

弱胶结砂岩的物理力学特征及定义

李回贵^{1,2}, 李化敏², 汪华君¹, 陈善乐¹

(1. 贵州工程应用技术学院 矿业工程学院, 贵州 毕节 551700; 2. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000)

摘要:为给弱胶结砂岩明确的定义,以布尔台煤矿覆岩中弱胶结砂岩为研究对象,采用地面钻孔取心的方法,采集了3种砂岩试样,首先对其成分以及微观结构进行了分析,然后分别对这3组试样进行了单轴压缩、三轴压缩、巴西劈裂试验,分析了弱胶结砂岩的密度、波速、抗拉强度、抗压强度、弹性模量、黏聚力及内摩擦角等参数。试验结果表明:弱胶结砂岩是以石英和长石为骨架颗粒的岩石,胶结物含量小于总含量的30%;弱胶结砂岩颗粒之间的孔隙非常大,主要集中在40~100 μm;胶结物非常少,颗粒边界非常清晰;弱胶结砂岩破裂时主要沿颗粒的边界破裂,宏观破裂类型以“I”形为主;弱胶结砂岩的波速(<1 200 m/s)和密度(<2 200 kg/m³)非常小;抗拉强度(<2 MPa)、抗压强度(<20 MPa)、弹性模量(<2 GPa)以及黏聚力(<10 MPa)也非常的小。研究成果有助于进一步揭示弱胶结岩层巷道变形大、巷道支护困难、矿压显现剧烈以及地表台阶下沉等现象的内在原因。

关键词:弱胶结砂岩;矿压显现;微观结构;物理力学特征

中图分类号:TD313 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2017)10-0001-07

Physical and mechanical characteristics and definition of weakly cemented sandstone

LI Huigui^{1,2}, LI Huamin², WANG Huajun¹, CHEN Shanle¹

(1. College of Mining Engineering, Guizhou University of Engineering Science, Bijie 551700, China;

2. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In order to give clear definition of weakly cemented sandstone, taking weakly cemented sandstone in Buertai Mine overburden as the research object, three kinds of sandstone samples were collected by using the core drilling method. Firstly, the composition and microstructure were analyzed. Secondly, the three kinds of specimens were carried out with uniaxial compression, triaxial compression and Brazil split experiment. Finally, the parameters such as density, wave velocity, tensile strength, compressive strength, elastic modulus, cohesion and internal friction angle were analyzed. Experimental results show that weakly cemented sandstone is a rock with quartz and feldspar as the skeleton particles. And the cement content is less than 30% of the total content. The pores between the grains of weakly consolidated sandstone are very large, mainly concentrated in the 40~100 μm. The cement is very small and the grain boundaries are very clear. The weakly cemented sandstone is mainly along the boundary of the particle. The macroscopic fracture type is dominated by the “I” type. The wave velocity (<1 200 m/s) and density (<2 200 kg/m³) of weakly consolidated sandstone are very small. Tensile strength (<2 MPa), compressive strength (<20 MPa), modulus of elasticity (<2 GPa) and cohesion (<10 MPa) are also very small. The research results help to reveal the internal reasons of the phenomenon, such as roadway deformation large, roadway support difficulty, mining pressure appear violent, surface step subsidence and so on.

Key words: weakly cemented sandstone; strata behaviors; microstructure; physical and mechanical characteristics

收稿日期:2017-06-05;责任编辑:杨正凯 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2017.10.001

基金项目:国家自然科学基金煤炭联合基金资助项目(U1261207);贵州省重点学科矿业工程学科资助项目(ZDXK[2016]13);贵州省联合基金资助项目(LH字[2016]7051)

作者简介:李回贵(1988—),男,江西莲花人,讲师,博士。Tel:15893013236, E-mail: lihuigui1221@163.com。通讯作者:李化敏,教授,博士生导师,博士, E-mail: lihuamin2007@163.com

引用格式:李回贵,李化敏,汪华君,等.弱胶结砂岩的物理力学特征及定义[J].煤炭科学技术,2017,45(10):1-7.

LI Huigui, LI Huamin, WANG Huajun, et al. Physical and mechanical characteristics and definition of weakly cemented sandstone[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(10): 1-7.

