



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)



移动扫码阅读

孙长彦,杨宗楠,杨恒.西山煤田山西组震积岩特征及其煤系气勘探开发意义[J].煤炭科学技术,2021,49(9):136-144. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.09.020
 SUN Changyan, YANG Zongnan, YANG Heng. Seismites characteristics and significance of exploration and development from coal measure gas of Shanxi Formation in Xishan Coalfield [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 136-144. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.09.020

西山煤田山西组震积岩特征及其煤系气勘探开发意义

孙长彦^{1,2},杨宗楠¹,杨恒¹

(1.河南理工大学 资源环境学院,河南 焦作 454000;2.中原经济区煤层(页岩)气河南省协同创新中心,河南 焦作 454000)

摘要:太原市西山煤田山西组地质勘探历程较早,但煤层气勘探开发起步较晚,虽然近年来投产的煤层气井不断增加,但整体产气量并不理想。西山煤田山西组2煤顶板、3煤顶板和1煤底板分别发育有3层震积岩,为查明震积岩特征及其煤系气勘探开发意义,开展了露头系统观测和室内测试分析。结果表明:①山西组共识别出同沉积断裂层、震积角砾岩、阶梯状小断层、震褶岩、液化均一层、球枕状构造、泄水构造、生物逃逸构造等8种震积构造,3层震积岩具有不同的垂向序列;②早二叠世晚期频发的地震事件对泥炭沼泽演化具有抑制作用,主要表现为破坏了地壳沉降速率和泥炭堆积速率的平衡,使得泥炭沼泽的可容纳空间减少,由此造成了泥炭沼泽的消亡,地震事件是造成山西组煤层相对较薄且分布极不稳定的主因;③2煤顶板震积岩形成于泥炭沼泽演化末期,总有机碳含量为1.22%~13.73%,平均为4.51%,是较好的烃源岩;孔隙度为2.53%~7.81%,平均为4.22%,地震作用形成的阶梯状小断层、震积角砾岩等构造增大了泥页岩的孔隙度,为煤系气的赋存提供了空间,为其运移提供了通道;脆性矿物含量为32.1%~75.9%,平均50.6%,震积岩可改造性较强;④在煤系气开发中,2煤可与顶板震积岩联合改造,这种联合改造可充分利用煤层的气资源优势和震积岩的可改造优势,突破以往在煤层中建立流态运移产出通道的技术瓶颈。

关键词:震积岩;煤系气;地质勘探;西山煤田

中图分类号:P618.11 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2021)09-0136-09

Seismites characteristics and significance of exploration and development from coal measure gas of Shanxi Formation in Xishan Coalfield

SUN Changyan^{1,2}, YANG Zongnan¹, YANG Heng¹

(1. School of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Collaborative Innovation Center of Coalbed Methane and Shale Gas for Central Plains Economic Region, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The geological exploration history of Shanxi Formation in Xishan Coalfield of Taiyuan City is earlier, while the exploration and development of coalbed methane (CBM) started late. Although the number of CBM wells put into production is increasing in recent years, the overall gas production did not achieve the desired effect. There are three layers of seismites developed in roof of No.2 coal, No. 3 coal and bottom of No. 1 coal in Xishan Coalfield, respectively. In order to study the characteristics and its significance of exploration and development in coal measure gas of the seismites of Shanxi Formation in Xishan Coalfield in Taiyuan City, outcrop observation, sampling and laboratory testing were carried out. The results show that: ① there are 8 kinds of deformation structures in the Shanxi Formation, including synsedimentary faults, seismogenic breccia, stepped small faults, seismic fold rocks, liquefy homogeneous layer, ball-and-pillow structures, water escape structures and biological escape into caves. The three layers of seismites have different vertical sequence. ② The frequent seismic events at the late early Permian in the study area inhibited the evolution of peat bogs. The balance between crustal subsidence rate and peat accumulation rate is destroyed, which reduces the accommodating space of peat bogs, thus leading to the extinction of peat bogs. Seismic events are the main reason for the relatively thin and unstable coal seam distribution in Shanxi Formation in Xishan

收稿日期:2021-03-25;责任编辑:曾康生

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41472127);河南省自然科学基金资助项目(182300410004)

作者简介:孙长彦(1987—),男,山东临沂人,讲师,博士。Tel:0391-3986981,E-mail:schy@hpu.edu.cn

Coalfield. ③ Seismites on the roof of No.2 coal were formed at the late of peat swamp evolution, and its total organic carbon contents are ranges from 1.22% to 13.73%, with an average of 4.51%, the seismites are a better source rock. The porosity of seismites is ranges from 2.53% to 7.81%, with an average of 4.22%, the small stepped faults and seismic breccia formed by earthquakes increased the porosity of mud shale, and it's also provided space for occurrence and migration of coal measure gas. The brittle-mineral contents of seismites are ranges from 32.1% to 75.9 %, with an average of 50.6%, showing strong reformability. ④ In the development of coal measure gas, the No.2 coal can be combined stimulation with roof seismites, which can make full use of the advantage of coal seam gas resources and seismites fracability, and also break through the technical bottleneck of establishing flow migration and output channel.

