

深部软弱地层 TBM 掘进围岩变形破坏特性室内试验研究

黄 兴¹, 刘泉声^{1,2}, 刘恺德³, 康永水¹, 刘学伟¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 3. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

摘要:为了揭示深部软弱地层 TBM 开挖卸荷围岩变形破坏特性,分析深埋隧道 TBM 机械开挖卸荷的本质特征为高初始围压下的缓慢准静态卸荷,开展不同卸荷速率下砂质泥岩三轴卸围压试验,研究卸荷速率效应,获取 TBM 缓慢准静态卸荷围岩变形破坏特性:(1) 缓慢卸荷条件下的峰前应力-应变曲线与常规三轴压缩时较接近,卸荷屈服阶段,岩石产生损伤扩容,侧向变形加速增长,从体积压缩开始转向扩容;(2) 达到峰值强度后,岩石首先沿已贯通的破裂面滑移,发生 1~2 级规模较小的脆性跌落,随着围压继续缓慢卸除,岩石沿一条斜率较小的近似斜直线发生线性应变软化,且线性应变软化过程中伴随多级微破裂;(3) 岩石变形全过程经历弹性变形、峰前卸荷损伤扩容、峰后脆性跌落、含有多级微破裂的线性应变软化以及残余强度阶段;(4) 缓慢卸荷破坏过程中,岩石发生宏观张剪复合破坏,伴有轴向劈裂裂纹,破裂断面为由许多劈裂裂纹相互贯通形成具有一定宽度的剪切带,剪切带内劈裂的岩片在轴向挤压力和沿剪切面的剪切力共同作用下被挤压和摩擦成许多细颗粒和岩粉。

关键词:岩石力学;深部软弱地层;TBM;机械开挖;缓慢准静态卸荷;三轴卸荷试验;卸荷速率

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2015)01-0076-17

LABORATORY STUDY OF DEFORMATION AND FAILURE OF SOFT ROCK FOR DEEP GROUND TUNNELLING WITH TBM

HUANG Xing¹, LIU Quansheng^{1,2}, LIU Kaide³, KANG Yongshui¹, LIU Xuwei¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China; 3. Xi'an Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: The TBM excavation in deep stratum is a process of smooth and quasi-static unloading of high initial confining pressure. In order to reveal the deformation and failure characteristics of soft rock at deep ground under the condition of TBM tunnelling, triaxial unloading tests on sandy mudstone with different unloading rates were carried out. The pre-peak stress-strain curves under the condition of smooth and quasi-static unloading of confining pressure were found close to the ones obtained from the conventional triaxial compression test. At the yielding stage upon unloading, the specimens exhibit damage dilatation, the lateral deformation grows accelerated, resulting in a turning of the volumetric strain from shrinkage into dilatation. After the peak strength, the specimens slide along the fracture surface already formed to display the modest brittle drop of strength once or twice. Then a linear strain softening stage accompanied by multistage micro fractures occurs on the stress-strain

收稿日期: 2013-09-26; **修回日期:** 2014-07-16

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB046904); 国家自然科学基金资助项目(41130742); 中国科学院重点部署项目资助(KZZD-EW-05)

作者简介: 黄 兴(1987-), 男, 2008年毕业于西安科技大学采矿工程专业, 现任助理研究员, 主要从事地下工程围岩稳定性分析与控制理论及支护技术、深部复合地层围岩与 TBM 的相互作用机制及安全控制等方面的研究工作。E-mail: huangxing220808@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.01.009

curve with a line segment of a small slope as the confining pressure is continuously and slowly unloaded. The complete deformation process of unloading is composed of the elastic deformation, the damage dilation, the post-peak brittle drop, the linear strain softening and the residual stress period. The specimens display composite shear-tension failure macroscopically accompanied with axial splitting cracks during the process of smooth unloading. Many split cracks link and cross each other to form a shear band of a certain width. The rock in the shear band is squeezed and wears into the fine particles and the powder as a result of the interaction of axial extrusion and the shear stress along the shear plane.

Key words : rock mechanics ; deep soft ground ; TBM ; mechanical excavation ; smooth quasi-static unloading ; triaxial unloading test ; unloading rate

1 引言

由于 TBM 在建设速度、造价、安全、围岩稳定性等方面比常规钻爆法优势显著, TBM 被广泛应用于深埋长大隧道和矿山超千米深部巷道建设^[1]中。

国内外大量 TBM 工程实践表明, TBM 最适宜在中硬岩隧道中掘进^[2-4], 破岩效率高、围岩稳定。然而, 由于处于山高谷深的特殊地貌环境、受多期区域构造活动强烈的特殊地质条件, 西部山岭地区深长隧道和中东部深井巷道的地质条件极为复杂, 地层结构复杂多变, 软、硬地层交错出现; 此外, 深部地层中赋存了高地应力甚至极高地应力。因此, TBM 在西部深、长隧道和中东部深井巷道建设中, 往往需要频繁穿越高地应力软弱岩层。

深部软弱地层中的高地应力和岩体软弱结构构成了围岩挤压大变形的基本条件, TBM 开挖扰动改变了岩体的初始应力状态, 使得围岩极易产生强烈挤压大变形^[5-6]。然而, 护盾式 TBM 的护盾与围岩间的超挖间隙较小, TBM 对围岩变形非常敏感, 围岩挤压大变形极易导致护盾被卡, 造成长时间卡机停工, 甚至导致护盾损毁, 严重影响工程进度。如云南掌鸠河引水供水工程上公山隧洞 TBM 发生 8 次重大卡机事故^[7], 停机约 1 a, 最后不得不改用常规钻爆法施工。

造成 TBM 开挖后, 围岩挤压大变形及其导致的卡机灾害的根本原因在于目前对 TBM 掘进条件下深部软弱围岩挤压变形力学特性认识不清、对挤压大变形机制缺乏深入研究。