0 引 言

以神东矿区为代表的西部地区是我国煤矿开采技术发展最活跃的地区,也是国内外采矿界高度关注的地区。煤层埋藏浅、上覆基岩薄,并且由于其特殊的沉积环境造成该地区岩性具有典型弱胶结、易风化、塑性变形大、各向异性强、单轴抗压强度小、抗拉强度低的特点^[1-5]。由于上覆岩层这种特殊的特征,近几年来这种弱胶结岩石的物理力学特性逐步引起了科研工作者的重视。对于这种弱胶结岩石的研究主要集中在以下3个方面:

1) 不同条件下弱胶结岩石的力学特征。文献[6-7]研究了在单轴压缩下红庆河煤矿和小纪汗煤矿弱胶结砂岩的力学特征,并得到了弱胶结砂岩的破坏模式。文献[8]以小纪汗煤矿顶板砂岩为研究对象,通过细观研究认为其是弱胶结砂岩,对其进行了三轴压缩试验,认为这种弱胶结砂岩初始压实阶段特别明显。文献[9]对西部弱胶结砂岩在循环载荷作用下的塑性应变能变化规律进行了研究,认为应力路径对弱胶结砂岩的应变能及变形特征有影响。文献[10-11]在三轴压缩下对弱胶结泥岩的力学及损伤特征进行了研究,认为围压和水对弱胶结泥岩的峰值强度及残余强度都有影响。

2) 弱胶结岩石的巷道支护及变形特征。文献[12-15]运用室内试验、理论分析、数值模拟和现场验证等方法对弱胶结岩石巷道的变形破坏机理进行了研究,研究认为这种弱胶结岩石巷道具有变形量大、变形速度快、变形持续时间长等特征。文献[16-18]对通过现场调研、成分分析、和数值模拟等对弱胶结软岩巷道的支护技术进行了研究,提出了锚网喷架、锚网索耦合和强力锚网索等支护措施。

3) 弱胶结顶板破断及覆岩运动规律。文献[19-20]通过理论分析建立了浅埋煤层工作面弱胶结顶板破断结构模型,并运用 UDEC 数值模拟软件分析了弱胶结顶板的破断规律。文献[21]以五间房煤矿为研究对象,分析了白垩纪地层弱胶结岩层综放开采之后导水裂隙带高度的发育情况。

综上所述,弱胶结岩石巷道支护、变形特征、顶板破断及覆岩运动特征已成为学者们的研究重点,并取得了许多重要的成果,为弱胶结岩层巷道围岩控制、巷道支护及顶板控制等做出了巨大贡献。然而到目前为止弱胶结岩石并没有一个明确的定义,

并且弱胶结岩石的成分、微观结构及物理力学特征研究的也相对较少,不能满足这种弱胶结岩层巷道围岩控制、支护、顶板控制以及覆岩运动研究的需要。因此,笔者从神东矿区白垩纪和侏罗系安定组中选取了3组弱胶结砂岩,对3组弱胶结砂岩的波速和密度、成分、微观结构、宏细观破裂特征以及力学特征进行了分析。

1 试样采集、加工及试验

1.1 试样采集与加工

弱胶结砂岩采集于神东矿区布尔台煤矿白垩纪和侏罗纪安定组。采集方式采用地面钻孔取心的方式,采集的岩心直径为62.5 mm。岩心采集后分段放入岩心盒中,为防止运输过程中损伤,在每个岩心盒中放入海绵做减震处理。试样按照规程要求加工成了直径为50 mm,高度100 mm的标准岩样。加工好的试样如图1所示。

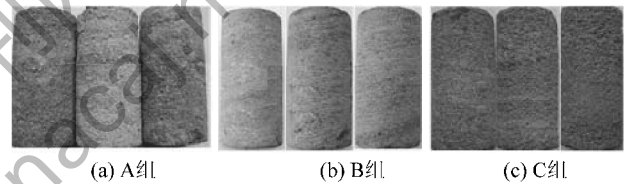


图1 3种弱胶结砂岩

Fig. 1 Three kinds of weakly cemented sandstone

1.2 试验方法

成分分析试验采用德国 Bruker 公司生产的 X 射线衍射仪,该 X 射线衍射仪适用于各种应用分析工作,包括定性和定量相分析、粉末样品的晶体结构解析和微晶尺寸分析等;扫描电镜试验采用美国 FEI 公司生产的场发射环境扫描电镜;力学试验采用中国武汉岩土力学所生产的 RMT-150C 力学试验系统。RMT-150C 力学试验系统可以采用位移控制和载荷控制的加载方式,试验采用位移控制的加载方式。试验过程中的加载速率是0.005 mm/s。

2 弱胶结砂岩物理特征

2.1 成分特征

布尔台煤矿白垩纪和侏罗纪安定组砂岩的成分特征见表1。从表1中可以看出,3种砂岩的骨架颗粒都是石英和长石,A组砂岩的长石和石英含量为78%,胶结物主要有高岭石和黄铁矿;主要胶结类型为铁质胶结物和碳酸盐胶结物,胶结物含量为22%。B组砂岩的长石和石英含量为76%,胶结物

