



引文格式: 袁士豪, 孙强, 耿济世, 等. 鄂尔多斯盆地东北缘烧变岩工程地质效应[J]. 西北地质, 2025, 58(5): 192–203. DOI: 10.12401/j.nwg.2025075

Citation: YUAN Shihao, SUN Qiang, GENG Jishi, et al. Engineering Geological Effects of Burnt Rocks in the Northeastern Margin of Ordos Basin[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(5): 192–203. DOI: 10.12401/j.nwg.2025075

鄂尔多斯盆地东北缘烧变岩工程地质效应

袁士豪^{1,2}, 孙强^{1,3,*}, 耿济世¹, 王少飞^{2,4}, 胡鑫¹, 陈凯⁵

(1. 西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 自然资源部矿山地质灾害成灾机理与防控重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 陕西省煤炭绿色开发地质保障重点实验室, 陕西 西安 710054; 4. 陕西理工大学土木工程与建筑学院, 陕西 汉中 723001; 5. 新疆大学地质与矿业工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要: 烧变岩是由煤层自燃对周围岩体高温烘烤形成, 在中国西北地区(新疆、宁夏、陕西、甘肃、内蒙古等)煤田多有分布。笔者以鄂尔多斯盆地东北缘的烧变岩为研究对象, 通过野外地质调查与实测以及资料收集, 研究了神木、府谷、保德–河曲等黄河沿线等地及准格尔旗的烧变岩形成模式和工程地质效应。研究表明: 烧变岩可划分为烘烤岩、烘变岩、烧结岩、烧熔岩 4 种类型; 在煤层自燃高温烘烤后, 烧变岩的微观结构与矿物成分与原岩相比发生显著变化, 孔洞裂隙发育, 强度下降, 渗透性与导水性增强; 岩体结构由层状变为碎裂状, 岩体质量降低, 并成为矿区重要的地下水储存空间。岩体受煤层自燃影响, 承载力降低, 烧变岩上部烧空区使边坡产生卸荷作用, 在岩体内形成贯通节理面及软弱接触面, 在降雨、冻融及地表水入渗下诱发边坡失稳, 产生地质灾害; 烧变岩区地下水位较低致使地表植被稀疏, 生态脆弱。本次研究从形成机制方面和工程地质条件阐述了烧变岩诱发的工程地质和环境效应, 主要体现在烧变岩区边坡崩塌失稳、地面塌陷与地裂缝、矿井水害、植被退化等方面, 为烧变岩区工程活动和灾害防治提供了理论和实践参考。

关键词: 鄂尔多斯盆地东北缘; 烧变岩; 工程地质效应; 地质灾害

中图分类号: P642.2; TD323

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)05-0192-12

Engineering Geological Effects of Burnt Rocks in the Northeastern Margin of Ordos Basin

YUAN Shihao^{1,2}, SUN Qiang^{1,3,*}, GENG Jishi¹, WANG Shaofei^{2,4}, HU Xin¹, CHEN Kai⁵

(1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Mine Geological Hazards Mechanism and Control, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Geological Research Institute for Coal Green Mining, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. School of Civil Engineering and Architecture, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, Shaanxi, China; 5. College of Geology & Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China)

Abstract: Burnt rocks is formed by the spontaneous combustion of coal seams on the surrounding rock mass at

收稿日期: 2025-04-01; 修回日期: 2025-05-16; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 国家自然科学基金项目“富油煤富油性地质控制机理及原位开发地质基础”(42330808)资助。

作者简介: 袁士豪(1999–), 男, 博士研究生, 从事富油煤热解研究工作。E-mail: yuanshihao2414@163.com。

* 通讯作者: 孙强(1981–), 男, 教授, 博士生导师, 煤矿工程地质与灾害防治教学与研究。E-mail: sunqiang04@cumt.edu.cn。

high temperature, and is mostly distributed in coalfields in northwest China (Xinjiang, Ningxia, Shaanxi, Gansu, Inner Mongolia, etc.). In this paper, the formation mode and engineering geological effects of burnt rocks along the Yellow River and Junger Banner in Shenmu, Fugu, Baode-Hequ Yellow River and Junger Banner were studied through field geological survey, actual measurement and data collection. The results show that burnt rock can be divided into four types: baked rock, baked metamorphic rock, sintered rock and burnt lava. After baking at high temperatures from spontaneous combustion in the coal seams, compared with the original rock, the microstructure and mineralogical composition of the burnt rock have changed significantly, with the development of pores and cracks, decreased strength, and increased permeability and hydraulic conductivity. The structure of the burn rock changes from laminated to fractured, the rock mass decreases, and it becomes an important groundwater storage space in the mining area. Affected by spontaneous combustion of coal seam, the bearing capacity of rock mass decreases, and the burned-out zone above the burned rock produces the unloading effect of slope, forming through joint surface and weak contact surface in the rock mass, and inducing slope instability under rainfall, freeze-thaw and surface water infiltration, resulting in geological disasters. The low water table in the burnt rock area leads to sparse vegetation and fragile ecology. This study describes the engineering geological and environmental effects induced by burnt rocks from the aspects of formation mechanism and engineering geological conditions, which are mainly manifested in the aspects of slope failure and instability, ground subsidence and ground cracks, water damage in mines, and degradation of vegetation in burnt rock areas, and provides theoretical and practical references to engineering activities and disaster prevention and control in burnt rock areas.

Keywords: Northeast margin of Ordos Basin; burnt rock; engineering geological effect; geological disaster

烧变岩(Cmbustion Metamorphic, CM)是指煤层自燃时烘烤围岩,使其颜色、结构、构造、矿物成分、化学组成和物理力学性质发生变化形成的一类特殊岩石(黄雷, 2008; 陈彬, 2021),是煤层自燃的产物,在美国 Powder River 盆地、俄罗斯 Goose Lake Coal 盆地、Кузнецкий угольный бассейн盆地、印度尼西亚 Pulau Sumatra 岛、中国的鄂尔多斯盆地、塔里木盆地以及准噶尔盆地等地区广为分布(业渝光等, 1998; Heffern et al., 2004; Novikov et al., 2008; Eijk et al., 2009; Grapes et al., 2011; 黄雷等, 2014; 令伟伟, 2017)。

烧变岩经历高温之后岩体结构疏松,孔隙及孔洞发育且连通性好,有利于地下水的存储、运移,使其成为具有良好供水意义和生态价值的含水层(范立民, 2005; 王双明等, 2010, 2024),也是煤炭开采过程中渗漏、涌水和突水等水文地质灾害的载体,属于煤矿保水采煤的重要防护对象(范立民等, 2006; 孙云博等, 2019; 杨磊等, 2022)。烧变岩区还存在边坡变形失稳、地面沉降及塌陷、地下工程塌方和生态环境破坏等工程地质问题,影响采煤等工程的安全进行(田华等, 2018; 陈凯等, 2020)。此外,烧变岩能够作为建筑材料使用,其地貌单元形成的地质旅游景观也具有一定

