

地下水活动对采空区覆岩移动影响机理分析

王云广^a, 张子月^b

(河南理工大学 a. 能源科学与工程学院; b. 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 目前在采煤覆岩移动研究方面较少考虑地下水活动的影响, 但地下水流失也能引发显著的覆岩移动, 且两者在某些区域可共同存在。通过分析采空区覆岩移动的基本形式及含水覆岩层内水通过裂隙时对覆岩的作用等, 阐述了地下水活动对采空区覆岩移动的影响机理, 认为一定条件下含水覆岩层内的水活动对采空区覆岩移动具有“帮助”作用, 在其长时间作用下可引发更大范围、更大程度的覆岩移动变形或局部突发性塌陷。

关键词: 地下水; 采空区; 覆岩; 移动变形; 影响机理; 分析

中图分类号: P641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)04-0742-05

Impact mechanism of groundwater flow on overlying strata movement in the goaf

WANG Yun guang^a, ZHANG Zi yue^b

(a. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

b. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The current research on the overlying strata movement in the coal mine goaf rarely considers the influence of groundwater flow; however, groundwater loss can result in strata movement and both factors occur simultaneously in some area. In this paper, the basic form of overlying strata movement and the effects of groundwater flow in the water-bearing stratum passing through the fracture on the strata were analyzed, and the impact mechanism of groundwater flow on the overlying strata movement in the goaf was discussed. The findings suggested that groundwater flow can “help” the overlying strata movement under certain conditions, and long time groundwater flow can cause the overlying strata movement with larger area and degree and lead to locally sudden collapse.

Key words: groundwater; goaf; overlying strata; movement and deformation; impact mechanism; analysis

地面沉降是国内外都十分关注的复杂的环境地质问题, 具有易发性、累进性、不可逆等特点^[1]。全国地面沉降防治规划(2011年-2020年)^[2]显示我国地下水超采形势严峻, 涉及地域广、影响人口多, 目前我国因地下水超采造成地面沉降灾害的城市超过50个, 分布于北京、天津、河北、山西、河南等20个省(区、市), 累计沉降量超过200 mm的总面积超过7.9万 km²。地面沉降造成建(构)筑物地基下沉、房屋开裂、地下管道破碎、井管抬升、洪涝及风暴潮灾害加剧等一系列问题, 给国民经济造成巨大的损失, 已成为影响我国区域经济社会持续发展的重要因素之一。

地下水的流失(超采)引发的水位下降可引发地表大范围沉降。在煤矿开采区, 因地下煤层开采发生地质灾害的主要表现特征为地表的不均匀下沉对各类建(构)筑物的破坏甚至损毁; 同时, 在井工采煤过程中, 上覆岩层及冲积层

中地下水位的下降对地表最终的下沉状态有不可忽视的影响^[3]。在矿区, 既有煤炭开采留下的大量采空区域, 也存在地下水的严重流失, 因此在煤炭开采过程中, 具备引发地表沉降的双重地质因素, 但在目前的开采沉陷研究中, 往往仅从煤炭开采引发的地表沉陷单一视角进行研究, 而忽视了, 特别是从长时间看由采矿活动引发地下水流失带来的地表沉降, 这显然是不严谨、不全面的, 特别是在一些地下水补给充足、水量丰富、渗流活跃及特殊地层(富水松散层、透水性强的卵砾石覆岩层等)条件下, 地下水活动造成的地表沉降及危害是无法人为忽视的。关于此类区域的地表沉陷及覆岩移动, 就需要在具体的开采沉陷研究过程中, 将地下水作为开采沉陷的重要影响因素加以考虑并综合研究。然而, 现阶段真正将地下水活动状况作为影响因素进行考虑的研究并不多, 所取得研究成果更为有限^[4-6]。对地下水渗

收稿日期: 2014-11-03 修回日期: 2015-04-30 网络出版时间: 2015-07-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150723.1122.006.html>

基金项目: 河南理工大学创新型科研团队(T 2013-1)

作者简介: 王云广(1981)男, 河南延津人, 博士研究生, 主要从事煤矿开采损害与保护及“三下”采煤技术研究。E-mail: mwang110@126.com

流给覆岩移动的作用机理、影响程度等重要内容的认识尚不深入,因此开展地下水活动对采场岩层移动的影响机理及因素研究,对丰富开采沉陷的规律性认识、提高开采沉陷预计精度、指导工程实践、保障人员及设施安全、服务社会经济发展具有重要的现实意义。

