http://qks.cqu.edu.cn

文章编号:1000-582X(2012)01-132-09

锦屏层状大理岩断裂特征的微细观分析

赵小平[1],左建平[2],裴建良[1],张　茹[1]
(1. 四川大学 水利水电学院,成都 610065;
2. 中国矿业大学(北京) 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083)

摘　要:锦屏二级地下洞室群围岩处于埋深大、高地应力状态,开挖卸荷后围岩变形破坏引起的工程问题十分突出。根据锦屏二级交通辅助洞所取得盐塘组大理岩的层状及白山组大理岩均质的特性,利用 SEM 高温疲劳试验系统,开展了对盐塘组大理岩不同层理方向受力及白山组大理岩的变形破坏特征及断裂机理的三点弯曲试验。试验过程中,将岩样加工成盐塘组大理岩平行层理、垂直层理及白山组大理岩 3 组试件。研究结果表明:盐塘组大理岩的层状特性是由于其矿物成分的方解石矿物颗粒及白云石矿物颗粒呈条带状相间分布所致,而矿物颗粒单一的白山组大理岩试件则较为均质;层状大理岩的断裂机理取决于对层理的作用力方向及矿物组成,并且表现出力学参数上的差异,而受矿物颗粒间的胶结能力及颗粒大小的影响,白山组试件强度则最小;盐塘组大理岩两组试件变形破坏过程表现出明显的 3 个阶段,而白山组试件变形破坏特征则划分为峰前及峰后阶段,受不同断裂机理的影响盐塘组荷载平行层理方向较之垂直方向试件的塑性变形特征明显,且白山组试件峰后阶段较为完整的表现出了其变形破坏过程。

关键词:锦屏;层状大理岩;三点弯曲;扫描电镜;变形特征;破坏机理
中图分类号:TU45　　**文献标志码**:A

Meso-experimental analysis on fracture characteristics of Jinping bedded marble

ZHAO Xiao-ping[1], *ZUO Jian-ping*[2], *PEI Jian-liang*[1], *ZHANG Ru*[1]
(1. School of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, P. R. China;
2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Beijing, Beijing 100083, P. R. China)

Abstract: The project problem because of wall rock's deformation fracture in deep-buried and high geostress conditions is very prominent at Jinping hydropower Ⅱ station underground engineering. According to the characteristics of the bedded marble collected from Jinpiing Ⅱ hydropower station auxiliary traffic tunnel in deep-buried area, three-point bending experiment on different bedded direction specimens with SEM high temperature testing system is carried out to test the stress of bedded marble in different directions and the failure mechanism and deformation features of homogeneous marble. In the test, there are 3 groups of specimens, include parallel bedded specimen, vertical bedded specimen and

收稿日期:2011-07-02
基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(2010CB732005,2010CB226802,2011CB201201);国家自然科学基金项目(50639100)
作者简介:赵小平(1984-),男,四川大学博士研究生,主要从事于岩石力学及地质灾害防治等方面的研究工作,(E-mail)zxpisgod@sina.com。

http://qks.cqu.edu.cn

homogeneous marble specimen. The results show that: bedded marble's bedded feature is because of the banded structure feature between dolomite mineral particles and calcite mineral particles; the fracture mechanism and strength parameter of bedded marble depend on different force directions and mineral composition. Because of the cement capacity between dolomite minerals and particles size, homogeneous marble specimen has the lowest strength. The marble specimens' deformation shows 3 stages, and because of different fracture mechanisms, the plastic deformation of parallel bedded specimens is more obvious than that of vertical bedded specimen. While the deformation of homogeneous marble can be divided into 2 stages, i. e. before and after peak stage, and the after peak stage shows the complete deformation development process.

Key words: Jinping; bedded marble; three-point bending test; SEM; deformation characteristic; fracture mechanics

锦屏二级水电站大型深埋隧洞群由 4 条引水隧洞、2 条辅助洞及 1 条施工排水洞组成，隧洞群总长约 118 km，具有埋深大、洞线长、洞径大、地应力水平高、工程地质条件极其复杂、施工布置困难等特点，是目前世界上已建、在建总体规模、综合难度最大的水工隧洞群工程[1]。尽管锦屏二级水电站建设所面对的这些难题，国内外一些学者采用各种试验手段针对其深埋大、应力水平高的深埋岩体已有较多深入的研究，并且取得较为显著的成果，为锦屏二级水电站的高埋深、高地应力条件下的设计、施工提供了有力的科学依据，如黄润秋、李宏哲及秦玉春等[2-4]通过室内三轴卸荷试验及破坏后断口 SEM 细观扫描分析手段，研究了高应力条件下卸荷速率及卸围压对锦屏大理岩力学特性影响规律；汪斌、裴建良等[5-6]通过对赋存与高地应力条件下的锦屏深埋大理岩进行加、卸载试验，深埋大理岩的变坏特征、力学参数及加卸荷本构模型；张春生等[7]通过单轴压缩-声发射试验研究了锦屏深埋白山组大理岩的启裂强度和损伤强度；李宏哲及陈卫忠等[8-9]研究了锦屏深埋裂隙岩体的宏观力学参数及其变形特征；Chun' an Tang、Lockner D 等[10-11]在高应力条件下岩爆预测方面也取得了一些有意义的研究成果；Zuo J. P.、Dyskin A. V. 等[12-13]通过细观手段研究了应力、温度对岩石破坏机理的影响。然而值得思考的是，已有的研究成果大部分是基于锦屏岩石宏观上的力学参数及变形特征的分析，而对其卸荷开挖后结合层状特性在微细观上的变形破坏的裂纹扩展及破坏机理鲜有报道。