的工程价值(杨时元等, 2008; 翟小伟等, 2010; 胡鑫等, 2023)。因此,有必要研究烧变岩的工程地质效应。

鄂尔多斯盆地东北缘煤层受印支期、燕山期和喜馬拉雅期等多期构造运动抬升、风化剥蚀和黄河及其支流侵蚀等作用出露于近地表并燃烧形成大片烧变岩区(黄雷等, 2008; 时潜等, 2017)。笔者基于分析鄂尔多斯盆地烧变岩结构特征,探讨烧变岩区不良地质作用,揭示烧变岩诱发滑坡、崩塌、地面沉降与塌陷等地质灾害机制,阐明烧变岩区生态环境破坏问题,总结烧变岩工程地质效应,以期对烧变岩区的工程建设、煤矿开采与采后复绿带建设提供指导。

1 地质概况

研究区位于鄂尔多斯盆地东北缘,处于陕西、内蒙和山西三省交界处,南为榆林市,北为东胜至准格尔旗沿线,西为东胜-伊金霍洛旗-榆林沿线,东至黄河东岸(图1)。鄂尔多斯盆地起源于中元古代(Khtar, 2017; 弓汶琪等, 2025),在地质历史上经历印支运动、燕山运动等多期构造运动的差异性抬升和不均匀剥蚀,形成如今东高西低的地理格局;研究所处构造单



图1 研究区位置图

Fig. 1 Study area location

元处于鄂尔多斯盆地伊盟隆起南部,陕北斜坡北部隆起带和晋西挠褶带西侧的三带交汇带处区(刘驰洋等, 2006; 赵振宇等, 2012; 邱海军等, 2016; 孙涛等, 2024; 冯旭亮等, 2025)。鄂尔多斯盆地地处陕北黄土高原,在第三纪起伏和缓的准平原基础上,历经第四纪以来多次黄土堆积和侵蚀作用,使得地形破碎,沟壑发育(铁连军等, 2015);研究区地形向东南延伸,总体地势北高南低,平均海拔为 1000~1500 m,主要地层由老到新主要包括石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、新近系、第四系(图 2)(Yuan et al., 2019)。研究区内地表水系主要是窟野河、秃尾河、清水川河、乌兰木伦河、县川河等,最终汇入黄河,其多年平均径流量均为 5~10 m³/s。含水层主要为第四系冲湖积层(萨拉乌苏组)孔隙含水层、第四系风积黄土层孔隙含水层、白垩系砂岩裂隙孔隙含水层和石炭系—侏罗系碎屑岩裂隙含水层(李云峰等, 2004)。

2 烧变岩分类与结构特征

国内学者普遍采用尚桂林等(1990)对烧变岩的分类方法。该方法基于烧变岩相对于原岩的结构变化特征,将烧变岩划分为 3 类:烘烤烧变岩、熔-烤过渡烧变岩和熔合烧变岩。侯恩科等(1993)根据烧变程度和颜色将烧变岩分为烘烤岩、烧结岩和类熔岩。笔者根据烧变岩结构与质量特征,将烧变岩分为烘烤岩、烘变岩、烧结岩、烧熔岩 4 类(图 3)。

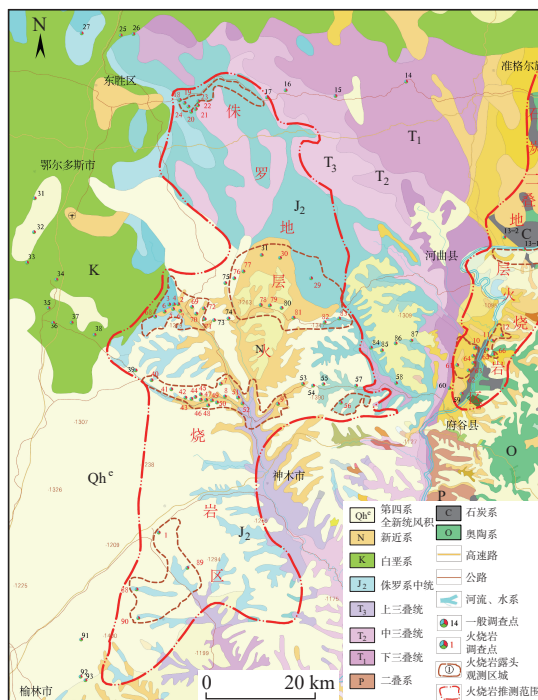


图2 地层分布与烧变岩分布范围示意图

Fig. 2 Schematic diagram of stratigraphic distribution and burnt rock distribution

(1) 烘烤岩以浅色系砖黄色、砖红色为主。距火源一般大于 5 m,岩石受到煤层燃烧影响的温度低于 300 °C,基本保持其原有沉积特征,岩石矿物成分变化率小于 10%,以层状为主,结构和层理没有明显变化。由于高温作用的影响,岩石中有机质部分挥发,导致重量损失,表面硬度略有增大(图 4b、图 4c)。

(2) 烘变岩位于烘烤岩下部,较烘烤岩色系较深,以砖红色、褐红色为主,顶板岩石受到煤层燃烧影响的温度为 300~1000 °C。岩体结构变化较大,发生塑变和变质作用,变质程度不一,大部分呈板状、层状,岩石矿物成分变化率 10%~60%(图 4d、图 4e)。原岩在高温下,部分黏土矿转化以及石英相变,孔洞、节理和裂隙极其发育且张开度较好,岩体极易风化碎块,为地下水的储存和运移提供良好的空间条件。

(3) 烧结岩位于断层面、烧空塌落区和节理裂隙面,为红色、黄色、褐色和黑色等杂色,烧空塌落堆积物和断层、断裂面角砾岩受到的温度高于 1000 °C。高温作用下原岩部分矿物熔化形成熔融基质,并与未烧结的岩石碎片粘结一起,原始结构发生严重破坏,以角砾状构造为主,孔洞、节理和裂隙极其发育,形状不规则,多被方解石填充(图 4f、图 4g)。