1 采空区覆岩移动基本过程

地下煤层开采后在岩体内部形成采空区,其周围岩体应力平衡状态受到破坏引起应力重新分布,从而使岩体产生移动、变形和破坏,直至达到新的平衡;采空区直接顶板岩层在自重应力及上覆岩层重力的作用下,产生向下的移动和弯曲;当其内部应力超过岩层的应力强度时,直接顶板首先断裂、破碎,相继垮落,而老顶岩层则以梁、板的形式沿层面法向方向移动、弯曲,进而产生断裂、离层;当开采范围足够大时,岩层移动发展到地表,在地表形成一个比采空区范围大得多的下沉盆地^[7],覆岩移动的基本形态如图 1^[7]所示。

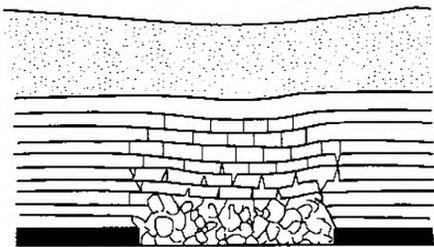


图 1 采空区覆岩移动破坏基本形态

Fig. 1 Basic form of overlying strata movement and damage

2 导水裂隙带概述及主要计算理论

全部垮落法管理顶板时,采场上方会产生垮落带、断裂带和弯曲下沉带,简称“三带”,垮落带和断裂带合称为导水裂隙带^[8]。导水断裂带发育过程中,覆岩层中相继产生大量孔隙、裂隙、裂缝及离层等空间,并可能相互沟通直至采空区,这些层内空间就构成了导通采空区上覆岩层(含水、砂层)至采空区的导水导砂通道。

目前在导水裂隙带计算方面,我国应用最为普遍的预计方法为《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》(简称《规程》)中推荐的统计经验公式^[9]。但该公式来源于大量实测数据统计,由于当时生产技术条件的限制,所统计的煤层一次开采厚度一般小于 3 m;也就是说,当煤层分层采厚大于 3 m 时,经验公式的适用性是值得商榷的,实践也已证明,许多煤矿放顶煤开采的断裂带高度实测结果与按《规程》预计方法的结果存在较大的差异^[10-11]。在《规程》指导及工程实践基础上,我国相关科技工作者对导水裂隙带的认识及计算方法进行了不断探索,文献[12]研究认为“顶板垮落带高度随着采高及工作面长度的增大而呈指数增大”;文献[13-14]认为关键层与开采煤层距离小于 7~10 倍煤层采高的条件下,不能按照《规程》中的准则确定导水裂隙带高度;文献[15]进一步提出导水裂隙带高度应达到与工作面距离 10 倍采高最近的关键层层位,并与中厚煤层及厚煤层开采的实测值进行对比,认为基于关键层理论确定导水裂隙带高度更接近实测值;在导水裂隙带发育分布方面,文献

[16]将采动影响覆岩裂隙场划分为离层低角度裂隙区,采空区中部垮落及断裂带中角度区,裂隙扩展高角度区,中、高角度过渡区 4 个区域。覆岩层破坏分带模型及相似模拟结果见图 2、图 3^[17]和图 4。

