

地球科学与测绘



移动扫码阅读

王 新,郭小铭.越层水文地质现象及对煤矿防治水的影响研究[J].煤炭科学技术,2020,48(8):150-156. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.08.019

WANG Xin, GUO Xiaoming. Study on hydrogeological phenomena of across stratigraphic boundary and impact on prevention and control of mine water [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(8): 150-156. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2020.08.019

越层水文地质现象及对煤矿防治水的影响研究

王 新^{1,2}, 郭小铭^{1,2,3}

(1.中煤科工集团西安研究院有限公司,陕西 西安 710077;2.陕西省煤矿水害防治重点实验室,陕西 西安 710077;

3.煤炭科学研究总院,北京 100013)

摘 要:地层沉积作用直接影响地下含水层的发育条件,尤其是不整合接触地层界面含(隔)水层特征会发生差异性变化;通过对地层不整合接触面处发育的风化带、古河床性质分析,利用沉积规律与水文地质结构概化和水文地质勘探方法,提出了地层不整合界面易造成地层界线与水文地质边界不重合的越层水文地质现象,即含水层跨过地层界限同时发育于不同地层之中。对不同类型的越层水文地质现象进行了分类分析,概化出“平行-减薄”型、“平行-增厚”型和“侵蚀-增厚”型3种主要的越层水文地质结构模型。结合我国现阶段主要产煤区的沉积地质及水文地质条件进行分析,研究了鄂尔多斯盆地侏罗系煤田顶板直罗组砂岩含水层和华北地区石炭-二叠系煤田底板奥陶系灰岩含水层存在的越层水文地质现象及其对煤层开采的影响,并提出了考虑越层水文地质现象时矿井综合防治水措施。研究表明:侏罗系煤田开采顶板延安-直罗组地层间越层水文地质现象使得隔水层厚度减小,矿井水文地质条件更加复杂;石炭-二叠系煤层开采过程中,由于底板奥灰顶部的越层水文地质现象,使得底板隔水层厚度增加,可将部分奥灰地层作为隔水层进行利用,有助于煤层开采过程中的底板奥灰水害防治。

关键词:不整合接触面;越层水文地质现象;矿井防治水;风化带

中图分类号:P641;TD741

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2020)08-0150-07

Study on hydrogeological phenomena of across stratigraphic boundary and impact on prevention and control of mine water

WANG Xin^{1,2}, GUO Xiaoming^{1,2,3}

(1.Xi'an Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China; 2. Shaanxi Key Lab of Mine Water Hazard Prevention and Control, Xi'an 710077, China; 3. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: Stratigraphic sedimentation directly affects the development conditions of the underground aquifer, especially on the unconformity contact surface, the characteristics of the aquifer and aquiclude will be changed. Through the analysis of weathering zone and the paleo-bed characteristics of the unconformity surface of the stratum, then generalization of sedimentary laws and hydrogeological structures and hydrogeological exploration methods are used to study the structure of aquifers and aquifuges, it is proposed that the unconformity of the stratum easily causes the across stratigraphic boundary hydrogeological phenomena, that the stratigraphic boundary do not coincide with the hydrogeological boundary. It is expressed that the aquifer is forced to cross the stratigraphic boundary and develop in different strata. The different types of hydrogeological phenomena are analyzed, then three types of cross-layer hydrogeological structure models are generalized, namely "parallel-thinning" type, "parallel-thickening" type and "erosion-thickening" type. This paper analyzes the sedimentary geological and hydrogeological conditions of the main coal-producing areas in China, then studies the across stratigraphic boundary hydrogeological phe-

收稿日期:2020-01-18;责任编辑:曾康生

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804100);国家自然科学基金青年基金资助项目(41807221)

作者简介:王 新(1963—),男,陕西西安人,研究员。Tel:029-81778328, E-mail: wangxin@cctegxian.com

nomena and the formation conditions of Zhiluo Formation sandstone aquifer and the Ordovician limestone aquifer and their effects on mine water disasters in Jurassic coalfields in the Ordos Basin and Carboniferous-Permian coalfields in North China, and proposes comprehensive water prevention measures. The research indicates that the across stratigraphic boundary hydrogeological phenomena of Yan'an-Zhiluo Formation in Jurassic coalfield mining make the thickness of the aquiclude is reduced, so hydrogeological conditions more complicated. The hydrogeological phenomenon of the top of the Ordovician limestone in the Carboniferous-Permian coalfield increases the thickness of the aquiclude, so part of Ordovician limestone layer can be used as aquiclude, which contributes to the prevention and control of water disasters from coal seam floor.