Key words: seismites; coal measure gas; geology exploration; Xishan Coalfield

0 引言

震积岩是具备地震记录的一组岩石的总称^[1]。1969年Seilacher首次提出震积岩的概念,用于表示构造活动区未固结的细粒水下沉积物受到地震活动改造的再沉积层^[2]。1984年《Marine Geology》出版了“地震与沉积作用”专辑,对地震事件沉积进行了系统的总结^[3]。随后,在中国也掀起了震积岩研究热潮,1987年龚一鸣首次将“Seismite”翻译成“震积岩”^[4],1988年宋天锐首先对华北元古代震积岩进行研究,并建立了已固结碳酸盐岩的震积序列^[5],1992年吴贤涛等在陆相地层中识别出震积岩,并建立了碎屑岩原地系统的地震液化序列^[6],1994年乔秀夫等建立了碳酸盐岩震动液化地震序列^[7]。随后许多地质学家先后对震积岩的识别标志、垂向序列、触发机制等进行系统性研究^[8-9]。

地震事件沉积与油气藏形成和演化之间存在内在的联系,震积岩作为一种潜在的油气储层,已经逐渐被认可^[10-11]。早在1989年,葛宝勋等^[12]就在含煤岩系中首次发现震积岩,并探讨了地震作用对泥炭沼泽演化的影响。其后研究表明,地震作用形成的震裂角砾岩是一种较好的储集层^[13];并且原地相震积岩与异地相震积岩之间规模不等的震积不整合面可作为油气运移通道^[14]。同时震裂缝附近常发育溶孔,对改善储层的储集性能起到了建设性作用,同时发生地震的断裂系统为油气的运移提供通道,这为在地震断裂系统附近寻找低渗透砂岩中的高渗储层提供了新的方向^[15]。因此,开展震积岩的研究具有重大的油气地质意义。

太原市西山煤田是华北石炭一二叠系煤系标准剖面。1870年,德国地质学家李希霍芬就曾对太原市西山煤田含煤岩系进行研究,随后的近130年里,许多地质工作者先后对太原市西山煤田含煤岩系进行了大量的地质研究^[16]。21世纪以来,地质工作者先后对太原市西山煤田含煤岩系进行了煤层气地质学^[17-18]、煤地球化学^[19]、含煤系统地质年代

学^[20]、陷落柱特征及成因^[21]等方面的研究,但未见震积岩相关报道,笔者在厚度仅为50 m的山西组发现了3组震积岩,且其中2组震积岩分别位于2煤和3煤顶板。为此,拟在查明震积岩特征、垂向序列的基础上,探讨地震事件与泥炭沼泽演化的关系和震积岩的煤系气勘探开发意义,旨在为本区煤系气勘探开发提供支撑。

1 地质背景

1.1 构造背景

太原市西山煤田位于华北克拉通中部造山带中部,现今构造位置为吕梁山脉中段东缘,沁水盆地构造赋煤带的西北部,晋中新生代断陷盆地西侧,为1个东西北三面向内倾斜、而南面开口的轴向偏西不对称复式向斜构造盆地,其构造形态呈“似火炬状”和“似倒梨状”东缓西陡的复式向斜盆地(图1)^[19]。

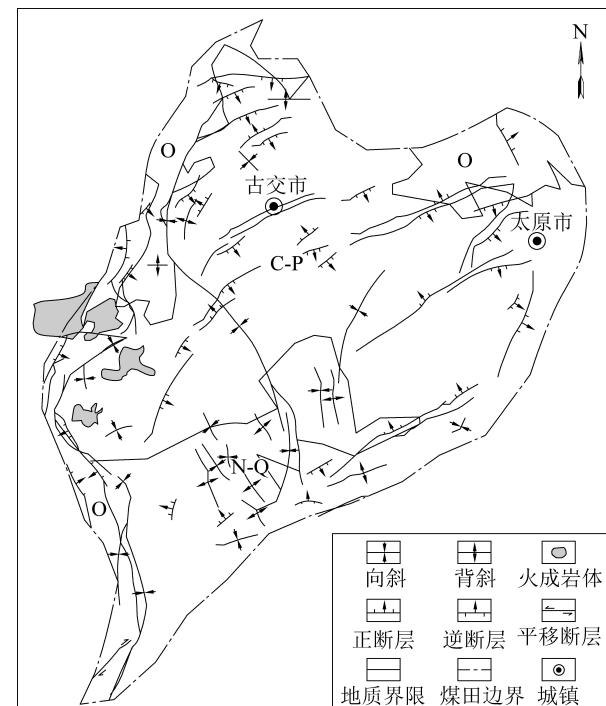


图1 西山煤田构造纲要

Fig.1 Structural outline of Xishan Coalfield

煤田主要构造格架为南北向构造、北东东向平行断裂及东西向构造,其中南北向构造是控制煤田形态的重要构造形式,东西向构造以褶皱和断裂形式产出^[16]。

1.2 地质演化史及地层特征

中奥陶世末期,华北地台南北两侧的板块俯冲碰撞,使得华北地台整体隆升,导致了上奥陶统一下石炭统的沉积间断^[16]。晚石炭世—早二叠世早期,海侵由北东向往南西向进行,华北地台继续接受沉积,沉积了多层巨厚层状的煤层^[22]。早二叠世晚期—中二叠世,由于华北地台北部的古亚洲洋闭合的俯冲碰撞,致使

的华北地台北部的持续抬升,形成了以三角洲为主的沉积体系^[23]。晚二叠世,随着海退的进行,以及秦岭微板块与华北板块的碰撞,华北盆地部分地区隆起成山,形成一套干旱气候条件下的河湖相沉积,华北盆地进入克拉通内陆凹陷盆地演化阶段^[16]。

西山煤田地层由老至新依次是奥陶系、石炭系、二叠系、三叠系、古近系、新近系和第四系^[16]。山西组在太原市西约10 km的西铭井田出露良好,山西组厚约50 m,主要由浅灰色碎屑岩、暗色泥岩和煤层组成,与上覆中二叠统下石盒子组、下伏下二叠统太原组呈整合接触(图2)。