基于锦屏二级交通辅助洞盐塘组层状大理岩及白山组大理岩试件，笔者利用 SEM 高温疲劳试验系统对试件进行三点弯曲试验并得到裂纹扩展的实时电镜扫描图片，研究盐塘组大理岩不同层理方向试件及白山组大理岩在三点弯曲作用下裂纹扩展的规律，并得到荷载-变形的全过程曲线，结合破坏后试件断口的电镜扫描，对锦屏层状大理岩三点弯曲试验的变形破坏特征及其细观破坏机制进行研究。为锦屏地下洞室群围岩裂隙的成因与其破坏机制提供一定的科学依据，并且对锦屏洞室群开挖卸荷后的围岩稳定问题有着重要的科学意义。

1　试件制备及试验介绍

试件取自于锦屏二级交通辅助洞埋深约 2 000 余 m 深的盐塘组及白山组大理岩，其中盐塘组大理岩呈灰白、灰色条带互层，具有明显的层状特征，中细粒结构；白山组大理岩呈白色，致密、质纯，细粒结构[14]。根据矿物 X-射线衍射分析结果（见表 1）：盐塘组大理岩主要矿物成分为方解石及白云石，其中方解石约占 54.7%，白云石约占 45.3%；白山组大理岩主要矿物成分为白云石，含量约占 91%，方解石约占 8.6%，此外，白山组大理岩还含有极少量的云母，含量约 0.4%。

表 1　锦屏二级辅助洞矿物 X-射线衍射分析结果

编号	岩性	矿物种类和含量/%			粘土矿物/%
		方解石	白云石	云母	
A	盐塘组	54.7	45.3	—	—
B	白山组	8.6	91.0	0.4	—

本次三点弯曲试验是在中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室 SEM 高温疲劳实验系统（如图 1 所示）上完成的，该实验系统不仅能够得到试件三点弯曲荷载-变形全过程曲线，还能实时观察不同荷载条件下试件的变形破坏及表面裂纹的扩展。

根据所取深埋盐塘组大理岩的层状特性及白山组大理岩均质的特征，为研究不同层理方向层状大理岩的破坏过程及其断裂机理，根据盐塘组大理岩

http://qks.cqu.edu.cn

图 1 SEM 高温疲劳试验系统

层理与三点弯曲荷载所产生的张拉应力的方向将盐塘组大理岩试件分为 2 组，分别为 A1、A2，其中 A1 组试件为盐塘组大理岩层理方向与张拉应力平行（以下简称平行层理，如图 2(a)所示），A2 组试件为盐塘组大理岩层理方向与张拉应力方向垂直（以下简称垂直层理，如图 2(b)所示），而质纯的白山组大理岩则单独一组（如图 2(c)所示），即可作为层状大理岩试件的对照组，也可以作为研究矿物成分单一、颗粒粒径较小的大理岩在三点弯曲作用下的破坏过程及其断裂机理，编号为 B 组试件，每组试件为 3 个试样，共 9 个试样，为方便试验，将盐塘组平行试件编号为 A1-1N，盐塘组垂直试件编号为 A2-1N，白山组大理岩编号为 B-1N，其中 N 为各组试件样品编号。受细观试验观察区域限制，为更好的观察试件裂纹的扩展，将试件进行开槽处理，开槽深度及试件尺寸如图 2 所示。

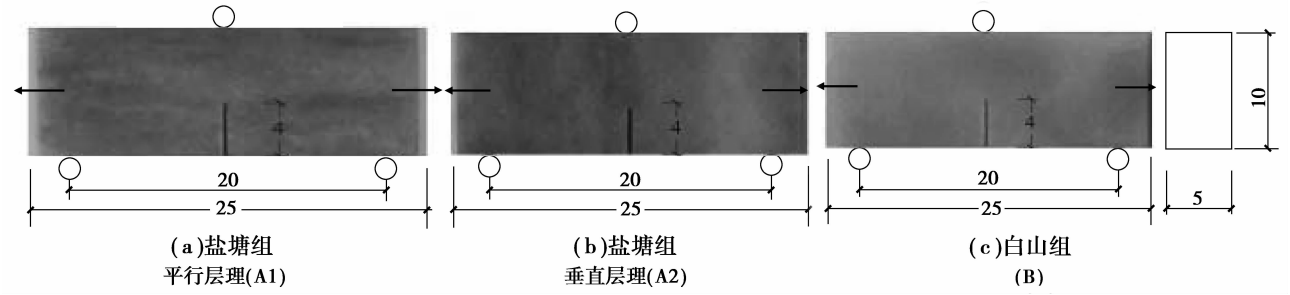


图 2 试件实物图及试件尺寸（单位：mm）

2 断裂力学参数及变形破坏特征

2.1 断裂力学参数

2.1.1 断裂韧度

断裂韧性作为表征材料阻止裂纹扩展的能力，是辨别材料断裂稳定的重要指标，相同裂纹尺寸时，在加载速度及温度一定的条件下，其断裂是稳定的。本文通过对 A1、A2 及 B 组试件进行预置裂纹处理，并采取断裂韧度对 3 组试件抵抗裂纹扩展能力进行比较，开槽深度均为 4.0 mm。