主要有高岭石和斜绿泥石;主要胶结类型为黏土矿物和碳酸盐胶结物,胶结物含量为24%。C组砂岩的长石和石英含量为83%,胶结物主要有高岭石、黄铁矿和斜绿泥石;主要胶结类型为碳酸盐胶结物、黏土矿物和铁质胶结物,胶结物含量为17%。

表1 砂岩成分分析结果

Table 1 Results of sandstone component analysis

组名	埋深/m	质量分数/%				
		石英	长石	白云石	黄铁矿	斜绿泥石
A组	85.82~88.82	19	59	14	8	0
B组	114.12~117.12	39	37	6	0	18
C组	141.02~144.02	48	35	12	2	3

2.2 波速及密度特征

布尔台煤矿白垩纪和侏罗纪安定组砂岩的密度及波速特征见表2。

表2 砂岩的波速及密度参数

Table 2 Velocity and density parameters of sandstone

编号	波速/(m·s ⁻¹)	密度/(kg·m ⁻³)
A1	908	2 134
A2	922	2 139
A3	960	2 149
B1	859	2 078
B2	793	2 224
B3	802	2 193
C1	1 010	2 171
C2	1 040	2 024
C3	1 044	1 986

从表2中可以看出,弱胶结砂岩的密度和波速都特别小。A组砂岩的平均密度为2 141 kg/m³,平均波速为930 m/s;B组砂岩的平均密度为2 165 kg/m³,平均波速为818 m/s;C组砂岩的平均密度为1 986 kg/m³,平均波速为1 031 m/s。弱胶结砂岩密度特别小是因为弱胶结岩石孔隙率大,在一定体积下,孔隙体积大,而颗粒体积小,导致其质量偏小。因此,弱胶结砂岩的密度会偏小。弱胶结砂岩波速偏小的原因是因为其孔隙发育,孔隙直径大,由于大量的孔隙存在导致超声波在弱胶结砂岩中受空气的影响,因此,会大幅降低其波速。

3 弱胶结砂岩的力学特征

3.1 弱胶结砂岩的抗拉强度

布尔石煤矿3组弱胶结砂岩抗拉强度参数见表

3,弱胶结砂岩间接拉伸下的应力-应变曲线如图2所示。

表3 弱胶结砂岩的抗拉强度特征

Table 3 Tensile strength characteristics of weakly consolidated sandstone

岩性	编号	抗拉强度/MPa	平均抗拉强度/MPa
含砾粗砂岩	A1	0.45	0.56
	A2	0.66	
	A3	0.58	
中粒砂岩	B1	0.33	0.34
	B2	0.31	
	B3	0.37	
粗粒砂岩	C1	0.10	0.13
	C2	0.19	
	C3	0.11	

3组弱胶结砂岩的抗拉强度非常小,A组抗拉强度的范围为0.45~0.66 MPa,平均值为0.56 MPa;B组砂岩的抗拉强度范围为0.31~0.37 MPa,平均值为0.34 MPa;C组砂岩的抗拉强度范围0.10~0.19 MPa,平均值0.13 MPa。此外,从图2中可以发现,3组弱胶结砂岩基本上没有初始压密期,没有出现上凹的现象。出现这种现象的原因是因为在初始压密期由于缺乏颗粒间胶结物的作用,在压密过程中同时会产生颗粒间的滑移;3组砂岩抗拉强度非常小是因为砂岩的胶结物含量特别少,胶结程度非常差,间接拉伸过程中,试样抵抗抗拉应力的能力非常小。

3.2 弱胶结砂岩的单轴压缩强度

3组弱胶结砂岩单轴压缩下力学参数见表4,弱胶结砂岩单轴压缩下的应力-应变曲线如图3所示,3组砂岩的单轴抗压强度和弹性模量都非常小,基本上比常规砂岩的抗压强度和弹性模量小10~30倍。

A组砂岩的抗压强度范围为3.972~5.205 MPa,平均值为4.786 MPa;弹性模量范围为0.275~0.448 GPa,平均值为0.337 GPa。B组砂岩抗压强度范围为8.054~10.312 MPa,平均为8.998 MPa;弹性模量范围为1.162~1.513 GPa,平均值为1.337 GPa。C组砂岩抗压强度范围为3.759~4.027 MPa,平均值为3.927 MPa;弹性模量范围为0.382~0.613 GPa,平均值为0.468 GPa。

