

盐岩拉伸破坏力学特性的试验研究

刘建锋^{1,2}, 徐进^{1,2}, 杨春和³, 侯正猛⁴

(1. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 2. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065;
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 4. 克劳斯塔尔工业技术大学, 德国 克劳斯塔尔-采勒费尔德 38678)

摘要: 利用 MTS815 Flex Text GT 岩石力学试验系统, 并利用 PCI-II 声发射测试系统及 SMZ1000 体视显微镜和 CCD 实时摄像系统, 采用间接拉伸与直接拉伸两种试验方法, 对层状盐岩拉伸破坏力学特性进行了综合试验研究。研究获得了两种测试方式的破坏全过程曲线, 揭示了间接拉伸、直接拉伸强度相互关系, 及其与单轴抗压强度的相互关系。研究表明, 直接拉伸试验测得的层状盐岩抗拉强度低于间接拉伸试验, 直接拉伸试验得到的结果更加真实反映盐岩的抗拉强度特性, 建议尽可能采用直接拉伸试验方法测试盐岩抗拉强度; 研究得到了两种拉伸破坏方式的声发射空间分布特征, 揭示了与之对应的受力状态和导致破坏的损伤演化规律; 不同拉伸破坏方式的岩石断面形貌研究表明, 间接拉伸以穿晶断裂为主, 直接拉伸以沿晶断裂为主, 这种断裂破坏方式的差异是导致不同拉伸测试方式强度差异的原因。
关键词: 层状盐岩; 拉伸破坏; 声发射; 表面形貌

中图分类号: TU432 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)04-0580-07

作者简介: 刘建锋(1979-), 男, 河南新乡人, 四川大学讲师、博士, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: ljf7908@yahoo.com.cn。

Mechanical characteristics of tensile failure of salt rock

LIU Jian-feng^{1,2}, XU Jin^{1,2}, YANG Chun-he³, HOU Zheng-meng⁴

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. College of Hydraulic and Hydroelectric Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics; Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 4. Technical University of Clausthal, Clausthal-Zellerfeld 38678, Germany)

Abstract: Using MTS815 Flex Text GT rock mechanics test system, PCI-II acoustic emission (AE) test system and SMZ1000 stereomicroscope system and CCD real-time camera system, comprehensive studies are carried out through indirect tensile test and direct tensile test on tensile mechanical properties of bedded salt rock. Through the research, the tensile displacement and stress full process curves of different tensile modes, the tensile strength relationship between the indirect tensile test and the direct tensile test and the relationship between the tensile strength and the uniaxial compressive strength are obtained. The studies show that the direct tensile strength is less than the indirect tensile strength, and the direct tensile test result more truly reflects the characteristics of the tensile strength of salt rock. So it is recommended as much as possible to use the direct tensile test method to test the tensile strength of bedded salt rock. The AE test reveals spatial distribution of AE of different tensile failure modes, and the characters of AE spatial distribution reveals the corresponding force status and damage evolution rule leading failure. The rock failure surface morphology of different tensile test methods shows that the rock failure mode of the indirect tensile test is mainly transgranular fracture, but that of the direct tensile test is mainly intergranular fracture. The failure mode differences are main reasons leading to the strength difference of different tensile test methods.

Key words: bedded salt rock; tensile failure; acoustic emission; surface morphology

0 引言

岩石作为非均质材料, 其内部强度差异极大, 与抗压强度相比, 抗拉强度则要低得多。岩石承载拉应力时是逐步发生破坏, 即内部微元体不会同时达到各自的承载极限, 因而试件的宏观抗拉强度低于微元体抗拉强度的平均值^[1]。岩石试件直接拉伸试验中, 由

于夹持及保证拉伸荷载轴线与试样轴线重合具有一定

基金项目: 国家自然科学基金项目(50620130440); 国际科技合作项目(2007DFB60100); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2011CB201201, 2010CB226802); 中央高校基本科研业务费专项资金项目

收稿日期: 2009-12-22

困难, 采用直接拉伸方法进行岩石抗拉强度测试的文献相对较少^[2-7], 而更为普遍的是采用劈裂法(即巴西试验法, Brazilian test)间接测定岩石的抗拉强度, 如国际岩石力学学会将其作为岩石抗拉强度的推荐测试方法之一^[8], 美国 ASTM^[9]也将间接拉伸法列入了相应测试标准中, 该方法也是目前我国国家标准及相关行业规程、规范规定的测试方法^[10-11]。

