

DOI: 10.11779/CJGE202102013

# 水-岩及风化作用下层状炭质板岩巴西劈裂试验研究

李二强<sup>1,2</sup>, 冯吉利<sup>\*1,2</sup>, 张龙飞<sup>1,2</sup>, 张洪昌<sup>1,2</sup>, 朱天宇<sup>1,2</sup>

(1. 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 横观各向同性层状板岩在地质环境及施工裸露后形成的水-岩和自然风化作用下, 其物理力学性质将发生退化, 由此常引起岩土隧道、边坡等工程产生抗拉失稳破坏。以甘肃岷县木寨岭隧道炭质板岩为研究对象, 对其开展即时烘干试样(即试样加工后烘干处理)和静置风化试样(加工后室内常温通风放置 60 d)巴西劈裂试验, 分析了两种条件下炭质板岩的抗拉力学性能。结果表明: 两种炭质板岩巴西劈裂试验均表现为脆性破坏, 但力学响应及峰值荷载差异极大; 炭质板岩抗拉强度均受层理影响显著, 但即时烘干试样和静置风化试样的劈裂破坏形态受层理影响程度不同; 以即时烘干试样为基础, 静置风化试样软化系数为 0.11~0.13, 体现了水岩作用及其静置风化对岩样具有显著劣化效应, 但对层理形成的横观各向同性抗拉性能影响不大。此外, 借助 SEM 对水岩静置风化机理进行分析, 具体为水侵入后形成物理化学反应改变矿物微观成分、结构进而结合风化作用表现为矿物骨架承载的累计劣化损伤。

**关键词:** 炭质板岩; 层理; 水-岩作用; 风化; 抗拉强度; 破坏模式; 劣化机理

中图分类号: TU452 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)02-0329-09

作者简介: 李二强(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事岩石力学与地下工程的研究工作。E-mail: lerqiang@163.com。

## Brazilian tests on layered carbonaceous slate under water-rock interaction and weathering

LI Er-qiang<sup>1,2</sup>, FENG Ji-li<sup>1,2</sup>, ZHANG Long-fei<sup>1,2</sup>, ZHANG Hong-chang<sup>1,2</sup>, ZHU Tian-yu<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, Beijing 100083, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The physical-mechanical properties of transversely isotropic layered slates may be degraded due to water-rock interaction (WRI) and natural weathering, which potentially leads to the instability or collapse of tunnels, slopes and mining. In this study, based on the specimens sampled from the carbonaceous slates of Muzhailing Tunnel, the corresponding drying samples (drying in oven after fabrication) and weathering samples (for 60 days' natural weathering after fabrication) are prepared, respectively. The Brazilian tensile tests are conducted. The test results show that the two kinds of carbonaceous slates are both characterized by brittle failure, but the mechanical response covering failure displacement and the peak load are rather different. Further, the tensile strength are significantly affected by bedding while the cleavage failure patterns are also dominated by bedding. The softening coefficient of the static weathering samples is 0.11~0.13, which implies that the WRI and natural weathering play a vital role in the course of rock failure, but they have few influences on the transverse isotropic tensile properties of bedding. Moreover, the mechanisms of specimen failure are explained by the SEM technique to analyze the micro-components and observe the process of specimen deterioration due to physico-chemical reaction.

**Key words:** carbonaceous slate; bedding; water-rock interaction; weathering; tensile strength; failure pattern; degradation mechanism

## 0 引言

岩石作为地质体, 呈现为具有微裂隙、节理、层理及结构面等特征的非均质属性, 其中以页岩、板岩及煤岩等在岩土工程领域分布广泛, 如边坡防护、隧道开挖、巷道顶底板支护等常引起失稳破坏问题<sup>[1-4]</sup>。在建兰州至海口高速渭源至武都段岷县木寨岭隧道因板岩张拉破坏引起初支开裂、钢拱架扭曲等大变形破

坏问题, 故明确其抗拉力学性质对指导工程实践具有重要作用。另外, 自然界中水和风、空气侵蚀等形成的风化作用对其力学特性及工程稳定性影响也具有普遍性<sup>[5-11]</sup>, 因此系统研究板岩水-岩作用后受风化影响

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0600901); 国家自然科学基金项目(41172116; U1261212)

收稿日期: 2020-04-21

\*通信作者 (E-mail: fjl@cumtb.edu.cn)

下的力学性质具有重要的应用意义。

目前, 国内外学者通过试验对层状岩体开展了较多的研究, 如 Cho 等<sup>[1]</sup>通过不同倾角下片麻岩、页岩和片岩的单轴压缩和巴西劈裂试验研究了弹性参数及强度的各向异性; Dan 等<sup>[2]</sup>对片麻岩等 4 种岩样结合试样轴线与结构面夹角、加载方向与结构面夹角开展了倾角间隔各为 15° 的详尽巴西劈裂试验, 抗拉强度和破坏形态均和倾角有密切联系; Tavallali 等<sup>[12]</sup>基于层状砂岩的试验研究了抗压及抗拉强度和层理的关系; Nezhad 等<sup>[13]</sup>对页岩进行了巴西劈裂试验和有限元模拟, 研究了层理及基质对抗拉强度和断裂韧度的影响; Khanlari 等<sup>[14]</sup>对层状砂岩开展了巴西劈裂试验, 分析了层理倾角对抗拉强度、破坏形态及裂缝长度的影响; 同时李德建等<sup>[15]</sup>、班宇鑫等<sup>[16]</sup>也针对页岩、煤岩等层状岩进行了巴西劈裂试验, 分析了层理对层状岩抗拉强度和破坏模式的影响。