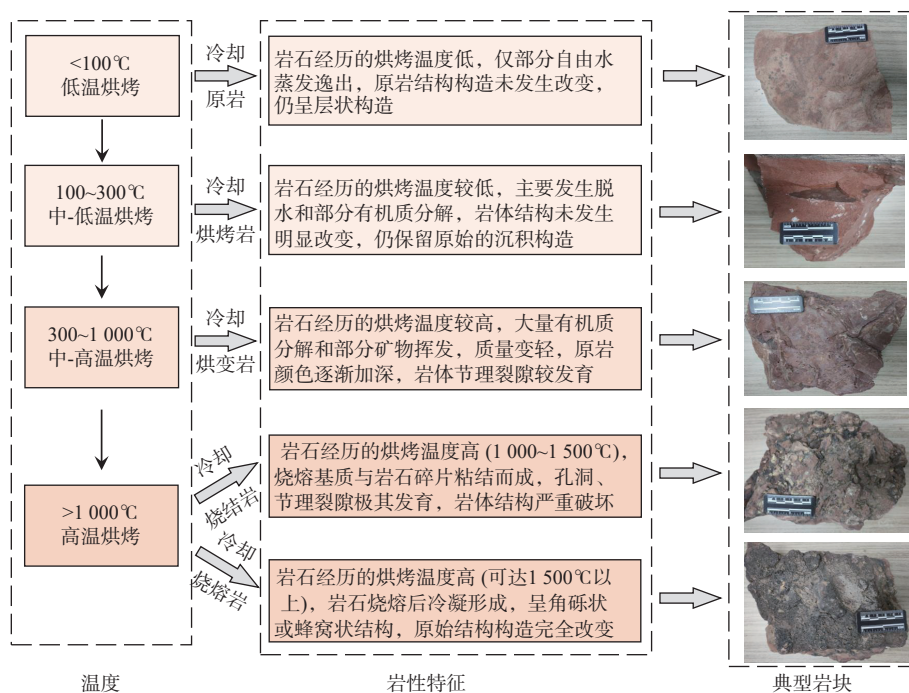


图3 烧变岩分类及其特征

Fig. 3 Classification and characteristics of burnt rock

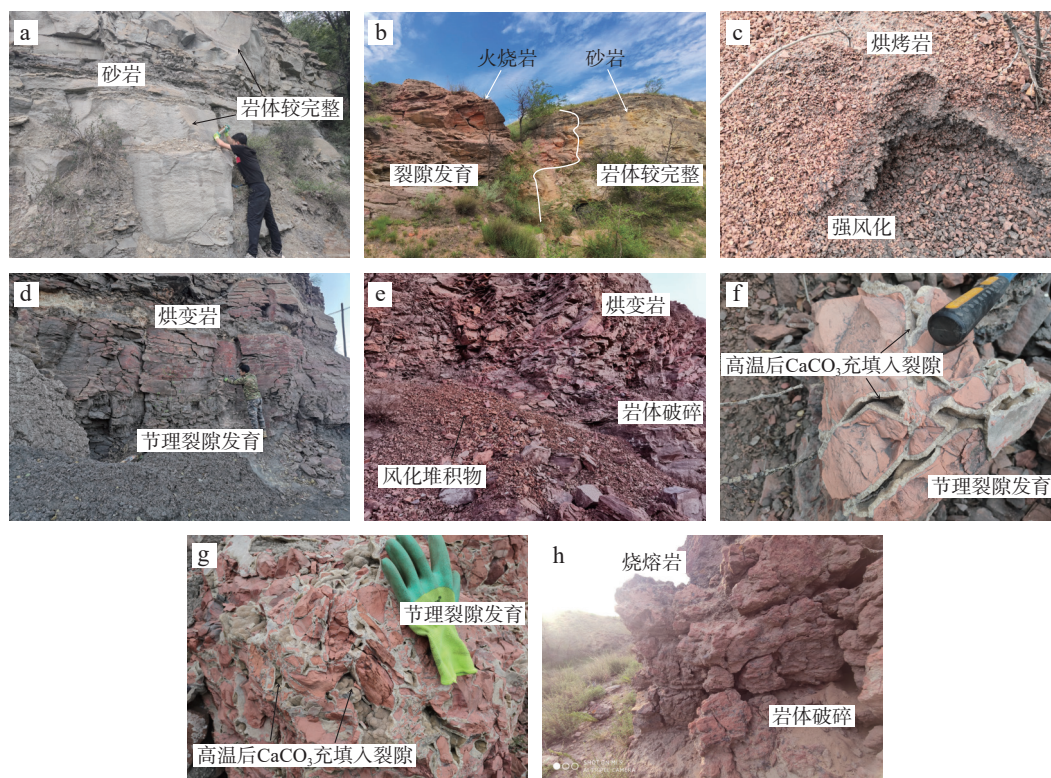


图4 野外出露烧变岩岩体

Fig. 4 Burnt rocks are exposed in the field

(4) 烧熔岩以深红色、黑红色为主。成岩位置靠近燃烧的煤层, 距火源近, 受热温度大于 1 000 °C, 局部可达到 1 500 °C, 导致大量原生矿物达到熔点, 岩石

几乎完全熔化呈流态或类岩浆态, 熔融状岩石随着温度下降逐渐冷凝形成烧熔岩, 外观类似岩浆喷出产物, 具有典型的气孔构造、流纹构造、杏仁构造, 表面粗

糙,质地坚硬(图 4h)。

3 烧变岩工程地质效应

在自然因素或人为影响下,地表或地下煤层发生自燃。煤层围岩受到煤火的长期烘烤,形成烧变岩。与原岩相比,烧变岩的矿物成分、晶体结构、元素含量发生改变,导致烧变岩结构疏松,节理裂隙发育。烧变岩区在地貌变化与风化剥蚀下易产生地表变形、斜坡失稳、矿井水害与生态退化等工程地质问题。同时,伴随着地质运动与人类开采活动的影响,烧边岩区周围的工程地质条件也会受到影响(图 5、图 6)。烧空区上覆岩层的破坏垮塌诱发地表裂缝、地面沉降

与塌陷,导致滑坡、悬崖和丘陵等新地貌的产生。烧变岩中裂隙和孔洞发育,孔裂隙连通性强、岩层储水空间大,极易引起矿井水害问题。

3.1 滑坡

瓷窑塔滑坡(图 7)位于神木市店塔镇瓷窑塔村(E 110.26457, N 39.044243),为烧变岩滑坡,岩层近水平。滑坡相对高差约为 6 m,纵向长约 8 m,横向宽约为 17 m,滑体厚为 0.5~3 m,浅层滑动,体积约为 272 m³,小型滑坡,主滑方向为 350°。滑体物质主要为碎石,母岩为烧变岩,粒径多为 3~10 cm,充填物为沙黄土,滑坡区呈直线型陡坡,地形起伏小,坡角约为 57°,滑坡后缘无明显拉张裂缝,两翼剪切裂缝不明显。