采用劈裂法间接测定岩石抗拉强度, 试样形状用的最多是圆柱体。试验时沿圆柱的直径方向施加线荷载, 试件受力后沿着受力方向的直径开裂; 直接拉伸试验得到的强度值相对间接拉伸更加真实。有研究者对间接拉伸和直接拉伸测试方法进行了探讨, 认为直接拉伸测试结果更为可靠^[12-13]。由于间接拉伸通常沿预定加载方向破坏, 该方向不一定能真实反映其抗拉强度, 而使测量值通常较直接拉伸强度值大, 但由于岩石的非均匀性及各向异性影响, 也偶有偏小情况出现。采用直接拉伸法虽然能较真实获得岩石的抗拉强度, 但实际试验存在较大困难。岩石直接拉伸试验中, 夹持式通常易在夹持部位产生应力集中, 对于岩石等脆性材料, 易在夹持部位发生夹持破碎或断裂; 黏接式直接拉伸相对来说易保证轴心受拉, 虽然同样存在应力分布不均匀现象, 但可通过提高试件两端面的平行度及垂直度等保证拉伸荷载平行轴心, 断裂发生在均匀应力段的概率较高, 是较为理想的拉伸方式。

本文利用黏接法及改进的弹簧支撑式直接拉伸试验装置^[14], 分别对盐岩试样进行间接拉伸和直接拉伸破坏全过程试验, 并结合破坏全过程得到的声发射三维空间分布特征及破坏后的断面形貌体视显微镜摄像分析, 对盐岩2种拉伸破坏方式的强度特性进行综合探讨。

1 试验测试

1.1 试件制备

试验测试盐岩取自江苏金坛, 取样部位为地下埋深约 1000~1200 m, 该盐矿含盐率高, 主体部位可达 84.76%~93.76%。按试样中是否含有泥岩夹层, 将其分为夹层盐岩和纯盐岩两类。由于盐岩地下钻芯取样后, 表面存在一定溶蚀、晶粒析出等造成取样岩芯表面凹凸不平, 室内加工首先采用锯石机切割为试验测试高度, 然后采用车床对试样圆周及两端面进行精加工。室内加工参照《工程岩体试验方法标准》^[10]进行, 加工得到夹层盐岩和纯盐岩间接拉伸试件分别为 9 个和 5 个, 纯盐岩直接拉伸试件 3 个, 各试件示例照片见图 1。



(a) 盐岩间接拉伸试件



(b) 盐岩直接拉伸试件

图 1 拉伸试件照片

Fig. 1 Specimen photos for tensile test

1.2 试验原理

参照《工程岩体试验方法标准》^[10]规定的岩石抗拉强度测试、计算方法, 按式(1)计算岩石的间接拉伸强度。

$$s_t = 2P / (\pi DH) \quad (1)$$

式中 s_t 为岩石间接拉伸抗拉强度, MPa; P 为间接拉伸作用荷载, N; D 为试件直径, mm; H 为试件高度, mm。

直接拉伸强度按式(2)计算:

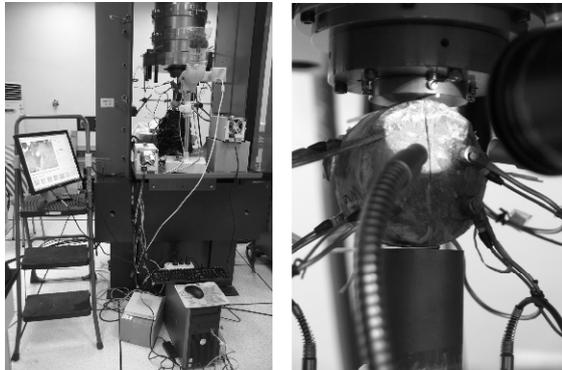
$$s_{dt} = P_d / A \quad (2)$$

式中 s_{dt} 为岩石直接拉伸抗拉强度, MPa; P_d 为直接拉伸荷载, N; A 为试件横截面面积, mm²。

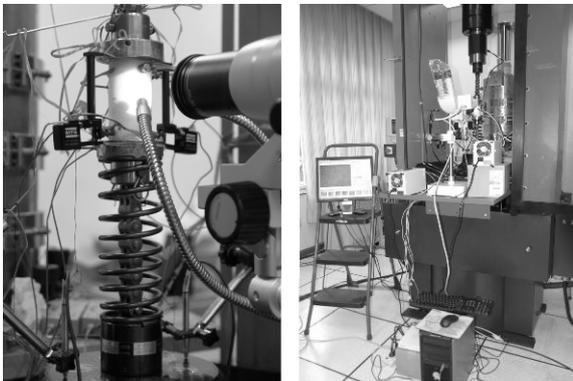
1.3 试验设备及测试方法

试验测试均在四川大学水电学院 MTS815 Flex Test GT 岩石力学试验机上进行, 并利用美国物理声学公司(PAC) PCI-II 声发射(Acoustic Emission, AE)测试系统和 SMZ1000 体视显微镜及 CCD 实时摄像系统等, 测试拉伸荷载下盐岩破坏过程损伤演化特征及破坏后的断面形貌特征。间接拉伸采用巴西劈裂法; 直接拉伸试件加工完成后, 采用 A81 高强胶将其与拉伸加载拉头黏结在一起, 并待其黏结强度达到最大时进行试验测试。间接拉伸及直接拉伸试验加载均采用轴向位移(LVDT)控制, 其量程为 ±2.5 mm, 间接拉伸峰值荷载前及峰值后的 LVDT 位移加载速率分别为 0.05 和 0.1 mm/min, 直接拉伸全过程加载速率为 0.15 mm/min; 拉伸荷载测试传感器量程为 25 kN。声

发射测试传感器为 Micr30 型,其中心频率为 300 kHz,频率范围为 150~1000 kHz,前置放大器增益为 40 dB。体视显微镜摄像测试系统物理分辨率为 500 万像素。间接拉伸和直接拉伸测试系统见图 2 所示。



(a) 间接拉伸及装置



(b) 直接拉伸及装置

图 2 拉伸试验装置图

Fig. 2 Tensile test apparatus

2 试验结果及分析

2.1 强度及变形分析

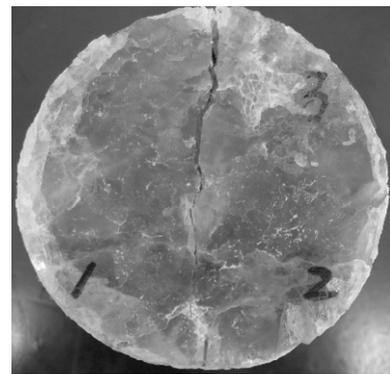
试验得到各试件抗拉强度值见表 1, 间接拉伸和

表 1 各试件抗拉强度列表

Table 1 Tensile strength for each specimen

试验类别	试件编号	直径/mm	高度/mm	抗拉强度/MPa	平均强度/MPa	
间接拉伸	夹层盐岩	JT-P ₁	70.97	39.52	2.295	1.946
		JT-P ₂	74.25	41.22	1.253	
		JT-P ₃	77.54	35.81	1.794	
		JT-P ₄	77.60	36.43	2.517	
		JT-P ₅	78.20	30.77	1.874	
		JT-P ₆	87.18	28.38	2.170	
		JT-P ₇	84.24	27.34	1.806	
		JT-P ₈	76.87	34.04	2.329	
		JT-P ₉	81.40	24.60	1.473	
	纯盐岩	JT-P ₁₀	81.39	43.53	0.764	0.846
		JT-P ₁₁	88.08	41.37	0.913	
		JT-P ₁₂	75.99	28.86	0.847	
		JT-P ₁₃	78.39	27.90	0.949	
		JT-P ₁₄	78.60	35.10	0.759	
纯盐岩直接拉伸	JT-6	50.12	76.17	0.101	0.099	
	JT-7	50.14	68.55	0.101		
	JT-8	50.44	67.89	0.096		

直接拉伸破坏后示例照片见图 3。夹层盐岩和纯盐岩各选取其中 3 个试件绘制拉伸应力 - 位移曲线(图 4)。直接拉伸试验过程中,在试验控制 MPT (Multipurpose test) 程序运行前,均对试样施加 0.2 kN (约 0.1 MPa) 的预拉伸荷载使加载上下端部拉头处于均匀受拉状态。由于 2 个试件在预拉加载中的荷载接近预定的预拉荷载时试件断裂,未能通过 MPT 试验程序测量其破坏过程,故图 4 (c) 仅绘制了 1 个直接拉伸试件的拉伸应力 - 位移曲线。图 4 (a)、(b) 中 LVDT 为间接拉伸两加载压头之间位移值,图 4 (c) 中 LVDT 为包含试件整体变形及部分机器变形在内的位移值。