针对板岩, 刘运思等<sup>[17]</sup>研究了层理对板岩抗拉强度和破坏模式的影响, 并结合单弱面进行了理论验证; Li 等<sup>[5]</sup>对不同层理倾角板岩进行了单轴压缩和巴西劈裂试验, 揭示了其强度特征和破坏机制; Debecker 等<sup>[18]</sup>基于板岩力学性质差异, 对其断裂破坏模式进行了试验研究, 借助声发射表明板岩强度各向异性对断裂模式影响巨大; 丁长栋等<sup>[19]</sup>进行了细化巴西劈裂试验, 表明不同层理板岩抗拉强度及破坏形态随加载方向变化有明显差异; Gholami 等<sup>[20]</sup>通过干湿状态下板岩单、三轴及巴西劈裂试验系统研究了层理倾角及含水率对板岩拉压强度及弹性模量的影响; 朱思尘等<sup>[6]</sup>对干燥及饱和板岩开展巴西劈裂试验, 研究了层理及含水对板岩抗拉强度的影响, 并基于峰值能率和峰值荷载分析了峰值能率与抗拉强度的关系。

可见相关层状岩的巴西劈裂试验、理论分析及模拟研究成果较为丰富, 其中涉及包括了干湿循环及饱和含水率等诸多研究。炭质板岩作为特殊的板岩富含黏土矿物易受水-岩接触和裸露于空气中风化作用影响<sup>[5-11]</sup>, 但当前文献缺乏相关研究。实际工程中随时间变化, 上述综合作用下会使其力学特性发生较大退化, 可见深入开展水-岩接触后综合风化作用影响下层状炭质板岩抗拉力学试验研究具有重要意义。

基于上述现状, 本文以甘肃岷县木寨岭隧道炭质板岩为研究对象, 对比制样后即时干燥及静置风化炭质板岩研究了水-岩及风化综合作用、层理对板岩的抗拉强度特性和破坏模式的影响, 并借助扫描电镜微观测试分析了劣化机理, 以期为工程实践提供夯实的理论和应用基础, 同时也为具有广泛工程背景的板岩赋存区相关岩石工程设计与施工提供参考。

## 1 含层理炭质板岩试样及试验

### 1.1 炭质板岩基本性质

本文炭质板岩采集自甘肃岷县海兰高速木寨岭隧道, 呈微薄层状构造, 裂隙及层理发育明显, 层理形态等差异较显著, 其层理间距约 3.5~14.5 mm。水平层理试样抗压强度为 48.8 MPa, 弹性模量约为 6.5 GPa, 泊松比为 0.20; 垂直层理试样抗压强度为 50.5 MPa, 弹性模量约为 7.8 GPa, 泊松比为 0.23。加工后岩样平均密度为 2.688 g/cm<sup>3</sup>, 采用日本理学 TTRIII 多功能 X 射线衍射仪测定矿物组成具体为: 石英 (48.8%) 和黏土矿物 (47.9%)、夹杂斜长石 (1.8%)、黄铁矿 (0.9%)、钾长石 (0.6%), 其中黏土矿物以伊利石、绿泥石、伊蒙混层、高岭石及蒙皂石为主。

### 1.2 试样制备

岩石抗拉强度一般采用直接拉伸法和巴西劈裂法, 但直接拉伸试验存在制样繁杂、夹持困难等问题, 而巴西劈裂法具有制样简单、操作简便快捷等优点, 从而使其成为国际上岩石类脆性材料测抗拉强度的通用方法<sup>[21]</sup>, 鉴于此本文采用巴西劈裂法开展炭质板岩抗拉性能试验研究。

巴西劈裂试验制样共分为两个步骤: ①选用直径为 50 mm 套筒按预定倾角取芯并按尺寸要求切割岩芯; ②磨石机平整试样, 其中, 沿厚度方向的平面应平整至 0.01 mm, 凹口平面不得偏离从垂直到厚度上的平面方向大于 0.5°, 使得加工后的试样均满足岩石力学试验相关规范的要求<sup>[16]</sup>。在制备试样过程中, 水作为润滑剂在样品制备过程中实质上也是水岩作用的过程, 加工过程中试样与水的接触状态及时间基本一致, 时间约为 1.5 h, 这一水岩接触为后续水岩作用提供了条件, 同时认定其水岩作用状态相同含水率一致。为尽可能和工程实践下炭质板岩对照, 该巴西劈裂试样制备后按照预定要求将试样转移到室内常温自然通风条件下静置 60 d (简称静置风化试样), 同时另一批试样在加工后即时烘干处理并密封 (简称即时烘干试样), 以最大化减小其吸水作用对该部分试样的影响。通过烘干法得出: 该炭质板岩试样制备完成时含水率为 1.63%~1.95%, 60 d 后试验状态下试样含水率为 0.21%~0.24%, 即时烘干试样含水率接近为零。同时需要说明的是, 鉴于为保证水岩接触时间一致, 试样预设定厚度为 25 mm 基础上各试样实际加工过程中使试样厚度存在一定差异, 通过测量得出巴西劈裂试样实际厚度约为 21~27 mm。

垂直于横观各向同性面的圆盘具有层理面, 设层理面与水平面夹角  $\alpha$  为层理倾角, 如图 1 所示。以英

文首字母为命名依据, 静置风化试样及烘干试样依次按 $\alpha$ 分别为 $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ 命名如SA、SB、SC、SD、SE及IA、IB、IC、ID、IE。如SA1及IC1分别指静置风化试样 $0^\circ$ 层理倾角#1试样, 即时烘干试样 $45^\circ$ 层理倾角#1试样。

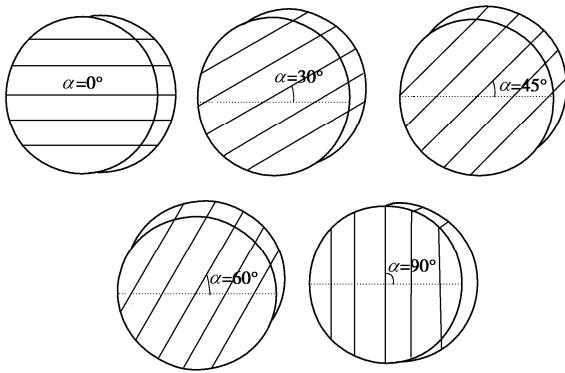


图1 巴西圆盘试样示意图

Fig. 1 Illustration for carbonaceous slate samples with bedding angles of  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  and  $90^\circ$