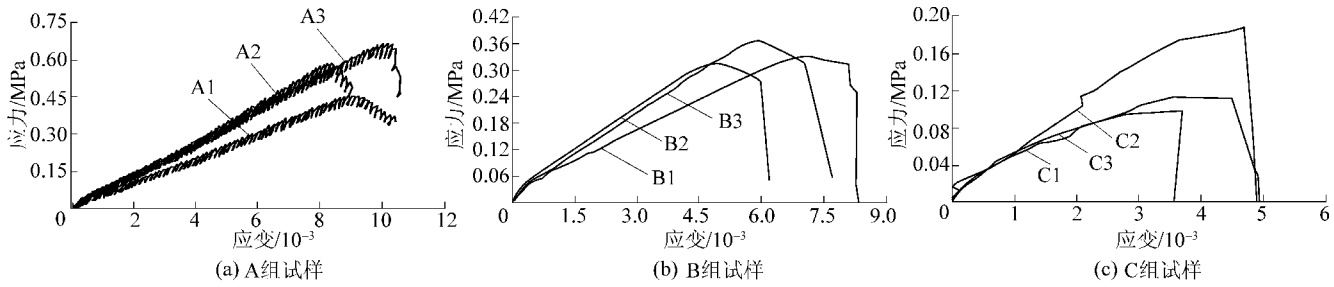


图2 间接拉伸下3组砂岩的应力-应变曲线

Fig. 2 The stress-strain curves of three groups of sandstone under the indirect tension

表4 单轴压缩下弱胶结砂岩的力学参数

Table 4 Mechanical parameters of weakly cemented sandstone under uniaxial compression

编号	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa
A1	5.181	0.448
A2	5.205	0.288
A3	3.972	0.275
B1	10.312	1.513
B2	8.054	1.162
B3	8.629	1.337
C1	4.027	0.613
C2	3.759	0.408
C3	3.995	0.382

此外,从图3中可以发现,弱胶结砂岩的应力-应变曲线大致可以分为4个阶段:初始压密期、线弹性阶段、屈服破坏阶段和峰后残余应力阶段。在初

始压密期由于其颗粒间的孔隙非常大,可压缩空间大,造成了3组砂岩在初始压密期间变形较大,初始压密阶段应变能达到峰值应变的50%左右,并且向上凹的也非常明显。由于弱胶结砂岩胶结程度非常差,颗粒之间的胶结作用力非常有限,进入线弹性阶段后抵抗间接滑移和拉伸作用力的能力很小,因此,在线弹性阶段曲线的直线非常短,3组弱胶结砂岩的弹性模量非常小。由于胶结物含量少,胶结作用力小,进入塑性变形破坏阶段后,由于线弹性阶段积聚的弹性能小,塑性变形破坏时释放的能量小,很难形成一个剪切滑移破坏面,因此,在此阶段曲线过度非常平稳,不会像脆性岩石破裂一样,产生突变。峰后阶段,弱胶结砂岩主要表现为塑性变形破坏特征,峰后曲线非常平滑,存在一定的残余强度。

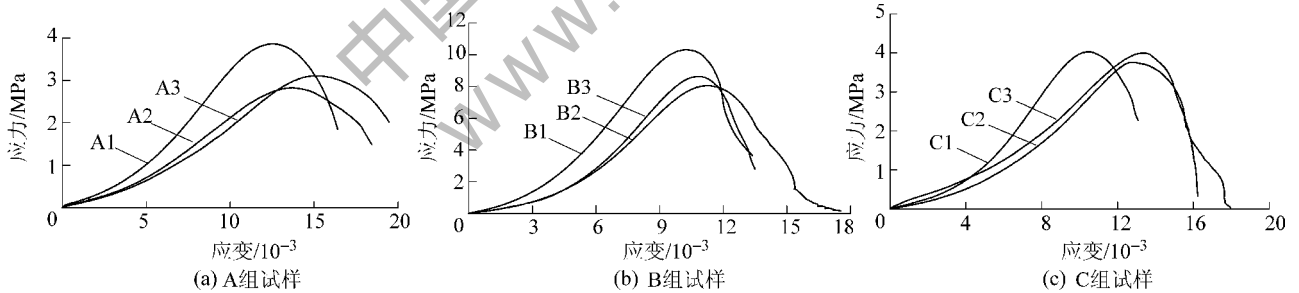


图3 单轴压缩下弱胶结砂岩的全应力应变曲线

Fig. 3 Full stress strain curves of the weak cementation sandstone under uniaxial compression