开槽试件三点弯曲试验断裂韧度 K_{1c} 计算可采用下式[15]

$$K_{1c}=\frac{P_c}{B\sqrt{H}}\cdot f\left(\frac{a}{H}\right), \tag{1}$$

式中：P_c 为试件临界荷载，为避免临界荷载的取值对各组试件断裂韧度的影响，且考虑到本文中断裂韧度仅作为表征三组试件抵抗裂纹扩展的能力的比较，临界荷载均取峰值荷载的 80%；B 为试件厚度，5 mm；H 为试件高度，10 mm；$f(a/H)$ 为裂纹相对长度 a/H 的函数，本次试验开槽深度均为 4 mm，试件高度均为 10 mm，则经文献[15]查表后可以得到 $f(a/H)=f(0.25)=7.43$。

盐塘组层状大理岩平行层理（A1）、垂直层理（A2）及白山组大理岩（B）断裂韧度 K_{1c} 计算结果（见图 3）显示，A2 组试件抵抗裂纹扩展的能力明显弱于同样的矿物成分而受力方向不同的 A1 组试件，断裂韧度为 A1 组的 55%，而作为单一矿物颗粒组成的 B 组试件断裂韧度最低，为 19.6 N·mm$^{-3/2}$，为 A1 组的 33%。

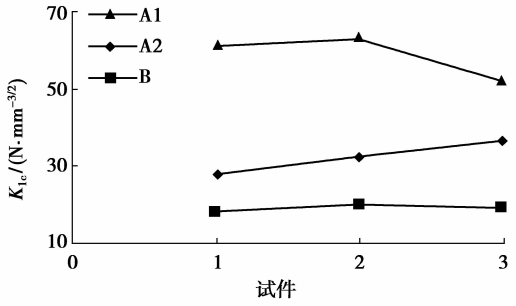


图 3 大理岩三点弯曲断裂韧度

2.1.2 峰值断裂能

断裂能作为材料断裂时外力对材料变形所做的

http://qks.cqu.edu.cn

功，同样可以作为表征岩石材料的力学参数，为避免取值对各组试件断裂能计算结果的影响，采取在峰值荷载时的荷载对试件所做的功作为 3 组试件力学参数的表征，即峰值断裂能。

峰值断裂能的计算采取下式[16]

$$W = \int_0^{\sigma_F} \sigma \mathrm{d}\varepsilon, \tag{2}$$

式中：W 为峰值断裂能，σ 为应变 ε 所对应的张拉应力，σ_F 为峰值荷载时所产生的张拉应力。

盐塘组层状大理岩平行层理（A1）、垂直层理（A2）及白山组大理岩（B）峰值断裂能的计算结果（见图 4）显示平行层理大理岩试件 A1 组试件峰值断裂能明显高于垂直层理 A2 组试件，A2 组试件为 A1 组试件的 43%，对于矿物颗粒组成单一的 B 组试件而言其峰值断裂能最低，为 0.59 kN/mm^2，为 A1 组的 30%，这与 3 组试件断裂韧度的大小规律是一致的。

通过对 3 组试件的断裂韧度及峰值断裂能的分析表明，对盐塘组层状大理岩而言，层理与作用力的方向不同会导致同样矿物颗粒组成的盐塘组大理岩试件表现出强度上的差异，而比较矿物颗粒组成不同的盐塘组及白山组大理岩试件，在力学参数上同样表现出迥异。这也就说明层理与作用力的关系及矿物颗粒成分对试件在三点弯曲作用下的破坏机理具有决定性的作用。

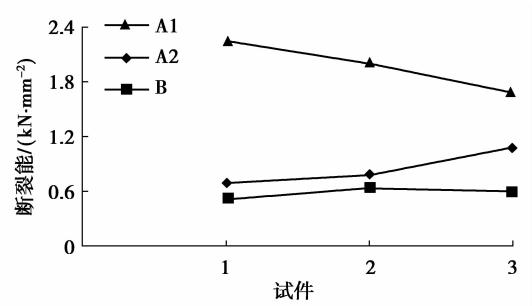


图 4　大理岩三点弯曲断裂能

2.2　变形破坏特征

通过 SEM 高温疲劳试验系统实时加载所得到的深埋盐塘组及白山组大理岩的荷载-变形全过程曲线及试件表面裂纹扩展规律如图 5、6 所示，由于试件的固定是通过三点弯曲加载系统对试件加载所产生的摩擦阻来实现的，使得试件三点弯曲初始荷载并不为零，而且对于开槽试件来说，为避免固定试件时所施加的荷载过大而对其造成不必要的损伤，经多次试验调试后初始荷载控制在 10 N 左右。

对于由方解石矿物颗粒及白云石矿物颗粒所组成的盐塘组层状大理岩，为更好的研究其变形破坏及其断裂机理，根据其荷载-变形全过程曲线的特征可将 A1 组及 A2 组试件变形破坏特征划分为 3 个阶段。

弹性阶段：此阶段内试件所受荷载增量与其所对应的变形增量为定值，即荷载与变形之间呈线性关系，如图 6(b)所示弹性阶段内试件内部并没有发育裂隙，无塑性变形，线弹性特征明显。且图 5 中显示，相比于 A1 组及 B 组荷载-变形曲线，盐塘组垂直层理（A2）试件荷载-变形曲线在开始阶段出现下凹现象，表明在三点弯曲荷载作用下内部矿物颗粒更易沿着不同矿物颗粒条带接触面产生滑移调整[17]，使其表现出压密特征明显。