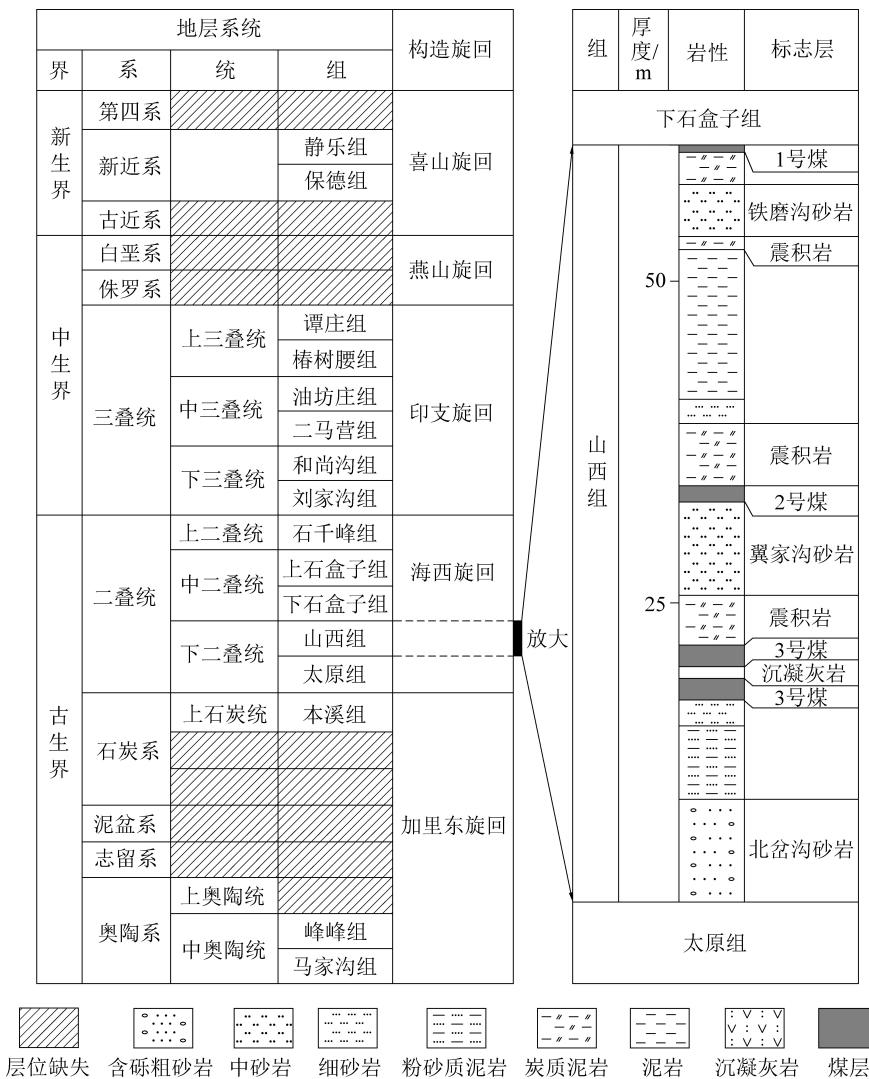


图2 太原市西山煤田山西组综合柱状

Fig.2 Columnar section of Shanxi Formation in Xishan Coalfield, Taiyuan City

2 震积岩识别标志

不同强度的地震活动可以引起不同类型、不同固结程度的沉积物产生形态各异的非正常沉积构造,进而形成具有特殊震积构造的震积岩^[24]。前人对震积岩的识别标志进行了总结^[25-26],这些震积构

造单独来看可能有多种形成机制,但这些震积构造的组合特征对其形成机制判定有着重要帮助^[27]。西山煤田山西组存在大量非正常沉积的岩石类型,通过对该区区域构造环境分析和野外露头观测,山西组共识别出同沉积断层、震积角砾岩、阶梯状小断层、震褶岩、液化均一层、球枕构造、泄水构造、生物

逃逸构造等8种非正常沉积构造,这些构造组合特征充分说明这些非正常沉积岩石与地震活动有关。

2.1 同沉积断层

同沉积断层是指未完全固结的沉积物受地震振动和液化共同作用产生一系列断裂面不规则的高角度正断层,一般以张性断层为主^[24]。西山煤田山西组同沉积断层切穿了泥岩、粉砂质泥岩和粉砂岩岩层,断层两盘可见明显未固结沉积物在断层作用下形成的拖拽痕迹(图3a)。前人物理模拟试验研究表明,强震期斜坡地带由于震动产生的地震剪应力大于斜坡的抗剪强度,使得发生断阶滑塌,形成一个

或多个与斜坡坡度相同的同沉积断层^[12]。

2.2 阶梯状小断层

阶梯状小断层是震积作用过程中形成的以张性断裂为主的小规模正断层^[44]。西山煤田山西组阶梯状小断层为成组出现的高角度张性正断层,延伸距离仅数厘米,断层发育在薄层粉砂岩之中,薄层粉砂岩上覆及下伏岩层均为泥岩,阶梯状小断层被严格限制在薄层的粉砂岩层之中(图3b)。其成因为地震引起液化作用停止后,沉积物重新压实使其自身体积变小,导致沉积物表面差异性下沉而形成一些阶梯状小断层^[10,28]。