3.3 弱胶结砂岩的三轴压缩强度

三轴压缩下弱胶结砂岩的应力-应变曲线如图4所示,弱胶结砂岩三轴压缩与单轴压缩下一样,同样可以分为4个阶段,但是随着围压的逐渐增大,压密阶段逐渐变短,线弹性阶段逐渐增长,峰值应力前塑形变形越来越明显。造成这些现象的原因是随着围压的增加,虽然弱胶结砂岩胶结物少,胶结作用差,但是围压限制了颗粒间的滑移错动,需要更大的力才能产生滑移,形成破裂面。弱胶结砂岩三轴压缩试验结果见表5, H 为高度, D 为直径, σ_3 为围压, σ_1 为峰值强

度, σ_R 为残余强度, ϵ_0 为峰值应变。由表5中可知,弱胶结砂岩的三轴压缩强度、残余强度和峰值应变与围压有明显的线性关系,随着围压的增大,三轴压缩强度、残余强度和峰值应变有明显增大的趋势。弱胶结砂岩的黏聚力非常小,A组、B组、C组砂岩的黏聚力分别为5.359、4.846、8.559 MPa。3组砂岩的黏聚力要比常规砂岩的小很多,黏聚力直接反映了试样内部颗粒间的相互吸引力,这说明弱胶结砂岩内部颗粒间吸引力很小,破裂过程中积聚的弹性能会很小,不会产生明显的破裂面,而是会产生很大的变形。

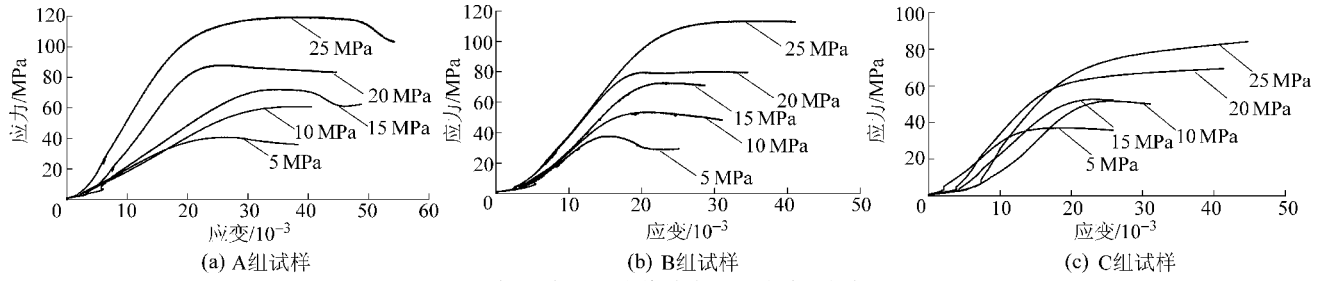


图4 三轴压缩下弱胶结砂岩的全应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of weakly cemented sandstone under triaxial compression

表5 三轴压缩下弱胶结砂岩的力学参数

Table 5 Mechanical parameters of weakly cemented sandstone under triaxial compression

编号	H/mm	D/mm	σ_3 /MPa	σ_1 /MPa	σ_R /MPa	$\varepsilon_0/10^{-3}$
A1	100.80	49.60	5	40.73	38.25	26.57
A2	97.70	49.50	10	60.82	60.60	38.94
A3	100.40	49.40	15	72.12	62.36	35.90
A4	97.10	49.60	20	87.93	83.30	25.98
A5	99.10	49.50	25	119.58	103.37	38.12
B1	99.10	49.10	5	37.77	29.27	15.58
B2	99.80	49.90	10	53.53	48.39	20.43
B3	98.10	49.20	15	72.95	71.17	23.35
B4	98.60	49.20	20	80.14	79.56	29.91
B5	98.60	49.70	25	113.49	112.80	35.04
C1	99.40	49.50	5	37.08	35.81	18.52
C2	96.90	49.40	10	51.66	50.05	25.55
C3	100.50	49.20	15	52.66	52.33	23.10
C4	96.60	49.40	20	69.28	41.34	41.34
C5	99.20	49.50	25	84.04	44.79	44.79