(a) 盐岩间接拉伸破坏后示例



(b) 盐岩直接拉伸破坏后示例

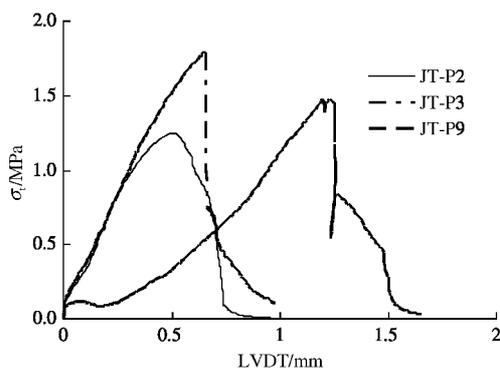
图 3 拉伸破坏示例图

Fig. 3 Failure photos for tensile test

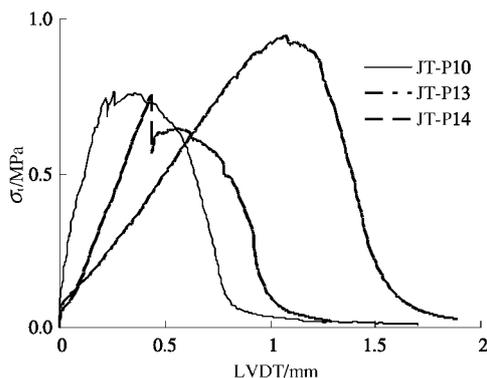
图 3 (a) 破坏照片清晰表明间接拉伸为沿预定加载方向发生的劈裂破坏状态;直接拉伸试验相对间接拉伸试验则沿抗拉强度最薄弱部位发生,其抗拉强度值更为真实、可靠,图 3 (b) 显示了直接拉伸破坏后状态。含夹层盐岩间接拉伸试件夹层面平行于其两端部平面,即夹层面法线方向与试件两端面法线方向一致。试验得到夹层盐岩和纯盐岩的间接拉伸强度平均值分别为 1.946 MPa 和 0.846 MPa,纯盐岩直接拉伸强度为 0.099 MPa。由试验研究已知金坛纯盐岩单轴压缩平均强度为 22.05 MPa,故可知其单轴压缩强度为纯盐岩间接拉伸强度的 26.06 倍,为其直接拉伸强度的 222.73 倍,为夹层盐岩间接拉伸强度的 11.33 倍。

夹层盐岩间接拉伸强度高于纯盐岩的间接拉伸强度, 为纯盐岩的 2.30 倍, 这主要是由于夹层为钙泥质胶结物, 其抗拉强度高, 导致含夹层盐岩强度较纯盐岩有所提高; 纯盐岩的直接拉伸强度则远低于其间接拉伸强度, 间接拉伸强度为直接拉伸强度的 8.55 倍。直接拉伸强度和间接拉伸强度的差异及破坏状态表明, 采用直接拉伸得到的抗拉强度值相对间接拉伸更加真实反映了盐岩的抗拉强度特性。

图 4 拉伸强度 - 位移曲线揭示了岩石的拉伸破坏与常见单轴压缩得到的应力应变全过程曲线类似。通过位移增量 (即变形速率) 控制加载得到的间接拉伸破坏峰值后盐岩仍有一定的承载能力, 峰值应力后随拉伸裂纹扩展, 拉伸应力逐渐降低。利用改进后的直接拉伸试验装置测得的拉伸应力 - 位移曲线与间接拉伸得到的结果相似, 峰值应力后, 随拉伸变形增加, 拉伸应力逐渐降低, 也得到了破坏全过程曲线。但是, 间接拉伸得到的应力 - 位移曲线, 在峰值应力后的应力下降梯度明显大于直接拉伸得到的结果, 且在应力下降过程中, 存在一应力下降梯度骤减的转折点, 直接拉伸得到的曲线该转折点则不明显。图 4 中拉伸应力 - 位移曲线表明, 岩石在其拉伸应力达到峰值应力后, 并未立刻丧失拉伸承载能力, 而是与单轴压缩全过程曲线类似, 存在一定的劣化过程, 即在峰值应力时并未沿破裂面断裂为独立的两部分, 随拉伸变形量增加, 仍可承受一定拉伸荷载。



