

不同组构砂岩微观破坏特征分析

孙大增¹, 赵文¹, 许兴亮², 王鑫¹

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819;

2. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 为了研究不同组构砂岩宏观-微观破坏特征的内在联系,对香花岭矿区三种砂岩开展物相分析、沉积相判别及单轴压缩和剪切试验,观察微观结构差异. 研究表明:陆相沉积石英砂岩抗压强度最大,长石砂岩次之,海相沉积海绿石砂岩最小;单轴压缩试验宏观上石英砂岩、长石砂岩发生脆性破坏,而海绿石砂岩呈现出具有软化特性的延性破坏,微观上石英砂岩发生沿晶破坏,断面平整,长石砂岩发生沿晶和穿晶破坏,断面呈小扇贝状,表面附着少量碎屑,海绿石砂岩断面呈平板-花团复合状,晶粒破碎且擦痕明显,晶粒、胶结物质及结构弱面共同控制破坏特征;剪切试验微观上石英砂岩先发生沿晶破坏后发生穿晶破坏,断面不平整、擦痕及碎屑多,长石砂岩以沿晶破坏为主伴随穿晶破坏,断面部分平整、擦痕及碎屑较多,海绿石砂岩同时发生沿晶破坏和穿晶破坏,断面平整、几乎无擦痕和碎屑,砂岩微观破坏特征受晶粒和晶间胶结物质强度的共同影响.

关键词: 砂岩;矿物组成;微观结构;破坏特征;强度

中图分类号: TD 313

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2024)04-0584-08

Microscopic Failure Characteristics of Sandstones with Different Composition and Microstructures

SUN Da-zeng¹, ZHAO Wen¹, XU Xing-liang², WANG Xin¹

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China. Corresponding author: ZHAO Wen, E-mail: wenneu@163.com)

Abstract: In order to study the interconnection between macroscopic and microscopic failure characteristics of different textured sandstones, three types of sandstones from Xianghualing mining area were analyzed using petrographic analysis, sedimentary phase discrimination, and uniaxial compression and shear tests to observe the microscopic structural characteristics. The results show that compressive strength of terrestrial sedimentary quartz sandstone is the largest, followed by feldspathic sandstone, and marine sedimentary glauconitic sandstone is the smallest. In uniaxial compression, quartz sandstone and feldspathic sandstone exhibit brittle failure on a macroscopic scale, while glauconitic sandstone shows ductile failure with softening characteristics. On the microscopic scale, quartz sandstone undergoes intergranular failure with a smooth surface, while feldspathic sandstone experiences intergranular and transgranular failure with a small scallop-shaped surface and minimal adhering debris, and glauconitic sandstone displays a flat-granular composite fracture surface with obvious grain crushing and pronounced scratches. The failure characteristics are jointly controlled by the grains, cemented material and structural weak planes. The shear test microscopically shows that the quartz sandstone occurs has transgranular failure first and then intergranular failure, with uneven surface, scrapes and debris, while the feldspathic sandstone occurs transgranular failure mainly and intergranular failure, with partially flat surface, scrapes and debris. The glauconitic sandstone simultaneously exhibits

收稿日期: 2022-12-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878127, 51864044).

作者简介: 孙大增(1994-),男,辽宁本溪人,东北大学博士研究生;赵文(1962-),男,内蒙古乌兰察布人,东北大学教授,博士生导师.

intergranular and transgranular failure, resulting in a smooth surface with almost no abrasion or debris. The microscopic failure characteristics are influenced by the grain strength and cementing materials.

Key words: sandstone; mineral composition; microstructure; failure characteristics; strength

砂岩是一种典型的沉积岩,由粒径0.05~2 mm细颗粒砂胶结形成,主要成分为石英和长石,自然表面呈粗糙颗粒状,结构较为稳定^[1].受造岩矿物、沉积环境及构造条件等影响,砂岩的组成和结构不尽相同,加之内部原生微裂纹和孔隙等缺陷,宏观物理学性质呈现出显著差异^[2-3],隧道、硐室等工程建设过程中常出现相同岩性不同变形破坏特征的现象.因此,分析不同组构砂岩的微观特征以及宏观力学性质,探究微观-宏观之间的内在关联性,对于完善砂岩物理力学属性,为工程建设提供地层岩性信息具有十分重要的意义.