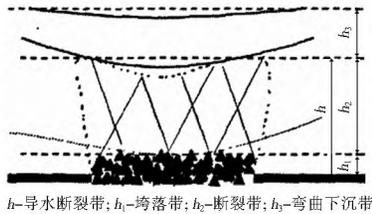


图 2 采空区上覆岩破坏“三带”模型

Fig. 2 Three zone damage model of overlying strata in the goaf

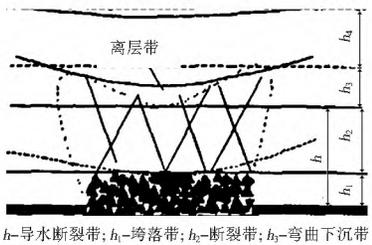


图 3 采空区上覆岩破坏“四带”模型

Fig. 3 Four zone damage model of overlying strata in the goaf

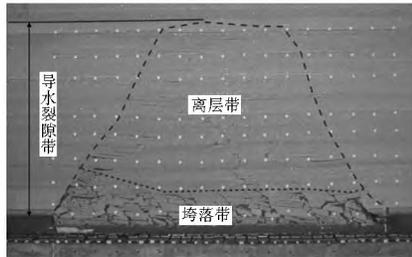


图 4 相似模拟试验导水裂隙带形态分布

Fig. 4 Form distribution of diversion fissure zone of similar simulation test

3 渗流对导水裂隙带的作用

煤炭开采过程中,由于采空区周围含水岩层不断向采空区渗排水,同时导水裂隙带内大量的空间(裂隙、离层等),为地下水沟通流动提供了良好的通道,极大地提高了覆岩的透水性;当导水裂隙带部分或整体发育在补给充足的含水覆岩层时,岩层内承受巨大水头的孔隙水获得了释放通道成为自由水,并在重力作用下沿着导水裂隙带内的沟通通道,以平衡状态下快得多的速度进入采空区,当进入采空区的自由水超过矿井的排水能力时,矿井产生水害,影响正常生产,甚至造成淹井事故,威胁井下人员及设备的安全。

当导水裂隙带发育在硬度较大的覆岩层内,仅有水进入覆岩裂隙和采空区,此时地下水活动对采场覆岩的影响较小,其对开采沉陷的贡献度可不予考虑;若煤层开采深度不大,且导水裂隙带发育在硬度偏低、透水性好、覆岩较软且含有较多泥砂的砂砾石层、砂土层时,离层、裂缝、孔隙表面粒径较小的岩土体颗粒在渗流作用下,将首先在裂隙内水活动的作用下,以颗粒流、湿陷、塌落、潜蚀、溶蚀等综合作用渗透变形形式进入覆岩导水断裂带的孔隙裂缝内,并可能最终进

入采空区;若含水层补给较为充足时,该过程将持续发育,直至地下水潜水面。由于地下覆岩土层的不均匀性,逐步向四周及上方的覆岩层(含水层)湿陷、塌落、潜蚀、溶蚀成不规则的地下空间,在个别区域甚至发育至地表附近,此时覆岩层中的水活动对覆岩层的演化影响作用则较为显著,将明显增大采空区覆岩的下沉幅度。

4 地下水活动对采空区覆岩影响机理

煤炭开采后,采空区上方覆岩相继发育垮落带、断裂带、弯曲下沉带。当由垮落带和断裂带共同组成的导水裂隙带局部或整体发育在含水岩层内时,其内的大量沟通裂隙成为含水层内水流动导通的自由通道。在采空区持续对其周围岩层渗排水时,采空区周围含水层水头压力降低,引起围岩更远处承受水头压力大的覆岩含水向水头压力较低的区域流动;在富水覆岩层及补给良好的区域,覆岩中的水将在水头压力作用下持续流向采空区。

覆岩含水层水流动过程中,覆岩层中颗粒度较小或强度较低的成分在水的搬运、潜蚀、溶蚀及重力塌落等综合作用下随水流进入断裂带、垮落带甚至直至未压实的未采区;由于含水覆岩层中的地下水持续活动及水对覆岩的软化作用,因采煤导致的导水裂隙带在水及重力作用下,将缓慢出现自下至上的离层裂隙,并成层状或聚团块状逐渐向上发展,并最终发育停止于含水量小或坚硬完整的岩层,个别的甚至直接发育至地表附近,但由于覆岩层的成拱特性,具有一定悬空区域的覆岩一般并不会立即垮塌;但当地下水影响区域面积足够大时,将引发采空区整个覆岩区域的下沉增大及影响范围增加;当地表覆岩性质均一性较差时,将在采场覆岩内的局部出现数量不等、大小不一、形状各异的局部孔洞或离层,发育至地表附近时导致地表塌陷,就成为破坏力极大的“天坑”。

虽然采空区周围含水层中的水渗流对采空区覆岩移动变形具有“促进、帮助”作用,但已有资料显示采煤因素在地表下沉及覆岩移动中起决定作用,而地下水位降低对其只是辅助作用^[2];且地下水渗流对覆岩变化的影响同开采煤炭引发的覆岩移动变形并不同步,具有滞后性^[18]、累积性、潜伏性、突发性等。

