maofei[4]

(*1. Shandong Energy Electric Power Group,Jinan 250014,China; 2. Shandong Luxi Power Generation Group,
Zoucheng 273500,China; 3. Shandong Energy Group,Jinan 250101,China;
4. Shandong University of Science and Technology,Qingdao 266590,China*)

Abstract: Aiming at the problems of roof rock stability and efficient utilization of gasification heat in underground coal gasification,a calculation model of flow field and stress field with heat-fluid-solid coupling was established. The temperature and stress changes of roof rock were explored. It is found that the temperature increment of roof rock before combustion surface is lower than that after combustion surface. With the advance of the combustion surface,both the temperature increment and high temperature area of the roof rock around the exhaust drilling hole increase. The high temperature can greatly increase the tensile stress and shear stress at the bottom of roof rock,and the maximum tensile stress and shear stress increase by more than 10 times. The maximum tensile stress and shear stress occur at the location of the combustion surface of the roof rock bottom,and tensile failure mainly occurs in roof rock.

Keywords: coal;underground gasification;heat-fluid-solid coupling;temperature field;stress field;gasification channel

煤炭地下气化具有煤炭洁净化利用和低碳能源资源保障两大优势,是适用于老矿井废弃煤炭资源和1 000 m以深等难开采煤炭资源利用的第二代采煤技术[1]。制约煤炭地下气化大规模开展的核心问题是安全性、环保性和经济性。其中,安全性问题主要由顶板岩高温破坏下的地表塌陷引发的;环保性问题主要与地下水污染及顶板岩高温破坏下的气化气体泄漏相关;经济性问题则与油气能源价格和可燃气化气体的占比有关。上述问题都与气化工作面的燃烧热传导和热效应密切相关,如何高效地利用燃烧热促进气化反应,同时减少燃烧热对顶板岩的热传导和热破坏,是地下气化炉设计优化的关键。

目前,国内外针对气化燃烧热下顶板岩高温破坏开展了大量研究,主要成果如下:气化过程中,燃空区的结构应力和高温热应力的共同作用会对岩石造成损伤,气化时间越长高温损伤范围越大;顶板岩

收稿日期:2023-03-11;2024-01-09 修订
基金项目:山东能源集团重大科技项目(SNKJ2022A31-R01)
作者简介:李 伟(1971—),男,山东济宁人,主要从事电力产业规划方面的研究工作。E-mail:dijiaxue@shandong-energy.com。

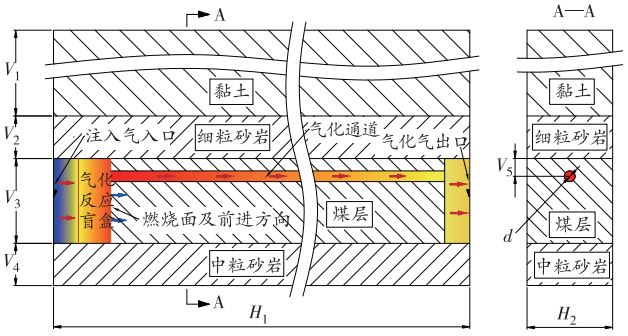
的升温区域大于煤层的升温区域，由于气化通道存在持续高温气流，其周围的岩石高温区域远大于气化炉燃烧面周围的高温区域[2-3]；600.0 ℃高温处理后粗砂岩和细砂岩的抗压强度和弹性模量都降低了50%以上，热损伤演化在 600.0 ℃处存在一个阈值[4]；当温度达到 200.0 ℃，煤炭表现出塑性，煤炭的力学参数随着温度的升高整体表现出“增强—急剧减弱—稳定”3 个阶段的变化特征[5]；高温下煤对 CO_2、CH_4 等气体的吸附性降低[6]，有利于气化气体的流出。

综合以上研究可知，煤炭地下气化燃烧热对顶板岩的损伤是不可避免的，气化通道传热对顶板岩的温度场影响更大，但针对气化通道传热对顶板岩温度场、应力场的规律性研究还较少。因此，笔者参考矿井式定向钻井导控法气化工艺[7]，建立热—流—固耦合的流场和应力场计算模型，研究气化通道传热对顶板岩温度场和应力场的影响。

1　计算模型

1.1　物理模型和网格划分

假设煤层、岩层全部水平，模型主要由位于煤层中心的气化通道、煤层、顶板岩（细粒砂岩）、底板岩（中粒砂岩）等组成。地下气化炉二维物理模型、具体参数如图 1、表 1 所示。