近年来,针对岩石微观结构与力学性质的关系已经开展大量的研究工作^[4-6],Li等^[7]通过X射线衍射(X ray diffraction, XRD)、扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)、低场核磁共振等手段对比分析5种砂岩的成分、微观结构、孔隙分布特征与力学性质的关联性.Tavares等^[8]对取自巴西四座采石场的岩石进行冲击、磨损、压缩实验,从微观结构角度分析破碎特征.Li等^[9]基于扫描得到的岩石微观结构,采用建立的离散元模型计算砂岩的力学行为,结果与试验较为吻合.针对砂岩的相关研究主要集中在不同处理条件(包括:干湿循环、冻融循环、化学溶液腐蚀、高温处理等多种特定手段)下表现出的力学响应与破坏特性^[10-11].邓华锋等^[12-14]通过砂岩多次浸泡-风干循环试验模拟库岸水位升降,分析水-岩作用后砂岩强度、变形模量等力学性质的劣化规律和对应不同循环周期的微观结构变化特征.Zhang等^[15]得到不同次数干湿循环作用下砂岩微结构损伤程度,建立了微结构特征、裂隙发展、分形维数、关联维数之间的关系.肖鹏等^[16]开展砂岩冻融循环试验,分析质量、波速、微观结构变化,引入冻融损伤和力学损伤并基于Lemaitre应变等效建立本构模型.Chen等^[17]开展低围压下砂岩的冻融循环试验,分析冻融循环次数对砂岩的力学影响,并利用声发射和压汞法获得了砂岩内部微观结构的损伤特征.Cai等^[18]通过单轴压缩和核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)试验得到了不同pH化学溶液侵蚀后砂岩强度特征及孔隙变化规律并指出矿

物的变化是本质原因.Shen等^[19]得到不同温度(25~900 °C)下砂岩矿物的晶格常数、微观应变、位错密度、热重分析曲线变化和破坏特征等核心微观参数,并进行热损伤机理分析.赵怡晴等^[20]研究砂岩不同温度梯度影响下的矿物含量、微观结构及力学性质变化规律.金爱兵等^[21]分析砂岩在5种高温后自然冷却和水冷引起的孔隙率、孔径分布、强度及微观结构的变化.

当前对砂岩微观破坏特征研究的重点主要集中在特定的外部条件带来的影响,而忽略了砂岩本身组成和结构的不同,这种组构差异足以导致力学性质产生变化,同时对剪切破坏微观形貌特征的研究较少,而工程中又常涉及剪切破坏.因此本文选取3种砂岩作横向对比,采用X射线衍射和X射线荧光光谱(X ray fluorescence, XRF)试验分析砂岩物相并判断沉积环境,通过扫描电子显微镜观察压缩及剪切断口微观破坏特征,揭示砂岩不同微观组构对宏观力学性质与破坏形式的控制机理.

1 试验方案及过程

试验所用3种砂岩样品均取自香花岭矿区,如图1所示,3种砂岩在外观颜色及颗粒质感上均有所不同,1#试样呈灰白色,中粒,粒径0.5 mm左右;2#试样呈褐红色,细粒,粒径0.15 mm左右;3#试样呈浅绿色,中粒,粒径0.3 mm左右.

XRD试验采用德国布鲁克公司生产的D8-ADVANCE型衍射仪.从岩样上分别切取新鲜断面小岩块若干,充分研磨后过45 μm标准筛,各取1 g样品均匀撒入制样框并压紧得到平整的砂岩粉末样品,分析组成成分.XRF试验采用布鲁克S8-TIGER型光谱仪,取上述研磨粉末各10 g,105 °C烘干2 h后压成圆片,测定微量元素含量.根据国际岩石力学学会(International Society for Rock Mechanics, ISRM)的制样要求加工标准试件^[22],试件为高100 mm、直径50 mm的圆柱体,测试砂岩强度并进行宏观破坏特征分析.同时,每种砂岩各制作9块50 mm×50 mm×50 mm立方体试件,在楔形剪切仪上进行变角剪切试验.微观结构特征采用HITACHI-SU8200型场发射扫

描电子显微镜观察,选取断口表面平整且未受污染的试件碎块,制成长、宽各为 5 mm,厚度为 2~

3 mm 的长方体样品,从微观角度分析岩石破断特征.

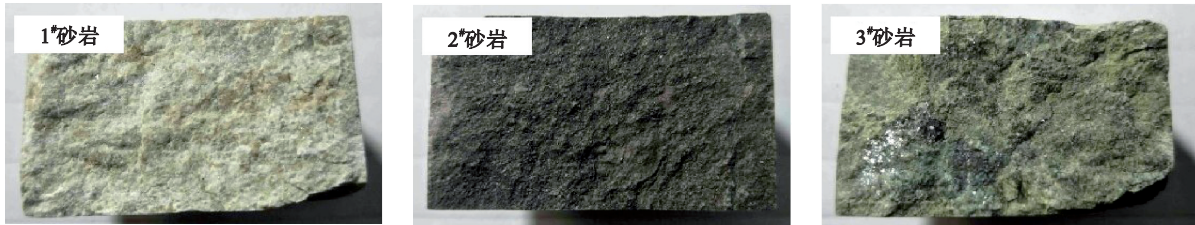


图 1 砂岩试样

Fig. 1 Sandstone specimens

2 砂岩物相和沉积相分析

2.1 砂岩组成成分分析

砂岩 X 射线衍射图谱如图 2 所示.1#砂岩主要矿物成分为石英、方解石和正长石,石英占 40% 以上,碳酸钙含量较高,判定其为钙质胶结石英砂岩.2#砂岩主要矿物成分为微斜长石、斜绿泥石和石英,微斜长石的含量最高,其次为斜绿泥石,石英含量较少,判定其为泥质胶结长石砂岩.3#砂岩主要矿物成分为海绿石、石英和黑云母,海绿石含量较高,黑云母含量较少,判定其为海绿石砂岩.