目前, 国内外开展了大量关于岩石在加载状态下变形破坏特性的试验、理论及应用研究^[8-9], 并取得了许多有益成果。实际上, 随着隧(巷)道的开挖, 围岩逐渐由三向应力初始平衡状态调整过渡到二维应力状态, 这一调整使围岩主应力的方向和大小均

发生了变化, 即围岩的径向应力减小, 切向应力相应增大。使得围岩受力不再处于单纯的加载状态, 而是在某一方向处于加载状态, 在另一方向却处于卸荷状态。研究表明, 岩体在卸荷状态下的力学特性与加载条件下具有显著差异^[10], 而且卸荷方式、卸荷应力路径对岩石力学行为有重要影响。目前国内外已有许多学者开展了卸荷条件下岩石力学特性的研究^[8-10], 并取得了一定的进展。总的来说, 关于卸荷条件下岩体力学特性研究尚不成熟。虽然已有这方面的研究, 但这些研究很少涉及开挖方式, 几乎都没有考虑不同开挖方式对应的卸荷方式和卸荷路径的差异, 因而研究结果的适用条件值得商榷。关于高地应力岩体在 TBM 机械开挖这一卸荷方式下的变形破坏特性及其力学机制研究更是极其少, 如 M. Ramoni 等^[11-12]在分析 TBM 开挖后围岩收敛变形对护盾挤压力时, 均未考虑 TBM 机械开挖卸荷方式下围岩的变形规律, 仍然采用的是常规加载条件下的本构方程和力学参数进行计算。

因此, 亟需开展反映 TBM 开挖卸荷特征的试验研究, 研究深部软弱岩体在 TBM 开挖卸荷条件下的变形破坏特性, 从而为 TBM 掘进下围岩挤压大变形及其导致的卡机灾害预测提供理论依据。

2 TBM 开挖卸荷的本质特征

目前, 地下工程主要有 2 种开挖方式: 一种是爆破开挖, 另一种是机械开挖(如 TBM)。众多研究结果表明, 岩体开挖扰动区(EDZ)的分布规律与开挖方式、围岩应力释放特征密切相关。

当采用钻爆法开挖时, 相邻炮孔裂隙面将在爆破后数十毫秒内相互贯通, 形成新自由面, 该自由面上的法向地应力在贯通的瞬间即被卸除完^[13-14]。钻爆法开挖对围岩的扰动是爆破荷载和高速动态卸荷共同作用的结果。严鹏等^[15-16]也指出, 钻爆法开挖地应力的卸载是一个与准静态卸载不同的高速动

态卸载过程，将在开挖面附近激起动态卸载应力波。

当采用 TBM 开挖时，开挖方式为机械开挖。如图 1 所示，超挖滚刀与刀盘正面存在一定的倾角，超挖滚刀对开挖轮廓处围岩而言，既存在滚压破岩又存在一定的切削破岩，开挖对围岩的扰动小，开挖轮廓上的地应力和储存的能量是逐步释放的，TBM 开挖时，开挖边界上的初始地应力经过平稳缓慢地调整过渡到二次应力状态，卸荷(应力释放)缓慢，持续时间也较长，围岩应力-位移曲线的连续性和过渡性较好(见图 2^[17])。图 3 为 TBM 和钻爆法 2 种开挖方法下围岩质点的振动曲线^[18]，对比发现，TBM 开挖引起的应力波比钻爆法的平缓光滑许多，围岩振动幅值非常小，峰值只有 1 mm/s 左右。

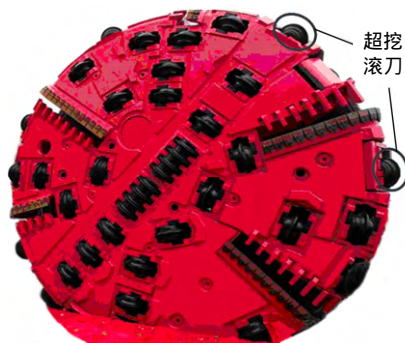


图 1 TBM 刀盘及滚刀

Fig.1 The cutterhead and cutters of TBM

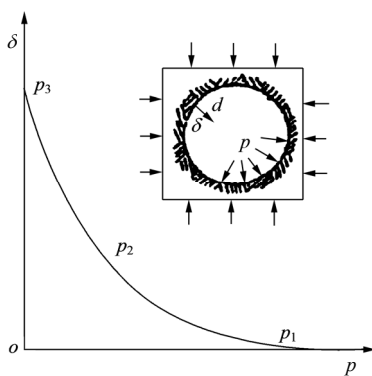
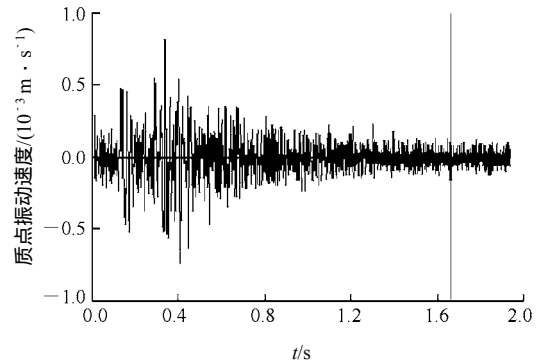


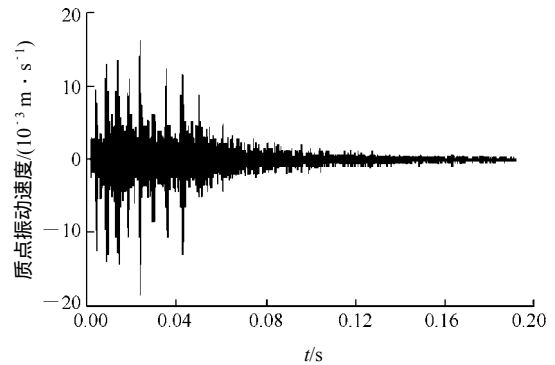
图 2 TBM 围岩应力-位移关系^[17]

Fig.2 Stress-displacement relationship of surrounding rock due to tunneling by TBM^[17]