Key words: unconformity contact surface; hydrogeological phenomena of across stratigraphic boundary; prevention and control of mine water; weathering zone

0 引 言

我国是世界上煤矿开采水文地质条件最为复杂的国家,其矿床水文地质条件的研究是煤矿开采过程中最主要的研究内容之一^[1]。矿床水文地质条件的研究任务就是查明井田范围内含水层、隔水层分布以及地下水的运动特征和物理化学性质等。其中,含水层和隔水层分布特征及性质受到地层沉积条件和后期构造作用影响最为显著。

国内外在沉积条件对水文地质特征的影响方面开展了部分研究工作。早在 20 世纪 90 年代,王祯伟^[2]通过分析孔隙含水层的沉积特征与水文地质条件的关联机理,提出沉积建造作用影响孔隙含水层的分布范围、厚度、宏观结构、碎屑粒度组分等,从而影响矿井的水文地质特征;谢渊等^[3]分析了鄂尔多斯盆地白垩系早谷、沙丘、丘间及沙漠湖等多类型沙漠亚相碎屑岩沉积形成的砂岩地层结构特征,研究了地层结构的水文地质意义;陈晨^[4]从沉积作用、成岩作用角度剖析了水文地质结构的层序地层控制、岩相古地理面貌及富水性的沉积控制机理与规律,分析了含水层富水性;楼章华^[5]认为地层的沉积和演化决定了不同地层的空间关系,进而决定了地下水动力场分布特征;JAYASINGHA 等^[6]通过对河流相的研究提出含水层系统演化受到沉积相的影响。由此可见,国内外在沉积相对水文地质条件的影响研究方面已经取得了一定成果,沉积相对含水介质和隔水层特征的空间分布、结构特征有较大的控制作用。但是,目前的研究成果多针对沉积对介质的含水性能影响方面,主要为沉积体本身的水文地质特征。对于沉积界面由于不整合接触造成的水文地质差异变化未开展专项研究。因此,尚未有对跨越不同时代地层水文地质条件延续性或差异性的深入研究成果。

大量的煤矿开采揭露资料表明,在一些地质界面附近同一地质年代的地层水文地质条件存在明显差异,造成含(隔)水层界面与地层年代及岩性界面

有较大不同,从而使得防治水工作的目标层位发生垂向移动,极有可能造成未预料到的矿井水害发生。在煤矿防治水领域,需准确掌握这种水文地质现象,根据其水文地质特征制定科学的防治水措施,以保障矿井防治水安全。

通过分析地层沉积动态过程与水文地质条件的关系,提出不同年代地层之间由于地层不整合面而出现的“越层水文地质现象”。结合我国主要产煤区的华北石炭-二叠系煤田和西北侏罗系煤田开采过程中主要影响含水层的沉积特征,研究了奥陶系灰岩含水层和直罗组砂岩含水层的越层水文地质现象,并结合现场揭露的实际含水层分布特点,提出该类条件下的防治水技术措施。

1 不整合地质界面及越层水文地质现象

不整合地质界面指沉积遭受区域抬升后发生沉积间断-剥蚀,后期又沉降发生沉积的作用面,代表了地层记录的间断或缺失。现有研究成果表明,不整合面常常伴随着岩层的次生储集空间,对地下水赋存及油气储藏有一定影响^[7]。

部分区域由于不整合面的存在,尤其是顺层滑动、构造、风化剥蚀、古河床冲刷等作用造成的地层界面附近形成具有一定厚度的风化壳或破碎带,其含(隔)水性能与自身所在层位岩层有所不同。将这种由于不整合面影响而造成的含(隔)水层边界与地层边界不一致的现象称为“越层水文地质现象”(图 1)。