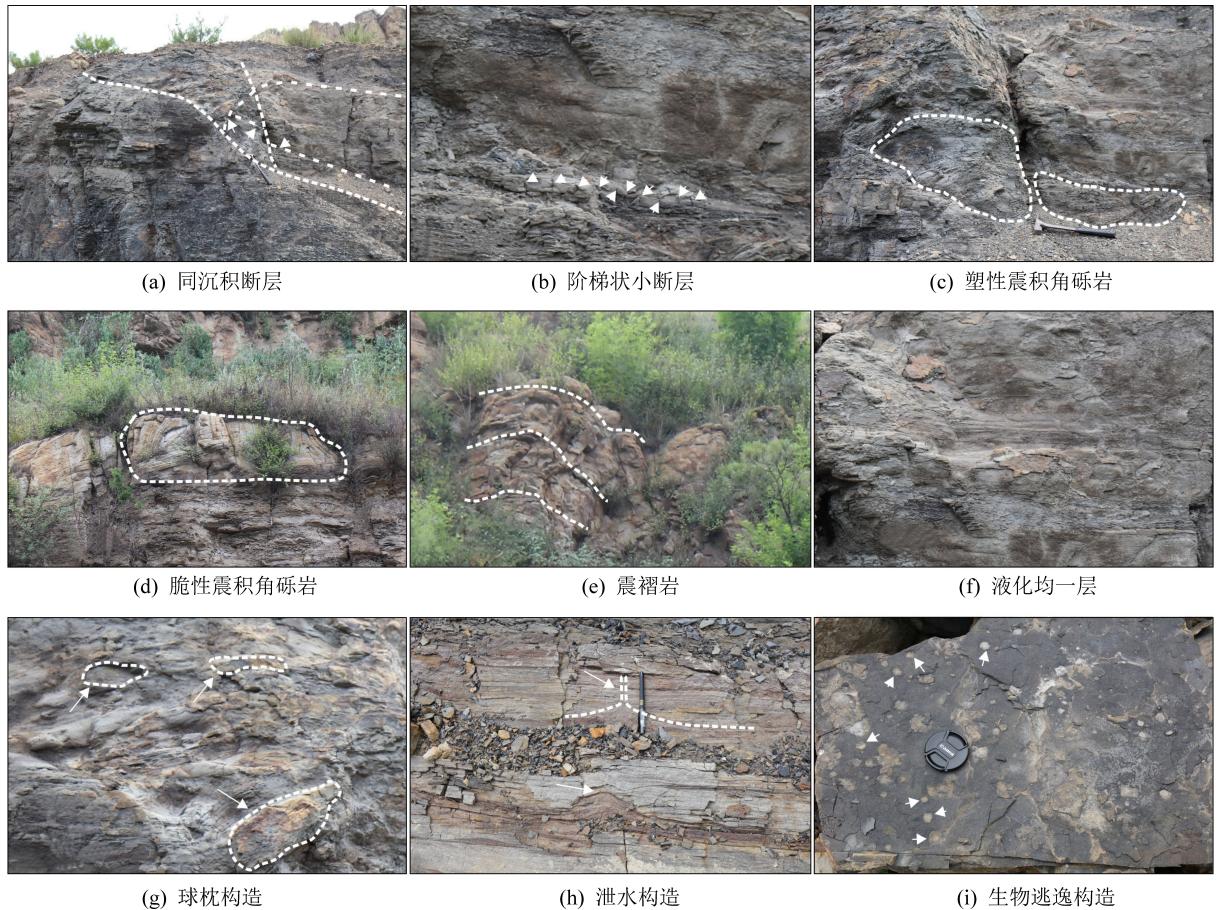


图3 太原市西山煤田山西组震积岩特征

Fig.3 Seismite characteristics of Shanxi Formation in Xishan Coalfield, Taiyuan City

2.3 震积角砾岩

震积角砾岩是指地震强烈的震动作用使得已经有一定深度固结的沉积物震碎震裂的产物^[29]。西山煤田山西组共识别出2种类型的震积角砾岩,分别是具撕裂状和藕断丝连痕迹的塑性角砾岩(图3c)和角砾呈脆性破裂特征、无磨圆和分选的脆性角砾岩(图3d),由此形成的裂缝宽可达数厘米,主要被上覆或内部的泥质物质充填,部分后期被方解石所充填,这些裂缝系统对储集层物性和运移通道均有重要的研究意义。

2.4 震褶岩

震褶岩也称揉皱层理,主要发育于中薄层粉砂岩、粉砂质泥岩及泥岩中,在强地震震动作用生成的异常高的孔隙水压力条件下,面状构造发生不规则揉皱弯曲变形所形成的一系列形态各异的小型—中型紧闭褶曲^[24]。西山煤田山西组震褶岩主要发育在震积角砾岩之上的中层状粉砂岩之中,褶皱形态多种多样,但一般局限于某一层内(图3e)。

2.5 液化均一层

液化均一层是指在强地震震动作用形成的异

常高的孔隙水压力条件下,可塑性沉积颗粒发生液化重组,原生的沉积构造被完全破坏而形成的。西山煤田山西组液化均一层发育在震褶岩之上的粉砂岩层中,原始的水平纹层基本被破坏并形成均一化层(图3f)。液化均一层是较强地震作用的响应。

2.6 球枕构造

球枕构造是强地震剪切力诱发的地震液化变形构造,一般发育在砂泥岩互层之中,一般是由于固结程度稍高,相对难易被地震液化作用的砂岩层,在密度差、重力作用、地震震动三者的共同作用下产生差异压实,砂质沉积物发生垂向运动,脱落形成球枕构造^[30]。西山煤田山西组球枕构造发育于泥岩夹中薄层粉砂岩、细砂岩层之中,一般为泥岩层对粉砂岩、细砂岩层挤压,使得粉砂岩、细砂岩层球枕化(图3g)。当泥岩层厚度较大时,部分粉砂、细砂球枕体会下陷到泥岩层中,并在围岩的作用下圆化,形成假结核。类似成因的构造还有火焰状构造等,一般砂岩层较厚或者地震烈度稍低时容易形成火焰状构造。球枕体的体积和大小均取决于液化层的厚度,而宽度及长度则取决于负载体的陷落深度^[40]。

2.7 泄水构造

泄水构造常发育于中薄层粉砂岩中,主要是在地震震动作用下孔隙水逃逸形成的通道,属水塑性褶皱。西山煤田山西组泄水构造发育于中层状粉砂岩、粉砂质泥岩之中,通道垂直于层面,通道底部两边的纹层沿泄水方向弯曲呈碟状,一般高10~20 cm(图3h)。强震期震动引起剪切力促使砂粒滑移而改变排列状态,应力由砂骨架转移至水,引起超孔隙水压力。当全部应力转移至孔