V_1、V_2、V_3、V_4—黏土层厚度、细粒砂岩厚度、气化煤层厚度、中粒砂岩厚度；V_5—气化通道与顶板岩的距离；H_1—气化煤层的长度；H_2—气化煤层的宽度；d—气化通道直径。

图 1　二维物理模型示意图（d 相对比例扩大 5 倍）

Fig. 1　Schematic diagram of the two-dimensional physical model (d is 5 times larger in relative scale)

表 1　模型尺寸

Table 1　Model size　　单位：m

岩层参数	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	H_1	H_2	d
取　值	90.0	10.0	20.0	10.0	2.0	150.0	20.0	0.4

模型采用六面体网格划分，气化通道与煤层间采用共节点网格。经过网格无关的计算验证，最终确定煤层、气化通道网格长 60 mm，其他网格长 120 mm，整个模型网格单元约 3 200 万个，网格平均质量达到了 0.99（最好为 1）。其中，气化通道的近壁面局部加密为 2 mm，气化通道的近壁面采用网格厚度为 0.5 mm 的边界层网格。网格划分如图 2 所示。

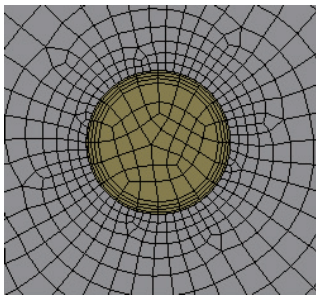


图 2　气化通道网格划分

Fig. 2　Gasification channel meshing

1.2　流体湍流和流体物性控制方程

通过 Fluent 软件进行流场计算。计算中采用 realizable k-ε 湍流方程，可有效计算旋转剪切流、喷射和边界层流及分离流动等[8-14]。

采用 GERG-2008 方程计算流体的密度、黏度、热导率和热容等。GERG-2008 方程由 GERG-2004 发展而来，是一种多参数状态方程。该计算模型以无量纲的 Helmholtz 自由能方程来表示，包含了大量计算纯工质的精确状态方程，并能够在传统的立方型状态方程的基础上结合实验数据进行拟合，准确计算出液态、气态、两相区及超临界区工质的热物性，且混合工质组分数由原有的 18 种增加到了现在的 21 种[15-17]。

1.3　岩石本构、热传导方程和岩石物性

通过 ANSYS 中的 Static structural 模块进行应力计算，岩石力学和热传导的控制方程如下。

1）应力与应变关系

$$\boldsymbol{\varepsilon}_i=\alpha(T-T_0)+\frac{\boldsymbol{\sigma}_i}{E}-\frac{\nu\boldsymbol{\sigma}_j}{E}-\frac{\nu\boldsymbol{\sigma}_k}{E} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{\varepsilon}_i$ 为应变张量，无因次；α 为热膨胀系数，10^{-6} K^{-1}；T 为岩石温度，K；T_0 为岩石初始温度，K；$\boldsymbol{\sigma}_i$、$\boldsymbol{\sigma}_j$、$\boldsymbol{\sigma}_k$ 为沿坐标轴 3 个方向的应力张量，GPa；$(i,j,k)=(x,y,z)$，为自由下标；E 为弹性模量，GPa；ν 为泊松比，无因次。

2）热传导方程

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)+q_v \tag{2}$$

式中：ρ 为流体或岩石的密度，kg/m^3；c 为岩石比热容，J/(kg·K)；t 为时间，s；λ 为热导率，W/(m·K)；x、y、z 为直角坐标轴位置；q_v 为热生成率，J/(m^3·s)。

通过对岩石力学和热力学等的性质调研[18-20]和分析,确定了模拟的岩石参数,见表 2。

表 2 模拟的岩石参数
Table 2 Rock parameters in simulation

岩层类别	ρ/(kg·m^{-3})	c/(J·kg^{-1}·K^{-1})	λ/(W·m^{-1}·K^{-1})	ν	E/GPa	α/(10^{-6} K^{-1})
煤	1 300	1 100	0.25	0.15	3.50	6.0
细粒砂岩	2 400	1 000	1.00	0.20	20.00	15.0
中粒砂岩	2 600	900	0.90	0.20	6.00	10.0
黏土	1 900	850	0.90	0.35	0.25	2.5