国内外学者在研究岩体开挖卸荷行为及力学效应过程中，一般将开挖卸荷作为准静态过程处理，如李建林和王乐华^[19]在研究岩体卸荷力学特性时便当做准静态来分析。因此可以得出结论：TBM 开挖时，开挖轮廓上的初始地应力是一个缓慢的准静态卸载过程。对于深埋隧道 TBM 开挖，其开挖卸荷的本质特征则为高初始围压下的缓慢准静态卸荷。



(a) TBM 开挖

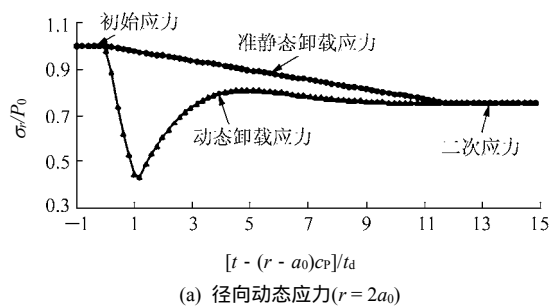


(b) 钻爆法开挖

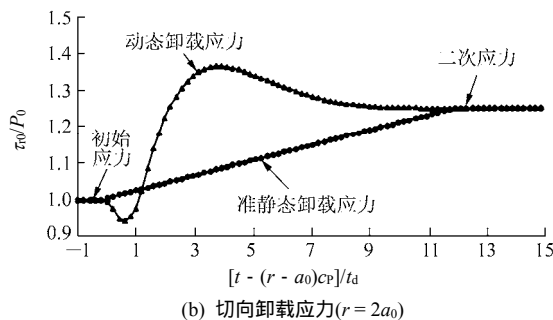
图 3 不同开挖方式下围岩质点振动速度^[18]

Fig.3 Vibrating velocities of surrounding rock under different tunnelling methods^[18]

TBM 机械开挖法和钻爆法的开挖卸荷特征分别为缓慢的准静态卸荷和高速动态卸荷。正因为这 2 种开挖方式的卸荷特征存在巨大的本质差异，因而对围岩的扰动影响也存在巨大差异。严鹏等^[15-16]进行了快速动态卸荷与缓慢准静态卸荷过程中应力扰动的比较(见图 4)，指出动态卸荷条件下径向应力快速卸荷反弹，而切向出现动应力集中，开挖轮廓处岩体的径向和切向应力都是先减小后增大，最终才收敛于二次应力值，而缓慢准静态卸载(TBM 开挖)时开挖边界附近岩体中的初始应力都是平稳地由初始应力状态线性过渡到二次应力状态。国内外学者普遍认为，TBM 开挖法产生的围岩扰动区范围要明显小于钻爆法开挖造成的扰动区范围。薛备芳^[17]认为，TBM 开挖法造成的围岩扰动区范围只有钻爆法的 1/5。这些研究成果进一步表明，TBM 开挖法和钻爆法这 2 种卸荷方式存在很大区别。而国内外尚未开展深部高应力软弱围岩 TBM 开挖缓慢准静态卸荷条件下围岩力学行为研究，因此本文研究深部软岩在 TBM 开挖缓慢准静态卸荷条件下的瞬时力学响应。



(a) 径向动态应力($r = 2a_0$)



(b) 切向卸载应力($r = 2a_0$)

注： σ_r 、 τ_{θ} 分别为径向、切向动应力， P_0 为初始地应力， c_p 为岩体的纵波波速， t_d 为卸载时间， a_0 为开挖半径。

图 4 初始地应力准静态、动态卸载过程对比图^[15]

Fig.4 Quasi-static and dynamic unloading stress curves of initial in-situ stress^[15]



图 6 岩石试样

Fig.6 Rock sample

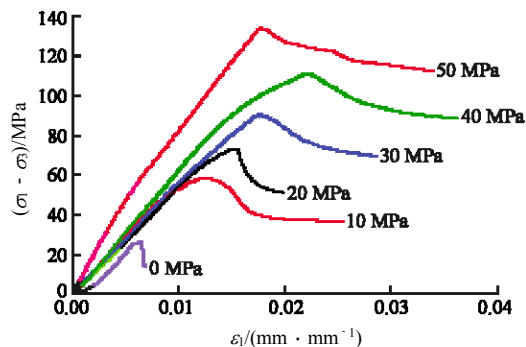


图 7 常规三轴压缩($\sigma_1 - \sigma_3$)- ε_1 曲线

Fig.7 Curves of $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ in conventional triaxial compression tests

3 试验方案

本文开展三轴卸围压试验，研究软岩在 TBM 机械开挖缓慢准静态卸荷条件下的力学行为。

3.1 试验条件

(1) 试验系统与岩石试样

三轴压缩和部分三轴卸围压试验是在 MTS 815.03 型电液伺服刚性试验机上进行的(见图 5)。

试验所用岩石试样取自淮南矿业集团潘一东煤矿 - 848 m 水平砂质泥岩(见图 6)，埋深 1 020 m。砂质泥岩单轴压缩和常规三轴压缩试验应力-应变曲线和基本力学参数见图 7 和表 1，可以看出砂质泥岩为典型的深部软岩。



图 5 MTS 815.03 试验系统

Fig.5 Experimental system MTS 815.03

表 1 砂质泥岩常规三轴压缩试验结果

Table 1 Test results from conventional triaxial compression of sandy mudstone

围压 σ_3 / MPa	峰值强度 σ_m / MPa	轴向峰值应 变 ε_{1m} / 10^{-3}	横向峰值应 变 ε_{3m} / 10^{-3}	峰值体积应 变 ε_{vm} / 10^{-3}	弹性模 量 E / GPa	泊松 比 μ
0	28.76	6.39	- 3.48	- 0.574 4	5.480	0.395
10	68.75	12.47	- 4.99	2.490 0	6.343	0.281
20	93.15	15.12	- 5.27	4.576 0	5.477	0.294
30	120.39	17.69	- 8.27	1.150 0	5.507	0.379
40	151.23	21.95	- 10.91	0.130 0	6.757	0.358
50	184.17	17.77	- 7.60	2.570 0	9.695	0.249