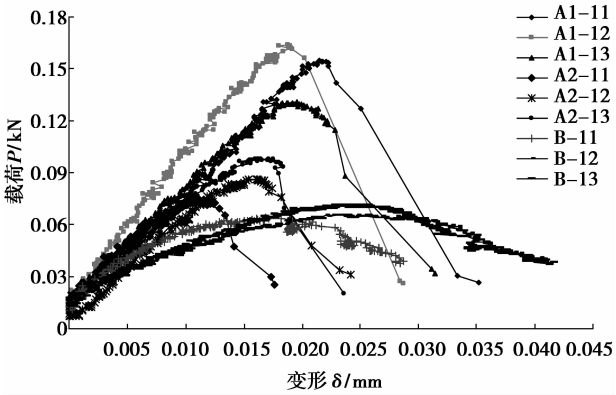


图 5　深埋大理岩三点弯曲荷载-变形全过程曲线

屈服阶段：进入此阶段后试件在三点弯曲荷载继续作用下，试件开槽处裂纹开始发育、扩展，然而受盐塘组大理岩层理与荷载作用力方向的影响，使得断裂机理的不同导致裂纹扩展路径不同，从而使得岩性相同的盐塘组大理岩试件屈服荷载差异明显（A1-11 试件裂纹开始发育扩展时的荷载为 0.129 kN（见图 6(c)），A2-13 试件裂纹开始发育扩展时的荷载为 0.062 kN（见图 6(f)），而且 A1 组试件试验数据离散型明显高于 A2 组，这主要是由于试件内部矿物颗粒间承载力的转换所引起的。

破坏阶段：上述 2 个变形阶段内，A1 与 A2 组试件均表现出相同的变形特征，然而受层状大理岩层理与作用力方向的不同所导致试件在强度上的差异，使得 A1 及 A2 组试件在破坏阶段有着明显的区别。如图 5 所示，A1 组试件由于峰值荷载较大，峰值断裂能较高，使其破坏前所储备的能量较高，当三点弯曲荷载达到峰值荷载后，所储备的能量快速释放，主裂纹开始迅速扩展、会合、贯通，导致试件强度的急剧降低，表现出脆性破坏特征明显；对于 A2 组试件，当试验荷载达到峰值荷载后，A2 组试件裂纹

http://qks.cqu.edu.cn

开始扩展、贯通，并导致试件的破坏，然而如图 5 所示，A2 组试件峰值荷载明显低于 A1 组试件，峰值断裂能同样低于 A1 组试件，导致 A2 组试件在破坏阶段并不像 A1 组试件那么剧烈，而是仍具有一定的塑性变形特征。分析对比图 6 中 A1-11 及 A2-13 试件表明裂纹扩展路径（见图 6(d)、(h)）表明，作为层理方向平行于三点弯曲张拉应力方向的 A1-11 试件破坏裂纹穿越方解石及白云石构成的条带，路径起伏较大，而层理方向垂直于张拉应力的 A2-13 试件破坏裂纹则主要沿着白云石及方解石条带界面之间扩展，路径较为平直；且 A1-11 试件裂隙张开度也明显大于 A2-13 试件，而这也正是 A1 组试件耗能机制及断裂时的剧烈程度的表现。

与盐塘组试件所不同的是，在盐塘组试件内白云石矿物颗粒约占 45.3%，而白山组（B 组）试件矿物成分较单一，白云石矿物颗粒含量达 90%以上，如图 4 所示，B 组试件表现出明显的均质特征，表面局部方解石矿物呈透镜体状分布于试件表面。通过对试件断口电镜扫描结果进行分析（如图 7 所示），可知方解石矿物颗粒粒径大于白云石矿物颗粒的粒径，且白云石颗粒间的胶结能力弱于方解石矿物颗粒之间的胶结能力，从而使得白山组试件在三点弯曲产生的张拉应力作用下，并受开槽处应力集中的影响，试验开始就伴随着塑性变形（如图 6(i)所示），变形破坏过程也明显不同于盐塘组试件，根据峰值前后荷载-变形之间的增减关系将其划分为峰前阶段及峰后阶段。

峰前阶段：B 组试件由于矿物颗粒粒径小，胶结能力较弱，受集中应力的影响，在开槽处裂纹极易沿着白云石矿物颗粒间发育、扩展，塑性变形特征明显，在荷载进一步作用下，裂隙广泛沿着白云石矿物颗粒表面发育，并在开槽处逐渐扩展成裂隙网络（见图 6(j)），并导致试件断裂韧度及峰值断裂能的降低。