### 1.3 试验概况

采用深部岩土力学与地下工程国家重点实验室光弹加载仪开展巴西劈裂试验, 该设备轴向最大加载为30 kN, 位移传感器精度为0.001 mm, 符合本试验要求。加载时采用位移控制, 加载速率为0.1 mm/min, 加载过程中系统自动记录加载力和位移数据, 加载示意图如图2所示。炭质板岩即时烘干试样和静置风化试样均为 $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ 倾角共5组试样, 即时烘干试样每组进行3例试样, 实际完成17例试验; 炭质板岩静置风化试样考虑到水岩及风化影响造成的离散性, 每组进行4例试样, 实际完成21例试验。

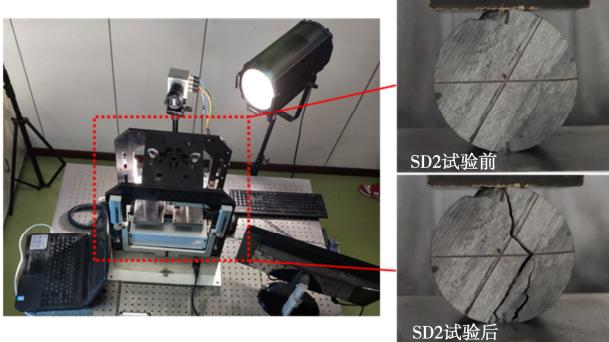


图2 加载仪器及试件放置

Fig. 2 Experimental setup and placement of samples

## 2 试验结果分析

### 2.1 荷载-位移曲线

#### (1) 即时烘干试样荷载-位移曲线

层理倾角 $\alpha$ 分别为 $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ 即时烘干炭质板岩试样的典型荷载-位移曲线如图3(a)所示。

随着轴向位移的逐渐增大, 荷载-位移曲线总体经历了线弹性变形和破坏跌落阶段, 曲线的峰前屈服阶段并不明显, 总体呈现脆性特征。轴向荷载达到峰值点后几乎平行于竖向坐标轴垂直跌落, 部分炭质板岩试样产生飞溅, 这种行为符合脆性材料的断裂破坏特征。

由图3(a)可以看出, 层理形成的横向各向同性对即时烘干试样力学响应影响较大。针对竖向位移, IA组试样劈裂破坏时竖向位移约为 $0.190\sim0.233$  mm, IA1为 $0.228$  mm; 而IE组相应位移为 $0.084\sim0.116$  mm, IE2为 $0.099$  mm; 同时IB, IC, ID组相应位移分别为 $0.166\sim0.187$ ,  $0.148\sim0.185$ ,  $0.112\sim0.149$  mm, 对应的IB1, IC1, ID2为 $0.165$ ,  $0.163$ ,  $0.137$  mm。对比可见IA组即水平层理即时烘干试样劈裂破坏位移最大, 这是因垂直荷载作用下层理面间胶结物产生逐层压缩所致。

IA, IB, IC, ID及IE组试样的峰值荷载分别为 $21.251\sim23.928$ ,  $16.483\sim21.180$ ,  $14.613\sim16.187$ ,  $10.060\sim14.284$ ,  $9.558\sim14.903$  kN, 如IA1, IB1, IC1, ID2, IE2则为 $23.946$ ,  $19.038$ ,  $14.889$ ,  $14.332$ ,  $13.031$  kN, 对比可见该组水平层理炭质板岩峰值荷载最大, 是由产生增韧效应所致。可见层理对巴西劈裂破坏具有显著影响, 同时由于受矿物成分个体化差异及固有缺陷等影响, 各组数据呈现出不同程度的离散性。且由于试验仪器较小, 接近最大承受荷载下由于振动效应而导致荷载位移曲线存在震荡现象。

#### (2) 静置试样荷载-位移曲线

静置风化炭质板岩试样的典型荷载-位移曲线如图3(b)所示, 在此不同层理状态下选取试样为SA1, SB1, SC1, SD1, SE1。随着轴向位移的增大, 炭质板岩荷载-位移曲线形式具有一定相似性, 荷载-位移关系总体经历了压密、线弹性及破坏跌落3个阶段, 曲线为骤降竖直线, 试样表现出显著的脆性破坏特征。

针对竖向位移, SA组试样劈裂破坏时竖向位移约为 $0.607\sim0.705$  mm, SA1试样劈裂破坏时竖向位移为 $0.672$  mm, 较大的竖向位移是由于微裂隙及层理间压密所致。同时SB、SC、SD组相对应的位移分别为 $0.366\sim0.476$ ,  $0.411\sim0.508$ ,  $0.342\sim0.431$  mm, 以典型试验结果来说, SB1, SC1, SD1试样劈裂破坏时竖向位移分别为 $0.367$ ,  $0.417$ ,  $0.430$  mm, 可见在层理倾角为 $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ 的倾斜层理位移较为接近, 主要和试样沿层理滑动剪切破坏有关。而SE组试样劈裂破坏时的竖向位移仅为 $0.221\sim0.284$  mm, SE1试样劈裂破坏时竖向位移为 $0.261$  mm, 可见对比各组试验