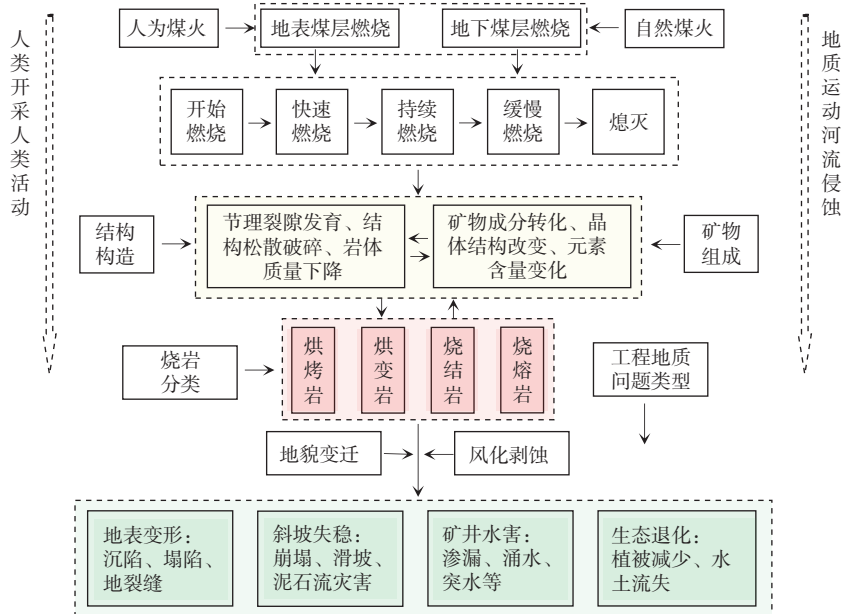


图5 烧变岩形成机制与地质环境效应

Fig. 5 Formation mechanism and geological environment effect of burnt rocks

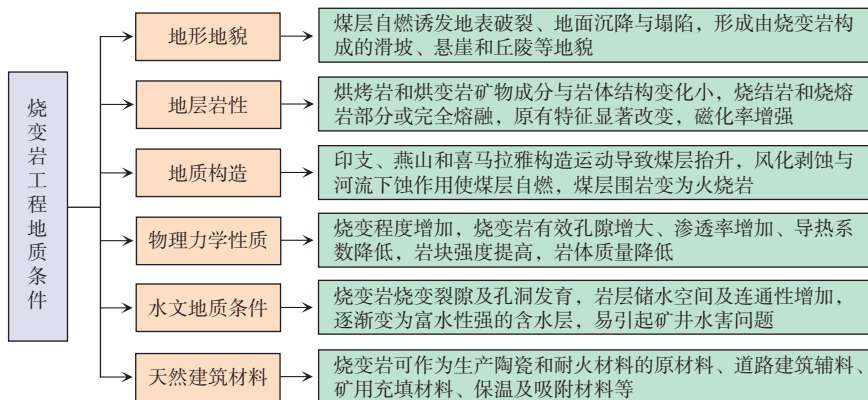


图6 烧变岩的工程地质条件

Fig. 6 Engineering geological condition of burnt rocks

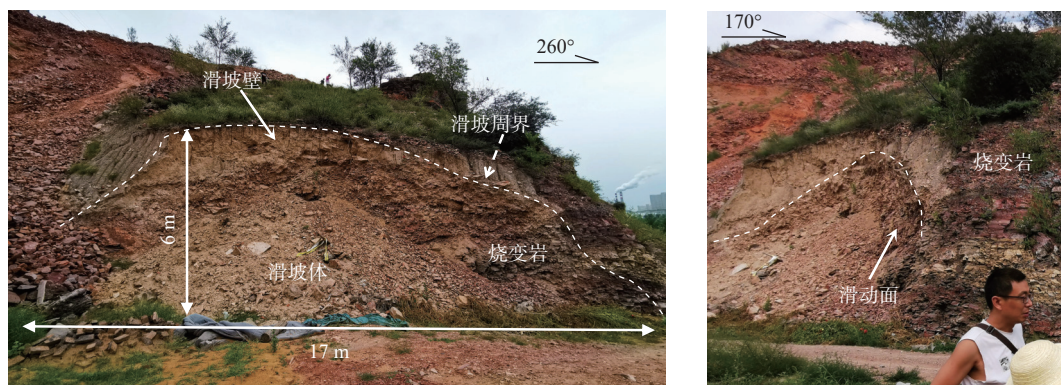


图7 瓷窑塔滑坡

Fig. 7 Ciyaota landslide

滑坡机理分析: 烧变岩受煤层自燃影响后, 节理裂隙在横向和纵向上扩张, 岩体破碎且质量降低, 内部形成软弱接触面。开挖使坡脚应力集中, 抗滑力减小, 在强降雨、冻融及地表水入渗的条件下极易诱发坡体失稳, 形成滑坡(图 8)。采用 PFC 对烧变岩形成

过程中滑坡的产生条件进行离散元数值模拟。较缓坡体处(图 9a), 煤层初始燃烧阶段, 坡脚处发育 85 条节理裂隙(图 9b), 随着煤层燃烧面积扩大, 上部岩体节理裂隙增加至 582 条, 局部发育成裂缝(图 9c), 最终节理裂隙发育至 1 073 条, 局部贯通, 为滑动带的形

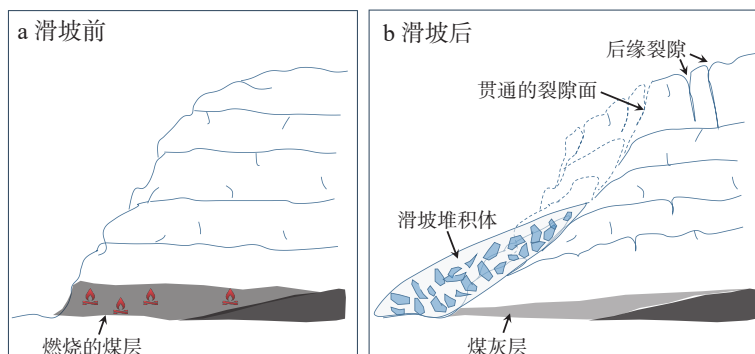


图8 烧变岩诱发滑坡机理示意图

Fig. 8 Schematic diagram of landslide induced by burnt rocks

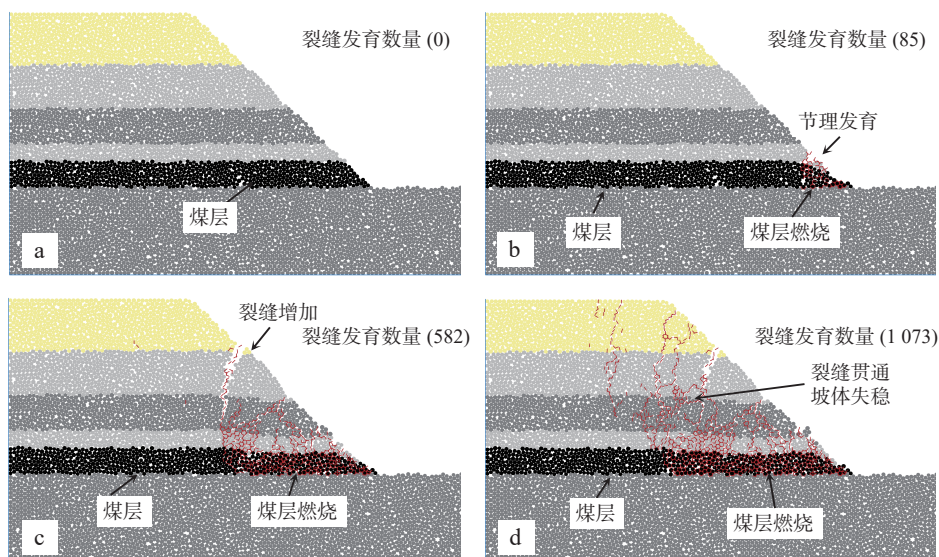


Fig. 9 Numerical simulation of landslide induced by burnt rocks

成奠定基础(图 9d)。

3.2 崩塌

(1)巴楞崩崩塌(图 10a)位于神木市店塔镇巴楞村(E 110.315017, N 39.047537),坡度为 70°。岩性为侏罗系砂岩和烧变岩,上覆薄层沙黄土。崩塌高约为 3 m,总长约为 10 m,崩积物体积约为 180 m³,小型崩塌,崩积物主要为烧变岩,粒径为 5~20 cm。附近原岩地层岩体较完整,上部烧变岩由砂岩高温形成,垂直节理发育,岩体破碎,完整性差,强度低。

(2)浪湾危岩体(图 10b)位于府谷县府谷镇柏林店村(E 111.168305, N 39.150841),岩体近水平,危岩体与母岩拉张裂缝最大达到 30 cm,最大向下滑移约为 40 cm,危岩体长约为 2.4 m,高约为 2.1 m,厚约为 0.6~1.1 m,体积约为 5 m³。岩体垂直节理发育,坡