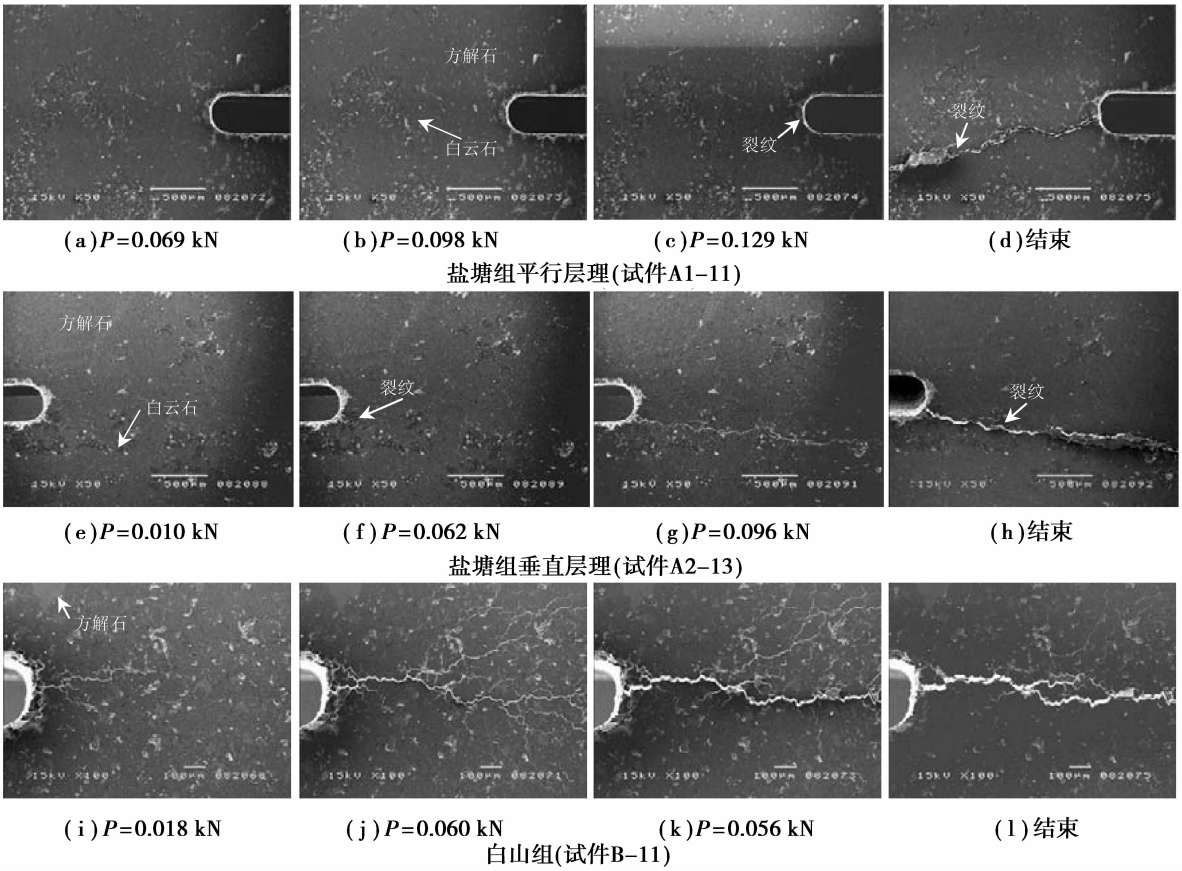
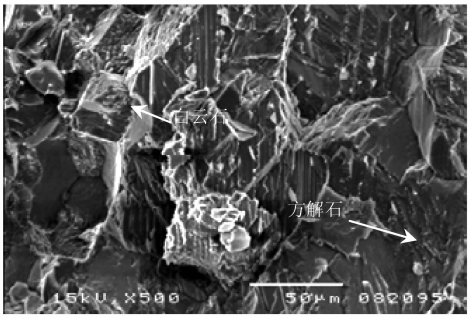


图 6 典型试件三点弯曲作用下试件表面裂纹扩展

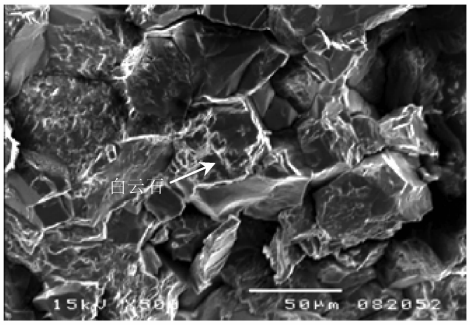
峰后阶段：当三点弯曲荷载达到峰值荷载以后，试件变形破坏开始进入到峰后阶段，试验系统所储存的能量开始释放，主裂纹开始在前阶段所形成的裂隙网络内会合、贯通，然而 B 组试件受矿物颗粒粒径较小及颗粒间胶结能力弱等因素的影响表现出塑性变形特征明显，峰值强度降低，导致 B 组试件在峰前阶段的峰值断裂能较低，使得主裂纹开始扩展时前期所积累的能量释放并不足以使主裂纹迅速扩

http://qks.cqu.edu.cn

展、贯通试件，并表现出与盐塘组试件截然不同的峰后破坏过程，具体表现为：荷载达到峰值荷载后，B 组试件主裂纹扩展到一定程度时在其端部达到一个不稳定平衡状态，荷载开始增加，变形能开始积累，端部裂隙网络也开始沿着颗粒表面发育、扩展，当断裂能积累到一定程度时，能量开始释放，主裂纹在端部形成的裂隙网络内开始扩展、会合；然而，如果此阶段所释放的能量仍不足以使主裂纹贯通试件造成破坏时，试件的变形破坏也就继续开始断裂能的积累到主裂纹扩展、会合的循环，并直至裂纹贯通试件；反之则主裂纹直接贯通试件，并导致试件的破坏。为更加清晰的表述峰后阶段 B 组试件的变形破坏规律，以峰后阶段表现明显的 B-11 来说明。