(a) 夹层盐岩间接拉伸示例曲线



(b) 纯盐岩间接拉伸示例曲线

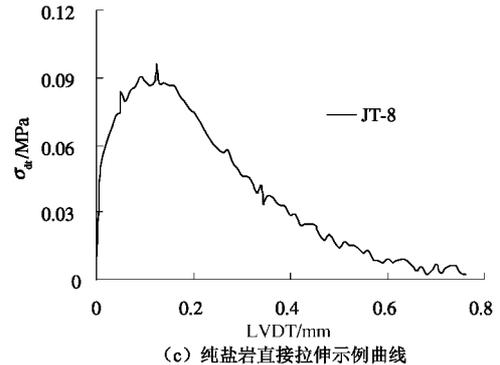


图 4 拉伸破坏示例曲线

Fig. 4 Failure curves for tensile test

2.2 损伤过程声发射特征分析

分别选取间接拉伸和直接拉伸得到的声发射空间分布特征, 分析盐岩在 2 种拉伸破坏方式下的损伤演化特征。图 5、图 6 中 (a)、(b)、(c)、(d)、(e) 分别对应图 4 (a) 中 JT-P₂ 试件间接拉伸应力 - 位移曲线和图 4 (c) 直接拉伸应力 - 位移曲线峰值应力的 60%、90%、峰值应力、峰值应力后 60%F (F 代表峰值后)、试验结束等 5 个阶段, 定位图中红色点代表声发射监测得到的岩石损伤位置, 空间分布中的每一个点代表一个损伤破裂信号位置。图 5 声发射各阶段表明, 盐岩间接拉伸破坏得到的声发射首先在两端加载部位出现, 并随拉伸应力增加逐渐向中间部位扩展, 这与间接拉伸破坏力学理论一致, 即因加载部位应力集中, 首先进入屈服破坏状态, 故声发射信号首先在该部位出现和汇集; 然后沿加载破坏面发生积聚、汇集, 但距离破坏面越远的中间部位声发射信号则越少, 并由加载破坏面向两侧积聚程度逐渐减弱; 峰值应力后沿加载破坏面附近仍有较多声发射信号, 这表明间接拉伸条件下, 虽然拉伸应力达到盐岩峰值拉伸荷载后承载能力逐渐降低, 但并未沿加载方向贯通为导致试样完全丧失承载能力的宏观破裂面, 随试件拉伸变形增加, 盐岩晶粒间及晶粒内的损伤进一步发展, 累积声发射信号增加, 这直观体现了间接拉伸破坏条件下拉伸应力达到峰值应力时, 盐岩仍有一定承载能力。图 6 直接拉伸破坏各声发射阶段与图 5 间接拉伸破坏有相似特征, 表现为声发射信号沿拉伸破坏面附近发生积聚, 如图 6 (e) 中虚线圆所示, 并在峰值拉伸应力后仍具有一定拉伸承载能力, 故峰值拉伸应力后随拉伸变形增加仍有较多声发射信号, 但其破坏面附近声发射累积程度不及间接拉伸破坏。分析认为这种差异主要是由于间接拉伸加载较为特殊, 通常沿加载拉伸应力线形成破坏面, 靠近破坏面一定区域内, 受拉应力力大且较为集中, 而远离破坏面的区域受拉应力力相对小, 故在破坏面附近区域会导致较多微裂纹形成、

成核和汇集, 声发射信号相对集中; 直接拉伸破坏方式, 试件内各点受拉伸应力均匀, 声发射首先在抗拉强度最薄弱部位出现, 并沿最薄弱破坏面积聚; 相比间接拉伸, 直接拉伸峰值荷载前试件内部声发射信号分布较为稀疏。根据声发射测试原理^[15], 声发射事件数的多少是岩石能量释放量大小的体现, 其空间分布状态揭示了岩石内部损伤特征, 声发射事件数越多岩石破坏能量释放量则越大, 声发射事件在某部位越密集则该部位岩石损伤程度越严重。因此, 声发射监测结果与岩石受拉破坏状态一致, 而采用直接拉伸法测试盐岩抗拉强度得到的结果更加真实。