1.4 边界条件

气化燃烧反应受煤质、注入气等因素影响,过程复杂,难以模拟。假设注入气与煤层的燃烧气化反应在 1 个反应盲盒内进行,该区域内部不考虑复杂的化学反应,注入气与煤经过反应盲盒发生化学反应后转化为高温气化气。边界条件如图 3 所示。

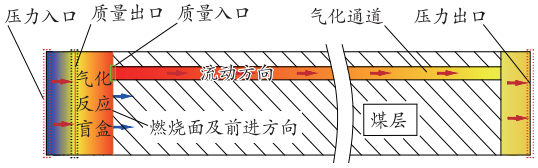


图 3 边界条件示意图
Fig. 3 Schematic diagram of boundary conditions

1)注入气边界条件。压力入口 0.2 MPa,入口流体温度 150.0 ℃;质量出口 8 kg/s。

2)气化通道边界条件。质量入口 10 kg/s,入口流体温度 1 000.0 ℃;压力出口 0.1 MPa。

3)燃烧面和反应盲盒。平移速度 v 取 1 m/d;气化反应盲盒及燃烧面温度为 1 000.0 ℃。

4)流—固耦合边界条件。流—固耦合界面的流体温度、压力与固体的相等。

1.5 求解步骤

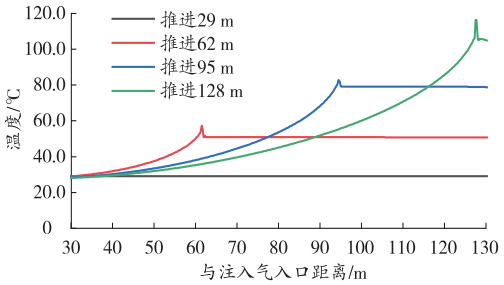
1)设置好流体入口和出口边界条件,采用动网格控制燃烧面的推进量,计算非稳态下的温度场和压力场。

2)将步骤 1)中得到的岩石温度场和压力场作为初始条件,对模型的中粒砂岩底部边界设置零位移约束,计算不同时间下岩石的拉应力和剪应力。

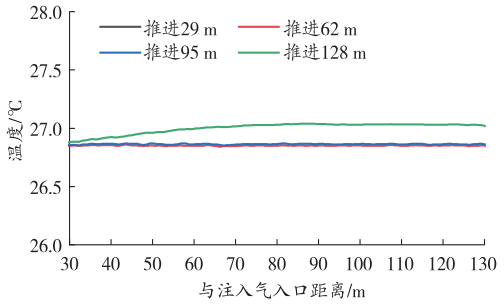
2 热—流—固耦合下温度场和应力场分布

2.1 顶板岩温度变化

顶板岩温度变化模拟结果如图 4 所示。由图 4 可知,顶板岩底部在燃烧面位置有最高温度,在燃烧面前升温幅度逐渐降低,在燃烧面后升温幅度基本不变;顶板岩顶部温度变化小于 0.5 ℃,顶板岩底部最高升温幅度大于 100.0 ℃。



(a)顶板岩底部中心



(b)顶板岩顶部中心

图 4 不同燃烧面推进量下顶板岩温度与注入气入口位置的关系
Fig. 4 Roof temperature under different combustion surface advance

距气化通道出口 2 m 处的顶板岩和煤层温度随燃烧面推进量的变化情况如图 5 所示。

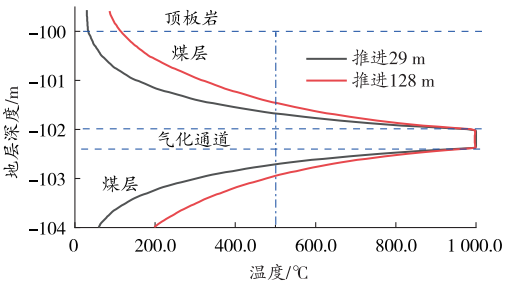
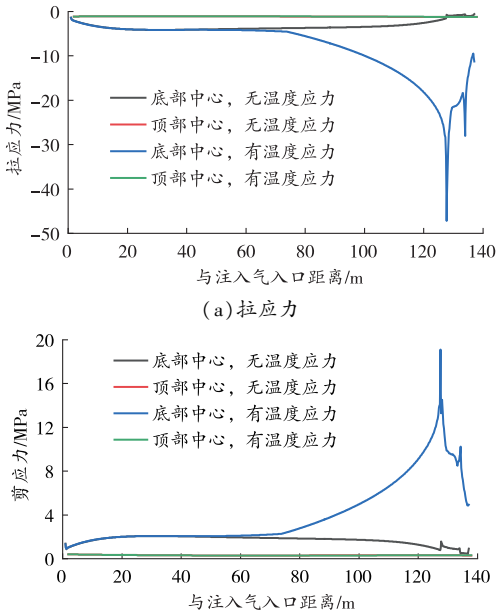