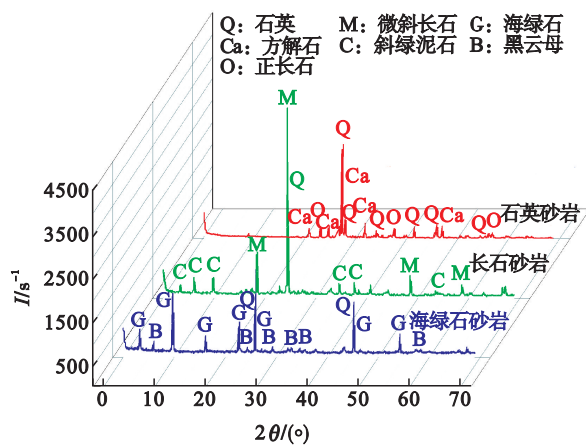


图 2 砂岩 X 射线衍射图谱

Fig. 2 X-ray diffraction patterns of sandstone

2.2 沉积环境判别

岩石颜色、磨圆度和分选性是判别沉积环境(氧化或还原)复原沉积古气候条件的重要依据.通过分析成岩矿物组分并观察岩石试样新鲜破断面宏观状态,判别 3 种砂岩沉积环境.石英砂岩分选性一般,说明其沉积过程中水流速度不均匀,磨圆程度中等以及矿物组分中含有少量长石,表明其沉积过程中搬运距离不远,环境较为稳定,地层起伏不大,气候条件温暖湿润,沉积环境偏还原环境.

长石砂岩主要成因是上游存在长石的基岩,地壳活动剧烈,导致母岩快速剥蚀、搬运、沉积并固结成岩.分选性较好,表明其沉积过程中水流流速均匀;磨圆程度较好,表明其搬运距离较远;而一般的长石砂岩沉积过程中搬运距离短,推测其沉积环境为氧化环境,风速较大,沉积地形起伏较大,气候条件较寒冷干燥,使不稳定的长石保留下来,形成长石砂岩.

海绿石砂岩分选性和磨圆程度均较好,表明其沉积过程中受到了潮汐浪的长期颠簸与反复冲击作用,搬运距离较远.推测其沉积环境为弱还原环境,雷电、风等外界物理条件影响较大,同时受海浪长期影响,气候条件温暖湿润.

2.3 沉积相还原

根据成岩环境的不同,沉积相分为陆相、海相和海陆过渡相.通过 XRF 试验能够测定主要矿物组成及微量元素锶、钡的含量,并根据锶、钡元素含量比值判断砂岩试样的沉积相.

如表 1 所示,3 种试样中氧化物主要为 SiO_2 , 其质量分数为 40.10%~65.15%, 其次为 CaO (1.75%~35.82%), Fe_2O_3 (1.62%~16.10%), MgO (0.94%~14.71%), Al_2O_3 (2.08%~14.31%), K_2O (0.98%~7.07%) 以及微量 Na_2O .

石英砂岩中石英是氧化物矿物,方解石属于碳酸盐类矿物,因此 SiO_2 和 CaO 的含量相对较高;长石砂岩中微斜长石是一种含钾铝硅酸盐,斜绿泥石为含镁、铁、铝的变质矿物,所以 SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O 含量相对较高;海绿石砂岩中海绿石属于含钾、铁、铝的硅酸盐矿物,由于铁含量较高可以初步推断为现代海洋沉积环境.

由于锶、钡元素的溶度积大小与活性存在差异,导致不同沉积环境中锶、钡元素含量不同,可以根据两者比值情况判断沉积相,石英砂岩 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})=0.113 < 1$,长石砂岩 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})=$

0.097<1, 海绿石砂岩 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})=1.142>1$, 因此, 石英砂岩、长石砂岩为陆相沉积, 海绿石砂岩为海相沉积.

3 砂岩单轴压缩宏观-微观破坏特征分析

3种砂岩各制作抗压强度试件3块, 由于长石砂岩和海绿石砂岩岩芯完整度较差, 所以各制作了1块尺寸为50 mm×50 mm×100 mm的长方体试块进行单轴抗压强度测试, 位移控制加载速率为0.01 mm/min.