表1 西山煤田山西组沉积构造及其对应里氏震级强度^[46]

Table 1 Sedimentary structures and corresponding Richter scale intensity of Shanxi Formation in Xishan Coalfield^[46]

沉积构造	描述	形成机制	里氏震级
液化脉	液化层侵入未变形岩层	液化层向孔隙压力小的层流动	5.0
球枕构造	砂质沉积物垮塌至未固结泥质沉积物中	地震振动导致砂质沉积物失稳	6.0~6.5
液化角砾	不同液化层被穿刺成角砾碎块状	液化层流动侵位	7.0~7.5
阶梯状小断层	1组或多组近平行排列的正断层,断层面倾角较陡	地震活动引发的张应力	8.0

序列1自下至上为:A下伏未震层、C震积角砾岩、E震褶岩、J上覆正常沉积段(图4a)。地震能量将连续3层中厚层状且具一定固结程度的细粒砂岩改造形成震积角砾岩,且震积序列不完整,推断该时期最少连续发育有3期地震,震积角砾岩发育说明古地震震级可达7.0~7.5级。

隙水后,超孔隙水压力等于饱和砂所承受的总应力,在完全水平的砂层中便产生了液化,这时砂本身的质量也加到水上,砂与水混然一体形成了悬液,产生喷砂冒水现象。地面之下形成一系列喷砂孔道,即泄水构造^[11]。

2.8 生物逃逸构造

生物逃逸构造指灾害来临时,底栖生物为躲避灾害而向下掘穴而形成的。西山煤田山西组生物逃逸构造发育于粉砂质泥岩之中,在平面上呈点状,直径一般介于0.5~2.0 cm,层内垂直于层面发育,高一般介于6~15 cm,潜穴后期被泥质沉积物充填,其成分与上覆正常沉积段一致,与围岩有明显不同(图3i)。由于生物对潜穴壁的加工作用,使潜穴壁具有较强的支撑能力,进而使得潜穴内部的后期充填物难以充分的压实,充填物内部具有相对良好的孔隙结构。

3 震积岩垂向序列

震积岩作为一种特殊的事件沉积岩,其震积序列反映了沉积物和地震作用的耦合,因此震积岩在垂向上具有一套独特的震动液化垂向序列,在侧向上也无明显偏移。由于地震震级、震域范围、持续时间、剖面位置、沉积物种类和固结程度等因素的不同,沉积物在剖面结构上所反映出的震积沉积构造类型及其组合差别较大^[24]。

根据震积的变形特征,结合前人建立的震积岩里氏震级判别表^[30](表1),可以查明地质历史时期地震里氏震级。

西山煤田山西组共识别出3种震积岩序列,分别是位于1号煤底板的序列1、2号煤顶板的序列2和3号煤顶板的序列3(图4)。

表1 西山煤田山西组沉积构造及其对应里氏震级强度^[46]

序列2自下至上发育有:A下伏未震层、B同沉积断裂、C震积角砾岩、D阶梯状小断层、E震褶岩、F液化均一层、G球枕构造层、H泄水构造层、I生物逃逸层、J上覆正常沉积段(图4b)。相序较为完整说明了此次地震为1期,但发育有同沉积断层且震积岩厚度在3 m以上说明古震级在8级

以上。

序列3自下至上为:A下伏未震层、D阶梯状小断层、F液化均一层、G球枕构造层、J上覆正常沉积

震积单元	垂向序列	典型构造	实例
J 正常 沉积段			—
E 震褶岩		液化变形构造	
C 震积 角砾层		震积 角砾岩	
A 下伏未 震层			

(a) 序列1

震积单元	垂向序列	典型构造	实例
J 正常 沉积段		—	—
G 球枕 构造层		球枕构造	
F 均一 液化层		液化变形构造	
D 阶梯状 断层		阶梯状小 断层	
A 下伏未 震层		—	

(c) 序列3

段(图4c)。液化均一层和球枕构造层厚度达2 m以上,这说明该时期发育多期地震,地震里氏震级总体较低,多为6.0~6.5级。

震积单元	垂向序列	典型构造	实例
J 正常 沉积段		—	—
I 生物 逃逸层		生物逃逸 构造	
H 泄水 构造层		泄水 构造	
G 球枕 构造层		球枕 构造	
F 均一 液化层		液化变形 构造	
E 震褶岩		液化变形 构造	
D 阶梯状 断层		阶梯状小 断层	
C 震积 角砾层		震积 角砾岩	
B 同沉积 断层		同沉积 断层	
A 下伏未 震层		—	

(b) 序列2

图4 西山煤田山西组震积岩垂向序列综合模式

Fig.4 Synthetical model of seismite sequences of Shanxi Formation in Xishan Coalfield

4 地震事件与泥炭沼泽演化关系

早二叠世处于全球冰期—间冰期转换期,海水在华北地台由北东向往南西向海侵,华北地台整体接受沉积,且在海西期构造运动的影响下,西山煤田在早二叠世形成了以台地、障壁岛、泻湖、潮坪、泥炭沼泽为主体的复合沉积体系^[23]。早二叠世早期,在海侵事件的主导下,泥炭沼泽具有稳定的可容纳空间,西山煤田太原组形成了多层巨厚层煤层。早二叠世晚期,海西期构造活动对泥炭沼泽演化具有重要的影响,山西组煤层以薄层—中厚层状为主,且分布极不稳定。

海西期构造活动主要表现为华北板块北部古亚洲洋处于闭合期间,板块俯冲碰撞导致了地震、火山等灾害地质事件的频发^[47]。西山煤田下二叠统山西组50余m的地层发育了3套震积岩、1套火山事