90° 层理试样竖向位移最小, 主要原因为试样仅在压实微裂隙后沿层理弱面产生张拉破坏。

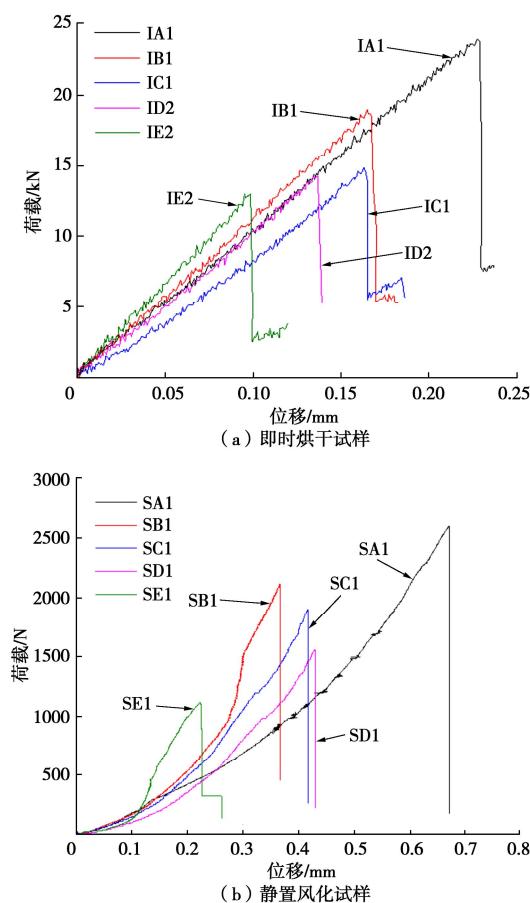


图3 炭质板岩不同层理倾角下巴西劈裂典型位移 - 荷载曲线

Fig. 3 Load-displacement curves of Brazilian carbonaceous slate tests under different bedding angles

针对峰值荷载, SA, SB, SC, SD, SE组试样峰值荷载分别为2.330~3.147, 1.410~2.532, 1.158~2.445, 0.842~2.131, 1.117~1.468 kN, 具体来说SA1, SB1, SC1, SD1, SE1试样劈裂破坏时分别为2.604, 2.115, 1.901, 1.562, 1.117 kN, 其中层理倾角为30°, 45°, 60°状态因破坏形式差异而呈现出峰值荷载的离散性, SE组试样因均为沿层理面张拉破坏而呈现出结果一致性, 同时也说明层理面间的胶结力学性质较为接近。对比即时炭质板岩试样可见, 各组静置风化炭质板岩试样劈裂破坏位移均增大很多。另外静置

风化试样承受荷载锐减, 但层理倾角对其仍具有显著影响, 由于受微裂隙及水岩作用及60 d静置风化效应的影响, 静置风化试样试验数据呈现出极大的离散性。

## 2.2 劈裂破坏模式

在巴西劈裂试验中, 对于不含层理结构的完整岩石试件, 圆盘首先从两加载端起裂, 而后裂纹贯穿圆盘中心形成竖向贯通裂缝。层理的存在会导致其变形破坏受基质的抗拉、抗剪强度和层理抗拉、抗剪强度的共同影响。所以炭质板岩变形的横向各向同性会使拉伸裂纹偏离圆盘中心位置而产生非中心裂纹, 从而使炭质板岩的破坏模式复杂化。

### (1) 即时烘干试样劈裂破坏模式

通过对炭质板岩即时试样开展巴西劈裂试验, 各组试样试验后破坏状态如图4所示, 由此将炭质板岩即时试样的巴西劈裂破坏模式分为中央裂纹、弧形裂纹和层理裂纹3种, 其中在层理倾角为0°及30°时呈现为中央裂纹形式, 在层理倾角为45°时开裂拓展表现为弧形裂纹; 在层理倾角为60°及90°时, 破坏形态表现为层理裂纹。劈裂破坏模式的差异是由于层理倾角变化, 试样可能是基质和层理的拉伸破坏、基质和层理的剪切破坏、基质和层理的拉剪复合型破坏等而呈现出不同形状的破坏裂纹。但总结来说, 即时试样在60°及90°层理倾角下层理效应显著, 可见在加工后及时试验条件下炭质板岩层理黏结力较大, 整体力学性能和基质应较为接近。

### (2) 静置风化试样劈裂破坏模式

为更深入理解静置风化及层理倾角的共同影响关系, 在此分析炭质板岩静置风化试样巴西劈裂试验的最终破坏模式, 具体如图5所示。劈裂大体呈现为沿加载轴方向近乎对称的破坏形式, 开裂路径也沿直径方向延伸至加载两端处, 同时和两加载端处接触的端部试样存在剪切破碎现象。总结炭质板岩试样的破坏形式可分为如下3种: ①层理倾角为90°时极限荷载一般较小, 由于水平拉应力试样断裂起源于圆盘中心线的某个位置, 并沿层理通过劈拉两种方式将圆盘分成两部分, 故通常将该组试验所测得的抗拉强度可视为炭质板岩层理面间的抗拉强度。②当层理倾角分别为



图4 炭质板岩即时烘干试样巴西劈裂破坏形态图

Fig. 4 Brazilian splitting failure modes of drying carbonaceous slate samples

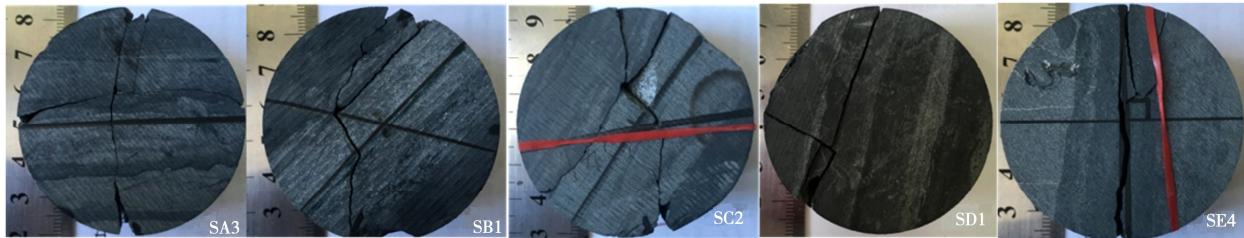


图 5 炭质板岩静置风化试样巴西劈裂典型破坏模式

Fig. 5 Typical Brazilian failure modes of weathering carbonaceous slate samples

表 1 炭质板岩抗拉强度统计表

Table 1 Tensile strengths of two kinds of carbonaceous slate samples

层理倾角/(°)	即时					静置				
	试样抗拉强度		均值	标准差	试样抗拉强度		均值	标准差		
0	12.19	10.81	11.60	11.53	0.21	1.33	1.72	1.43	1.58	1.19
30	9.70	10.80	8.43	9.64	1.19	1.12	0.73	1.35	1.16	—
45	7.45	7.56	8.17	7.73	0.47	0.97	0.73	0.56	1.30	—
60	5.13	7.30	7.18	6.54	1.22	0.76	0.99	0.97	0.41	—
90	4.88	6.57	7.61	6.35	1.38	0.59	0.71	0.68	0.78	—