经过计算, 石英砂岩的平均单轴抗压强度为54.01 MPa、弹性模量为3.34 GPa, 长石砂岩的单轴抗压强度为44.88 MPa、弹性模量为2.57 GPa, 海绿石砂岩的单轴抗压强度为36.33 MPa、弹性模量为2.07 GPa, 陆相较海相沉积环境下砂岩的抗压强度高, 应力-应变曲线及主要破坏形式如图3所示.

已有研究表明, 岩石矿物颗粒强度差异较大, 文献[23-25]给出了花岗岩各矿物颗粒的强度, 其中石英单轴抗压强度达700 MPa左右, 长石单轴抗压强度达400 MPa左右, 云母单轴抗压强度在200 MPa左右. 据此分析, 3种砂岩的单轴抗压强度差异与其主要矿物颗粒的强度密切相关.

表 1 元素含量测定
Table 1 Elemental content determination

编号	石英砂岩	长石砂岩	海绿石砂岩
$w(\text{Na}_2\text{O})/\%$	0.04	0.02	0
$w(\text{MgO})/\%$	0.94	4.99	14.71
$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	2.08	13.91	14.31
$w(\text{SiO}_2)/\%$	54.01	65.15	40.10
$w(\text{K}_2\text{O})/\%$	2.75	7.70	0.98
$w(\text{CaO})/\%$	35.82	1.75	7.89
$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/\%$	1.62	6.61	16.10
$w(\text{Ti})/10^{-6}$	1 293.3	3 751.2	2 149.2
$w(\text{Mn})/10^{-6}$	315.5	1 040.2	8 609.4
$w(\text{Zn})/10^{-6}$	167.5	122.4	614.5
$w(\text{P})/10^{-6}$	1 292.8	508.4	295.4
$w(\text{S})/10^{-6}$	72.9	124.9	3 422.6
$w(\text{Rb})/10^{-6}$	5.9	131.7	483.5
$w(\text{Cl})/10^{-6}$	202.8	53.0	87.2
$w(\text{Ba})/10^{-6}$	147.9	466.1	20.4
$w(\text{Sr})/10^{-6}$	16.7	45.1	23.3

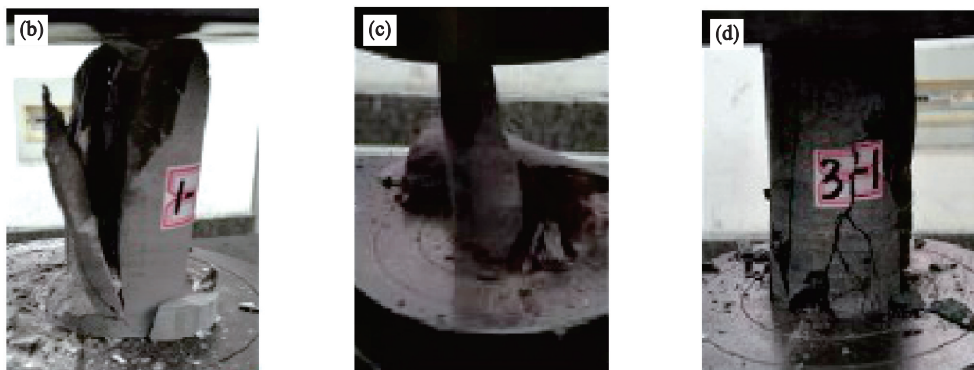
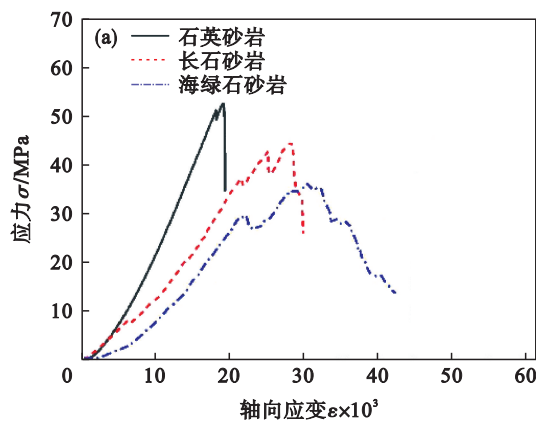


图3 砂岩应力-应变曲线及破坏形式

Fig. 3 Stress-strain curves and failure modes of sandstone
(a)一应力-应变曲线; (b)一石英砂岩; (c)一长石砂岩; (d)一海绿石砂岩.