图 5 不同燃烧面推进量下顶板岩和煤层温度
Fig. 5 Temperature of roof rock and coal seam under different combustion surface advance

由图 5 可知,随着燃烧面推进,气化通道周围的顶板岩和煤层高温区域扩大。气化燃烧结束时,500.0 ℃以上高温区域扩大为燃烧前的 1.8 倍。烟煤燃点在 500.0 ℃左右,因此可预测气化通道孔径会由于燃烧或气化反应逐渐变大,气化炉后期产气量将大于前期产气量。

2.2 顶板岩应力变化

燃烧面推进 128 m 时,顶板岩应力变化情况如图 6 所示;顶板岩应力随燃烧面推进量变化模拟结果如图 7 所示。

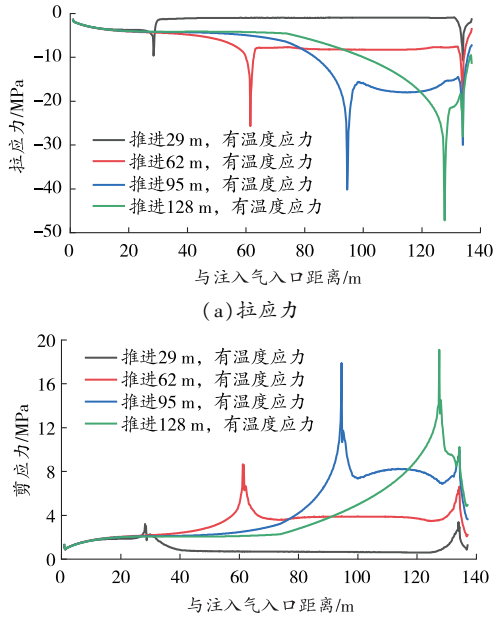


(a)拉应力

(b)剪应力

图 6　推进 128 m 时温度场对顶板岩拉应力和剪应力的影响

Fig. 6　Influence of temperature on tensile stress and shear stress of roof rock when combustion surface is pushed 128 m



(a)拉应力

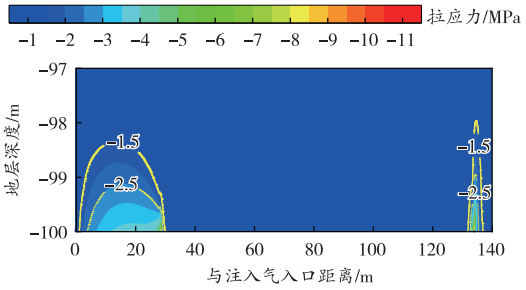
(b)剪应力

图 7　顶板岩底部中心拉应力与剪应力随燃烧面推进变化

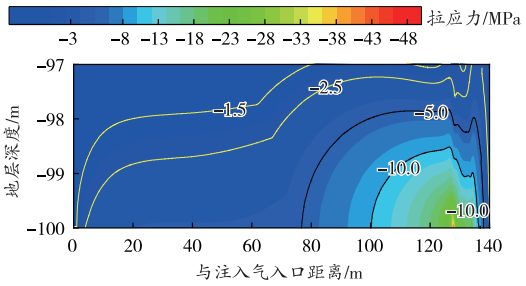
Fig. 7　Tensile stress and shear stress of roof rock bottom with forward displacement of combustion surface

由图 6~7 可知，气化温度场对顶板岩顶部的拉应力和剪应力影响可忽略，但可大幅增加顶板岩底部的拉应力和剪应力，增加幅度随燃烧面的推进而提升，最大可分别增加 10 倍以上。