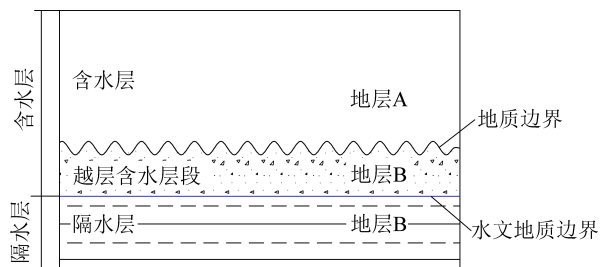


图 1 越层水文地质现象示意

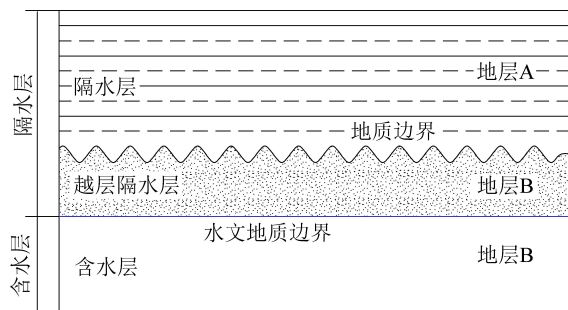
Fig.1 Schematic of hydrogeological phenomena of across stratigraphic boundary

根据不整合面的形态和含(隔)水性能,结合含(隔)水地层的空间组合形态,概化出煤矿区常见的3种由于不整合面造成的越层水文地质模型。

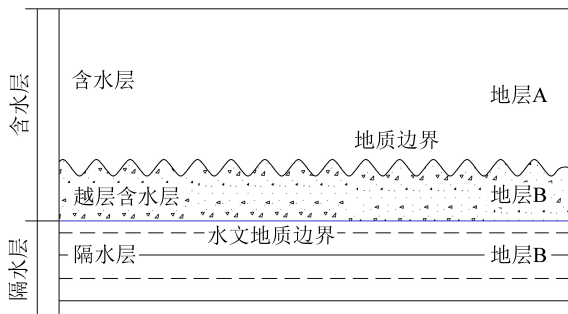
1) 平行不整合接触地层界面,下部地层在构造运动过程中受到长期风化形成风化裂隙,若后续地层沉积前风化裂隙得到较好充填与压实,可形成较好的隔水层段。该越层水文地质模型使得下部含水层厚度减薄,含(隔)水层界线向下部含水层移动,为“平行-减薄”型(图2a)。

2) 平行不整合接触界面下部地层形成风化裂隙未得到充填,风化带受上部含水层补给而成为含水段。该越层水文地质模型使得上部含水层厚度增加,含(隔)水层界线向下部隔水层移动,为“平行-增厚”型(图2b)。

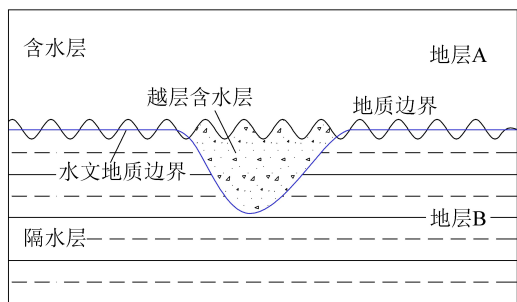
3) 古河床冲刷造成河床下侵蚀,形成的侵蚀不整合面。尤其是辫状河的砂砾岩快速沉积地层中,



(a) “平行-减薄”型



(b) “平行-增厚”型



(c) “侵蚀-增厚”型

图2 越层水文地质现象类型

Fig.2 Hydrogeological phenomena types of across stratigraphic boundary

古河床位置会形成胶结程度较差的砂体,受上部含水层补给成为富水层段。该越层水文地质模型使得局部区域上部含水层厚度增加,含(隔)水层界线向下部隔水层移动,为“侵蚀-增厚”型(图2c)。由于区域侵蚀基准面不同,形成了不规则的不整合接触面,侵蚀基准面越深,砂岩厚度越大,使得上覆含水层的厚度、富水性等方面呈现较大差异。

不整合面造成的“越层水文地质现象”对煤炭开采过程中水害防治有较大影响,直接关系到矿井防治水目标层位的确定。水文地质边界跨越地层边界时可造成隔水层厚度增加或减小,从而减弱或增强含水层的水害威胁与影响,防治水工作的开展需加强该方面的研究。

通过总结提出的3种越层水文地质模型在我国主要产煤区—西北侏罗系煤田和华北石炭-二叠系煤田较为普遍,造成矿井实际水文地质条件与预测情况有所偏差,从而影响矿井水文地质条件。

2 侏罗系煤层顶板越层水文地质现象

随着我国煤炭资源的开发向西部转移,鄂尔多斯盆地侏罗系煤田成为我国煤炭的主要开采区域。盆地内煤层开采过程中主要面临顶板砂岩含水层水害影响,尤其是直罗组砂岩含水层对其影响最为显著^[8]。深入探讨研究侏罗系煤层开采顶板的含水层越层现象对侏罗系煤田开发过程中水文地质条件的认识有重要意义。