图 5、图 6 声发射监测结果显示, 峰值应力前, 只有拉伸应力达到一定量值时才有较多声发射信号, 而该声发射信号主要是由岩石晶粒或晶粒间屈服、破裂等所导致, 这与单轴压缩试验加载初期导致的晶粒间滑移或微缺陷闭合等形成的声发射信号较多明显不同; 盐岩拉伸破坏后, 沿破坏面一定区域形成一积聚声发射带, 而非一平面, 这揭示了岩石在拉峰值应力后的拉伸破坏过程中, 沿破坏面一定区域内仍可承载一定拉伸应力, 随拉伸变形增加, 声发射信号最终沿破坏面区域积聚, 揭示了峰值应力后拉伸承载能力存在与单轴压缩类似的渐进劣化过程。

2.3 破坏断面形貌特征分析

利用 SMZ1000 体视显微镜对盐岩间接拉伸和直接拉伸试样破坏后断面形貌进行了观测和摄像, 利用

物理像素 500 万 CCD 摄像系统, 分别得到间接拉伸和直接拉伸破坏后显微镜照片见图 7 (放大倍率 $0.5 \times 1.5 \times 0.8$)。图 7 (a) 清晰表明间接拉伸以穿晶断裂破坏为主, 断裂后晶体呈多台阶状, 间接拉伸破坏后断面内部观测到盐岩试件中存在穿透晶体并平行于试件两端面的微观裂纹, 如图 7 (a) 中椭圆标示, 该伸加载方向, 对间接拉伸破坏无实质影响, 但对直接拉伸试验强度大小起到了决定性作用, 导致直接拉伸强度降低; 图 7 (b) 显示直接拉伸以沿晶断裂为主, 破坏后断面相对平整光滑, 并沿垂直于加载方向的晶粒间微观裂纹面断裂, 结合纯盐岩间接拉伸和直接拉伸试验结果强度值数据对比, 分析认为盐岩晶粒间抗拉强度不及晶体本身抗拉强度, 而微裂纹的抗拉强度更为薄弱, 最终导致直接拉伸试样的强度值远低于间接拉伸试样的抗拉强度值。

对于岩石类材料, 晶粒间的黏结强度要低于晶粒本身的强度, 材料内部晶粒中的微孔隙、微裂纹、夹杂、第二相等引起局部应力集中, 以及材料本身独立的滑移系数目不够, 材料内多晶体在变形中未能保证微观连续性的条件等, 均导致穿晶断裂。根据材料脆性断裂 Griffith 裂纹临界扩展力准则及分形研究理论^[16], 穿晶断裂粗糙性明显增加断裂表面面积, 至少比平直裂纹扩展的面积要大得多, 因此其破坏过程需要大得多的能量耗散, 这揭示了盐岩间接拉伸破坏强度高于直接拉伸破坏强度的原因。