(2) 卸荷应力路径

卸围压试验过程若采用应力控制，达到峰值应力后，试样极易发生崩溃式破坏^[20-21]，而采用变形控制为可控式升轴压卸围压，能获取完整的峰后应力-应变曲线。为了尽量与工程实际情况(对应于 TBM 开挖后围岩径向卸荷、切向加载的应力状态)吻合，同时为了保证岩石越过峰值后能获得完整的峰后应力-应变曲线，本试验选择轴向变形控制，即可控式的升轴压卸围压试验，试验应力路径如图 8 所示。

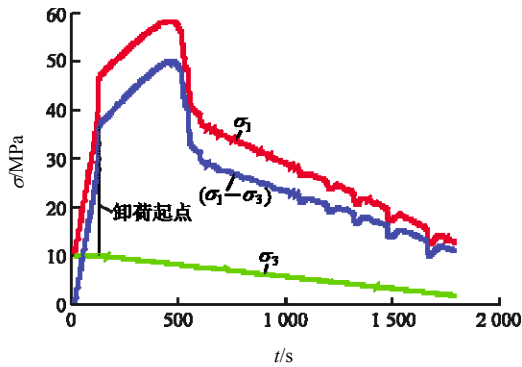


图 8 试样 UL10-1M 三轴卸围压试验应力路径

Fig.8 Stress paths of triaxial unloading test for sample UL10-1M

(3) 卸荷速率

邱士利等^[22-23]和张凯等^[24]分别研究了卸荷速率对岩石变形特性和强度特性的影响。然而这些研究针对的都是大理岩一类的硬岩，并且卸荷速率的设置并未对应 TBM 缓慢准静态卸荷速率。因此需要进一步研究 TBM 开挖缓慢卸荷速率下软岩的力学响应。

目前国内外尚没有关于掘进速率和卸荷速率定量对应关系的研究，因此为了使三轴卸围压试验能反映 TBM 开挖卸荷的特征——缓慢准静态卸荷，假设 TBM 开挖对隧洞轮廓上的围岩为线性卸荷，卸荷速率设为 2 个较小的常量，分别设为 0.005，0.010 MPa/s，并开展快速卸荷试验(卸荷速率为 0.050，0.500 MPa/s)，将缓慢准静态卸荷下的试验结果与快速卸荷条件下的试验结果进行比较。

(4) 卸荷起点应力水平

为了使三轴卸围压试验的应力水平能反映深部地层的典型应力特征——高地应力，卸荷初始围压 σ_3 依次设置为 10，20，30，40，50 MPa。

卸荷起点轴向应力 σ'_1 应设置为大于单轴抗压强度、小于三轴压缩强度，为常规三轴压缩强度的 60%~80%，根据图 5 和表 1 砂质泥岩三轴压缩试验结果制定相应的卸荷起点(见表 2)。

表 2 卸荷起点应力水平

Table 2 Stress levels of the start points of unloading

围压 σ_3 /MPa	三轴抗压强度/MPa	卸荷起点 σ'_1 /MPa
10	61.648	37
20	87.027	52
30	113.137	68
40	135.655	82
50	156.411	102

3.2 试验控制过程

试验控制过程如下：

(1) 首先以 0.500 MPa/s 的加载速率按静水压力条件逐步施加 σ_1 ， σ_2 ， σ_3 至预定的围压值(分别为 10，20，30，40，50 MPa)；

(2) 稳定围压 σ_3 ，采用应力控制方式以 0.500 MPa/s 的速率逐步施加轴向应力至卸荷起点 σ'_1 ；

(3) 继续采用轴向变形控制方式，以 0.001 mm/s 的轴向变形速率增加轴压至试样破坏，同时按照设定的卸荷速率卸围压(设定的卸荷速率分别为 0.005，0.010，0.050，0.500 MPa/s)，直至试样破坏。

试验过程中其他试样的应力路径类似图 7。

4 试验结果

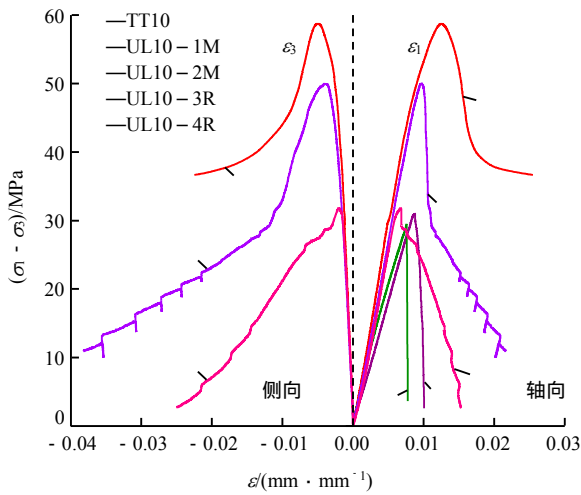
4.1 卸荷应力-应变曲线

图 9~13 为同一初始围压水平(10，20，30，40 和 50 MPa)砂质泥岩在各卸荷速率(0.005，0.010，0.050，0.500 MPa/s)条件下及常规三轴压缩应力-应变关系曲线，其他试验结果见表 3。需说明本文中试样编号中各字母或数值的含义，如试样 UL20-2M-1，字母“UL”表示卸荷(TT 表示三轴压缩)，数字“20”等表示初始围压值，数字“2”对应卸荷速率为 0.010 MPa/s (“1”，“3”，“4”分别对应卸荷速率为 0.005，0.050，0.500 MPa/s)，“M”表示试验机为 MTS815.03 (“R”代表示试验机为 RMT-150C)，最后一个数字“1”表示该试验条件下的第一个试样。