注: ①抗拉强度单位均为 MPa; ②考虑静置试样易受人为影响产生数据离散, 故总计完成 21 例试样。

30° ~60° 时, 试样通常会沿层理发生剪切或部分路径剪切破坏使得断裂路径会偏离竖向试样中心线。如当层理倾角较大时, 如SD(60°)、SC(45°)试样, 裂纹在剪切作用下极易沿着层理平直开展。而当层理倾角较小时, 如SB(30°)试样, 裂纹不再沿层理平直开展, 而是既有层理间的滑移也有板岩矿物基质纵向上拉剪破坏, 通常表现为曲折的弧线破坏模式。③当层理倾角为0°时, 层理对试样呈现增韧作用, 即较大极限荷载才会导致劈裂破坏, 具体表现为竖向主裂纹通过试样中心线并垂直层理面发展, 与加载设备接触的两端会发生压碎或压断破坏, 同时试样中部受层理影响产生拉应力导致穿过层理并产生破坏基体中的矿物颗粒的横向次级张拉裂纹, 由此也会产生多片层理开裂的复杂破坏模式。该组试验所测得的抗拉强度可视作炭质板岩矿物基质的抗拉强度。

因此, 静置风化试样的各向异性不仅影响其拉伸强度, 而且影响其破坏形态。对比即时试样, 可见静置试样沿层理破坏更明显, 裂纹更多, 形式也更多变。具体而言: 当层理倾角趋近于0°时试样容易发生沿板理面的拉裂或拉剪破坏; 当层理倾角趋近于90°时, 试样矿物基质被拉裂、剪断或压断。由于本试验静置风化试样受水-岩及60 d自然风化综合效应, 劈裂破坏形态实际为矿物基质、层理、缺陷及水-岩及风化效应的综合作用, 各组破坏状态呈现出一定差异。

## 2.3 抗拉强度研究

针对采集的试验数据, 分别用巴西劈裂试验的弹性解公式进行求解计算<sup>[21]</sup>:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi DB} \quad , \quad (1)$$

式中,  $P$ 为极限线荷载,  $D$ 为试件直径,  $B$ 为试件厚度。

由表1可见, 炭质板岩即时试样抗拉强度在0°, 30°, 45°, 60°, 90°分别为11.53, 9.64, 7.73, 6.54, 6.35 MPa, 相对应标准差依次为0.21, 1.19, 0.47, 1.22, 1.38 MPa; 炭质板岩静置风化试样抗拉强度在0°, 30°, 45°, 60°, 90°分别为1.45, 1.09, 0.89, 0.78, 0.69 MPa, 相对应标准差依次为0.21, 0.26, 0.32, 0.27, 0.08 MPa。

### (1) 即时烘干试样抗拉强度

由表1可见, 层理倾角0°, 30°, 45°, 60°, 90°炭质板岩即时烘干试样抗拉强度分别为11.53, 9.64, 7.73, 6.54, 6.35 MPa, 在层理倾角为30°, 45°, 60°及90°时试验结果离散性较为显著, 这和试验中层理效应呈现的不同劈裂破坏形态相关, 计算得炭质板岩即时试样抗拉强度各向异性系数为1.82, 由图6可见炭质板岩抗拉强度在层理倾角逐渐增大时呈递减趋势, 其强度变化趋势与文献中多种层状岩相似<sup>[1-2, 12, 15]</sup>。

### (2) 静置风化试样抗拉强度

同样由表1可知, 层理倾角0°, 30°, 45°, 60°, 90°状态下静置风化试样抗拉强度依次为1.45, 1.09, 0.89, 0.78, 0.69 MPa。最大抗拉强度同样为层理倾角0°受载时, 并随着层理倾角的增大而逐步降低, 在层理倾角为90°时降到最低, 约为0.69 MPa, 计算得炭质板岩各向异性系数为2.10, 充分反映了炭质板岩抗拉强度受层理影响呈现的典型各向异性。其强度变化趋势与上述即时烘干试样及多种层状岩相似<sup>[1-2, 12, 15]</sup>。由图6对比可见, 在相同层理状态下两者抗拉强度差距悬殊, 这是由于静置风化时间效应所致。

## 2.4 炭质板岩静置劣化效应

即时烘干及静置风化试样抗拉强度对比如图6所

示, 参考水理性质的软化系数, 在此设定水化后60 d 静置风化效应下抗拉强度软化系数为某一特定含水率下岩石特定静置时间后的抗拉强度与该特定含水率下岩石即时试验处理的抗拉强度之比, 经计算得静置风化试样层理倾角为0°, 30°, 45°, 60°, 90°时软化系数依次为0.13, 0.11, 0.12, 0.12, 0.11, 可见软化性强, 工程力学性质极差, 这和木寨岭隧道施工后短期稳定、后续隧道断面变形破坏严重的现场情况相符合。另外由软化系数为0.11~0.13较一致可见, 在相同层理状态下两种试样所受横观各向同性并未随水–岩及风化作用影响而有较大差异性, 也即水岩及风化综合作用并未改变炭质板岩的显著横观各向同性的力学性质。