2.1 平行不整合接触面越层水文地质现象

侏罗纪延安组地层沉积末期,鄂尔多斯盆地整体抬升,沉积间断,使得延安组地层顶部遭受到了不同程度的剥蚀、风化,与上覆直罗组地层形成平行不整合接触关系。在没有风化剥蚀的条件下延安组地层上段多以泥岩和粉砂岩为主,富水性普遍较弱,属于隔水层或弱富水含水层。直罗组地层下段多以灰白、灰绿色中粗粒砂岩为主,底部普遍发育一套厚层含砾中粗粒砂岩,属于直罗组较为普遍发育的含水地层,是侏罗系煤田开采的主要充水含水层。但是,由于延安组地层顶部长期的风化剥蚀作用,使得延安组顶部具备一定的富水性而出现越层水文地质现象。

通过对鄂尔多斯盆地多对矿井水文地质勘探成果的总结,在区域内发现大量延安组顶部风化形成的含水层越层现象。地处鄂尔多斯盆地中南部黄陵煤田的黄陵一号煤矿某工作面T5钻孔探放水成果如图3所示。在井下钻孔未进入直罗组地层时即表现出明显的涌水现象,到进入直罗组地层底界时水

量可达 $60 \text{ m}^3/\text{h}$,与后续直罗组含水层涌水量近似,表明在孔深 51—74 m 间的 23 m 厚度延安组泥岩段存在明显的富水现象,延安组上段与直罗组下段成为统一的含水层。旬耀矿区照金煤矿、陈家山煤矿等井下探放水钻孔均发现类似现象。

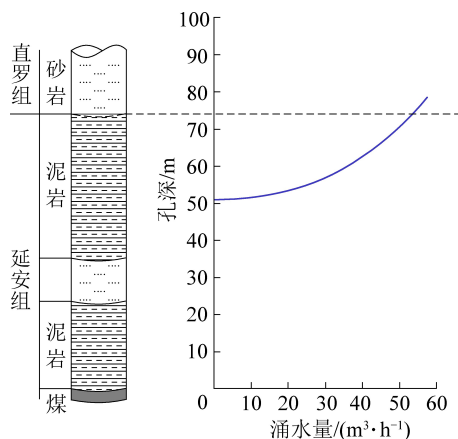


图 3 T5 钻孔孔深与涌水量关系

Fig.3 Relationship between hole depth and water inflow of Drilling Hole T5

大量探查与研究结果表明,延安组地层顶部存在明显的风化带富水层位,厚度可达 15~30 m,造成含水层底界面下移,减小了煤层到含水层的距离。鄂尔多斯盆地侏罗系煤层开采过程中顶板延安组与直罗组地层之间的不整合面属于典型的“平行-增厚”型越层水文地质现象,煤层与不整合面水文地质结构模型如图 4 所示。

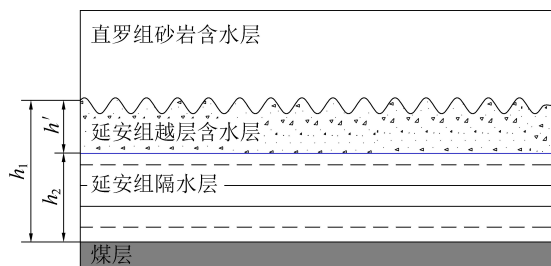


图 4 侏罗系煤层“平行-增厚”型结构模型

Fig.4 “Parallel-thickening” type structural model of Jurassic coal seam

由图 4 可知,原始沉积条件下,按照地层界线划分煤层与含水层间距为 h_1 。由于延安组顶界面存在风化带造成含水层底界面下移 h' ,使得煤层与含水层间距减小,即

$$h_2 = h_1 - h' \quad (1)$$

式中: h_2 为煤层到实际含水层距离,m; h_1 为煤层到直罗组距离,m; h' 为延安组越层含水层厚度,m。

由此可知,侏罗系煤层开采过程中,越地层界线的含水层底界面下移现象使得矿井水文地质条件较初始预测更加复杂。

2.2 侵蚀不整合越层水文地质现象

侵蚀不整合源于层序地层学中由于古河床下侵蚀作用造成的河床与上覆地层的局部不整合现象。受沉积时期区域侵蚀基准面控制,古河床冲刷基底地层形成河谷并堆积了胶结较差的砂体,上覆地层覆盖后形成不整合面。