3.1 石英砂岩宏观-微观破坏特征

石英砂岩试件单轴压缩应力-应变曲线大致呈现 3 个阶段,即压密阶段、弹性阶段、屈服破坏阶段.压密阶段的应力-应变曲线呈上凹形,孔隙受压闭合,这一阶段相对较短表明试件内部的裂纹和孔隙较少.弹性阶段的应力-应变呈线性增长,该段斜率较大表明石英砂岩(切线)弹性模量较高.屈服破坏阶段试件短时间内出现大量裂纹并发出声响,应力达到峰值强度后,伴随一声较大且清脆的响声应力迅速跌落,试件破裂后不具备承载能力.石英砂岩试件破坏前总应变量较小,能量瞬间释放,发生脆性劈裂破坏,卸载后试件较易破碎.

石英砂岩破断面微观结构如图 4 所示,由于试件石英含量高,断面多处呈现完整的晶体面,晶粒层呈平板状,晶体棱角分明(图中蓝圈).晶间胶结紧密,孔洞发育(图中红圈)、裂隙不发育,表面基本无碎屑物质堆积,在破断面裂隙处分布少量不均匀的零星碎屑.组成石英砂岩的石英等晶粒强度大于钙质胶结物质强度,发生沿晶破坏并形成宏观裂隙,最终贯穿整个试件.

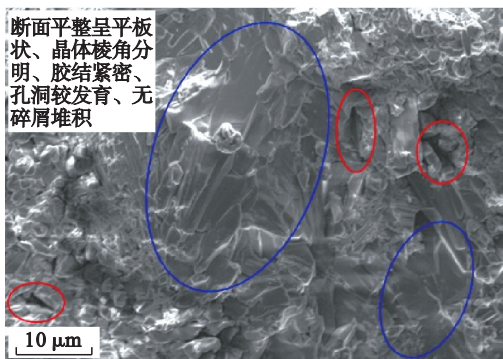


图 4 石英砂岩微观结构

Fig. 4 Microstructure of quartz sandstone

3.2 长石砂岩宏观-微观破坏特征

长石砂岩试件的单轴压缩应力-应变曲线压密阶段呈上凹形,持续时间较石英砂岩稍长,弹性阶段曲线呈线性缓慢上升,斜率较石英砂岩小,屈服破坏阶段曲线呈现波动上升的特点,裂纹不断萌生发展最终贯通,应力达到峰值强度后快速降低.长石砂岩脆性程度不及石英砂岩明显,试件呈劈裂破坏,表现较为完好,卸载后发现一部分破碎严重,另一部分存在较多裂隙,但整体较完整.

长石砂岩破断面微观结构如图 5 所示,断面较为平整干净,整体呈现出多个小扇贝形状的断口(图中蓝圈),晶体形貌不明显,伴有少量碎屑

散落分布,晶体胶结程度较差,孔洞不发育,裂隙较发育(图中红圈),破裂的晶粒和晶间裂隙较明显,长石砂岩绝大部分晶粒强度大于胶结物质强度,所以晶粒发生断裂、晶间胶结物质同样发生破坏,两者强度不同导致破坏需要克服不同作用力,从而在应力-应变曲线屈服阶段呈现波动上升的特点.

当长石砂岩试件沿晶面和穿过晶粒发生劈裂破坏后,绝大部分承载结构失效,峰后继续加压过程中,晶粒碎片在裂隙间起一定阻碍作用,所以峰后强度在 35 MPa 出现短暂波动后继续快速降低,裂隙最终贯穿试件.

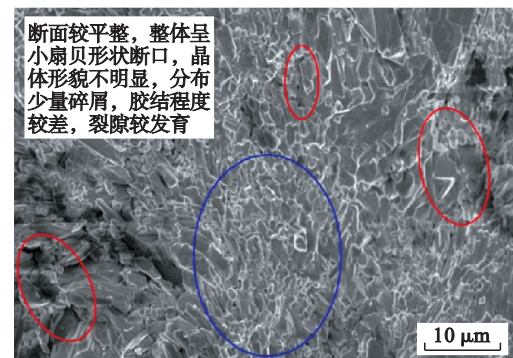


图 5 长石砂岩微观结构

Fig. 5 Microstructure of feldspathic sandstone

3.3 海绿石砂岩宏观-微观破坏特征

海绿石砂岩试件应力-应变曲线的压密阶段较石英砂岩、长石砂岩持续时间更长,表明其内部裂纹和孔隙较多,致密性相对较差;弹性阶段应变较小,但斜率与长石砂岩相当;塑性阶段在较低的应力条件下裂纹即开始萌生和发展,出现软化变形,但仍具有承载能力,应力降至 28 MPa 左右时,试件承载一段时间后缓慢降低,试件总应变较大,没有瞬间破坏现象,能量逐渐耗散,呈现出延性破坏的特点.试件呈 X 形剪切破坏,卸载后试件仍能保持较完整形貌.