件沉积层(图2)充分说明了早二叠世晚期研究区地壳活动异常活跃。异常活跃的地壳活动抑制了泥炭沼泽的发育,直接证据为煤层和炭质泥岩的直接顶板发育有震积岩,煤层中发育有火山事件沉积层。

西山煤田早二叠世晚期地震事件对泥炭沼泽发育的抑制作用表现为破坏了地壳沉降速率和泥炭堆积速率的平衡,导致泥炭沼泽的可容纳空间减少,使得泥炭沼泽的发育没有了物质基础,并由此造成了泥炭沼泽的消亡;火山事件沉积对泥炭沼泽发育的抑制作用表现为火山灰掩埋泥炭沼泽,破坏大气环境,影响植物的生长。

总体上,地震事件对泥炭沼泽演化的破坏作用是长期的,火山事件对泥炭沼泽的抑制作用是短期的,但早二叠世晚期异常活跃的地壳活动使得泥炭沼泽很难持续长期演化,因此,山西组煤层以薄层—中厚层状为主,且分布极不稳定。

5 煤系气勘探开发意义

太原市西山煤田下二叠统山西组三组震积岩均位于煤层或炭质泥岩的顶板,在煤系气的勘探开发中属于重点层位,因此,以位于2号煤顶板的震积岩序列2为例,对其各震积单元的总有机碳含量、孔隙度以及脆性矿物含量进行逐层测试,查明其特征。

1) 总有机碳含量。采用美国LOCE公司的CS-200型碳硫分析仪进行总有机碳含量测试,结果表明(表2),震积岩序列2的下伏未震层的总有机碳质量分数为4.63%,上覆正常沉积段的总有机碳质量分数为4.32%,其他各震积单元的总有机碳质量分数为1.22%~13.73%,平均为4.51%。总有机碳含量是评价烃源岩丰度的重要指标,也是衡量烃源岩生烃强度和生烃量的重要参数。一般认为页岩气藏总有机碳含量下限标准为0.4%。岩石的有机碳含量越高,表示生烃的物质基础越充足,单从这方面来分析,西山煤田山西组2号煤顶板震积岩属于较好的烃源岩。

表2 西山煤田山西组2号煤顶板震积岩特征

Table 2 Seismite characteristics on roof of No.2 coal seam of Shanxi Formation in Xishan Coalfield

震积单元	岩性	总有机碳含量/%	孔隙度/%	脆性矿物含量/%
J	泥岩	4.32	2.41	52.15
I	粉砂岩质泥岩	1.22	3.13	41.61
H	粉砂岩	1.73	3.42	32.10
G	泥岩	4.83	2.53	49.63
F	泥岩	13.73	4.73	75.90
E	粉砂质泥岩	3.32	3.72	54.31
B、C、D	泥质粉砂岩	2.21	7.81	50.25
A	泥岩	4.63	2.31	53.03

2) 孔隙度。采用美国康塔仪器公司的PoreMaster-33压汞仪进行孔隙度测试,结果表明(表2),震积岩序列2的下伏未震层的孔隙度为2.31%,上覆正常沉积段的孔隙度为2.41%,其他各震积单元的孔隙度为2.53%~7.81%,平均为4.22%。震积岩层孔隙度较下伏未震层和上覆正常沉积段明显增大,震积作用对孔隙度具有明显的改善作用。震积作用形成的同沉积断层可沟通下伏煤层,为煤系气的运移提供通道,阶梯状断层、震积角砾岩、震褶岩、球枕构造、泄水构造以及生物逃逸构造等形成的震积岩层中的孔缝系统可以在一定程度上改善了其储集性能,为煤系气的赋存提供了空间。

3) 脆性矿物含量。采用日本理学公司的D/max-

ra型X射线衍射仪进行各类矿物的分析测定,结果表明:震积岩矿物成分主要为石英、长石、黏土矿物、碳酸盐岩矿物、菱铁矿。脆性矿物包括石英、长石、碳酸盐岩矿物和菱铁矿。下伏未震层和上覆正常沉积段脆性矿物含量分别为53.03%和52.15%。震积岩各震积单元脆性矿物含量为32.1%~75.9%,平均50.6%。脆性矿物平均含量较下伏和上覆地层变化不大,但脆性矿物含量最高可达75.9%说明在液化过程中,脆性矿物向液化均一层运移。震积岩脆性矿物含量相对较高,可改造性较强,有利于后期压裂过程中裂缝的形成和扩展。在煤系气开发中,2号煤可与顶板震积岩联合改造,这种联合改造可充分利用煤层的气资源优势和震积岩的可改造优势,突破以往在煤层中建立流态运移产出通道的技术瓶颈,可以为西山煤田二叠系太原组、山西组的煤系气开发开辟了新的途径。

6 结 论

1)首次在西山煤田山西组识别出三组震积岩,识别出同沉积断裂、阶梯状小断层、震积角砾岩、震褶岩、液化均一层、枕状构造、泄水构造、生物逃逸潜构造等8种震积岩标志。

2)建立了西山煤田山西组碎屑岩原地系统的地震液化系列,完整的垂向序列自下而上发育有下伏未震层、同沉积断裂段、震积角砾岩段、阶梯状小断层段、震褶岩段、液化均一层段、球(枕)状构造层段、泄水构造层段、生物逃逸层段、上覆正常沉积段。

3)查明了西山煤田早二叠世晚期地震事件与泥炭沼泽演化的关系。研究区早二叠世晚期地震事件对泥炭沼泽演化主要表现为抑制作用,破坏了地壳沉降速率和泥炭堆积速率的平衡,致使泥炭沼泽的可容纳空间减少,使得泥炭沼泽的发育没有了物质基础,并由此造成了泥炭沼泽的消亡。研究区早二叠世晚期频发的地震事件是导致研究区山西组煤层相对较薄,且分布极不稳定的主因。