鄂尔多斯盆地直罗组沉积时期水体较浅,早期以辫状河沉积为主,后逐渐过渡为曲流河,晚期发育河漫湖泊^[9]。直罗组早期辫状河沉积过程中,部分古河床沉积砂体胶结程度较差,使得河道砂岩具有良好的渗透性和连通性,受上覆直罗组含水层补给成为良好的局部含水层。由于不同地区不同时间段侵蚀基准面各不相同,形成深度不一、规模差异的侵蚀河道砂体堆积,侵蚀基准面越深,砂岩厚度越大,直罗组含水层厚度、富水性等均呈现出较大差异。

对于区域的层序地层,层序地层界面为地层主要沉积界面^[10]。古河床下侵蚀位置河床砂体底界向下移动,造成实际含水层边界与层序地层界线不同。在煤田地质勘探中,由于实际勘探钻孔控制精度有限,加之古河床侵蚀范围小,探查地层界线与层序地层界线一致。古河床位置由于砂体堆积,在上覆直罗组含水层补给作用下成为富水体,局部范围内直罗组含水层界线下移。由于直罗组地层沉积时期古河床侵蚀造成的侵蚀不整合面属于“侵蚀-下移”型越层水文地质现象,煤层与不整合面水文地质结构模型如图 5 所示。

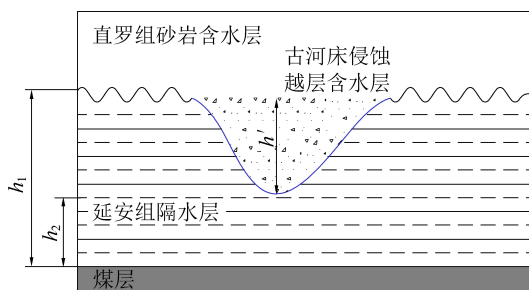


图 5 侏罗系煤层“侵蚀-下移”型结构模型

Fig.5 “Erosion-downward” type structural model of Jurassic coal seam

由图 5 可知,在原始地层沉积条件下,按照区域钻孔勘探得出的地层界线划分煤层与含水层间距为 h_1 。由于局部古河床造成的下侵蚀现象,在古河床影响范围内造成直罗组含水层向下移动,最大下移厚度 h' ,煤层与直罗组含水层实际间距同样可以用式(1)表示,式中 h' 即表示古河床侵蚀向下的厚度。

由此可知,“侵蚀-下移”型越地层界线的水文

地质现象使得矿井局部范围内水文地质条件较初始预测条件更加复杂。该类型越层水文地质现象造成的水害事故在鄂尔多斯盆地近年来时有发生。内蒙古某煤矿由于古河床侵蚀砂体堆积造成最大水量 $2\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$ 的溃水溃砂事故。此外,在陕西彬长、铜川、黄陵等矿区部分煤层顶板延安组较薄区域甚至有古河床直接下侵蚀造成煤层缺失的现象。

2.3 越层水文地质现象对矿井防治水影响

鄂尔多斯盆地侏罗纪煤层开采过程中受到越层水文地质现象影响,使得矿井开采水文地质条件趋于复杂,甚至造成较为严重的水害和溃水溃砂事故。越层水文地质现象对侏罗系煤层开采的影响主要表现在2个方面。

1) 延安组与直罗组地层界面“平行-增厚”型越层水文地质现象,使得延安组风化裂隙带成为富水性相对较好的含水层,含水层厚度增加且延安组隔水层厚度减小。按照地层界线间距留设防水煤柱会造成顶板含水层涌水。

2) “侵蚀-增厚”型越层水文地质现象,造成古河床侵蚀和砂体堆积,加之河床规模小,隐蔽性强,古河床位置含水层底界下移,含水层厚度增加。煤层开采裂隙带波及到古河床时造成含水层涌水,垮落带波及到古河床位置时甚至发生严重的溃水溃砂事故(图6)。

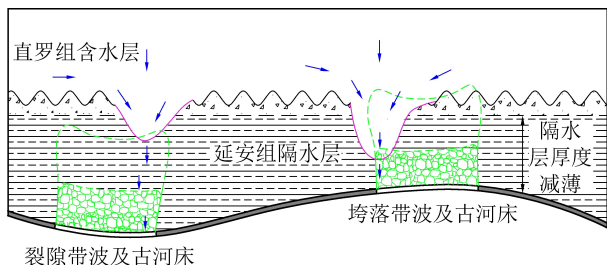


图6 越层水文地质现象对矿井水害影响示意

Fig.6 Schematic of impact of hydrogeological phenomena of across stratigraphic boundaries on mine water disasters