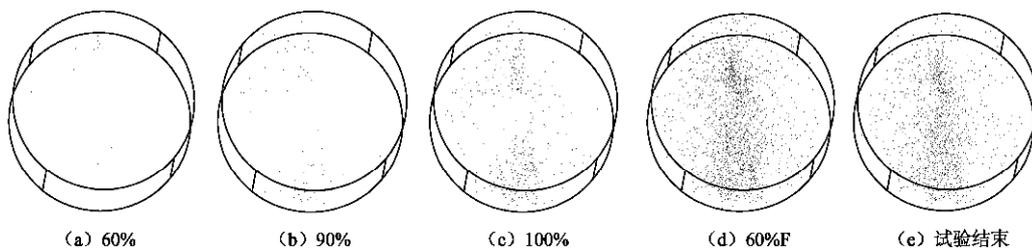


图 5 间接拉伸损伤过程 AE 空间分布

Fig. 5 AE spatial distribution for indirect tensile test

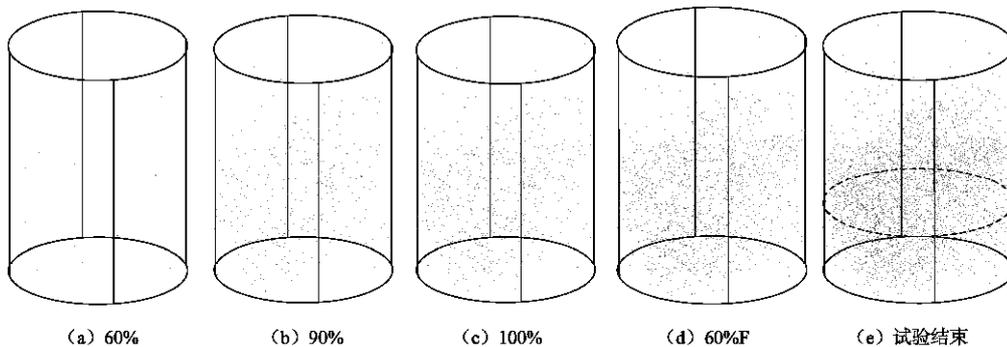


图 6 直接拉伸损伤过程 AE 空间分布

Fig. 6 AE spatial distribution for direct tensile test

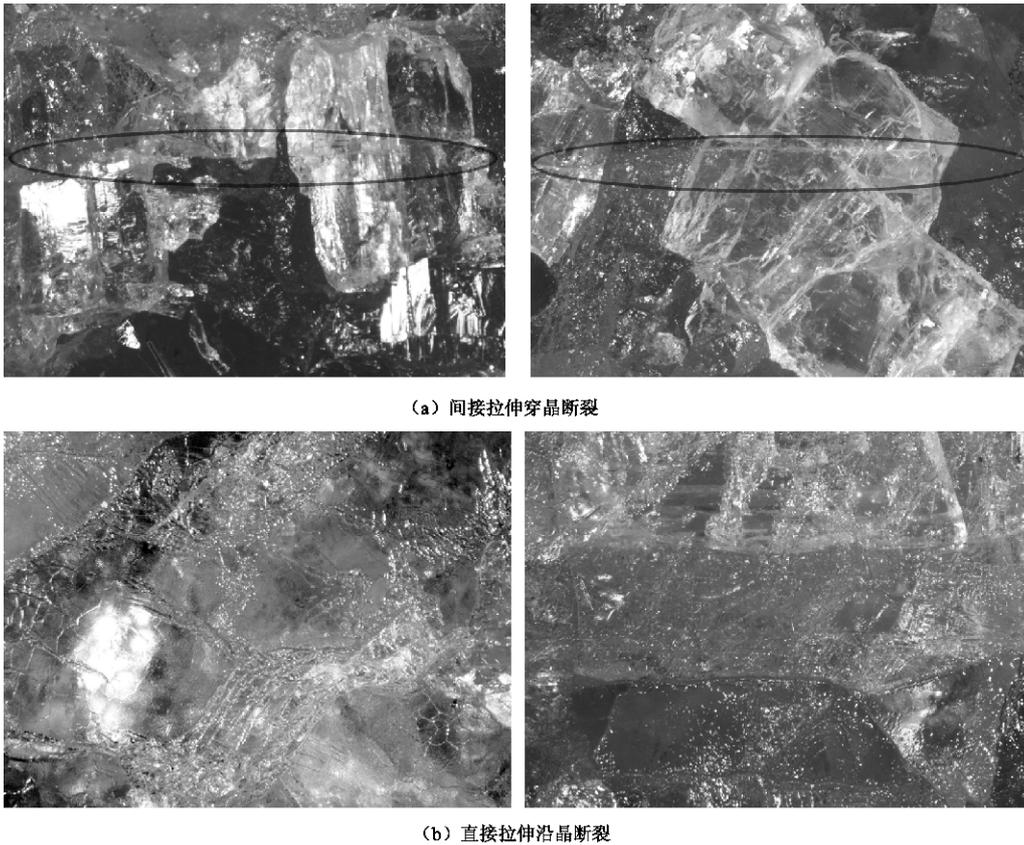


图7 拉伸断裂显微镜观测照片

Fig. 7 Microscopic photos for tensile failure of salt rock

3 结 论

(1) 研究得到了层状盐岩间接拉伸和直接拉伸破坏全过程曲线及相互强度特征。直接拉伸强度低于间接拉伸强度, 直接拉伸测试方式可更加真实反映盐岩的抗拉强度, 建议尽可能采用直接拉伸试验方法测试层状盐岩抗拉强度。

(2) 利用 PCI-II 三维声发射监测系统, 得到了不同拉伸加载破坏全过程对应的声发射空间分布特征。对该特征进行了损伤过程的分析研究, 揭示了与之对应的受力状态和导致破坏的损伤演化规律。