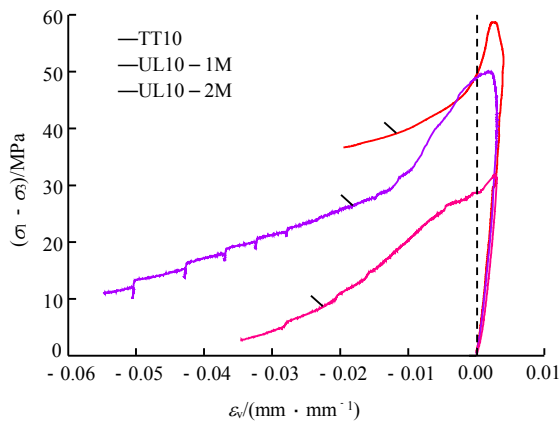
同一初始围压下，卸荷起点前应力-应变曲线弹性段的弹性模量相差较小，加载段的变形模量相差也较小，表明试样离散性小，用于不同初始围压和卸荷速率条件下的三轴卸围压试验是合适的。

4.2 卸荷总体变形破坏特征

岩石的承载能力由材料本身的强度和围压共同决定，三轴压缩破坏是增加轴向应力达到岩样的承载能力，卸围压破坏是卸除围压使岩样的承载能力降低直至试样破坏。虽然二者最终都能导致岩样破坏，但是由于应力路径不同，加载和卸荷 2 种应力状态使得岩石变形破坏过程存在显著差异。对比图 9~13 可以发现：岩石在加载、卸荷条件下变形均随偏应力增大而增加，但卸荷条件下，从卸荷点起，轴向变形曲线变缓，向右发展，侧向变形加速增长，体积变形曲线开始向左偏移，即从体积压缩开始转向扩容；相同的差应力作用下，卸荷产生的扩容量大于加载条件下的扩容量；在接近峰值应力时，较



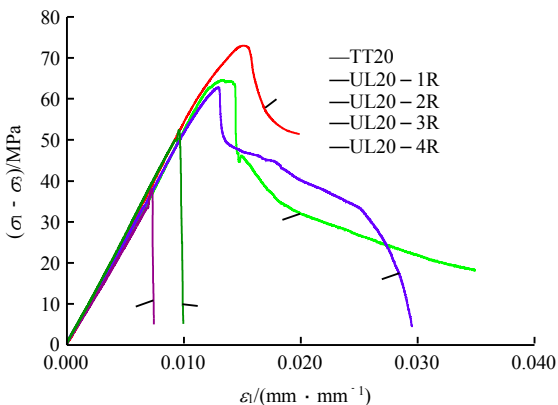
(a) 偏应力 - 轴向、侧向应变曲线



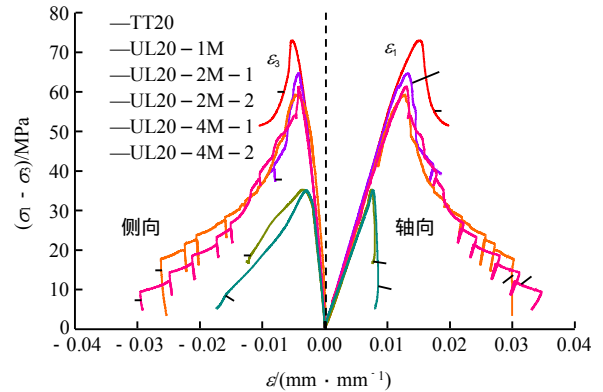
(b) 偏应力 - 体积应变曲线

图 9 初始围压 10 MPa 下不同卸荷速率应力 - 应变曲线
Fig.9 Stress-strain curves under different unloading rates with initial confining pressure of 10 MPa

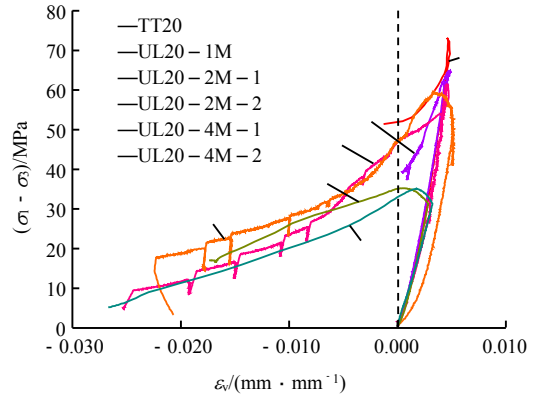
小的偏应力增量便能产生较大的轴向和侧向应变；相同初始围压条件下，试样卸荷破坏所需的偏应力值远小于三轴压缩破坏所需值，即卸荷的峰值强度明显低于加载条件下的峰值强度，表明岩石在卸荷应力状态下更容易破坏，破坏程度更剧烈。



(a) 偏应力 - 轴向应变曲线(RMT)

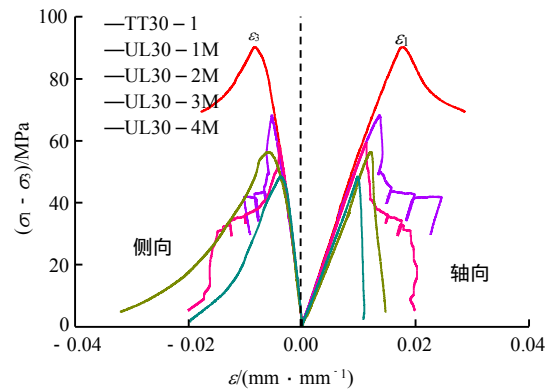


(b) 偏应力 - 轴向、侧向应变曲线

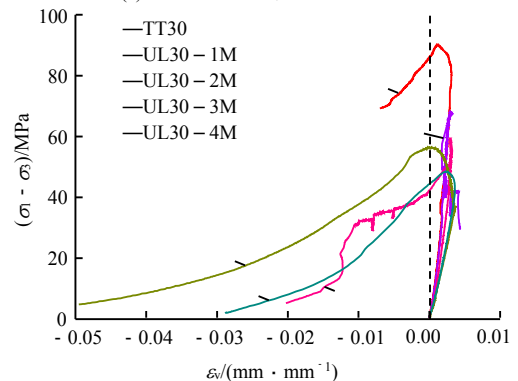


(c) 偏应力 - 体积应变曲线

图 10 初始围压 20 MPa 下不同卸荷速率应力 - 应变曲线
Fig.10 Stress-strain curves under different unloading rates with initial confining pressure of 20 MPa