(a) 盐塘组试件电镜扫描 × 500



(b) 白山组试件电镜扫描 × 500

图 7　试件矿物颗粒组成

白山组典型试件 B-11 的荷载-变形全过程曲线（如图 8 所示）较为明显的表现了白山组大理岩开槽试件峰后阶段的变形破坏特征，当荷载达到峰值荷载后（图 8Ⅰ点），前期所积累的变形能释放，主裂纹开始在开槽处发育的裂隙网络内会合、扩展，如前所述，该试件受矿物颗粒粒径大小及胶结能力所影响，强度明显低于 A1 组及 A2 组试件（如图 3、4 所示），且峰前阶段试件塑性变形特征明显，试验系统所储备的应变能较低，主裂纹扩展时所释放的应变能并不足以使其贯通试件，而是扩展到一定范围后，在裂纹端部形成一个不稳定平衡状态（图 8Ⅱ点），此时试件变形所受荷载的增加而增加，变形能也开始在试件及仪器内积累，微裂隙在三点弯曲张拉应力的作用下开始在裂纹端部沿着矿物颗粒界面开始发育、扩展，并逐渐在端部形成一个裂隙网络，当裂隙网络发展到一定程度时，前期所形成的主裂纹开始在端部的裂隙网络内会合、扩展，周边微裂隙开始闭合（如图 6 所示），所储备的能量开始释放（图 8Ⅲ点），这就完成了峰后变形破坏的一个循环，根据其在荷载-变形曲线上的形态可将这样的一个循环称为“鼓包”[18]。然而，如果上一次循环后所释放的能量仍不足以导致裂纹贯通试件，则在端部继续形成一个新的不稳定状态（图 8Ⅳ点），开始下一次的“鼓包”循环；当上一次所释放的能量足以使裂纹贯通试件时，则直接导致试件的破坏。综上，B 组试件经开槽处理后，受矿物颗粒粒径及颗粒间胶结能力的影响，峰后变形破坏特征表现较为明显，过程概括为主裂纹扩展、会合（Ⅰ-Ⅱ）→裂隙网络（塑性变形区）（Ⅱ-Ⅲ）→主裂纹扩展、会合（Ⅲ-Ⅳ）的循环过程，直至裂纹贯穿试件，受该过程的发展试件及电镜扫描的观察范围的约束，裂隙网络的形成→主裂纹扩展、会合的发展过程类似于图 6(j)→(k)，且在图 6(k)的尾部新的裂隙网络开始形成。

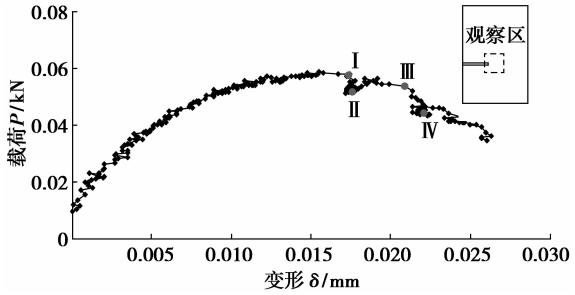


图 8　白山组典型试件 B-11 荷载-变形全过程曲线

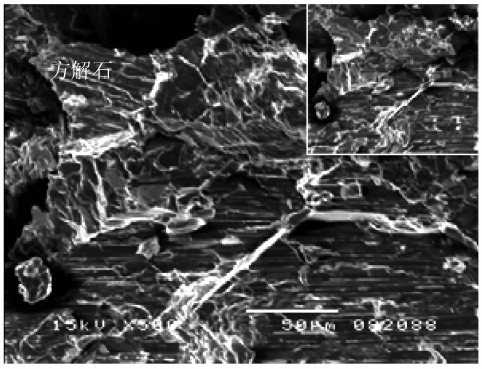
3　断裂机理的细观分析

如前文所述，矿物成分一致的盐塘组大理岩 A1 组与 A2 组试件层理方向与其所受作用力的方向不同导致 A1 组试件及 A2 组试件在力学参数及变形破坏特征上具有明显的差异，而作为矿物颗粒成分单一，粒径较低的白山组试件同样具有不同的力学参数及变形破坏特征，在图 6 中试件表面裂纹的扩展路径可以认为 3 组试件力学参数参数及变形特征的差异是与其断裂机理有着直接的关系，然而试件表面的裂纹电镜扫描结果并不能观察到裂纹内部的断裂情况，也就无法究其根本的原因。因此，通过利用 SEM 疲劳试验系统，将试件破坏后的断口再一次放入该实验系统，对试件断口进行高倍显微分析，并

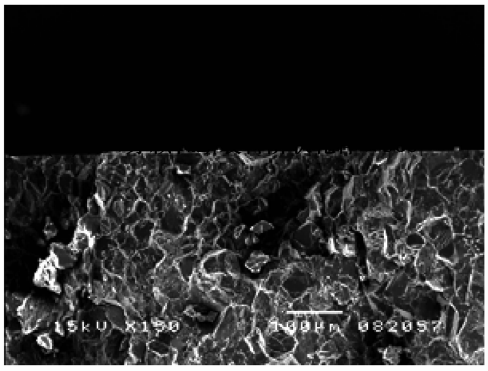
http://qks.cqu.edu.cn

得到高倍下的电镜扫描图片，受篇幅的限制，本文选取能够代表试件断裂机理的典型图片，现将 3 组试件断裂机理分析如下：

1)图 9 为盐塘组层状大理岩平行层理试件典型断口电镜扫描图，扫描结果显示，盐塘组大理岩层状特性是由方解石矿物颗粒及白云石矿物颗粒成条带状互层所表现出的宏观层状特征。水平层理试件 A1 在张拉应力的作用下，裂纹扩展时需穿透方解石矿物颗粒集中条带及白云石矿物颗粒条带，如图 6(d)所示，由于方解石矿物颗粒粒径较大，在方解石条带内裂纹则直接穿透方解石颗粒，表现为穿方解石颗粒断裂，如图 9(a)所示，试件表面裂纹扩展路径如图 6(d)所显示的张开、曲折的特点，而在白云石矿物颗粒条带内，其颗粒粒径较小，裂纹扩展时容易调整，且颗粒强度高于方解石颗粒，表现出沿白云石颗粒断裂，如图 9(b)所示。