侏罗系煤层开采过程中需对煤层顶板不整合面造成的越层水文地质现象重视,制定合理的防治水措施,避免造成顶板涌水事故。防治措施主要从3方面开展:①通过井上下物探和水文地质勘探,查明井田区域风化带发育范围、厚度,查明风化带与正常地层的富水性差异、岩性变化等;②合理调整工作面开采参数与煤层厚度,控制导水裂隙带发育高度保证其不会波及到水文地质边界底部^[11];③采用井下物探、钻探联合探查手段,查明工作面范围内延安组顶部富水异常区并进行超前疏放。

3 石炭-二叠系煤田底板越层水文地质现象

3.1 奥陶系顶部越层水文地质现象

华北煤系地层基底为巨厚奥陶系灰岩地层,沉积环境总体为海相沉积。华北地区在早奥陶世发生海侵,沉积了厚层的碳酸盐岩,中奥陶世之后发生海退,华北陆表海上升为陆,使得上奥陶统地层被剥蚀,并发生强烈的风化作用^[12]。从晚奥陶世至下石炭世,区域内中奥陶统长期遭受风化剥蚀,风化裂隙被石炭系泥质物充填并压实形成具有一定隔水性能的古风化壳。

我国华北型煤田开采过程中主要面临底板太原组灰岩和奥陶系灰岩含水层水害影响,其中奥灰含水层水害威胁最为严重^[13]。地层沉积环境和后期大量研究表明,奥陶系与上覆石炭系地层之间存在明显的不整合接触关系,奥陶系地层顶部普遍存在一定厚度的古风化壳,同样形成越层水文地质现象,从而影响矿井防治水工作^[14]。

国内外大量学者研究成果表明,奥陶系灰岩含水层顶部古风化壳裂隙充填率高,致密性好,具备一定的隔水性能^[15]。该现象同样是由于奥陶系和石炭系地层之间的不整合面造成的越层水文地质现象,造成底板含水层顶界面下移,奥陶系地层界线与含(隔)水层界线不一致。因此,由于奥陶系地层顶部风化壳造成的平行不整合面属于“平行-减薄”型越层水文地质现象,煤层与不整合面水文地质结构模型如图7所示。

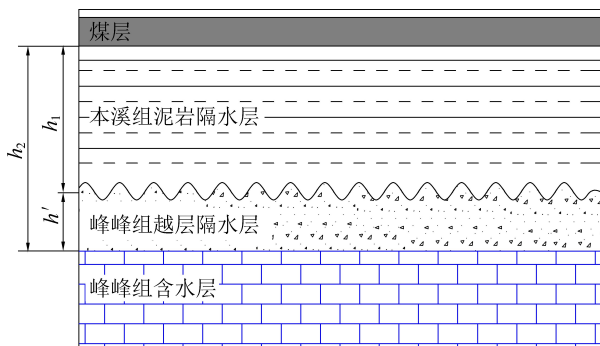


图7 奥灰顶部越层水文地质现象

Fig.7 Across stratigraphic boundaries hydrogeological phenomena at top of Ordovician limestone

由图7可知,原始沉积条件下,按照地层界线划分煤层与含水层间距为 h_1 。由于峰峰组顶界面存在风化壳,造成含水层顶界面下移 h' ,使得煤层与含水层间距增大,即

$$h_2 = h_1 + h' \quad (2)$$

由此可知,石炭-二叠系煤层开采过程中,越地

层界线的含水层顶界面下移现象使得矿井水文地质条件较初始预测相对简单。

3.2 矿井水害形成条件的影响及利用

奥陶系地层顶部不整合面造成的越层水文地质现象使得煤层底板隔水层厚度增加。采用突水系数法和其他评价方法对奥灰含水层水害威胁评价时,需充分考虑越层水文地质现象对矿井水害形成的影响,其修正后的突水系数公式如下^[16]:

$$T = \frac{P + h'/100}{h_1 + h'} \quad (3)$$

式中: T 为突水系数,MP/m; P 为底板本溪组隔水层承受的实际水压,MPa。

华北型煤田下组煤开采过程中,需充分考虑该类越层水文地质现象造成的含水层厚度减小,煤层到含水层距离增大的现象,采用式(3)进行突水系数数值计算,合理评价煤层底板奥灰含水层水害威胁。但是,由于古风化壳部分区域由于未受到完整充填,或者受到后期断裂构造或陷落柱发育影响,存在一定的导水风险。煤矿开采过程中需系统研究井田古风化壳厚度及阻水能力,结合超前区域治理方式加固风化壳的薄弱区段,有效增加隔水层厚度^[17]。