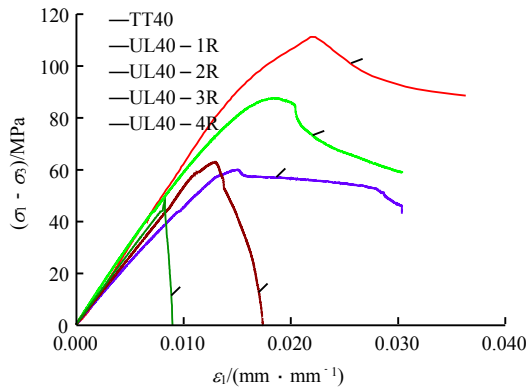


(a) 偏应力 - 轴向、侧向应变曲线

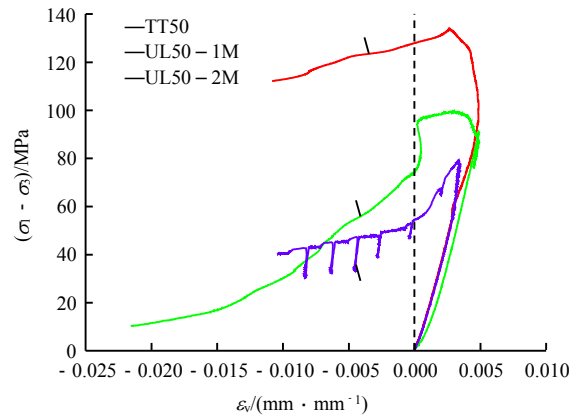


(b) 偏应力 - 体积应变曲线

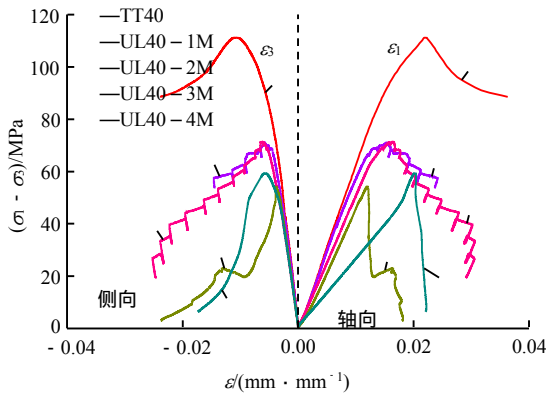
图 11 初始围压 30 MPa 下不同卸荷速率应力 - 应变曲线
Fig.11 Stress-strain curves under different unloading rates with initial confining pressure of 30 MPa



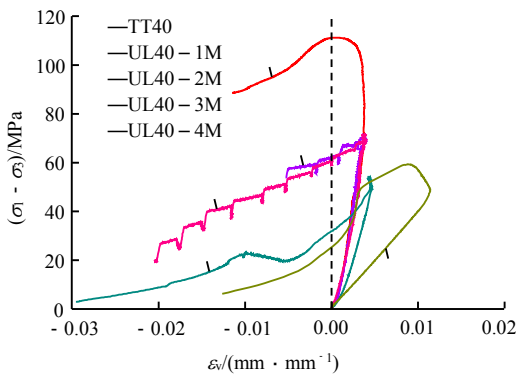
(a) 偏应力-轴向应变曲线(RMT)



(b) 偏应力-体积应变曲线

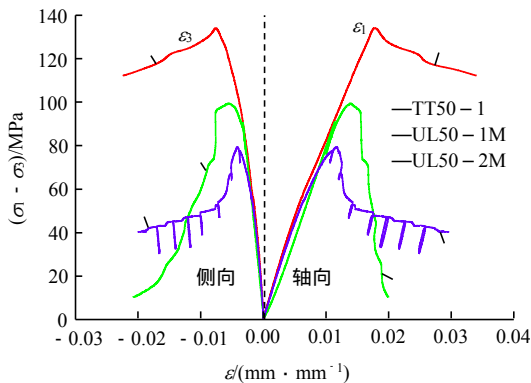


(c) 偏应力-轴向、侧向应变曲线



(d) 偏应力-体积应变曲线

图 12 初始围压 40 MPa 不同卸荷速率应力-应变曲线
Fig.12 Stress-strain curves under different unloading rates with initial confining pressure of 40 MPa



(a) 偏应力-轴向、侧向应变曲线

图 13 初始围压 50 MPa 不同卸荷速率应力-应变曲线
Fig.13 Stress-strain curves under different unloading rates with initial confining pressure of 50 MPa

三轴压缩条件下试样以剪切破坏为主，卸荷应力状态下，相当于在原应力状态上叠加了一个侧向的拉应力，试样易产生偏向于轴向的张拉型裂纹，试样发生宏观张剪复合破坏。

5 卸荷速率效应

从图 9~13 可以看出，三轴卸围压条件下，砂质泥岩轴向、侧向和体积变形均受卸荷速率影响显著，且影响规律受初始围压水平控制。由此可获得各初始围压不同卸荷速率下岩石变形破坏特性。

5.1 卸荷速率对软岩变形特征的影响规律

从图 9~13 可看出，各卸荷速率条件下，卸荷点前试样均处于轴向加载状态，且各试样的加载速率相同时，其应力-应变曲线与三轴压缩条件下的应力-应变曲线基本一致，表明试样离散性小。从卸荷起点开始，三轴卸围压条件下的应力-应变曲线开始随卸荷速率出现差异。