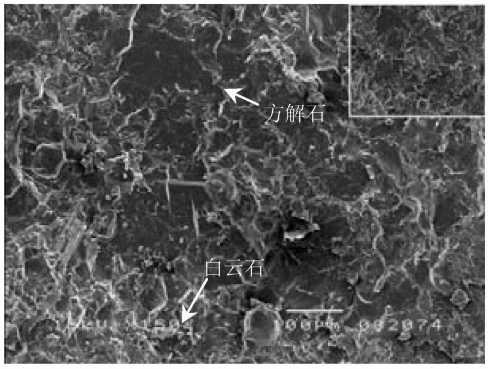
(a)断口穿颗粒断裂台阶状花样×500



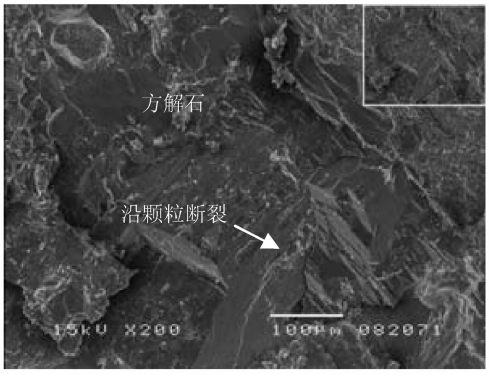
(b)断口沿颗粒断裂电镜扫描×150

图 9 A1 组试件典型断口电镜扫描

2)图 10 为盐塘组层状大理岩垂直层理试件典型断口的电镜扫描图片，结合试件表面裂纹扩展规律，垂直层理 A2 组试件在三点弯曲张拉应力作用下，裂纹则主要沿着方解石矿物与白云石矿物集中条带之间的界面扩展，扩展路径较为平直，如图 6(h)所示，裂纹断口如图 10(a)所示，表现为沿矿物条带界面间的沿颗粒性质的断裂，然而受开槽所处的矿物颗粒性质及条带之间的平直程度，试件局部范围内裂纹则会沿着方解石及白云石矿物颗粒间扩展，表现为沿颗粒断裂，如图 10(b)所示。



(a)断口沿颗粒断裂电镜扫描×150



(b)断口沿方解石颗粒断裂电镜扫描×200

图 10 A2 组试件典型断口电镜扫描

3)图 11 为白山组大理岩试件典型断口电镜扫描图，扫描结果显示，白山组试件内部矿物成分单一，颗粒粒径较小，而正是由于白山组大理岩具有的这样特点使得白云石单颗粒强度高于方解石，裂纹在粒径较小的矿物颗粒周边扩展时更易调整，且白云石颗粒间的云母充填也一定程度上降低了颗粒间的胶结能力，因此，试件在三点弯曲张拉应力的作用下，裂纹极易沿着白云石矿物颗粒周边发育、扩展，表现为沿白云石矿物颗粒断裂，如图 11 所示。

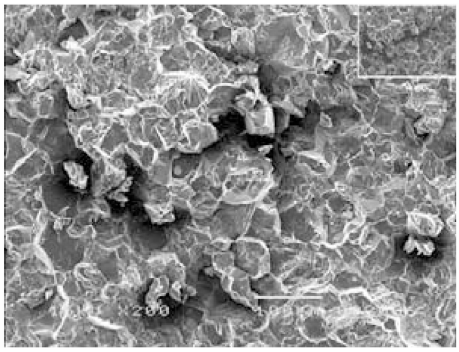


图 11 B 组试件典型断口电镜扫描×200

http://qks.cqu.edu.cn

综上分析，从试件断口电镜扫描对其断裂机理的分析表明，正是由于 A1 组试件层理方向与三点弯曲张拉应力平行，裂纹扩展所表现出的穿颗粒断裂与沿颗粒断裂使得其力学参数是最高的，且裂纹扩展的最为剧烈；而 A2 组试件由于层理方向与三点弯曲张拉应力方向垂直，裂纹扩展表现为主要沿着矿物条带界面之间的沿颗粒断裂，且裂纹扩展较为平直，试件强度降低明显；对于 B 组试件而言，受矿物颗粒组成及颗粒粒径大小的影响，裂纹极易沿着白云石颗粒周边发育、扩展，表现为沿白云石颗粒断裂，而且电镜扫描结果及矿物成分分析显示，白山组大理岩颗粒间的胶结能力低于盐塘组大理岩，使得同样为沿颗粒断裂的白山组试件的力学参数低于 A2 组试件。

4　结　论

本次试验是对取自于锦屏二级交通辅助洞的盐塘组及白山组大理岩所进行的三点弯曲试验，为研究盐塘组大理岩的层状及均质的白山组大理岩断裂特征，利用 SEM 高温疲劳试验系统对试件裂纹的实时扩展路径及破坏后试件断口经行电镜扫描分析，结合三点弯曲变形破坏特征及其断裂力学参数，对锦屏盐塘组层状大理岩及均质的白山组大理岩的断裂特征及其断裂机理进行分析，并得到了以下几点结论：

1)盐塘组大理岩主要由颗粒粒径较小的白云石矿物颗粒及颗粒粒径较大的方解石矿物颗粒所组成，白云石矿物颗粒与方解石矿物颗粒呈条带状分布，宏观上表现为层状、中细粒结构；白山组大理岩绝大部分由粒径较小的白云石矿物颗粒所组成，宏观上表现为均质、细粒结构。

2)三点弯曲荷载-变形全过程曲线表明，盐塘组层状大理岩试件阶段特征较为明显，然而受断裂机理的差异，平行试件裂纹扩展路径曲折，张开度大；垂直试件则表现出塑性变形特征明显，扩展路径较为平直；而受矿物颗粒大小及颗粒间胶结力的影响，白山组试件变形特征表现出明显峰前阶段及峰后阶段。