海绿石砂岩破断面微观结构如图 6 所示,断面平整度差,晶体形貌特征不明显,分布大量晶体碎片和岩屑(图中黄圈),试件断面呈现复合形貌(图中蓝圈),其中左下部为平板状石英断口,右上部海绿石呈现花团状图案,孔洞、裂隙发育(图中红圈),晶间胶结性差.图中可以观察到擦痕,表明试件破坏过程中存在相对剪切滑移,晶粒运动挤压破碎,晶间物质被摩擦成粉,在裂隙和破碎晶间堆积.

据此分析组成海绿石砂岩的晶粒强度与晶间胶结物质强度相当,且内部存在不连续弱面,

所以晶粒本身断裂、晶间胶结物质破坏、内部弱面结构剪切滑移共同控制试件的破坏,形成裂隙最终贯穿试件.峰后阶段大量晶粒碎片和岩屑物质阻碍主破断面的相对剪切滑移,所以峰后阶段应力缓慢降低.

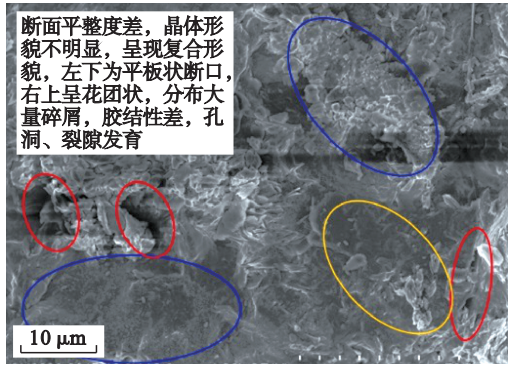


图 6 海绿石砂岩微观结构

Fig. 6 Microstructure of glauconitic sandstone

综上分析,3种砂岩峰值应力逐渐降低但峰值应变增加,并呈现出一定的软化特征,由脆性破坏向延性破坏过渡,产生这种现象的主要原因是晶粒强度和晶间胶结物质强度相近,试件同时发生沿晶破坏和穿晶破坏,破碎的晶粒和岩屑等物质会阻碍主破断面的相对滑移.

4 砂岩剪切试验微观破坏特征分析

采用楔形剪切仪进行砂岩变角剪切试验,如图 7 所示.每种岩样制作 9 块 50 mm×50 mm×50 mm 立方体标准试件^[22],分 3 组每组 3 块在 45°,55°,65°剪切角下进行试验,通过计算得到正应力和剪应力均值,得到黏聚力 C 和内摩擦角 ϕ 的值,如表 2 所示.



图 7 剪切强度试验

Fig. 7 Shear strength test

4.1 石英砂岩剪切微观破坏特征

石英砂岩剪切破断面微观结构如图 8 所示,断面平整度差,晶体形貌不明显,但可观测到扇

砂岩样品	黏聚力 C /MPa	内摩擦角 ϕ /($^{\circ}$)
石英砂岩	12.9	33.0
长石砂岩	11.5	30.9
海绿石砂岩	9.22	28.4

状的晶面(图中蓝圈).受剪切错动影响断面擦痕明显(图中绿圈),在相对剪切滑移的过程中,晶面沿运动方向产生擦痕,胶结物质摩擦破碎,堆积于低洼处或错断隙间.断口表面有大量的晶粒碎片(图中黄圈),说明石英砂岩试样在剪应力作用下,由于晶粒强度大于晶间胶结物质强度,破坏具有一定“选择性”,首先发生沿晶破坏,主破断面两侧凸起的晶粒在剪应力强烈作用下反复碰撞挤压错动,才发生明显的穿晶破坏,所以断口表面粗糙度大,坑洼状态明显.

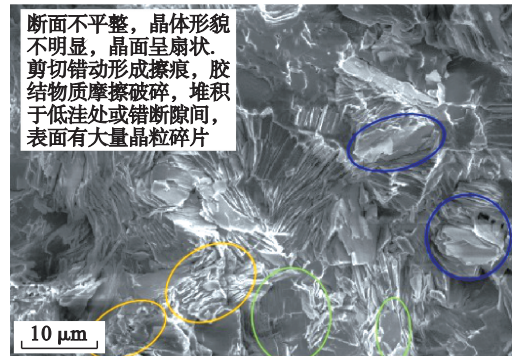


图 8 石英砂岩剪切破断面微观结构

Fig. 8 Microstructure of quartz sandstone shear-breakage section

4.2 长石砂岩剪切微观破坏特征

长石砂岩剪切破断面微观结构如图 9 所示,断面部分平整(图中蓝圈),大多表现出丘陵沟壑状,晶体形貌不明显,受剪切错动影响,擦痕较明显.断口表面有大量的晶粒碎片(图中黄圈).长石砂岩试样在剪应力作用下,绝大部分晶粒强度大于晶间胶结物质强度,一小部分晶粒的强度小于晶间胶结物质强度,胶结物质剪断沿晶破坏为主伴随部分穿晶破坏,在主破断面两侧强度较大的凸起晶粒反复碰撞挤压错动形成晶粒碎片,断口表面粗糙程度一般.