(3) 利用体视显微镜和 CCD 摄像系统, 从微细观角度对盐岩不同拉伸破坏状态的形貌特征进行了研究。得到了间接拉伸以穿晶断裂为主, 直接拉伸则以沿晶断裂为主, 这种断裂破坏方式的差异是导致不同拉伸测试方式强度差异的原因。

参考文献:

[1] 尤明庆. 岩石的力学性质[M]. 北京: 地质出版社, 2007. (YOU Ming-qing. Characteristic of rock mechanics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007. (in Chinese))

[2] 彭瑞东, 鞠 杨, 谢和平. 灰岩拉伸过程中细观结构演化

的分形特征[J]. 岩土力学, 2007, **28**(12): 2479 - 2583. (PENG Rui-dong, JU Yang, XIE He-ping. Fractal characterization of meso-structural evolution during tension of limestone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(12): 2479 - 2583. (in Chinese))

[3] 窦庆峰, 岳 顺, 代高飞. 岩石直接拉伸试验与劈裂试验的对比研究[J]. 地下空间, 2004, **24**(2): 178 - 181. (DOU Qing-feng, YUE Shun, DAI Gao-fei. Experimental study on direct and indirect tension of rock[J]. Underground Space, 2004, **24**(2): 178 - 181. (in Chinese))

[4] 张少华, 缪协兴, 赵海云. 试验方法对岩石抗拉强度测定的影响[J]. 中国矿业大学学报, 1999, **28**(3): 243 - 246. (ZHANG Shao-hua, MIAO Xie-xing, ZHAO Hai-yun. Influence of test methods on measured results of rock tensile strength[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1999, **28**(3): 243 - 246. (in Chinese))

[5] 叶明亮, 续建科, 牟 宏, 等. 岩石抗拉强度试验方法的探讨[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2001, **30**(6): 19 - 25. (YE Ming-liang, XU Jian-ke, MOU Hong, et al. Approach to test method of rock strength in uniaxial tension[J]. Journal of Guizhou University of Technology (Natural Science), 2001, **30**(6): 19 - 25. (in Chinese))

- [6] 代高飞, 夏才初, 宴成. 龙滩工程岩石试件在拉伸条件下的变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(3): 384 - 388. (DAI Gao-fei, XIA Cai-chu, YAN Cheng. Testing study on deformation behavior of rock in Longtan hydropower project under tensile condition[J]. Journal Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(3): 384 - 388. (in Chinese))
- [7] OKUBO S, FUKUI K. Complete stress-strain curves for various rock types in uniaxial tension[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Gromech, 1996, **33**(6): 549 - 556.
- [8] ISRM. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials[J]. Int J Rock Mech Min Sci and Geomech Abstr, 1978, **15**(1): 99 - 103.
- [9] ASTM C496—86. Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens[S]. [s. l.]: [s. n.], 1986.
- [10] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T50266—99 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999. (The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T50266—99 Standard for tests method of engineering rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese))
- [11] 中华人民共和国行业标准编写组. SL264—2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001. (The Professional Standard Compilation Group of People's Republic of China. SL264—2001 Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering[S]. Beijing: China Water Power Press, 2001. (in Chinese))
- [12] 王金星, 王灵敏, 杨小林. 对岩石拉伸试验方法探讨[J]. 焦作工学院学报(自然科学版), 2004, **23**(3): 205 - 209. (WANG Jin-xing, WANG Ling-min, YANG Xiao-lin. Tensile test methods for rock materials[J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology (Natural Science), 2004, **23**(3): 205 - 209. (in Chinese))
- [13] 陶纪南. 岩石轴向拉伸与劈裂法试验结果的分析[J]. 金属矿山, 1995, **225**(3): 28 - 31. (TAO Ji-nan. Comparative analysis of test results by axial tension method and splitting method[J]. Metal Mine, 1995, **225**(3): 28 - 31. (in Chinese))
- [14] LIU Jian-feng, XU Jin, XIE He-ping. Spring supported lower clamper for direct tensile test[P]. USA:7624647, 2009.
- [15] 秦四清, 李造鼎, 张倬元, 等. 岩石声发射技术概论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1993. (QIN Si-qing, LI Zao-ding, ZHANG Zhuo-yuan, et al. An introduction to acoustic emission techniques in rocks[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1993. (in Chinese))
- [16] 谢和平. 分形 - 岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1997. (XIE He-ping. Fractal and rock mechanics introduction[M]. Beijing: Science Press, 1997. (in Chinese))