脚处存在崩积物。浪湾危岩体局部出现破碎岩体,完整性较差,危岩体变形破坏模式主要是滑移-拉裂式。

(3)李家畔崩塌(图 10c)属神木市大柳塔镇李家畔村(E 110.17657, N 39.271277),坡度近 90°,岩体近水平,危岩体与母岩拉张裂缝为 40~60 cm,最大向下滑移约为 40 cm,危岩体长约为 5 m,高约为 11 m,厚约为 1.5 m,体积约为 83 m³。该段岩体节理裂隙发育,裂缝内部可见烧熔岩。该段边稳定性较好,中-厚层状结构,宽度约为 0.1~0.4 cm。该危岩体煤层正发生燃烧,上部岩体受高温烘烤,岩体破碎,出现多处贯通裂隙,该危岩体变形破坏模式主要是滑移-拉裂式。

崩塌机理分析:鄂尔多斯盆地东北缘地层岩体完整程度较好,整体稳定。而烧空区裂缝发展成危岩体,水平岩层垂直节理发育,危岩体底部局部崩落,崩落区域向边坡后方扩展岩体破碎,质量较差,易风化发生蠕变,形成悬挂式危岩体,受到降雨等外力因素后,产生小型滑移式崩塌。若危岩体底部烧变岩为中-厚层状,危岩体在垂直方向的节理裂隙中产生水压,或者在充填物的水平方向的推力作用之下,卸荷产生的节理裂隙会继续向深部发展,在垂直方向形成类似于“柱状节理”的贯通面,危岩体由单独小型岩块发展成为多个大型岩块,并逐渐地向外倾斜,局部伴有鼓胀现象,在降雨或地震等外力作用下形成危险性更高的倾倒式崩塌(图 11)。

采用 PFC 软件对烧变岩区岩质高陡边坡节理裂隙贯通、危岩体形成及崩塌的产生进行离散元模拟。烧变岩初始边坡岩层倾角近水平,坡体较稳定,节理裂隙不发育(图 12a);煤层燃烧使坡体上部岩层节理裂隙发育(286 条),裂缝增加,并且与地面产生贯通节理面(图 12b);随着燃烧面向内部煤层推进,形成烧空区,上部岩体节理裂隙增加至 400 条,使岩体结构发育为碎裂结构,斜坡类型发育成碎块体斜坡(图 12c);烧空区面积的扩大,节理裂隙发育至 509 条,岩体下部支撑力减少,危岩体形成,坡体失(图 12d)。

3.3 地裂缝

(1)活鸡兔沟地裂缝(图 13a)分布在活鸡兔井田西北角露天开采区,属神木市大柳塔镇(E 110.144815, N 39.264901)。煤层厚约为 6 m,产状近水平,埋深为 20~35 m,地表出露岩性主要为侏罗系砂岩。地裂缝为台阶状,台阶落差一般约为 1 cm。主要为南北走向,裂缝连续长度可达 300 m,最宽处约为 60 cm,伴有地面塌陷和沉降。

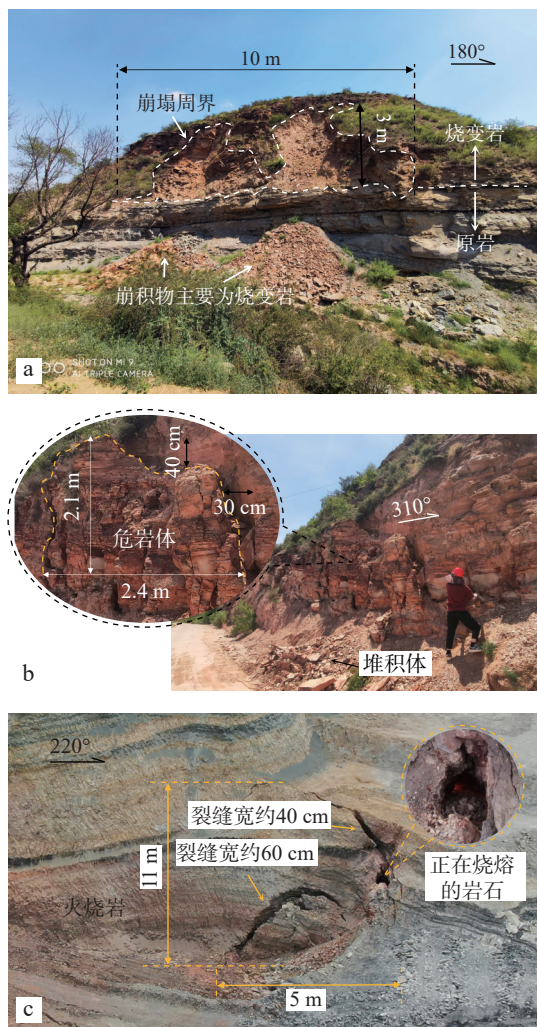


图 10 巴楞崩崩塌(a)、浪湾崩塌(b)、李家畔崩塌(c)

Fig. 10 (a) Balunmao collapse, (b) the collapse of Long Bay, and (c) the collapse of the Li family bank