以初始围压 20 MPa 的试样为例(见图 10)，从图 10 中可以清晰地看出砂质泥岩变形破坏特征受卸荷速率的影响显著。图 10 和表 4 显示，卸荷速率为 0.005 MPa/s 的试样 UL20-1R 和 UL20-1M 的峰值极限承载强度分别为 81.144 和 83.709 MPa，卸荷速率 0.010 MPa/s 的试样 UL20-2R 和 UL20-2M-1，UL20-2M-2 的极限承载强度分别为 77.290，76.489，77.287 MPa，均非常接近三轴压缩峰值强度 93.709 MPa，而且试样 UL20-1R，UL20-1M 和 UL20-2R，UL20-2M-1，UL20-2M-2 的峰前偏应力-应变曲线与常规加载条件下的峰前偏应力-应变曲线非常接近。当卸荷速率较快时(如

表 3 砂质泥岩三轴卸围压试验结果

Table 3 Experimental results of triaxial unloading of confining pressure

试样编号	围压/ MPa	卸荷起点 ($\sigma_1 - \sigma_3$)/MPa	卸荷速率/ (MPa · s ⁻¹)	极限承载强度/MPa			峰值应变/(10 ⁻³ mm/mm)		
				σ_m	σ_{3m}	($\sigma_1 - \sigma_3$) _m	ϵ_{1m}	ϵ_{3m}	ϵ_{vm}
UL10-1M	10	27	0.005	58.446	8.477	49.969	9.546 0	- 3.671	2.205
UL10-2M			0.010	41.457	9.629	31.828	6.674 0	- 1.953	2.767
UL10-3R			0.050	37.162	6.168	30.994	8.748 9	-	-
UL10-4R			0.500	36.375	6.983	29.392	7.554 6	-	-
UL20-1M	20	32	0.005	83.709	19.028	64.681	13.340 0	- 4.258	4.828
UL20-2M-1			0.010	76.489	15.069	61.421	12.940 0	- 4.204	4.533
UL20-2M-2			0.010	77.287	17.930	59.358	12.770 0	- 4.678	3.414
UL20-4M-1			0.500	42.701	7.469	35.232	7.465 0	- 3.382	0.7016
UL20-4M-2	0.500	0.500	45.739	10.681	35.058	7.677 0	- 2.910	1.856	
UL30-1M	30	38	0.005	94.546	26.292	68.254	13.680 0	- 5.329	3.021
UL30-2M			0.010	85.228	25.872	59.356	11.310 0	- 4.186	2.938
UL30-3M			0.050	67.007	10.659	56.348	12.030 0	- 5.822	3.882
UL30-4M			0.500	67.579	19.105	48.474	9.778 0	- 3.635	2.508
UL40-1M	40	42	0.005	106.166	35.989	70.177	14.250 0	- 5.187	3.873
UL40-2M			0.010	102.377	31.022	71.355	16.340 0	- 6.323	3.690
UL40-3M			0.050	87.353	33.212	54.141	11.930 0	- 3.776	4.376
UL40-4M			0.500	70.880	11.505	59.375	20.280 0	- 5.722	8.836
UL50-1M	50	55	0.005	147.808	48.326	99.482	13.910 0	- 5.486	2.941
UL50-2M			0.010	124.198	44.916	79.282	11.690 0	- 4.173	3.346

表 4 缓慢卸荷峰值极限承载强度与三轴压缩峰值强度

Table 4 Peak strengths under smooth unloading and conventional triaxial compression

偏应力- 应变曲线	试样编号	卸荷速率/ (MPa · s ⁻¹)	强度/MPa	
			σ_m	($\sigma_1 - \sigma_3$) _m
图 10(b)中曲线	TT20	-(三轴压缩)	93.150	73.150
图 10(a)中曲线	UL20-1R	0.005	81.144	64.677
图 10(b)中曲线	UL20-1M	0.005	83.709	64.681
图 10(a)中曲线	UL20-2R	0.010	77.290	62.820
图 10(b)中曲线	UL20-2M-1	0.010	76.489	61.421
图 10(b)中曲线	UL20-2M-2	0.010	77.287	59.358

图 10(a)中的卸荷速率为 0.050, 0.500 MPa/s 的试样 UL20-3R 和 UL20-4R, 图 10(b)中的试样 UL-4M-1, UL4M-2), 其峰值强度不仅明显低于常规加载条件下的强度, 且低于卸荷速率缓慢时的峰值强度, 达到峰值强度后应力-应变曲线发生突然的脆性跌落。

再以初始围压为 30 MPa 的试样为例(见图 14), 当围压卸荷速率较快时(0.050, 0.500 MPa/s), 如试

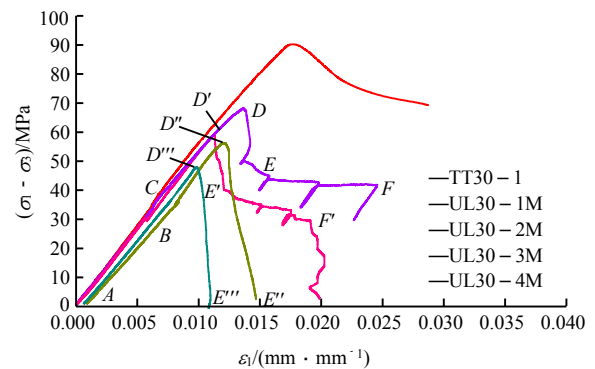


图 14 初始围压 30 MPa 下不同卸荷速率偏应力-轴向应变曲线

Fig.14 Deviatoric stress-axial strain curves under different unloading rates with initial confining pressure of 30 MPa

样 UL30-3M(卸荷速率 0.050 MPa/s)和 UL30-4M(卸荷速率 0.500 MPa/s), 峰前屈服阶段应力-应变曲线明显偏离三轴压缩试验曲线, 峰值点后基本呈铅直线发生突然的脆性破坏(试样 UL30-3M 的 D''E''段和 UL30-4M 的 D'''E'''段); 然而, 当围压