4)西山煤田3组震积岩均位于煤层或炭质泥岩之上,2号煤顶板震积岩的总有机碳含量、孔隙度和脆性矿物含量测试表明:震积岩本身作为一种较好的烃源岩;震积作用产生的微裂缝、微断层等裂缝系统一方面可以沟通下伏煤层,作为煤系气运移的通道,另一方面可以改善岩层原始孔隙度,增大渗透率;震积岩本身脆性矿物含量较高,可改造性较强。在煤系气开发中,震积岩与煤层联合改造,可充分利用煤层的气资源优势和震积岩的可改造优势,突破以往在煤层中建立流态运移产出通道的技术瓶颈。

参考文献(References):

- [1] SHI G R, DU Y S, GONG Y M. Soft-sediment deformation structures interpreted as seismite from the Middle Permian of the southern Sydney Basin, southeastern Australia [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2007, 54: 861–874.
- [2] SEILACHER A. Fault-grade bed interpreted as seismites [J]. *Sedimentology*, 1969, 13(1/2): 155–159.
- [3] CITA M B, LUCCHI R, SEILACHER A, et al. Seismicity and sedimentology [J]. *Marine Geology*, 1984, 55(1/2): 1–161.
- [4] 龚一鸣. 事件沉积[J]. 地质科技情报, 1987, 6(3): 21–26.
GONG Yiming. Event deposits [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 1987, 6(3): 21–26.
- [5] 宋天锐. 北京十三陵前寒武纪碳酸盐岩地层中的一套可能的地震—海啸序列[J]. 科学通报, 1988, 33(8): 609–611.
SONG Tianrui. A possible series of earthquakes and tsunamis in the Pre-Cambrian carbonate strata of the Ming tombs in Beijing [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1988, 33(8): 609–611.
- [6] 吴贤涛, 尹国勋. 四川峨眉晚侏罗世湖泊沉积中震积岩的发现及其意义[J]. 沉积学报, 1992, 10(3): 19–24.
WU Xiantao, YIN Guoxun. Features and significance of seismites from Upper Jurassic lacustrine deposits of Emei, Sichuan [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1992, 10(3): 19–24.
- [7] 乔秀夫, 宋天锐, 高林志, 等. 碳酸盐岩震动液化地震序列[J]. 地质学报, 1994, 68(1): 16–34.
QIAO Xiufu, SONG Tianrui, GAO Linzhi, et al. Seismic sequence in carbonate rocks by vibrational liquefaction [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1994, 68(1): 16–34.
- [8] 杜远生. 中国地震事件沉积研究的若干问题探讨[J]. 古地理学报, 2011, 13(6): 581–586.
DU Yuansheng. Discussion about studies of earthquake event deposit in China [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2011, 13(6): 581–586.
- [9] 冯增昭, 鲍志东, 郑秀娟, 等. 中国软沉积物变形构造及地震岩研究简评[J]. 古地理学报, 2017, 19(1): 7–12.
FENG Zengzhao, BAO Zhidong, ZHENG Xiujuan, et al. Researches of soft-sedimentation structures and seismites in China: a brief review [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2017, 19(1): 7–12.
- [10] 夏青松, 田景春. 鄂尔多斯盆地南部上三叠统延长组震积岩的发现及地质意义[J]. 沉积学报, 2007, 25(2): 246–252.
XIA Qingsong, TIAN Jingchun. Characteristics and geological significance of seismites of the Yanchang Formation, Upper Triassic, Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(2): 246–252.
- [11] 杨仕维, 李建明. 震积岩特征综述及地质意义[J]. 岩性油气藏, 2008, 20(1): 89–94.
YANG Shiwei, LI Jianming. Characteristics and geological significance of seismites [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2008, 20(1): 89–94.
- [12] 葛宝勋, 刘祖发. 含煤岩系中震积岩的首次发现及其特征[J]. 岩相古地理, 1989, 43(5): 9–14.
GE Baoxun, LIU Zufa. The first discovery and characteristics of seismites in the coal-bearing strata [J]. *Sedimentary Geology*, 1989, 43(5): 9–14.
- [13] 李洁, 陈洪德, 林良彪, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组古地震效应及其地质启迪[J]. 地质论评, 2010, 56(4): 480–489.
LI Jie, CHEN Hongde, LIN Liangbiao, et al. Effect of ancient earthquake and its geological significance of upper Triassic Yanchang Formation in Southeast Ordos Basin [J]. *Geological Review*, 2010, 56(4): 480–489.
- [14] 盛军, 李纲, 杨晓菁, 等. 柴达木盆地茫崖凹陷尕斯库勒油田新近系上干柴沟组震积岩特征及其地质意义[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2019, 49(1): 155–164.
SHENG Jun, LI Gang, YANG Xiaojing, et al. The characteristics and geological significance of the Neogene Upper Ganchaigou formation seismites in Gasikule Oilfield, Mangya Depression, Qaidam Basin [J]. *Journal of Northwest University(Natural Science Edition)*, 2019, 49(1): 155–164.
- [15] 刘建宁, 何幼斌, 王宁, 等. 济阳坳陷惠民凹陷沙三段地震事件沉积特征及地质意义[J]. 岩性油气藏, 2020, 32(2): 14–23.
LIU Jianning, HE Youbin, WANG Ning, et al. Sedimentary characteristics and geological significance of earthquake events of Sha 3 member in Huimin Sag, Jiyang Depression [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2020, 32(2): 14–23.
- [16] 赵金贵. 太原西山礦厂沟C-P煤系沉积于构造地貌解析[M]. 北京: 地质出版社, 2018.
- [17] 夏鹏, 曾凡桂, 宋晓夏. 西山煤田古交矿区煤层气分布模式及开发效果评价[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(1): 245–254.
XIA Peng, ZENG Fanggui, SONG Xiaoxia. Evaluation on distribution mode and development effect of coalbed methane in Gujiao Mining Area of Xishan Coalfield [J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(1): 245–254.
- [18] 夏鹏, 曾凡桂, 宋晓夏, 等. 山西古交矿区煤层气组成特征及成因探讨[J]. 煤炭学报, 2019, 44(9): 2824–2832.
XIA Peng, ZENG Fanggui, SONG Xiaoxia, et al. Origins and molecular composition of coalbed methane in Gujiao area, Shanxi [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(9): 2824–2832.
- [19] 程剑波, 周瑞, 刘燕海. 西山煤田山西组煤层气学和煤质特征[J]. 煤炭技术, 2018, 37(3): 132–134.
CHENG Jianbo, ZHOU Rui, LIU Yanhai. Coal petrology and quality characteristics of Shanxi Formation in Xishan Coalfield [J]. *Coal Technology*, 2018, 37(3): 132–134.
- [20] 孙蓓蕾, 曾凡桂, 刘超, 等. 太原西山煤田新生代隆升史的磷灰石裂变径迹约束[J]. 地质学报, 2017, 91(1): 43–54.
SUN Beilei, ZENG Fanggui, LIU Chao, et al. Cenozoic uplift history of the Xishan coalfield and constraints from apatite fission track dating [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(1): 43–54.
- [21] 李俊杰, 郭英海, 车灿辉, 等. 西山煤田古交矿区陷落柱特征及其导水性分析[J]. 中国煤炭地质, 2010, 22(4): 46–50.
LI Junjie, GUO Yinghai, CHE Canhui, et al. Subsided column features and water conductivity analysis in Gujiao Mine Area, Xishan Coalfield [J]. *Coal Geology of China*, 2010, 22(4): 46–50.
- [22] 黄泽光, 高长林. 秦岭一大别造山带北侧盆地序列及油气前景[J]. 石油实验地质, 2007, 29(1): 29–35, 43.