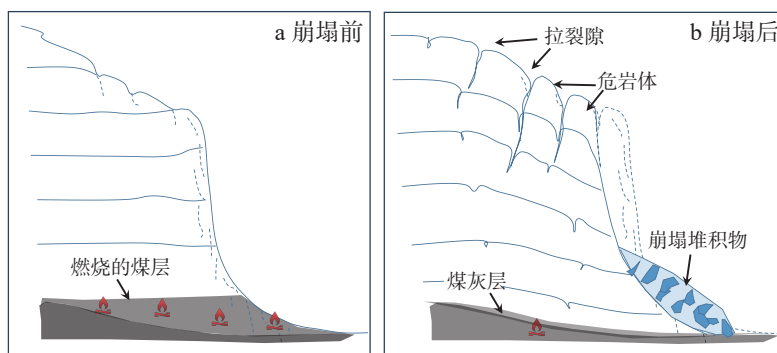


图11 烧变岩诱发崩塌机理图

Fig. 11 Diagram of mechanism of collapse induced by burnt rocks

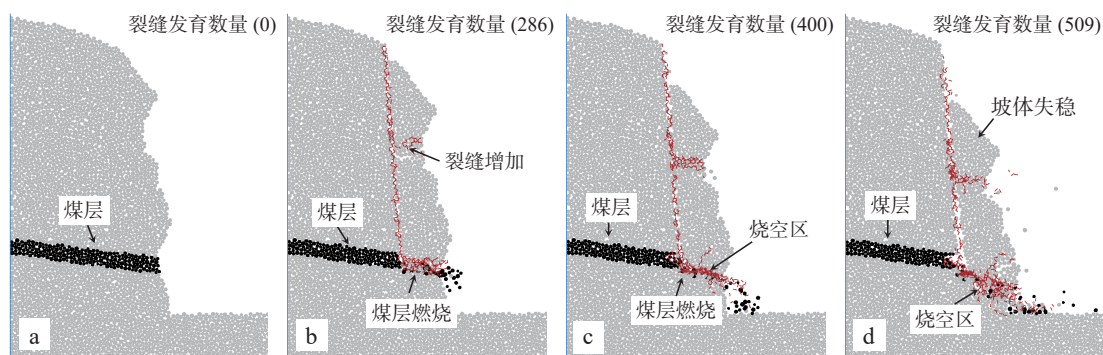


图12 烧变岩诱发崩塌数值模拟

Fig. 12 Numerical simulation of induced collapse of burnt rocks

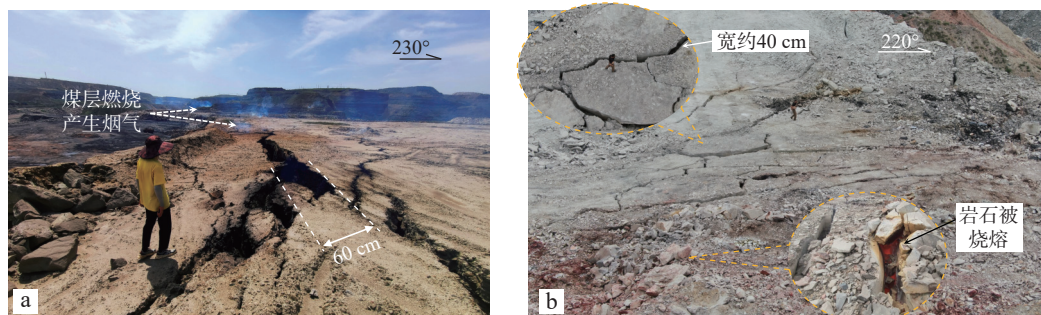


图13 活鸡兔井田地裂缝(a)、李家畔地裂缝(b)

Fig. 13 (a) ground cracks in well field of Huojitai, and (b) ground cracks of Li Jiaban

(2) 李家畔地裂缝(图 13b)位于活鸡兔井田中部, 属神木市大柳塔镇(E 110.17657, N 39.271277)。地层产状近水平, 岩性为侏罗系砂岩和烧变岩。地裂缝落差一般小于 1 cm。地裂缝走向为近 EW 向, 裂缝连续长度可达 100 m, 最宽处约为 40 cm, 局部地段伴有塌陷和沉降。

地裂缝机理分析: 煤层燃烧形成烧空区, 原有应力平衡破坏, 重分配的应力集中于烧变岩。而烧变岩岩体结构碎裂, 岩体质量较差, 在自重和上覆岩土体压力的作用下向烧空区垮落沉降。塌陷区工程地质

条件存在差异, 地面发生不均匀移动与变形, 地表形成沉降盆地, 并在采空区上方形成倾斜、弯曲和水平拉伸或压缩, 使得地表向盆地中倾斜。当下沉产生的拉应力超过地表岩土体的抗拉强度时, 沉降塌陷边缘处出现拉应力, 中间部位出现压应力, 最大拉应力处形成张性地裂缝。当弯曲应力超过烧变岩体自身强度极限时, 地裂缝进一步发展形成断裂, 开裂宽度和延伸长度均较大, 裂缝呈现拉裂状, 形成地面塌陷。地面裂缝处进入空气, 加剧地下煤层燃烧, 高温使上部岩体膨胀不均匀, 进一步扩大地裂缝(图 14)。

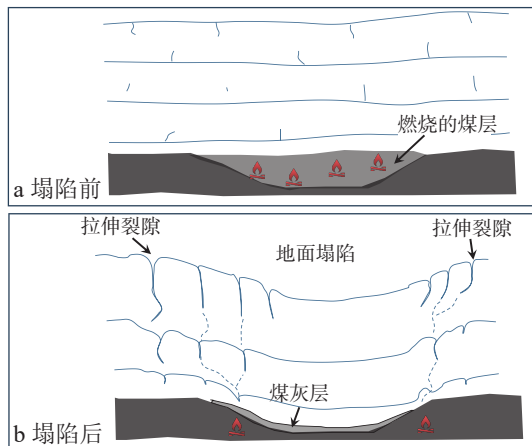


图14 烧变岩诱发地裂缝机理图

Fig. 14 Mechanism diagram of ground fractures induced by burnt rocks

3.4 烧变岩区矿井水害

烧变岩上覆渗透性强的第四系风积沙土,易接受大气降水补给,成为矿井水害水源。据文献和野外调查(孙亚军等, 2017; 翟勤等, 2017; 郭守泉等, 2018; 苗彦平等, 2019; 宋业杰等, 2019; 王碧清等, 2019), 榆阳区-神木-东胜烧变岩区的水害问题尤为突出, 矿井水害频发超 30 余起, 主要分布于店塔镇、榆阳区和大柳塔矿区(图 15)。该区烧变岩结构破碎, 具有气孔、角

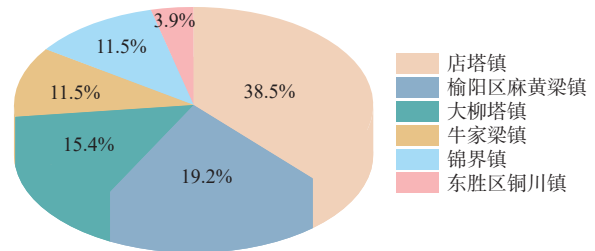


图15 研究区矿井水害分布

Fig. 15 Distribution of mine water damage in the study area
砾状、垮塌构造, 透水性强。烧变岩层发育网状裂隙, 地下水类型为萨拉乌苏组地下水, 富水性好, 水化学多为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ 型, 矿化度 0.5 g/L 以下, pH 值为 7.2~7.8, 渗透系数一般大于 100 m/d。含水层厚度一般为 3~5 m, 单孔涌水量一般为 500~1 000 m^3/d 。烧变岩中裂隙气孔发育, 表面粗糙, 吸水率大, 在温差较大、冻融交替的大气环境和地下水的作用下, 岩体易崩解剥落。矿区内主要水害为涌水、突水, 挡水工程易产生渗漏, 地下工程易塌方。

3.5 烧变岩区生态环境

烧变岩区诱发的地质灾害和地裂缝破坏地表生态(图 16a)。烧变岩孔隙发育导致地下水位下降或形成漏斗面至地下水储存资源枯竭引起植被退化, 烧变岩区的泉水干涸、河流断流, 土壤结构松散, 对植物生

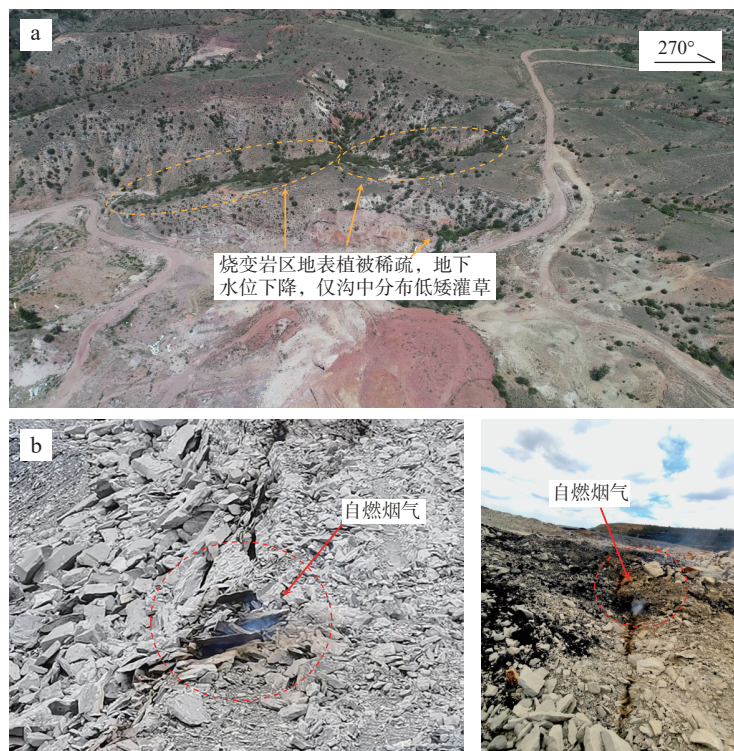


图16 烧变岩区植被分布(a)与煤层燃烧释放烟气(b)