注:A组、B组、C组的平均黏聚力分别为5.359、4.846、8.559 MPa;平均内摩擦角分别为35.1°、34.1°、22.3°。

4 弱胶结砂岩的宏观结构特征

4.1 弱胶结砂岩微观结构

为了分析弱胶结砂岩的孔隙特征,在弱胶结

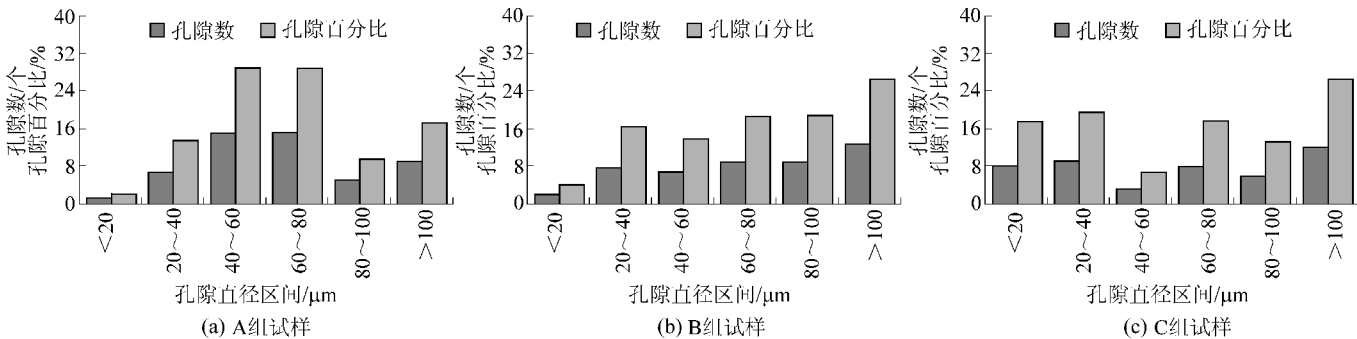


图5 弱胶结砂岩孔隙分布特征

Fig. 5 Pore distribution characteristics of weakly consolidated sandstone

砂岩的微观结构 SEM 图片的基础上运用专业的处理软件 SmileView 对其孔隙直径进行了测量,并对其孔隙分布特征进行了统计,3组砂岩的孔隙统计分布如图5所示,弱胶结砂岩的颗粒边界非常清晰,颗粒间孔隙比较多,孔隙直径较大,胶结物非常少,胶结物并没有紧紧围绕着骨架颗粒,而是松散地填充在颗粒之间,因而颗粒间的相互吸引力非常小。从图5中可以看出,弱胶结砂岩的孔隙直径非常大,3组弱胶结砂岩孔隙直径小于20 μm的都特别的少,A组孔隙直径小于20 μm的只占1.9%;B组孔隙直径小于20 μm的只占4.2%;C组孔隙没有直径小于20 μm的。3组弱胶结砂岩的孔隙直径主要集中在40~100 μm;A组孔隙直径40~100 μm 占总孔隙的67.2%;B组孔隙直径40~100 μm 占总孔隙的52.0%;C组孔隙直径40~100 μm 占总孔隙的43.5%。

4.2 弱胶结砂岩宏观破裂

弱胶结砂的宏观破裂特征如图6所示,弱胶结砂岩宏观破裂断口的微观结构特征如图7所示。从图6中可以看出,弱胶结砂岩的宏观破裂形态主要以I字形态为主;弱胶结砂岩破坏时主要是以张拉破裂为主,并没有形成大的破裂面。从图7中可以发现,弱胶结砂岩宏观破裂面的微观结构很完整,并没有出现颗粒破裂的现象,这说明弱胶结砂岩破裂时主要是从颗粒间的胶结物处破坏。



图6 弱胶结砂岩宏观破裂特征

Fig. 6 Macroscopic fracture characteristics of weakly cemented sandstone

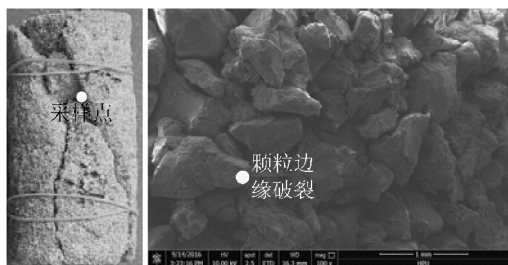


图7 弱胶结砂岩的微观破裂特征

Fig. 7 Microscopic fracture characteristics of weakly cemented sandstone

5 结论

1) 通过研究认为3组弱胶结砂岩的主要特征有:①弱胶结砂岩宏观结构松散;②骨架颗粒主要为石英及长石,胶结物含量较低,胶结程度差;③弱胶结砂岩微观结构可以清晰的观察到颗粒的边界及孔隙结构,孔隙直径比较大,并且以 $40\sim 100\ \mu\text{m}$ 为主;④弱胶结砂岩主要以张拉破坏为主,破坏时主要从颗粒间胶结物处破坏为主,宏观破裂形态主要以I字形形态为主;⑤弱胶砂岩的抗拉强度一般低于2 MPa;⑥弱胶结砂岩的抗压强度一般低于20 MPa;⑦弱胶结砂岩的弹性模量一般低于2 GPa;⑧弱胶结砂岩的黏聚力一般低于10 MPa。