3)受作用力方向、矿物成分、矿物颗粒间的胶结能力及其粒径大小等因素的影响，盐塘组平行层理试件内部以穿颗粒及沿颗粒组合的断裂机制而表现出断裂韧度及峰值断裂能最大；盐塘组垂直层理试件以沿条带间的界面扩展的沿颗粒断裂机制所表现出的力学参数次之，分别为 A1 组试件的 55%和 43%；而沿白云石矿物颗粒断裂机制的白山组试件力学参数则最低，分别为 A1 组试件的33%和 30%。

4)盐塘组大理岩受作用力方向的影响所表现出力学行为、断裂韧度及断裂机理的差异，表明锦屏地下洞室群围岩中，主应力垂直层理面时岩爆的潜在危害更大，而当主应力平行层理面时则易发生沿层面发生张拉弯折破坏。

参考文献：

[1] 吴世勇，王鸽. 锦屏二级水电站深埋长隧洞群的建设和工程中的挑战性问题[J]. 岩石力学与工程学报，2010，29 (11)：2161-2170.
WU SHI-YONG，WANG GE. Challenge issues in construction and project of larger-scale deep-buried tunnel group of Jinping Ⅱ hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2010，29 (11)：2161-2170.

[2] 黄润秋，黄达. 高地应力条件下卸荷速率对锦屏大理岩力学特性影响规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2010，29 (1)：21-33.
HUANG RUN-QIU，HUANG DA. Experimental research affection laws of unloading rates on mechanical properties of Jinping marble under high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2010，29 (1)：21-33.

[3] 李宏哲，夏才初，闫子舰，等. 锦屏水电站大理岩在高应力条件下的卸荷力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报，2007，26(10)：2104-2109.
LI HONG-ZHE，XIA CAI-CHU，YAN ZI-JIAN，et al. Study on marble unloading mechanical properties of Jinping hydropower station under high geostress conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2007，26 (10)：2104-2109.

[4] 秦玉春，朱珍德，王战鹏. 锦屏水电站引水隧洞大理岩卸荷变形特性试验[J]. 岩土力学，2006，27 (增刊)：1084-1088.
QIN YU-CHUN，ZHU ZHEN-DE，WANG ZHAN-PENG. Unloading strain characteristic experiments on marble of diversion tunnel of Jinping hydropower station [J]. Rock and Soil Mechanics，2006，27(suppl)：1084-1088.

[5] 汪斌，朱杰兵，邬爱清，等. 锦屏大理岩加、卸载应力路径下力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2008，27(10)：2138-2145.

http://qks.cqu.edu.cn

WANG BIN, ZHU JIE-BING, WU AI-QING, et al. Experimental study on mechanical properties of Jinping marble under loading and unloading stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2138-2145.

[6] 裴建良，刘建峰，徐进. 层状大理岩卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2009，28 (12): 2496-2501.
PEI JIAN-LIANG, LIU JIAN-FENG, XU JIN. Experimental study of mechanical properties of layered marble under unloading condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2496-2501.

[7] 张春生，陈祥荣，侯靖，等. 锦屏二级水电站深埋大理岩力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报，2010，29(10): 1999-2009.
ZHANG CHUN-SHENG, CHEN XIANG-RONG, HOU JING, et al. Study of mechanical behavior of deep-buried marble at Jinping Ⅱ hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 1999-2009.

[8] 李宏哲，夏才初，王晓东，等. 含节理大理岩变形和强度特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2008，27(10): 2118-2123.
LI HONG-ZHE, XIA CAI-CHU, WANG XIAO-DONG, et al. Experimental study on deformation and strength properties of jointed marble specimen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (10): 2118-2123.

[9] 陈卫忠，杨建平，邹喜德，等. 裂隙岩体宏观力学参数研究[J]. 岩石力学与工程学报，2008，27 (8): 1569-1575.
CHEN WEI-ZHONG, YANG JIAN-PING, ZUO XI-DE, et al. Research on macro-mechanical parameters of fractured rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8):1569-1575.

[10] TANG C A, WANG J, ZHANG J J. Preliminary engineering application of microseismic monitoring technique to rockburst prediction in tunneling of Jinping Ⅱ project[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2010, 2(3):193-208.

[11] LOCKNER D, BYERLEE J. Acoustic emission and creep in rock at high confining pressure and differential stress [J]. Bulletin of Seismological Society of America, 1977, 67(2): 247-258.

[12] ZUO J P, XIE H, ZHOU H W. SEM in-situ investigation on thermal cracking behavior of Pingdingshan sandstone at elevated temperatures[J]. Geophysical Journal International, 2010, 181(2): 593-297.

[13] DYSKIN A V. Effective characteristics of stress concentrations in materials with self-similar fluctuations[J]. International Journal of Solid and Structures, 2005, 42(2): 477-502.

[14] 华东院勘测设计研究院. 雅砻江锦屏二级水电站可行性研究报告[R]. 成都：华东院勘测设计研究院，2005.

[15] 褚武扬. 断裂韧性测试[M]. 北京：科学出版社，1979.

[16] 庄茁，蒋持平. 工程断裂与损伤[M]. 北京：机械工业出版社，2004.

[17] 尤明庆. 两种晶粒大小大理岩的力学性质研究[J]. 岩土力学，2005，26 (1): 91-96.
YOU MING-QING. A study of mechanical property of two marbles with different crystal sizes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26 (1): 91-96.

[18] 肖树芳，杨淑碧. 岩体力学[M]. 北京：地质出版社，1987.

（编辑 郑 洁）