5 实例分析

5.1 区域概况

焦作煤田以水大著称,其原因主要有以下三点:一是地下水补给区广阔,其西部以沁河和丹河之间分水岭为汇水边界,东部以横水至陵川一带为汇水边界,北部以太行山复背斜轴部为界,南部以矿区煤系露头为界,接受大气降水补给的面积约 1 350 km²;二是煤田北部有巨厚的灰岩含水层及其裂隙溶洞储水空间;三是煤田发育的断裂构造带和层面裂隙是上述含水岩体内的地下水向煤田补给的良好通道。

煤田煤层埋深一般 79~290 m;所采二₁煤厚 2.5~9.0 m;倾角一般 $\theta \sim 17^\circ$;煤层上部由泥岩、砂岩、页岩等软岩组成,上覆第三、四系地层厚 39.40~150.0 m,含水层与黏土或黏土夹砾石层相间,构成多层次复结构含水层组,直接接受

大气降水与地表水补给,富水性很强。

5.2 区域采空区地表移动变形特征

(1) 采空区实测下沉。

老采空区土地规划利用的前提之一是确定采空区的稳定性问题。焦作矿区于 2003 年 9 月至 2004 年 11 月在部分老采空区上方建立了地表移动观测站并进行了连续 14 个月的观测(观测结果见图 5)。按开采沉陷学理论^[19],在缺乏精确完整采空区分布资料的情况下,在建立地表移动观测站时无法严格将观测站设置在沿煤层走向或倾向的移动盆地的主断面上(单一工作面开采时,主断面较为容易确定;多个工作面开采、由于变形相互影响、存在变形叠加时其主断面较难确定)。考虑到本文探讨内容及下沉盆地自身的变形特征,如主要的地表移动变形均发生在考虑拐点偏移距 S 后的以 r 为主要影响半径的范围内(S, r 为概率积分法沉陷预计 5 个参数^[20]中的 2 个),同时为使观测结论更具普遍性和代表性,设站时各站点间距离较一般观测站间距大,这样布设站点可尽可能地将各站点分布在采空区及未采区上方,使测量结果对本文问题的研究更具一般性。据此 JZ1 至 JZ5 测站布置于采掘工程平面图的采空区边界之外, JZ6 至 JZ10 位于采空区内;相邻两站点间距不小于 25 m(依据设站原则及具体的地物地貌,整条观测线实际长度为 263.627 m)。

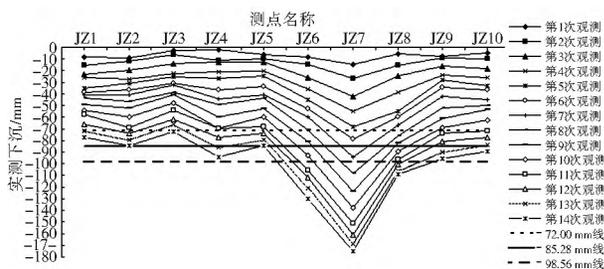


图 5 实测下沉

Fig. 5 Measured subsidence

通常情况下,煤炭开采后采空区上覆岩层经过一系列的覆岩应力演化及移动变形后将逐渐趋于稳定,并最终停止变形。由此可知:“在没有影响地表移动变形的特殊因素下,地表将在一定时间内移动变形结束,超过这一移动变形时间后,将测不到地表的变形量(理论上变形量为 0)”。通过观测知, JZ1 至 JZ5、JZ9 至 JZ10 7 个测站下沉量在整个观测过程中始终比较接近,7 个测站中最大下沉为 JZ9 站、下沉 96 mm,最小下沉为 JZ3 站、下沉 72 mm,两者仅相差 24 mm;若取 7 个下沉值的算术平均值(85.28 mm)为衡量下沉的参考,则 7 个测站的下沉在 ± 13.28 mm 内上下浮动。测站点的这种下沉特征,既不同于变形活跃时采空区上方下沉值远大于采空区边界外测站的下沉特征,也不同于移动变形结束后下沉为 0 时的特征。在所有 10 个测站中,未观测到下沉等于或接近于 0 的点,说明观测时变形仍未停止且变形范围大于一半的开采沉陷影响范围;单月最大下沉量达 16 mm(测站 JZ7),单月最小下沉 2 mm(测站 JZ1、JZ3);累计最大下沉在 JZ7 处(1989 年老采空区上方,采空区已形成 15 年),其下沉量达 175 mm(月均 12.5 mm),累计最小下沉 73 mm(月均 5.2 mm);可见下沉仍不稳定。由图 5 可知,下沉曲线整体符合地表移动的一般特征规律,但在局部测点(JZ3、