不同燃烧面推进量下顶板岩应力分布云图如图 8~9 所示。分别以 2.5、10.0 MPa 作为顶板岩的抗拉强度和抗剪强度，并作为岩石破坏区域的判断条件。



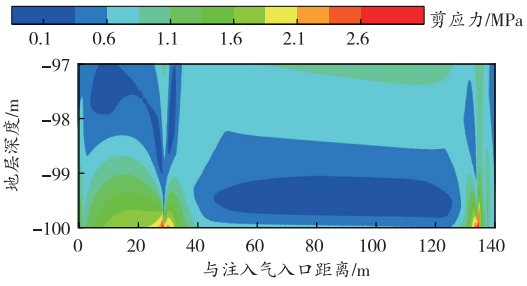
(a)推进 29 m



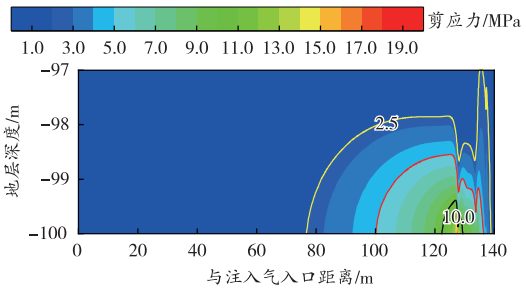
(b)推进 128 m

图 8　不同燃烧面推进量下顶板岩拉应力云图

Fig. 8　Roof rock tensile stress nephogram under different combustion surface advance



(a)推进 29 m



(b)推进 128 m

图 9　不同燃烧面推进量下顶板岩剪应力云图

Fig. 9　Shear stress cloud diagram of roof rock under different combustion surface advance

由图 8~9 可以看出，燃烧面推进量较小(<30 m)时，顶板岩拉伸剪切破坏深度在 1 m 以下；当燃烧面推进量较大(>120 m)时，顶板岩底部以上 3 m 处发生拉伸剪切破坏。

综合温度和应力分布规律，可看出随着燃烧面推进量增大，气化通道周围的顶板岩高温(200 ℃)、高应力(2.5 MPa)区域的深度分别增加了约 1、2 m，拉伸破坏面积增加了 10 倍以上。

3 结束语

1)煤炭地下气化中顶板岩最高温度发生在其底部的燃烧面处,在燃烧面前顶板岩升温幅度逐渐减小,在燃烧面后顶板岩保持较大的升温幅度,因此燃烧面前的顶板岩升温幅度低于燃烧面后的顶板岩升温幅度。

2)随着燃烧面推进,气化通道周围的顶板岩和煤层升温区域扩大,可预测气化通道孔径由于燃烧或气化反应逐渐变大。

3)气化温度场可大幅增大顶板岩底部的拉应力和剪应力,增幅随燃烧面推进而提高,最大可增高拉应力和剪应力10倍以上;最大拉应力和最大剪应力发生在燃烧面所在位置,顶板岩主要发生拉伸破坏。

4)由于未考虑煤层裂隙、气化通道扩大、高温对岩石力学和热力学性质等因素的影响,因此对气化通道传热下温度场及温度应力的计算相对保守,需要后期继续改进计算方法,得出更精确的结果。

参考文献(References):

[1] 许浩,陈艳鹏,幸福东,等.煤炭地下气化面临的挑战与技术对策[J].煤炭科学技术,2022,50(1):265-274.
XU Hao, CHEN Yanpeng, XIN Fudong, et al. Challenges faced by underground coal gasification and technical countermeasures[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 265-274.

[2] 吴财芳,蒋秀明.煤炭地下气化过程中温度场及其传热特征研究进展[J].煤炭科学技术,2022,50(1):275-285.
WU Caifang, JIANG Xiuming. Research progress of temperature field and heat transfer characteristics in process of underground coal gasification[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 275-285.

[3] 黄温钢,王作棠,夏元平,等.煤炭地下气化热-力耦合作用下条带开采数值模拟研究[J].煤炭科学技术,2022,50(8):16-23.
HUANG Wengang, WANG Zuotang, XIA Yuanping, et al. Numerical simulation of strip mining under thermal-mechanical coupling of underground coal gasification[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(8): 16-23.

[4] 辛林,韩立民,冯洛泽,等.煤炭地下气化覆岩相似材料热损伤特性研究[J].矿业研究与开发,2021,41(11):52-57.
XIN Lin, HAN Limin, FENG Mingze, et al. Study on thermal damage characteristics of similar overburden materials in underground coal gasification[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(11): 52-57.