2) 通过对弱胶结砂岩从宏观结构到微观结构,再从力学到物理参数的研究可以发现,弱胶结砂岩是一种胶结物含量少($<30\%$),宏观结构松散,微观结构中常观察到明显的颗粒边界,抗拉强度小($<2\ \text{MPa}$),抗压强度小($<20\ \text{MPa}$),弹性模量小($<2\ \text{GPa}$)、黏聚力小($<10\ \text{MPa}$);破裂沿颗粒物表面以张拉形式破坏为主的岩石。

3) 研究结果可以进一步揭示弱胶结岩层巷道大变形的机理,以及西部地区出现台阶式下沉、浅埋深但是矿压显现剧烈等现象内在原因。同时为这种

弱胶结岩层巷道支护、顶板设计及管理提供可靠的基础数据。

参考文献(References):

- [1] 李化敏,李回贵,宋桂军,等.神东矿区煤系地层岩石物理力学性质[J].煤炭学报,2016,41(11):2661-2671.
LI Huamin, LI Huigui, SONG Guijun, *et al.* Physical and mechanical properties of the coal-bearing strata rock in Shendong coal field [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2661-2671.
- [2] 陈俊杰,南华,闫伟涛,等.浅埋深高强度开采地表动态移动变形特征[J].煤炭科学技术,2016,44(3):158-162.
CHEN Junjie, NAN hua, YAN Weitao, *et al.* Features of surface dynamic movement and deformation caused by high intensity mining with shallow depth [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 158-162.
- [3] 王翰钊,李守国,段鹏飞,等.风积沙厚度对浅埋煤层大采高工作面矿压显现的影响[J].中国安全生产科学技术,2016,12(4):25-29.
WANG Hanzhao, LI Shouguo, DUAN Pengfei, *et al.* Influence on strata behaviors at large mining height working face in shallow coal seam by depth of aeolian sand [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(4): 25-29.
- [4] 题正义,潘进,田臣,等.7.0 m采高综采面回采巷道变形破坏规律研[J].中国安全生产科学技术,2016,12(4):57-61.
TI Zhengyi, PAN Jin, TIAN Chen, *et al.* Research on laws of deformation and failure of mining gateway in fully mechanized face with 7.0 m mining height [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(4): 57-61.
- [5] 李博融,杨更社,奚家米,等.白垩系地层冻结砂岩物理力学试验研究[J].煤炭科学技术,2015,43(5):30-33,16.
LI Borong, YANG Gengshe, XI Jiami, *et al.* Experimental study on physical mechanics of freezing sandstone of cretaceous strata [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(5): 30-33, 16.
- [6] 汪泓,杨天鸿,徐涛,等.单轴压缩下某弱胶结砂岩声发射特征及破坏形式:以陕西小纪汗煤矿砂岩为例[J].金属矿山,2014,43(11):39-45.
WANG Hong, YANG Tianhong, XU Tao, *et al.* Acoustic emission characteristics and failure patterns of a weak cemented sandstone under uniaxial compression: Xiaojihan coal mine in Shanxi as a case [J]. Metal Mine, 2014, 43(11): 39-45.
- [7] 纪洪广,陈波,孙利辉,等.红庆河煤矿弱胶结砂岩单轴加载条件下声发射特征研究[J].金属矿山,2015,44(10):56-61.
JI Hongguang, CHEN Bo, SUN Lihui, *et al.* Research on the acoustic emission of weakly consolidated sandstone under uniaxial compression in Hongqinghe coal mine [J]. Metal Mine, 2015, 44(10): 56-61.
- [8] 汪泓,杨天鸿,于庆磊,等.不同围压条件下榆横矿区砂岩力学特性和本构关系[J].煤炭学报,2015,40(S2):320-327.
WANG Hong, YANG Tianhong, YU Qinglei, *et al.* Constitutive relationship of the sandstone from Yuheng mining area under different