JZ5)处下沉曲线出现波动且下沉量偏大,这与一般的残余变形特征不相符。以上分析说明,采空区在地下水活动影响下,地表下沉出现整体幅度较为一致的下沉、但局部点出现小幅波动、个别点下沉量较大,在观测曲线出现明显的尖角(JZ6、JZ7);这可能是由局部地质不均匀发育引发的。该现象应引起相关专家学者及土地规划利用部门的重视。

(2)采空区移动变形时间跨度。

该区域缺乏开采初期系统的地表移动变形观测资料,由地质资料知该区域属浅埋煤层开采,根据“三下”开采规程^[20],在没有观测资料时,地表移动变形时间可由公式(1)计算。

$$T = 2.5H_0 \quad (1)$$

式中: H_0 为工作面平均深度(m)。

为分析该区域采空区活动时间,取最大埋深290 m计算地表移动时间。计算得最大移动时间为725 d(约2 a)。按一般规律,该区域地表下沉约2 a左右,但实测结果显示在采空区形成15 a后(相差13 a),下沉仍在继续,这不符合一般地质采矿条件下的开采沉陷时间维度上的特征。

5.3 区域覆岩钻孔注浆特性分析

通过对区域采空区下沉设站观测及地表移动变形时间跨度比较,两者从不同角度均表明该区域下沉规律特征与一般地质条件下的移动变形差异明显。为揭示影响区域老采空区移动变形的内在因素及覆岩内裂隙发育状况,决定在采空区上方覆岩及未采区域,分别进行钻孔注浆分析。

该区域多年地下水水位观测表明,地下水在雨季得到补给,水位缓慢回升,水位一般滞后降雨30~40 d后才有明显反映,到当年10月份前后水位出现高峰。在旱季,由于矿坑排水及其它因素的影响,地下水位缓慢下降,到第二年6月、7月份出现最低水位,水位年变幅极值在3.0~91.9 m之间,多年平均地下潜水水位为30 m左右。据此钻孔设计深度为45 m,该深度正位于区域多年平均潜水位以下,同时也位于松散层及泥卵石层的接壤层下,随着水量补给、流失程度的不同,实际潜水位在该深度上下波动,因而其影响也可能最为显著。在钻径、孔深($\Phi = 71 \text{ mm}$ 、 $H = 45 \text{ m}$)一致的前提下, K_1 孔(位于未采区上方),砾石层厚26.5 m,累计注浆4.2 t,平均单位注浆量0.16 t/m; K_2 孔(位于采空区上方),砾石层厚28.1 m,累计注浆量11.4 t,单位注浆量0.41 t/m; K_2 孔平均单位注浆量是 K_1 孔的2.56倍,差异明显。在区域地质较为均匀,覆岩计算“两带”高度影响有限的前提下,出现如此大的注浆量差距,说明采空区覆岩内孔隙、裂隙比未采区覆岩多。

5.4 采空区覆岩长期存在移动变形原因分析

根据区域地下水位的多年观测及未采区注浆钻孔 K_1 分析,该位置由于长期的地质演化作用,覆岩结构及水循环在该区域达到了平衡,因此 K_1 孔在未受煤炭开采影响时注浆量小; K_2 由于位于采空区上方,在煤炭开采后,覆岩层发生相应的垮落弯曲下沉、岩层内发育了大量上下沟通的裂隙、裂隙,特别是在卵石层内,由于卵石层本身的松散结构,加上由于开采造成的水力梯度降低区域,使含水层内的地下水自上至下经过覆岩裂隙流入采空区,在这一过程中,卵石层及覆岩层中的细小颗粒填充物被带走和溶蚀,增大了覆岩

中的空间。在这一作用长期积累下,卵石层中的细小填充物(泥砂颗粒等)逐渐流失进入更深的覆岩“两带”裂隙内;同时覆岩裂隙经历自下至上逐层向上发展的过程(个别区域可达地表附近),造成局部岩层内空间增大,但该过程效果与单纯开采引起的覆岩移动变并不同步,即具有时间上的滞后性。这就较好的解释了 K_2 孔注浆量比 K_1 孔注浆量大的原因。