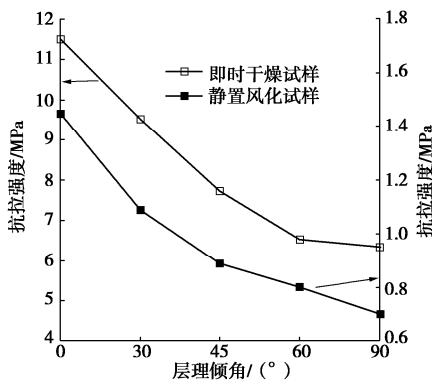


图 6 炭质板岩抗拉强度对比曲线图

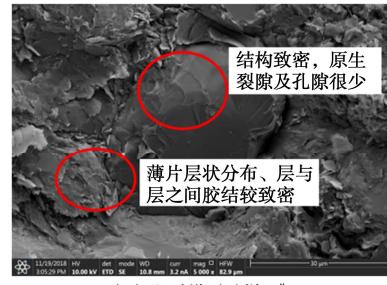
Fig. 6 Comparative curves of tensile strength of two kinds of carbonaceous slates

### 3 静置风化机理讨论

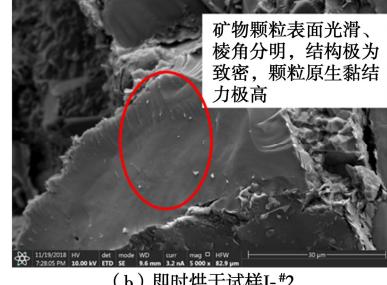
岩石矿物颗粒间存在孔隙、缺陷及微观结构面, 试样加工产生实质上的水岩作用, 在自然风化作用下会导致矿物成分、结构不断变化, 如风化过程中石英、钾长石等矿物向黏土转化, 而伊利石等在水及风化影响下晶粒外围松散变小、层间黏结变弱孔隙贯通等结构变化<sup>[10]</sup>, 进而导致炭质板岩物理力学性质逐渐劣化, 这一变化可从图4, 5板岩试样宏观色泽差异得以体现, 其实质也是一个微细观结构变化引起的宏观力学特性劣化的过程<sup>[6-11]</sup>, 在此借助SEM(scanning electron microscopy)扫描电镜以分析劣化机制, 同时为保证两种试样微观结构的准确对比分析, 经仔细筛选特选取放大倍数均为5000倍SEM图像进行分析, 典型岩样SEM照片如图7, 8所示。

即时烘干炭质板岩试样断面矿物颗粒清晰, 结构致密, 原生裂隙及孔隙较少。如图7 (a) 矿物颗粒结构致密, 而薄片层状分布下层与层之间胶结致密, 同时矿物周边原生裂隙及孔隙较少。由图7 (b) 可见大块状矿物颗粒表面光滑、棱角分明, 结构极为致密,

颗粒原生黏结力极高, 由上述典型微细观结构可见其宏观力学性质应较为优异。这也和即时试样荷载位移曲线中由于炭质板岩颗粒坚硬、黏结强度高能够承受较大荷载及曲线易震荡相符合。



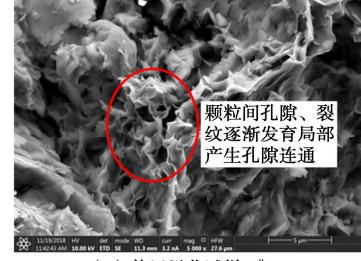
(a) 即时烘干试样L-#1



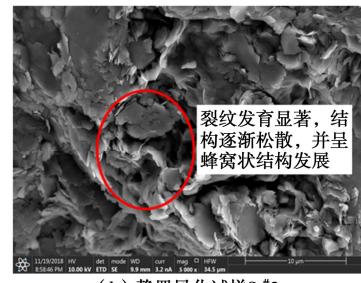
(b) 即时烘干试样L-#2

图 7 即时烘干炭质板岩 SEM 照片

Fig. 7 SEMs of drying carbonaceous slate samples



(a) 静置风化试样S-#1



(b) 静置风化试样S-#2

图 8 静置风化炭质板岩 SEM 照片

Fig. 8 SEMs of weathering carbonaceous slate samples

在加工试样自然风化作用下, 初始状态下胶结物溶解、溶蚀显著, 颗粒间逐步出现细小孔隙, 局部微裂纹发育, 颗粒因溶蚀等导致相互间连接减弱; 随后颗粒会产生物质脱落, 边缘逐渐模糊, 颗粒间孔隙、裂纹发育并产生贯通, 矿物颗粒间连接逐步松散, 并随风化时间效应逐渐累计, 导致裂纹汇集贯通、尺度明显增大。具体表现为图8 (a) 中伊利石颗粒间孔隙、裂纹逐渐发育局部产生孔隙连通, 图8 (b) 中绿泥石裂纹发育显著, 结构逐渐松散, 并呈现蜂窝状结构发展。