4.3 海绿石砂岩剪切微观破坏特征

海绿石砂岩剪切破断面微观结构如图 10 所示.由图 10 可以观察到,虽然受剪切错动影响但断口表面较为平整呈片板状(图中蓝圈),仅局部存在少量擦痕.试件在剪应力作用下,由于晶粒强度与晶间胶结物质强度相近,几乎同时发生沿

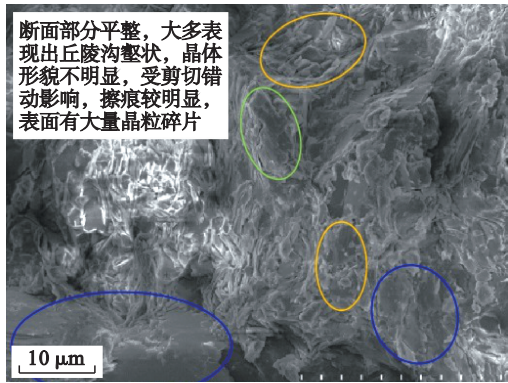


图9 长石砂岩剪切破断面微观结构

Fig. 9 Microstructure of feldspathic sandstone shear-breakage section

晶破坏和穿晶破坏, 两者同时被剪断形成主破断面, 断口表面粗糙程度低, 摩擦情况不明显, 断面上散落着少量的碎屑物质(图中黄圈), 说明裂隙贯通的瞬间即发生破坏。

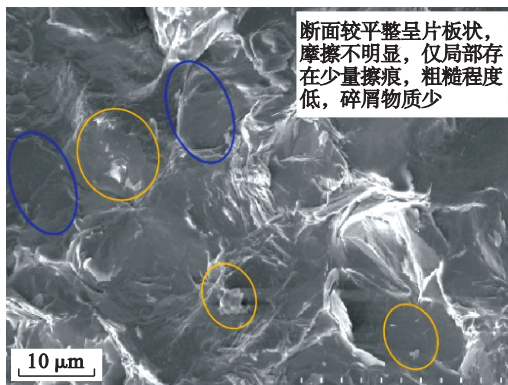


图10 海绿石砂岩剪切破断面微观结构

Fig. 10 Microstructure of glauconitic sandstone shear-breakage section

综上所述, 3种砂岩受剪应力作用发生沿晶破坏和穿晶破坏, 但发生顺序略有不同, 受晶粒和晶间胶结物质强度影响, 当晶粒强度大于晶间胶结物质强度时, 主要发生沿晶破坏, 主破裂面两侧凸起晶粒挤压错动引起穿晶破坏, 导致断口表面粗糙度大、晶粒碎片多、擦痕明显, 当两者强度相近时, 沿晶破坏和穿晶破坏几乎同时发生, 断口表面粗糙程度低、晶粒碎片少、擦痕不明显。

5 结 论

1) 砂岩强度受矿物组成和微观结构的共同作用, 以石英、长石为主要矿物的陆相沉积砂岩强度高于海相沉积砂岩。陆相沉积环境形成的砂岩胶结较紧密, 发生脆性破坏, 海相沉积砂岩易

受外界环境影响导致胶结性一般, 呈现延性破坏。

2) 砂岩压缩微观破坏特征受晶粒和晶间胶结物质强度影响, 石英砂岩晶粒强度>晶间胶结物质强度, 发生沿晶破坏, 断面平整, 长石砂岩发生沿晶和穿晶破坏, 断面呈小扇贝状, 少量碎屑, 海绿石砂岩断面呈平板-花团复合状, 晶粒破碎且擦痕明显, 晶粒、晶间胶结物质及内部结构弱面共同控制破坏特征。

3) 砂岩剪切微观破坏均发生沿晶破坏和穿晶破坏, 石英砂岩先发生沿晶破坏再发生穿晶破坏, 断面不平整、擦痕及碎屑多, 长石砂岩发生沿晶破坏为主伴随一定穿晶破坏, 断面部分平整、表面有擦痕和碎屑, 海绿石砂岩同时发生沿晶破坏和穿晶破坏, 断面平整、几乎无擦痕和碎屑。

参考文献:

- [1] 朱建明, 谢谟文, 赵俊兰. 工程地质学[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2006: 15-49.
(Zhu Jian-ming, Xie Mo-wen, Zhao Jun-lan. Engineering geology[M]. Beijing: China Building Materials Press, 2006: 15-49.)
- [2] Wu Z J, Ji X K, Liu Q S. Study of microstructure effect on the nonlinear mechanical behavior and failure process of rock using an image-based-FDEM model[J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 121: 103480.
- [3] Xie H P, Gao F. The mechanics of cracks and a statistical strength theory for rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(3): 477-488.
- [4] Zhang G B, Zhang W Q, Wang H L, et al. Microscopic failure mechanism analysis of sandstone under triaxial compression[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2019, 37(2): 683-690.
- [5] Tan Y L, Yin Y C, Huang D M. Inhomogeneous micro-structure influence on macro-crack of sandstone[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2013, 41(6): 1024-1031.
- [6] Wasantha P L P, Ranjith P G, Zhao J, et al. Strain rate effect on the mechanical behaviour of sandstones with different grain sizes[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 48(5): 1883-1895.
- [7] Li H M, Li H G, Wang K L, et al. Effect of rock composition microstructure and pore characteristics on its rock mechanics properties[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2018, 28(2): 303-308.
- [8] Tavares L M, das Neves P B. Microstructure of quarry rocks and relationships to particle breakage and crushing[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2008, 87(1/2): 28-41.
- [9] Li L M, Larsen I, Holt R M. Laboratory observation and micromechanics-based modelling of sandstone on different scales[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(4): 1407-1422.
- [10] Sha S, Rong G, Tan J, et al. Tensile strength and brittleness of sandstone and granite after high-temperature treatment: a review[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(14): 598.
- [11] Wan Z J, Zhao Y S, Zhang Y, et al. Research status quo and prospect of mechanical characteristics of rock under high

- temperature and high pressure [J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2009, 1(1):565-570.
- [12] 邓华锋,支永艳,段玲玲,等.水-岩作用下砂岩力学特性及微观结构损伤演化[J]. *岩土力学*, 2019, 40(9):3447-3456.
(Deng Hua-feng, Zhi Yong-yan, Duan Ling-ling, et al. Research on the mechanical properties of sandstone and the damage evolution of microstructure under water-rock interaction [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(9):3447-3456.)
- [13] 邓华锋,齐豫,李建林,等.水-岩作用下断续节理砂岩力学特性劣化机理[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(4):634-643.
(Deng Hua-feng, Qi Yu, Li Jian-lin, et al. Degradation mechanism of intermittent jointed sandstone under water-rock interaction [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(4):634-643.)
- [14] Deng H F, Yuan X F, Wang L H, et al. Experimental research on changes in the mechanical property law of reservoir bank sandstone under "immersion - air dry" circulation [J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2013, 12(9):1785-1789.
- [15] Zhang H X, Lu K P, Zhang W Z, et al. Quantification and acoustic emission characteristics of sandstone damage evolution under dry - wet cycles [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 48:103996.
- [16] 肖鹏,陈有亮,杜曦,等.冻融循环作用下砂岩的力学特性及细观损伤本构模型研究[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(4):805-815.
(Xiao Peng, Chen You-liang, Du Xi, et al. Study on the mechanical properties of sandstone under freeze-thaw cycles and study of meso-damage constitutive model [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(4):805-815.)
- [17] Chen L X, Li K S, Song G L, et al. Effect of freeze-thaw cycle on physical and mechanical properties and damage characteristics of sandstone [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1):12315.
- [18] Cai Y Y, Yu J, Fu G F, et al. Experimental investigation on the relevance of mechanical properties and porosity of sandstone after hydrochemical erosion [J]. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(11):2053-2068.
- [19] Shen Y J, Zhang Y L, Gao F, et al. Influence of temperature on the microstructure deterioration of sandstone [J]. *Energies*, 2018, 11(7):1753.
- [20] 赵怡晴,吴常贵,金爱兵,等.热处理砂岩微观结构及力学性质试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(7):2233-2240.
(Zhao Yi-qing, Wu Chang-gui, Jin Ai-bing, et al. Experimental study of sandstone microstructure and mechanical properties under high temperature [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(7):2233-2240.)
- [21] 金爱兵,王树亮,魏余栋,等.不同冷却条件对高温砂岩物理力学性质的影响[J]. *岩土力学*, 2020, 41(11):3531-3539,3603.
(Jin Ai-bing, Wang Shu-liang, Wei Yu-dong, et al. Effect of different cooling conditions on physical and mechanical properties of high-temperature sandstone [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(11):3531-3539,3603.)
- [22] Ulusay R. The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007-2014 [M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2015:51-68.
- [23] Zhou J, Lan H X, Zhang L Q, et al. Novel grain-based model for simulation of brittle failure of Alxa porphyritic granite [J]. *Engineering Geology*, 2019, 251:100-114.
- [24] Hofmann H, Babadagli T, Zimmermann G. A grain based modeling study of fracture branching during compression tests in granites [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 77:152-162.
- [25] 于庆磊,郑超,杨天鸿,等.基于细观结构表征的岩石破裂热力耦合模型及应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(1):42-51.
(Yu Qing-lei, Zheng Chao, Yang Tian-hong, et al. Meso-structure characterization based on coupled thermal-mechanical model for rock failure process and applications [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(1):42-51.)