华北石炭-二叠系煤层开采过程中可充分利用奥灰含水层顶部越层水文地质现象,科学分析底板奥灰含水层水害威胁,做好带压开采区域煤层底板水害突水威胁评价。底板奥灰水害防治主要从几方面开展:①通过井上下物探和水文地质勘探,查明井田奥灰顶部古风化壳发育厚度,查明风化壳阻水性、渗透性变化等特征;②结合煤层开采底板破坏深度、古风化壳厚度等因素,合理确定隔水层和有效隔水层厚度^[18];③综合含水层水压、新确定的隔水层厚度,评价水害危险性并采取相应的防治水措施;④做好风化壳范围内断裂构造、陷落柱发育等探查、治理工作,可采用超前区域治理技术加固古风化壳薄弱区段^[19-20]。

4 结 论

1)地层沉积不整合面常会形成地层界线与水文地质边界不一致的越层水文地质现象。根据风化带性质、含(隔)水层位置,概化出“平行-增厚”型、“平行-减薄”型和“侵蚀-增厚”型3种越层水文地质模型。

2)鄂尔多斯盆地侏罗系煤田,延安组与直罗组地层之间的平行不整合面符合“平行-增厚”型越层水文地质模型,侵蚀不整合面符合“侵蚀-增厚”型越层水文地质模型,直罗组含水层底界面均不同程

度的下移,矿井水文地质条件趋于复杂。

3)华北石炭-二叠系煤田开采过程中,底板奥陶系峰峰组顶部均在古风化壳,符合“侵蚀-减薄”型越层水文地质模型,造成含水层顶界面下移,增加了隔水层厚度,在一定程度上减小了奥陶系灰岩含水层对矿井水害威胁。

4)矿井防治水工作中需分析不整合面造成的越层水文地质现象对矿井水文地质条件的影响,布设探查工程界定实际含(隔)水层边界,合理布设防治水工程。

参考文献(References):

- [1] 虎维岳,周建军. 煤矿水害防治技术工作中几个易混淆概念的分析[J].煤炭科学技术, 2017,45(8):60-65.
HU Weiye, ZHOU Jianjun. Discussion on some confused key concepts used in mine water disaster control and protection[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(8):60-65.
- [2] 王祯伟.论孔隙含水层的沉积特征与水文地质条件的关联机理[J].煤炭学报,1993,18(2):81-88.
WANG Zhenwei. Relationship between depositional characteristics of porous aquifer and Hydro-geological conditions [J]. Journal of China Coal Society, 1993, 18(2):81-88.
- [3] 谢 渊,王 剑,江新胜,等.鄂尔多斯盆地白垩系沙漠相沉积特征及其水文地质意义[J].沉积学报,2005,23(1):73-83.
XIE Yuan, WANG Jian, JIANG Xinsheng, et al. Sedimentary characteristics of the cretaceous desert facies in Ordos Basin and their hydrogeological significance [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(1):73-83.
- [4] 陈 晨.乌审旗—横山地区中侏罗世沉积特征与控水规律研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2018.
- [5] 楼章华,程军蕊,金爱民.沉积盆地地下水动力场特征研究:以松辽盆地为列[J].沉积学报,2006,24(2):193-201.
LOU Zhanghua, CHENG Junrui, JIN Aimin. Origin and evolution of the hydrodynamics in sedimentary basins: a case study of Songliao Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(2):193-201.
- [6] JAYASINGHA P, PITAWALA A. Evolution of coastal sandy aquifer system in Kalpitiya Peninsula, Sri Lanka: sedimentological and geochemical approach [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(11):4925-4937.
- [7] 陈新军,蔡希源,纪友亮,等.塔中奥陶系大型不整合面与风化壳岩溶发育[J].同济大学学报(自然科学版),2007,35(8):1122-1127.
CHEN Xinjun, CAI Xiyuan, JI Youliang, et al. Relationship between large scale unconformity surface and weathering crust Karst of Ordovician in Tazhong [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(8):1122-1127.
- [8] 李 东,刘生优,张光德,等.鄂尔多斯盆地北部典型顶板水害特征及其防治技术[J].煤炭学报,2017,42(12):3249-3254.
LI Dong, LIU Shengyou, ZHANG Guangde, et al. Typical roof water disasters and its prevention & control technology in the north of Ordos Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(12):3249-