6 结论

(1)地下水活动对采空区覆岩的影响并不是在所有采空区都有显著体现,它一般在覆岩含水丰富、补给充足、透水性较强、岩性较软或含泥砂较多的采空区域有明显体现。导水裂隙带内的大量裂隙、离层、孔洞等未压实空间,成为导水导砂的自由通道;由于水对覆岩内裂隙、颗粒物质的软化、潜蚀、溶蚀、搬运、湿陷、塌落等的综合作用,使覆岩发生幅度比无(少)水或坚硬覆岩层更大范围、更大程度上的不均匀移动变形。

(2)地下水活动对采空区覆岩移动变形所起作用具有滞后性。地下水活动对开采沉陷覆岩移动变形虽然具有幅度及范围上增大影响,但一般情况下,在导水裂隙带形成初期,地下水对覆岩移动变形的影响有限,地下水活动对覆岩的影响一般需要通过较长时间的累积和应力传递才能显现。

虽然地下水活动对采空区覆岩移动的影响已被实践证明,但因缺乏对该问题完整系统的研究,其影响机理及作用有待深入研究,定量计算尚有困难,造成难以有效服务工程实践。今后应结合更多的实测资料及工程实践,进行更为深入的研究,以进一步揭示其影响机理及计算方法,更好地指导工程实践及服务社会经济建设。

参考文献(References):

- [1] 龚士良,丁利红.地面沉降自动化测控与预警预报系统[J].计算机测量与控制,2003,11(4):244-247. (GONG Shiliang, DING Lihong. Automatic measurement and alarm prediction system of land subsidence[J]. Computer Measurement & Control, 2003, 11(4): 244-247. (in Chinese))
- [2] 国土资源部,水利部.全国地面沉降防治规划(2011-2020年)[M].国土资源部办公厅,2012: F.2. (Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. National land subsidence prevention plan (2011-2020) [M]. General Office of Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, 2012: 1-2. (in Chinese))
- [3] 杨愈,刘文生,冯国才.地下水下降对采矿覆岩下沉影响探析[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(4):67-70. (YANG Yu, LIU Wensheng, FENG Guocai. Study on the influence of groundwater lowering to the subsidence of overlying strata in mining area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(4): 67-70. (in Chinese))
- [4] 隋旺华,狄乾生.开采沉陷土体变形与孔隙水压相互作用研究进展[J].工程地质学报,1999,17(4):303-304. (SUI Wanghua, DI Qiansheng. Study on interaction between soil mass deformation and pore pressure during subsidence by mining[J]. Journal of Engineering Geology, 1999, 17(4): 303-304. (in Chinese))
- [5] 夏玉成,雷通文,白红梅,等.煤层覆岩与地下水在采动损害中