[5] 刘潇鹏.煤炭地下气化高温烧变围岩移动破坏机制研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(7):1512.
LIU Xiaopeng. Study on high temperature burnt surrounding rock movement and failure mechanism in underground coal gasification[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(7): 1512.

[6] 殷珂,傅雪海,陈峰,等.准南阜康矿区低煤化烟煤高温高压吸附实验及深部吸附气含量预测[J].中国科技论文,2022,17(1):72-77.
YIN Ke, FU Xuehai, CHEN Feng, et al. High-temperature and high-pressure adsorption experiment and deep adsorbed gas content prediction of low coal bituminous coal in Fukang mining area of South Junggar Basin[J]. China Sciencepaper, 2022, 17(1): 72-77.

[7] 辛林,程卫民,谢军,等.一种适用于煤炭地下气化的移动注气装置及方法:CN107387055B[P].2019-09-20.

[8] KIM S E, CHOUDHURY D, PATEL B. Computations of complex turbulent flows using the commercial code fluent[M]//SALAS M D, HEFNER J N, SAKELL L. Modeling Complex Turbulent Flows. Dordrecht: Springer, 1999: 259-276.

[9] MOHAN B, YANG W M, CHOU S. Cavitation in injector nozzle holes—A parametric study[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2014, 8(1): 70-81.

[10] SHIH T H, LIOU W W, SHABBIR A, et al. A new k-ε eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows[J]. Computers & Fluids, 1995, 24(3): 227-238.

[11] WASEWAR K L, SARATHI J V. CFD modelling and simulation of jet mixed tanks[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2008, 2(2): 155-171.

[12] TOGUN H, SHKARAH A J, KAZI S N, et al. CFD simulation of heat transfer and turbulent fluid flow over a double forward-facing step[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013: 895374.

[13] FERREIRA V G, BRANDI A C, KUROKAWA F A, et al. Incompressible turbulent flow simulation using the κ-ε model and upwind schemes[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2007: 012741.

[14] XIE Y H, GAO K K, LAN J B, et al. Computational fluid dynamics modeling three-dimensional unsteady turbulent flow and excitation force in partial admission air turbine[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013: 251926.

[15] 强雄超,陈海朝,杜洋,等.CO_2/H_2O混合工质热物性计算方法研究[J].汽轮机技术,2018,60(4):241-244.
QIANG Xiongchao, CHEN Haichao, DU Yang, et al. Study on thermodynamic property calculation of CO_2/H_2O binary mixture[J]. Turbine Technology, 2018, 60(4): 241-244.

[16] 王国云,李长俊,贾文龙,等.GERG-2008状态方程对超高压天然气流量测量的敏感性[J].化学工程,2022,50(10):36-40.
WANG Guoyun, LI Changjun, JIA Wenlong, et al. Sensitivity of ultra-high pressure gas flow measurement to GERG-2008 equation of state utilization[J]. Chemical Engineering (China), 2022, 50(10): 36-40.

[17] 王国云,李长俊,贾文龙.基于GERG-2008方程对CH_4-H_2混合物压缩因子的计算与因素分析[J].天然气化工—C1化学与化工,2022,47(2):89-94.
WANG Guoyun, LI Changjun, JIA Wenlong. Calculation and factor analysis of compressibility factor of CH_4-H_2 mixture based on GERG-2008 equation[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2022, 47(2): 89-94.

[18] 王建华,孟中能,施峰,等.热力耦合作用下气化炉顶板下沉规律与相关参数研究[J].煤炭学报,2023,48(增刊2):514-526.
WANG Jianhua, MENG Zhongneng, SHI Feng, et al. Subsidence law and related parameters of gasifier roof under thermal-mechanical coupling[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(S2): 514-526.

[19] 王霞,冯子军.热力耦合作用下长焰煤的热变形规律试验研究[J].煤炭工程,2021,53(6):135-139.
WANG Xia, FENG Zijun. Thermal deformation of long flame coal under thermo-mechanical coupling[J]. Coal Engineering, 2021, 53(6): 135-139.

[20] 李化敏,梁亚飞,陈江峰,等.神东矿区砂岩孔隙结构特征及与其物理力学性质的关系[J].河南理工大学学报(自然科学版),2018,37(4):9-16.
LI Huamin, LIANG Yafei, CHEN Jiangfeng, et al. Relationship between pore structural characteristics and physical-mechanical properties of sandstone in Shendong mining area[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2018, 37(4): 9-16.

(责任编辑:林桂玲)