- 3254.
- [9] 薛锐,赵俊峰,闫占冬,等.鄂尔多斯盆地北部侏罗系直罗组沉积特征与演化[J].古地理学报,2017,19(6):999-1012.
XUE Rui, ZHAO Junfeng, YAN Zhandong, *et al.* Sedimentary characteristics and evolution of the Jurassic Zhiluo Formation in northern Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2017, 19 (6):999-1012.
- [10] 李斌,胡博文,罗群.中、上扬子地区构造层序地层及原型盆地沉积环境演化[J].煤炭科学技术, 2018, 46(2):19-27.
LI Bin, HU Bowen, LUO Qun. Tectonic sequence stratigraphy and sedimentary environment evolution of prototype basin in middle and upper Yangtze Region [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(2):19-27.
- [11] 李超峰,刘英锋,李抗抗.导水裂隙带高度井下仰孔探测装置改进及应用[J].煤炭科学技术, 2018, 46(5):166-172.
LI Chaofeng, LIU Yingfeng, LI Kangkang. Equipment improvement and application on determining height of water flowing fractured zone in upward slant hole [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(5):166-172.
- [12] 吴光华,焦养泉,郝运轻.华北地区东部寒武系-奥陶系沉积相特征及其对烃源岩的控制作用[J].油气地质与采收率, 2008, 15(4):1-4, 111.
Wu Guanghua, Jiao Yangquan, Hao Yunqing. Sedimentary facies and the control on hydrocarbon source rocks of Cambrian-Ordovician in the east of north China [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(4):1-4, 111.
- [13] 董书宁.对中国煤矿水害频发的几个关键科学问题的探讨[J].煤炭学报, 2010, 35(1):66-71.
DONG Shuning. Some key scientific problems on water hazards frequently happened in China's coal mines. [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1):66-71.
- [14] 董书宁,刘其声.华北型煤田中奥陶系灰岩顶部相对隔水段研究[J].煤炭学报, 2009, 34(3):289-292.
DONG Shuning, LIU Qisheng. Study on relative aquiclude existed in middle-Ordovician limestone top in north China coalfield [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(3):289-292.
- [15] 武强,贾秀,曹丁涛,等.华北型煤田中奥陶统碳酸盐岩古风化壳天然隔水性能评价方法与应用[J].煤炭学报, 2014, 39(8):1735-1741.
WU Qiang, JIA Xiu, CAO Dingtao, *et al.* Impermeability evaluation method and its application on the ancient weathering crust of carbonate in middle Ordovician system in north China coalfield [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8):1735-1741.
- [16] 刘其声.关于突水系数的讨论[J].煤田地质与勘探, 2009, 37(4):34-37, 42.
LIU Qisheng. A discussion on water inrush coefficient [J]. Coal Geology & Exploration, 2009, 37(4):34-37, 42.
- [17] 郑士田.两淮煤田煤层底板灰岩水害区域超前探查治理技术[J].煤田地质与勘探, 2018, 46(4):142-146.
ZHENG Shitian. Advanced exploration and control technology of limestone water hazard in coal seam floor in Huainan and Huaibei coalfields [J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(4):142-146.
- [18] 董书宁,王皓,张文忠.华北型煤田奥灰顶部利用与改造判别准则及底板破坏深度[J].煤炭学报, 2019, 44(7):2216-2226.
DONG Shuning, WANG Hao, ZHANG Wenzhong. Judgment criteria with utilization and grouting reconstruction of top Ordovician limestone and floor damage depth in north china coal field [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7):2216-2226.
- [19] 刘再斌.基于孔型组合的煤矿水害区域治理模式研究[J].煤炭科学技术, 2018, 46(7):184-189.
LIU Zaibin. Study on water hazard regional control pattern based on different borehole type combination [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(7):184-189.
- [20] 郑士田.地面定向钻进技术在煤矿陷落柱突水防治中的应用[J].煤炭科学技术, 2018, 46(7):229-233.
ZHENG Shitian. Application of ground directional borehole technology to control prevention Karst collapsed column water inrush in coal mines [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(7):229-233.