Fig. 16 (a) Vegetation distribution in burnt rock area, and (b) Flue gas release from coal seam combustion

长极为不利。而非烧变岩区的植被生态较好。河谷地带地下水位埋深为0.5~7 m,水位埋藏浅,水分充足,植被生态的生长以柳树、杨树等乔木为主;黄土梁、崩地表为粉质黏土,下伏延安组砂岩,地下水位埋深15~30 m,水位埋深大,植被生态存在零散矮小的乔木和沙蒿、沙打旺和蒿草等耐旱的灌草。目前烧变岩区存在煤层燃烧现象(图16b),煤层在燃烧过程中释放出大量烟气。烧变岩中大量发育的孔隙、裂隙和孔洞是有毒气体的储存空间,在压力释放条件下,这些有毒气体逸出,污染环境,危害人类工程活动(范立民,2010)。

4 结论

(1) 烘烤岩区、烘变岩区、烧结岩区、烧熔岩区,烧变岩岩体节理裂隙发育逐渐增强,岩体结构从层状变成碎裂状,破碎程度提高,岩体质量降低。

(2) 研究区内烧变岩岩体质量较差,烧空区上部岩体失去支撑,在岩体内形成贯通节理面、软弱接触面等,在强降雨、冻融及地表水入渗的条件下诱发边坡失稳,产生滑坡、崩塌、地面沉降与塌陷。

(3) 研究区烧变岩上覆主要为第四系风积沙土,渗透性好,接受大气降水补给,易成为矿井水害水源,诱发矿井水害。烧变岩区地下水位降低和地下水储存资源枯竭,植被稀少,表明烧变岩区生态环境脆弱。且研究区内部分烧变岩区存在正燃烧煤层,产生有毒气体,污染环境。

参考文献(References):

- 陈彬. 中国西北地区侏罗系中烧变岩的特征,形成时代及地质意义[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.
- CHEN Bin. Characteristics, ages and geological significance of the Jurassic combustion metamorphic rocks in northwestern China[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021.
- 陈凯, 王文科, 商跃瀚, 等. 生态脆弱矿区烧变岩研究现状及展望[J]. 中国矿业, 2020, 29(3): 171-176.
- CHEN Kai, WANG Wenke, SHANG Yuehan, et al. Study status and outlook on burnt rock in the ecologically vulnerable coal-mining areas[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(3): 171-176.
- 范立民. 论保水采煤问题[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(5): 50-53.
- FAN Limin. Discussing on coal mining under water-containing condition[J]. Coal Geology & Exploration, 2005, 33(5): 50-53.
- 范立民. 生态脆弱区烧变岩研究现状及方向[J]. 西北地质, 2010, 43(3): 57-65.
- FAN Limin. Research Status and Research Directions of Burnt Rocks in Vulnerable Ecological Region[J]. Northwestern Geology, 2010, 43(3): 57-65.
- 郭守泉, 宋业杰. 榆神矿区浅埋煤层多重水体下大采高综采水害影响评价[J]. 煤矿开采, 2018, 23(6): 117-121.
- GUO Shouquan, SONG Yejie. Evaluation of Water Disaster Influence of Fully Mechanized Mining with Multiply Water Body in Shallow of Yushen Mine Area[J]. Coal Mining and Technology, 2018, 23(6): 117-121.
- 冯旭亮, 汪啸东, 罗姣, 等. 鄂尔多斯盆地地热和氦气资源远景: 来自居里面深度的证据[J]. 西北地质, 2025, 58(3): 22-32.
- FENG Xuliang, WANG Xiaodong, LUO Jiao, et al. Geothermal and Helium Resource Prospects in the Ordos Basin: Insight from the Curie Point Depths[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(3): 22-32.
- 弓汶琪, 弓虎军, 王苏里, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组中期物源分析及其对秦岭造山带隆升作用的指示[J]. 西北地质, 2025, 58(1): 118-134.
- GONG Wenqi, GONG Hujun, WANG Suli, et al. Provenance Analysis of Middle Yanchang Formation in the Southeastern Ordos Basin and Its Indications for the Uplift of the Qinling Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(1): 118-134.
- 胡鑫, 孙强, 晏长根, 等. 陕北烧变岩水-岩作用的劣化特性[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(4): 76-84.
- HU Xin, SUN Qiang, YAN Changgen, et al. Deterioration characteristics of water-rock interaction on combustion metamorphic rocks in northern Shaanxi[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(4): 76-84.
- 侯恩科, 陈培亨. 神府煤田煤层自燃研究[J]. 西安科技大学学报, 1993, (2): 137-142.
- HOU Enke CHEN Peiheng. Study on spontaneous combustion of coal seams in shenfu coal field[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 1993, (2): 137-142.
- 黄雷, 刘池洋. 鄂尔多斯盆地北部地区延安组煤层自燃烧变产物及其特征[J]. 地质学报, 2014, 88(9): 1753-1761.
- HUANG Lei, LIU Chiyang. Products of combustion of the Yan'an formation coal seam and their characteristics in the Northeastern Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(9): 1753-1761.
- 黄雷, 刘池洋. 烧变岩岩石学及稀土元素地球化学特征[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2008, 33(4): 515-522.
- HUANG Lei, LIU Chiyang. Petrologic and REE Geochemical Characters of Burnt Rocks[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2008, 33(4): 515-522.
- 黄雷. 鄂尔多斯盆地北部延安组烧变岩特征及其形成环境[D]. 西安: 西北大学, 2008.
- HUANG Lei. Characters and forming conditions of burnt rocks in