- HUANG Zeguang, GAO Changlin. Basin sequence and oil-gas potential in near Northern Qinling-Dabie mountain [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(1): 29-35, 43.
- [23] 杨文涛, 王敏, 杜远生. 中生代济源盆地沉积充填特征及其对秦岭-太行山隆升作用的响应[J]. 地质论评, 2014, 60(2): 260-274.
- YANG Wentao, WANG Min, DU Yuansheng. The depositional characteristics from mesozoic jiyuan basin with its response to the uplift of Qinling Orogen and Taihang Mountains [J]. Geological Review, 2014, 60(2): 260-274.
- [24] 田媛, 钟建华, 王书宝, 等. 鄂尔多斯盆地富县探区三叠系延长组震积岩及其地质意义[J]. 古地理学报, 2015(4): 119-130.
- TIAN Yuan, ZHONG Jianhua, WANG Shubao, et al. Seismites and their geological significances of the Triassic Yanchang Formation in Fuxian exploration area, Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2015(4): 119-130.
- [25] 谭先锋, 蒋威, 吴康军, 等. 达木盆地西南缘下干柴沟组震积岩的发现及地质意义[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(4): 11-18, 26.
- TAN Xianfeng, JIANG Wei, WU Kangjun, et al. Discovery and geological significance of seismites of the lower Ganchaigou Formation, the southwest margin of Qaidam Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(4): 11-18, 26.
- [26] 杜远生, 余文超. 地震和非地震引发的软沉积物变形[J]. 古地理学报, 2017, 19(1): 65-72.
- DU Yuansheng, YU Wenchao. Earthquake-caused and non-earthquake-caused soft-sediment deformations [J]. Journal of Palaeogeography, 2017, 19(1): 65-72.
- [27] 杜芳鹏, 邓辉, 师学耀. 震积岩形态特征及地质意义综述[J]. 地下水, 2013, 35(4): 243-245.
- DU Fangpeng, DENG Hui, SHI Xueyao. The morphological characteristics and geological significance of seismogenic rocks are reviewed [J]. Groundwater, 2013, 35(4): 243-245.
- [28] 杜远生, 韩欣. 论震积作用和震积岩[J]. 地球科学进展, 2000, 15(4): 389-394.
- DU Yuansheng, HAN Xin. Seismo-deposition and seismites [J]. Advance in Earth Sciences, 2000, 15(4): 389-394.
- [29] 陈世悦, 袁文芳. 济阳坳陷早第三纪震积岩的发现及其意义[J]. 地质科学, 2003, 38(3): 377-384.
- CHEN Shiyue, YUAN Wenfang. Discovery and significance of earthquake event deposits of Early Tertiary in the Jiyang Depression [J]. Chinese Journal of Geology, 2003, 38(3): 377-384.
- [30] 赵青峰, 张建国, 康文君, 等. 辽河坳陷西部凹陷沙四上亚段震积岩特征及地质意义[J]. 岩性油气藏, 2019, 31(5): 24-33.
- ZHAO Qingfeng, ZHANG Jianguo, KANG Wenjun, et al. Characteristics of seismites and their geological significance of the upper fourth member of Shahejie Formation in Western Sag, Liaohe Depression [J]. Lithologic Reservoirs, 2019, 31(5): 24-33.
- [31] 桑树勋, 刘换杰, 贾玉如. 华北中部太原组火山事件层与煤岩层对比——火山事件层的沉积学研究与展布规律[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(1): 46-62.
- SANG Shuxun, LIU Huanjie, JIA Yuru. Volcanic event strata and correlation of coals and rocks of Taiyuan formation in central North China: sedimentary study of volcanic event strata and their distribution [J]. Journal of China University Mining Technology, 1999, 28(1): 46-62.