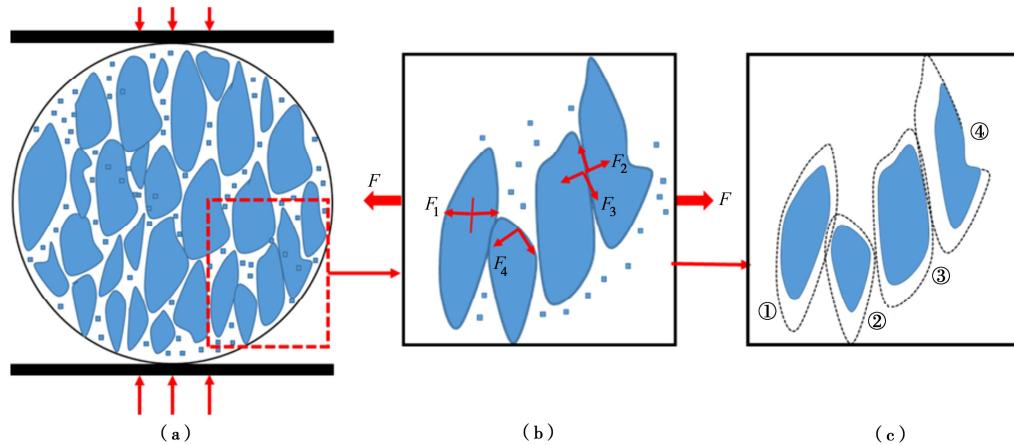


图9 炭质板岩巴西劈裂受力及劣化示意图

Fig. 9 Illustration for degradation of a Brazilian carbonaceous slate sample

为建立较形象的劣化分析途径,在此简单绘制炭质板岩试样宏观巴西劈裂受力如图9所示,由图9 (a)可知炭质板岩由矿物颗粒、颗粒间物质黏结及孔隙、微裂纹、水气组成,简化可见其黏结力由原生黏聚力 $F_1$ ,胶结黏聚力 $F_2$ ,颗粒间表面摩擦力 $F_3$ ,颗粒间咬合阻力 $F_4$ 组成,具体如图9 (b)所示。由于炭质板岩富含黏土矿物所呈现出的极强亲水性使得试样在加工完成后含水率高达1.63%至1.95%,伊利石、高岭石等黏土矿物的水化膨胀特性会使矿物颗粒中充满水分子,随时间演化孔隙和微观结构可能发生变化,如伊利石与水发生化学反应会使晶层间连接变弱,进而降低黏结力,导致松散的晶间胶结甚至泥化效应,在中性自来水及结合二氧化碳形成的弱酸性环境下,云母、钾长石等矿物也会发生矿物溶解转化等反应,可见与水溶液之间的溶解将导致离子溶解、迁移或连续的物质交换和化学反应,析出得到的反应物易变质、易分解、易迁移、易流失,也会使矿石矿物变得疏松、易碎,如以上可统称为物理化学效应。如图9 (c)可见矿物颗粒①~④在水作用下,产生的溶蚀等效应导致颗粒缩小、接触面减小,颗粒表面趋近圆滑、颗粒面附着物力学性质差。

在上述物理化学作用下,炭质板岩静置风化试样微结构和层面的胶结经历连续的结构调整和损伤降解。结构调整表现为矿物组分的溶解和流失,孔隙和缺陷的增加,矿物颗粒间胶结作用的减弱,样品中形成更多的微裂纹,同时在水分逐渐蒸发的同时,自然界风化作用也会对矿物颗粒产生粉化等劣化效应,表现在图9 (c)中即为随水分蒸发矿物颗粒再次发生收缩,使得矿物颗粒原生黏聚力骤降,同时表面黏结物减少使得胶结黏聚力降低,由于颗粒间表面变化为光滑面且颗粒间孔隙增大使得咬合阻力及表面摩擦力降低,是从微观颗粒角度分析所呈现的力学效应。可以

看出,加工过程中使试样产生的水岩作用及后续静置风化效应导致静态试样在水分逐渐蒸发下物理化学反应、矿物成分及其结构劣化、裂隙逐渐发育、风化侵蚀等形成累积损伤劣化效应。计算得到的各层理状态下软化系数仅为0.11~0.13,即是典型的定量证明。

## 4 结 论

通过对层状炭质板岩即时烘干试样和静置风化试样开展巴西劈裂试验,研究了炭质板岩在水-岩及静置风化作用下的抗拉力学特性,得到以下5点结论。

(1)炭质板岩即时烘干试样荷载-位移曲线为线弹性—破坏跌落的发展过程,而静置风化试样则表现为压密—近线弹性—破坏跌落,且在破坏位移及荷载上两种试样表现出极大差异。

(2)即时烘干试样破坏形态受层理影响较小,在层理倾角较小时为沿加载轴线对称的张拉破坏;较大层理倾角如60°~90°时受层理影响为拉剪及纯拉破坏形态;对比可见静置风化试样受层理影响显著,可分为张拉、剪切破坏及基质、层理面间的拉剪组合破坏。

(3)炭质板岩即时烘干试样和静置风化试样抗拉强度在层理倾角0°,30°,45°,60°,90°分别为11.50,9.52,7.73,6.54,6.35 MPa和1.65,1.45,1.09,0.89,0.78,0.69 MPa,对应软化系数分别为0.13,0.11,0.12,0.12,0.11,表明水-岩及静置风化使炭质板岩的强度产生显著劣化。

(4)对比两种试样抗拉强度随层理变化趋势可见,静置风化试样所受横观各向同性并未随水岩及风化综合作用影响而产生较大变化,也即水-岩及风化作用对其显著横观各向同性的力学性质影响较小。