- confining pressures [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40 (S2): 320-327.
- [9] 赵永川, 杨天鸿, 肖福坤, 等. 西部弱胶结砂岩循环载荷作用下塑性应变能变化规律[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(8): 1813-1819. ZHAO Yongchuan, YANG Tianhong, XIAO Fukun, *et al.* The variation law of plastic strain energy of western weak cemented sandstone during cyclic loading experiment [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(8): 1813-1819.
- [10] 赵增辉, 王渭明, 高鑫, 等. 弱胶结泥质软岩的三向压缩损伤特性[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2014, 48(8): 1399-1405. ZHAO Zenghui, WANG Weiming, GAO Xin, *et al.* Damage behavior of weakly consolidated soft mudstone under tri-axial compression [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2014, 48(8): 1399-1405.
- [11] 王磊, 李祖勇. 西部弱胶结泥岩的三轴压缩试验分析[J]. *长江科学院院报*, 2016, 33(8): 86-90, 95. WANG Lei, LI Zuyong. Triaxial Compression test analysis of weakly cemented mudstone in west China [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2016, 33(8): 86-90, 95.
- [12] 李廷春, 张仕林, 卢振, 等. 泥化弱胶结软岩巷道底板变形破坏机理分析[J]. *湖南科技大学学报: 自然科学版*, 2015, 30(1): 1-7. LI Tingchun, ZHANG Shilin, LU Zhen, *et al.* Analysis of deformation and failure mechanism of roadway in the mud weakly consolidated soft rock strata [J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology: Natural Science Edition*, 2015, 30(1): 1-7.
- [13] 李廷春, 卢振, 刘建章, 等. 泥化弱胶结软岩地层中矩形巷道的变形破坏过程分析[J]. *岩土力学*, 2014, 35(4): 1077-1083. LI Tingchun, LU Zhen, LIU Jianzhang, *et al.* Deformation and failure process analysis of rectangular roadway in muddy weakly cemented soft rock strata [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(4): 1077-1083.
- [14] 郝育喜, 王炯, 袁越, 等. 沙吉海煤矿弱胶结膨胀性软岩巷道大变形控制对策[J]. *采矿与安全工程学报*, 2016, 33(4): 684-691. HAO Yuxi, WANG Jiong, YUAN Yue, *et al.* Large deformation control technology for expansive and weak-cemented soft rock roadways in Shajihai coal mine [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2016, 33(4): 684-691.
- [15] 乔卫国, 韦九洲, 林登阁, 等. 侏罗白垩纪极弱胶结软岩巷道变形破坏机理分析[J]. *山东科技大学学报: 自然科学版*, 2013, 32(4): 1-6. QIAO Weiguo, WEI Jiuzhou, LIN Dengge, *et al.* The deformation failure mechanism of very weakly cemented soft rock formed during Jurassic-cretaceous period in roadways [J]. *Journal of Shandong University Science and Technology: Natural Science*, 2013, 32(4): 1-6.
- [16] 贾宝新, 贾志波, 刘家顺, 等. 弱胶结软岩巷道支护技术研究[J]. *安全与环境学报*, 2016, 16(3): 109-115. JIA Baoxin, JIA Zhibo, LIU Jiashun, *et al.* On the supporting technology for the case of the weakly cemented soft rock roadway in the mining system [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, 16(3): 109-115.
- [17] 范明建, 秦旭卫, 林健, 等. 褐煤矿区弱胶结砂岩巷道支护技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(4): 5-8. FAN Mingjian, QIN Xuwei, LIN Jian, *et al.* Study on support technology of mine roadway with weak cemented sandstone in lignite mining area [J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(4): 5-8.
- [18] 王渭明, 高鑫, 景继东, 等. 弱胶结软岩巷道锚网索耦合支护技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(1): 23-26. WANG Weiming, GAO Xin, JING Jidong, *et al.* Study on roof bolting with anchor and wire mesh coupling support technology in weakly consolidated soft rock roadway [J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(1): 23-26.
- [19] 张洪彬, 田成林, 孙颢, 等. 浅埋煤层弱胶结顶板破断规律数值模拟研究[J]. *山东科技大学学报: 自然科学版*, 2015, 34(2): 36-40. ZHANG Hongbin, TIAN Chenglin, SUN Bi, *et al.* Numerical simulation of roof break laws in weakly cemented shallow seam [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science*, 2015, 34(2): 36-40.
- [20] 宁建国, 刘学生, 谭云亮, 等. 浅埋煤层工作面弱胶结顶板破断结构模型研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2014, 31(4): 569-574. NING Jianguo, LIU Xuesheng, TAN Yunliang, *et al.* Fracture structure model of weakly cemented roof in shallow seam [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2014, 31(4): 569-574.
- [21] 孙景武, 刘家根, 韩德明, 等. 极弱胶结覆岩综放开采导水裂隙带发育高度预测研究[J]. *矿山测量*, 2012(2): 19-21. SUN Jinwu, LIU Jiagen, HAN Deming, *et al.* Prediction of the development height of water flowing fractured zone in fully mechanized top coal caving mining with extremely weak cementation [J]. *Mine Surveying*, 2012(2): 19-21.