- 的互馈效应探讨[J]. 煤田地质与勘探, 2006, 34(1): 44-45. (XIA Yur cheng, LEI Tong wen, BAI Hong mei, et al. Discussion of interaction between cover rocks and underground water in environmental hazards induced by coal mining[J]. Coal Geology & Exploration, 2006, 34(1): 44-45. (in Chinese))
- [6] 胡炳南. 地下水开采引发表沉陷损害问题探讨[J]. 煤矿开采, 2006, 11(4): 13-15. (HU Bing nan. Analysis of surface subsidence induced by underground water mining[J]. Coal Mining Technology, 2006, 34(1): 44-45. (in Chinese))
- [7] 郭文兵, 柴华彬. 煤矿开采损害与保护[M]. 煤炭工业出版社, 2008: 1-2. (GUO Wen bing, CHAI Hua bin. Coal mining damage and protection[M]. Coal Industry Publishing House, 2008: 1-2. (in Chinese))
- [8] 王志强, 李鹏飞, 王磊, 等. 再论采场“三带”的划分方法及工程应用[J]. 煤炭学报, 2013, 38(增 2): 287-293. (WANG Zhi qiang, LI Peng fei, WANG Lei, et al. Method of division and engineering use of ‘three band’ in the stope again[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(S2): 287-239. (in Chinese))
- [9] 国家煤炭工业局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[M]. 煤炭工业出版社, 2010: 228-230. (Coal Industry Administration of the People’s Republic of China. Building, water, railway and main roadway and coal mining regulations[M]. Coal Industry Publishing House, 2010: 228-230. (in Chinese))
- [10] 戴露, 谭海焦, 胡戈. 综放开采条件下导水裂隙带发育规律探测[J]. 煤矿安全, 2009, 29(5): 463-467. (DAI Lu, TAN Hai jiao, HU Ge. Exploration to the development rules of water flowing fracture zone in the fully mechanized top coal caving face[J]. Safety in Coal Mines, 2009, 29(5): 463-467. (in Chinese))
- [11] 李佩全. 淮南矿区水体下采煤的实践与认识[J]. 中国煤炭, 2001, 27(4): 30-32. (LI Pei quan. Coal mining under surface water bodies in Huainan mining area: Practice and inspiration [J]. China Coal, 2001, 27(4): 30-32. (in Chinese))
- [12] 付玉平, 宋选民, 邢平伟. 浅埋煤层大采高超长工作面垮落带高度的研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(2): 190-194. (FU Yu ping, SONG Xuan min, XING Ping wei. Study of the mining height of caving zone in large mining height and super long face of shallow seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(2): 190-194. (in Chinese))
- [13] 许家林, 王晓振, 刘文涛. 覆岩主关键层位置对导水裂隙带高度的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 380-385. (XU Jia lin, WANG Xiao zhen, LIU Wen tao. Effects of primary key stratum location on height of water flowing fracture zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 380-385. (in Chinese))
- [14] 伊茂森, 朱卫兵, 李林, 等. 补连塔煤矿四盘区顶板突水机理及防治[J]. 煤炭学报, 2008, 33(3): 241-245. (YI Mao sen, ZHU Wei bing, LI Lin, et al. Water inrush mechanism and prevention for fourth panel roof in Bulianta coalmine[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(3): 241-245. (in Chinese))
- [15] 许家林, 朱卫兵, 王晓振. 基于关键层位置的导水裂隙带高度预计方法[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 762-769. (XU Jia lin, ZHU Wei bing, WANG Xiao zhen. New method to predict the height of fractured water conducting zone by location of key strata[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 762-769. (in Chinese))
- [16] 李宏艳, 王维华, 齐庆新, 等. 基于分形理论的采动裂隙时空演化规律研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(6): 1023-1030. (LI Hong yan, WANG Wei hua, QI Qing xin, et al. Study on fissure development rule of overlying strata influenced by mining based on fractal theory [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(6): 1023-1030. (in Chinese))
- [17] 董东林. 煤矿水害及其防治技术[R]. 中国矿业大学(北京), 2012(6): 69-80. (DONG Dong lin. Mine water damage and its control technology[R]. China University of Mining & Technology, Beijing, 2012(6): 69-80. (in Chinese))
- [18] 冯剑, 漆泰岳, 王睿, 等. 砂卵石地层空洞的安全性定量评价方法浅析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(增 2): 2058-2063. (FENG Jian, QI Tai yue, WANG Rui, et al. Analysis on quantitative evaluation of the safety of cavity in sandy pebble stratum[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(S2): 2058-2063. (in Chinese))
- [19] 邹友峰, 邓喀中, 马伟民. 矿山开采沉陷工程[M]. 中国矿业大学出版社, 2003: 213-217. (ZOU You feng, DENG Ka zhong, MA Wei min. Mining subsidence engineering[M]. China University of Mining and Technology Press, 2003: 213-217. (in Chinese))
- [20] 国家煤炭工业局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[M]. 煤炭工业出版社, 2000: 110-111. (Coal Industry Administration of the People’s Republic of China. Building, water, railway and main roadway and coal mining regulations[M]. Coal Industry Publishing House, 2010: 110-111. (in Chinese))

(上接第 720 页)

- [7] 赵江涛. 圆中环沉沙排沙过滤池滤水槽过滤性能研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2013. (ZHAO Jiang tao. An experimental study on the filtration performance of the filter tank in the circular central sand discharging sand filter[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2013. (in Chinese))
- [8] CJJ40-2011, 高浊度给水设计规范[S]. (CJJ40-2011, Design Specifications For High Turbidity Water Supply[S]. (in Chinese))
- [9] SL310-2004, 村镇供水工程技术规范[S]. (SL310-2004, Technical Code For Water Supply Engineering of town and Village[S]. (in Chinese))
- [10] 沈长松, 王世夏, 临益才, 等. 水工建筑物[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. (SHEN Chang song, WANG Shi xia, LIN Yi cai, et al. Hydraulic structure[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2008. (in Chinese))