(5)水-岩及风化作用,导致板岩的水分逐渐蒸

发、矿物成分转化及结构损伤、裂隙逐渐发育和风化侵蚀，在宏观上呈现为力学性态的劣化。

## 参考文献：

- [1] CHO J W, KIM H, JEON S, et al. Deformation and strength anisotropy of Asan gneiss, Boryeong shale, and Yeoncheon schist[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, **50**(2): 158 – 169.
- [2] DAN D Q, KONIETZKY H, HERBST M. Brazilian tensile strength tests on some anisotropic rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, **58**(2): 1 – 7.
- [3] 吕 坤, 高 旭, 吴 峥, 等. 弱黏结复合层状顶板冒顶隐患分级方法与应用[J]. 矿业科学学报, 2018, **3**(3): 253 – 259. (LÜ Kun, GAO Xu, WU Zheng, et al. Weakly bonding composite layered roof risk classification method and its application[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2018, **3**(3): 253 – 259. (in Chinese))
- [4] 黄琪嵩, 程久龙. 层状底板采动应力场的解析计算模型研究[J]. 矿业科学学报, 2017, **2**(6): 559 – 565. (HUANG Qi-song, CHENG Jiu-long. Research on analytic calculation model for mining induced stress in multi-layered floor rock[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2017, **2**(6): 559 – 565. (in Chinese))
- [5] LI Z G, XU G L, HUANG P, et al. Experimental study on anisotropic properties of Silurian silty slates[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2017, **35**(2): 1 – 12.
- [6] 朱思尘, 李江腾. 干燥和饱水状态下含层理构造板岩巴西劈裂实验能量研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, **49**(8): 2024 – 2030. (ZHU Si-chen, LI Jiang-teng. Experimental energy study of Brazil test of bedded structural slate under dry and saturated conditions[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, **49**(8): 2024 – 2030. (in Chinese))
- [7] 张 娜, 赵方方, 张毫毫, 等. 岩石气态水吸附特性及其影响因素实验研究[J]. 矿业科学学报, 2017, **2**(4): 34 – 45. (ZHANG Na, ZHAO Fang-fang, ZHANG Hao-hao, et al. Experimental study on water vapor adsorption of rock and its influencing factors[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2017, **2**(4): 336 – 347. (in Chinese))
- [8] 张 娜, 王水兵, 何 崇, 等. 深部煤系页岩吸水及软化效应微观机理研究[J]. 矿业科学学报, 2019, **2**(4): 308 – 317. (ZHANG Na, WANG Shui-bing, HE Xiao, et al. Study on micromechanism of water absorption and its softening effect on shale rock in deep coal measures[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2019, **2**(4): 308 – 317. (in Chinese))
- [9] 滕 腾, 杜玉冰, 陈朋飞, 等. 砂岩变形率与水理效应的力学特性研究[J]. 矿业科学学报, 2020, **5**(3): 342 – 352. (TENG Teng, DU Yu-bing, CHEN Peng-fei, et al. Effects of deformation rate and hydrated condition on the mechanical property of sandstone[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2020, **5**(3): 342 – 352. (in Chinese))
- [10] 郑明雄, 李保珠, 申岳龙. 贵州泥堡金矿凝灰岩的风化机理[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2019, **44**(6): 31 – 38. (ZHENG Ming-xiong, LI Bao-zhu, SHEN Yue-long. Weathering mechanism of tuff in Guizhou Nibao gold mine[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2019, **44**(6): 31 – 38. (in Chinese))
- [11] WONG L N Y, MARUVANCHERY V, LIU G. Water effects on rock strength and stiffness degradation[J]. Acta Geotechnica, 2016, **11**(4): 713 – 737.
- [12] TAVALLALI A, VERVOORT A. Effect of layer orientation on the failure of layered sandstone under Brazilian test conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, **47**(2): 313 – 322.
- [13] NEZHAD M M, FISHER Q J, GIRONACCI E, et al. Experimental study and numerical modeling of fracture propagation in shale rocks during brazilian disk test[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, **51**(6): 1755 – 1775.
- [14] KHANLARI G, RAFIEI B, ABDILOR Y. An experimental investigation of the Brazilian tensile strength and failure patterns of laminated sandstones[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, **48**(2): 843 – 852.
- [15] 李德建, 祁 浩, 李春晓, 等. 含层理面煤试样的巴西圆盘劈裂实验及数值模拟研究[J]. 矿业科学学报, 2020, **5**(2): 150 – 159. (LI De-jian, QI Hao, LI Chun-xiao, et al. Brazilian disc splitting tests and numerical simulations on coal samples containing bedding planes[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2020, **5**(2): 150 – 159. (in Chinese))
- [16] 班宇鑫, 傅 翔, 谢 强, 等. 页岩巴西劈裂裂缝形态评价及功率谱特征分析[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(12): 2307 – 2315. (BAN Yu-xin, FU Xiang, XIE Qiang, et al. Evaluation of fracture morphology of shale in Brazilian tests and analysis of power spectral characteristics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(12):

- 2307 - 2315. (in Chinese))
- [17] 刘运思, 傅鹤林, 伍毅敏, 等. 基于单弱面理论对板岩巴西劈裂试验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(10): 1775 - 1780. (LIU Yun-si, FU He-lin, WU Yi-min, et al. Study on Brazilian splitting test for slate based on single weak plane theory[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(10): 1775 - 1780. (in Chinese))
- [18] DEBECKER B, VERVOORT A. Experimental observation of fracture patterns in layered slate[J]. International Journal of Fracture, 2009, 159(1): 51 - 62.
- [19] 丁长栋, 胡大伟, 周辉, 等. 考虑三维片理的板岩巴西劈裂试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(2): 90 - 101. (DING Chang-dong, HU Da-wei, ZHOU Hui, et al. Brazil test of slate considering three-dimensional schistosity effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(2): 90 - 101. (in Chinese))
- [20] GHOLAMI R, RASOULI V. Mechanical and elastic properties of transversely isotropic slate[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(5): 1763 - 1773.
- [21] ISRM. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics, 1978, 15(3): 99 - 103.

## 黄土力学的理论与实践专题学术研讨会在西安成功召开

由中国土木工程学会土力学及岩土工程分会与中国工程建设标准化协会湿陷性黄土专业委员会联合主办, 西安理工大学等单位承办的“黄土力学的理论与实践专题学术研讨会”于2020年11月20日—22日在西安成功召开。参会单位共120个, 参会学者652位。

会议组织学术报告98个, 其中院士报告2个, 特邀报告24个, 分会场报告72个。邓铭江院士做了题为“中国西北“水三线”空间格局与区域协调发展”的报告, 彭建兵院士做了题为“宜居黄河科学愿景”的报告。会议以“一带一路”重大工程建设中的黄土力学理论与实践的关键科学问题和工程技术问题为中心议题进行了广泛深入交流。在黄土的基本性质、测试技

术、本构模型、地基处理、基坑支护、桩基工程、地下工程、边坡工程、环境工程和数值分析以及其它特殊土等方面, 与会专家提供了最新研究成果, 拓展了与会者的学术视野, 将有力地促进黄土力学理论与实践的发展和创新。

本次会议共收到全国60多个单位提交的169篇学术论文。

会议采用线上线下同时进行, 全程线上免费直播, 盛况空前。会议组织和大会报告得到与会专家的高度评价和盛赞, 取得了圆满成功, 既是黄土力学的第一次盛会, 也是名副其实的学术盛宴。

会议期间, 非饱和土与特殊土专委会举行了工作会议, 共有92名专委会委员出席会议。

(西安理工大学党发宁教授和王丽琴副教授、陆军勤务学院方祥位教授联合供稿)