- Yan'an formation of Northern Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2008.
- 李云峰, 李金荣, 侯光才, 等. 从水文地球化学角度研究鄂尔多斯盆地南区白垩系地下水的排泄途径[J]. *西北地质*, 2004, 37(3): 91-95.
- LI Yunfeng, LI Jinrong, HOU Guangcai, et al. Study on Cretaceous groundwater discharge in the southern parts of ordos basin as viewed from hydrogeochemistry[J]. *Northwestern geology*, 2004, 37(3): 91-95.
- 令伟伟. 准噶尔盆地东部火烧山地区平地泉组方沸石特征及成因分析[D]. 西安: 西北大学, 2017.
- LING Weiwei. Occurrence and origin analysis of analcime in pingdi-quan formation, Huoshaoshan Area, Eastern Jungar Basin, Xinjiang, China[D]. Xi'an: Northwest University, 2017.
- 刘池洋, 赵红格, 桂小军, 等. 鄂尔多斯盆地演化-改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J]. *地质学报*, 2006, 80(5): 617-638.
- LIU Chiyang, ZHAO Hongge, GUI Xiaojun, et al. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(5): 617-638.
- 苗彦平, 姬中奎, 李军, 等. 待采工作面上覆烧变岩注浆帷幕建造技术[J]. *煤矿安全*, 2019, 50(7): 108-111.
- MIAO Yanping, JI Zhongkui, LI Jun, et al. Construction Technology of Grouting Curtain for Overburden Burnt Rock in Waiting Mining Face[J]. *Safety in Coal Mines*, 2019, 50(7): 108-111.
- 邱海军, 崔鹏, 胡胜, 等. 陕北黄土高原不同地貌类型区黄土滑坡频率分布[J]. *地球科学*, 2016, 41(2): 343-350.
- QIU Haijun, CUI Peng, HU Sheng, et al. Size-Frequency Distribution of Landslides in Different Landforms on the Loess Plateau of Northern Shaanxi[J]. *Earth Science*, 2016, 41(2): 343-350.
- 尚桂林, 蒋新民. 神木北部侏罗纪煤层自然因素及其烧变特征[J]. *中国煤炭地质*, 1990, 2(1): 25-29.
- 时潜, 陈彬. 中国北方煤层自然产物——烧变岩的研究意义[J]. *科技创新导报*, 2017, 14(32): 58-60.
- 宋业杰, 甘志超. 榆神矿区烧变岩水害防治技术[J]. *煤矿安全*, 2019, 50(8): 92-96.
- SONG Yejie, GAN Zhichao. Water Hazard Treatment for Burnt Rock Aquifer in Yushen Mining Area[J]. *Safety in Coal Mines*, 2019, 50(8): 92-96.
- 孙亚军, 张梦飞, 高尚, 等. 典型高强度开采矿区保水采煤关键技术与实践[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(1): 56-65.
- SUN Yajun, ZHANG Mengfei, GAO Shang, et al. Water-preserved mining technology and practice in typical high intensity mining area of China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(1): 56-65.
- 孙云博, 孙文植, 焦振华. 陕北烧变岩的工程地质特征[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2019, 41(S1): 71-73.
- SUN Yunbo, SUN Wenzhi, JIAO Zhenhua. Engineering Geological Characteristics of Burnt Rock in Northern Shanxi[J]. *Journal of China Three Gorges University*, 2019, 41(S1): 71-73.
- 孙涛, 雷晶超, 刘阳, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘镇原地区洛河组沉积环境对铀成矿的制约[J]. *西北地质*, 2024, 57(6): 199-217.
- SUN Tao, LEI Jingchao, LIU Yang, et al. The Constraints of the Depositional Environment of the Luohe Formation on Uranium Mineralization in the Zhenyuan Area of the Southwestern Ordos Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(6): 199-217.
- 田华, 李新鹏, 韩流, 等. 黑山露天矿浅部火烧区边坡稳定性研究[J]. *煤矿安全*, 2019, 113(3): 191-210.
- TIAN Hua, LI Xinpeng, HAN Liu, et al. Study on Slope Stability of Shallow Buried Area in Heishan Surface Mine[J]. *Safety in Coal Mines*, 2019, 113(3): 191-210.
- 铁连军, 李恒娟, 李旭日, 等. 试论鄂尔多斯盆地地层划分与对比[J]. *石化技术*, 2015, 22(3): 115.
- TIE Lianjun, LI Hengjuan, LI Xuri, et al. Stratigraphic division and comparison in the Ordos Basin[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2015, 22(3): 115.
- 王碧清, 姬中奎, 郑永飞, 等. 火烧区完整烧变岩断面的帷幕注浆技术[J]. *煤炭技术*, 2019, 38(4): 99-102.
- WANG Biqing, JI Zhongkui, ZHENG Yongfei, et al. Curtain Grouting Technology for Complete Burnt Rock Section in Burnt Rock Area[J]. *Coal Technology*, 2019, 38(4): 99-102.
- 王双明, 黄庆享, 范立民, 等. 生态脆弱矿区含(隔)水层特征及保水开采分区研究[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(1): 7-14.
- WANG Shuangming, HUANG Qingxiang, FAN Linong, et al. Study on overburden aquiclude and water protection mining regionalization in the ecological fragile mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(1): 7-14.
- 王双明, 孙强, 袁士豪, 等. 论煤-水-土多资源协调开发[J]. *西北地质*, 2024, 57(5): 1-10.
- WANG Shuangming, SUN Qiang, YUAN Shihao, et al. On the coordinated development of coal-water-soil multiple resources[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(5): 1-10.
- 杨磊, 杨斯亮, 车晓阳. 红柳林井田烧变岩富水性分区与水害防治措施[J]. *中国煤炭地质*, 2022, 34(2): 43-47+70.
- YANG Lei, YANG Siliang, CHE Xiaoyang. Burnt rocks water yield property zoning and water hazard control measures in Hongliulin Minefield[J]. *Coal Geology of China*, 2022, 34(2): 43-47+70.
- 杨时元, 许绍群, 杨芳洁. 新疆烧变岩开发天然轻集料初探[J]. *砖瓦世界*, 2008, (10): 41-42.
- 业渝光, 郭象隆, 刁少波, 等. 塔里木盆地库车河烧变岩的形成年龄[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1998, 18(4): 116-120.
- YE Yuguang, WU Xianglong, DIAO Shaobo, et al. Formation ages of burned metamorphic rocks from the Kuqa River Section Tarim Basin[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1998,

- 18(4): 116–120.
- 赵振宇, 郭彦如, 王艳, 等. 鄂尔多斯盆地构造演化及古地理特征研究进展[J]. *特种油气藏*, 2012, 19(5): 15–20+151.
- ZHAO Zhenyu, GUO Yanru, WANG Yan, et al. Study progress in tectonic evolution and paleogeography of Ordos Basin[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2012, 19(5): 15–20+151.
- 翟勤, 王英, 姬亚东. 何家塔井田烧变岩水赋存特征及其防治[J]. *煤炭技术*, 2017, 36(12): 156–158.
- ZHAI Qin, WANG Ying, JI Yadong. Hejiata Coal Burnt Rock Water Occurrence Characteristics and Prevention[J]. *Coal Technology*, 2017, 36(12): 156–158.
- 翟小伟, 张辛亥, 王亚超. 古拉本煤田火灾烧变岩固体废料充填新技术研究与应用[J]. *矿业安全与环保*, 2010, 37(1): 27–29.
- Eijk P V, Leenman P, Wibisono I, et al. Regeneration and restoration of degraded peat swamp forest in Berbak NP, Jambi, Sumatra, Indonesia[J]. *Malayan Nature Journal*, 2009, 61(3): 223–241.
- Grapes R, Korzhova S, Sokol E, et al. Paragenesis of unusual Fe-cordierite (sekaninaite)-bearing paralava and clinker from the Kuznetsk coal basin, Siberia, Russia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2011, 162: 253–273.
- Heffern E L, Coates D A. Geologic history of natural coal-bed fires, Powder River Basin, USA[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2004, 59: 25–47.
- Khtar S, Yang X, Pirajno F. Sandstone type uranium deposits in the ordos Basin, northwest China: A case study and an overview [J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2017, 146: 367–382.
- Novikov I S, Sokol E V, Travin A V, et al. Signature of Cenozoic orogenic movements in combustion metamorphic rocks: mineralogy and geochronology (example of the Salair-Kuznetsk Basin transition)[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2008, 49(6): 378–396.
- Yuan Yong, Liu Zhiheng, Zhu Cheng, et al. The effect of burnt rock on inclined shaft in shallow coal seam and its control technology[J]. *Energy Science and Engineering*, 2019, 7(5): 1882–1895.