卸荷速率缓慢时(0.005, 0.010 MPa/s), 如试样 UL30-1M(卸荷速率 0.005 MPa/s)和 UL30-2M(卸荷速率 0.010 MPa/s), 三轴卸荷条件下的峰前应力-应变曲线与三轴压缩条件下的峰前应力-应变曲线较接近, 临近峰值点时变形略增大, 轴向应力-应变曲线略向右偏移, 当应力值达到峰值点后, 试样往往发生一~两级规模较小的脆性跌落(试样 UL30-1M 的 DE 段和 UL30-2M 的 D'E'段), 然后沿一条斜率较小的近似斜直线发生线性应变软化(试样 UL30-1M 的 EF 段和 UL30-2M 的 E'F'段)。且随着卸荷速率增大, 峰值强度越低(试样 UL30-1M 的峰值点 D 应力值到试样 UL30-4M 的峰值点 D'''应力值依次降低), 峰后脆性破坏的幅度越大、越剧烈。

从图 9~13 及表 3 可以看出其他围压下的缓慢卸荷也与图 14 存在类似的规律。卸荷速率较快时(0.050, 0.500 MPa/s), 试样侧向应力的约束快速、大幅度地解除, 承载能力急剧降低, 试样达到峰值强度时首次脆性破坏破裂面就已基本贯通, 破坏后的岩石块体基本沿已贯通的破裂面滑移, 峰后呈瞬间剧烈脆性跌落。缓慢卸荷过程中(0.005, 0.010 MPa/s), 岩石在峰值点前卸荷屈服阶段产生损伤扩容, 体积应变曲线明显向扩容方向发展, 达到峰值强度后, 岩石首先沿已贯通的破裂面滑移发生 1~2 级规模较小的脆性跌落, 然后随着围压继续卸荷, 岩石沿一条斜率较小的近似斜直线发生线性应变软化。

综上, 卸荷速率越缓慢, 试样峰值强度越接近常规加载条件下的峰值强度, 峰值点前的偏应力-应变曲线也越接近常规加载条件下的峰前偏应力-应变曲线, 峰后经历脆性跌落、线性软化应变软化; 卸荷速率越快, 峰后脆性特征越显著; 快速卸荷(0.050, 0.500 MP/s)时峰后发生瞬间剧烈的脆性跌落。

5.2 卸荷速率对岩石变形参数的影响规律

为了更好地分析卸荷速率对岩石变形特性的影响, 除对常见的变形参数——变形模量和泊松比分析外, 将对应力水平达到试样极限承载力时的峰值应变值、应变围压柔量等变形参数进行分析。

(1) 变形参数定义

变形模量与泊松比

借鉴刘恺德等^[20-21]的研究成果, 卸荷条件下的变形模量 E 和泊松比 μ 按如下方法计算:

$$\left. \begin{aligned} E &= (\sigma_1 - 2\mu\sigma_3) / \varepsilon_1 \\ \mu &= (\alpha\sigma_1 - \sigma_3) / [\sigma_3(2\alpha - 1) - \sigma_1] \\ \alpha &= \varepsilon_3 / \varepsilon_1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

应变围压柔量

为了分析卸荷过程中围压卸荷量对应变增量的影响, 引入一个描述变量——应变围压柔量 $\Delta\epsilon_i^{[22]}$, $\Delta\epsilon_i$ 等于卸围压起始点和应力跌落点之间由卸围压引起的应变增量与围压卸荷量之比:

$$\Delta\epsilon_i = \frac{\Delta\varepsilon_i}{\Delta\sigma_3} \quad (2)$$

式中: $\Delta\epsilon_i$ 为应变围压柔量($i = 1, 3, v$, 分别表示轴向、环向和体积应变围压柔量); $\Delta\varepsilon_i$ 为第 i 方向的应变增量; $\Delta\sigma_3$ 为围压卸荷量。

应变围压柔量 $\Delta\epsilon_i$ 表示卸荷单位围压时应变增量变化快慢, 该指标能较好地反映卸荷过程中围压变化对岩石变形的影响, 也能反映试样内部结构调整对应力状态变化的响应速度。应变围压柔量 $\Delta\epsilon_i$ 值越大, 表明围压卸除对该方向变形影响越显著。

(2) 卸荷速率对变形模量的影响规律

对试验结果进行数据处理, 得到不同卸荷速率条件下变形模量随围压卸荷的变化曲线(见图 15)。

由图 15 可以看出, 卸荷过程中, 岩石变形模量随围压卸荷不断减小, 表明随着卸荷的进行, 单位围压卸荷量将引起更大的变形量。在卸荷初期, 变形模量降低幅度较小, 而当应力差接近屈服强度时, 变形模量呈加速降低趋势, 较小的围压卸荷量就导致变形模量较大幅度的降低, 此时试样已基本接近屈服破坏。在峰值点后变形模量发生突变, 瞬间减小, 且初始围压越大, 整个卸荷过程中变形模量变化的非线性特征越突出, 总体服从指数函数分布规律($E = E_0 + Ae^{R_0\sigma_3}$, 其中, σ_3 为围压, E_0 , R_0 和 A 均为拟合参数)。对比不同初始围压、不同卸荷速率条件下变形模量随围压卸荷的变化曲线发现, 同一卸荷速率下, 其变形模量变化规律基本相同。各级初始围压条件下, 当卸荷速率较快时, 由于卸荷非常快, 试样内部微结构和应力状态来不及调整, 峰值点之前, 变形模量变化较小, 到峰值点后, 由于试样发生瞬时脆性跌落, 且侧向约束大幅度快速解除, 试样沿已贯通的破裂面滑移、错动, 变形模量突然急剧降低; 而当卸荷缓慢时, 由于卸荷过程平缓, 试样内部微结构和应力状态有充足时间进行调整, 从卸荷一开始变形模量便减小, 待达到峰值点后变形模量大幅度降低。

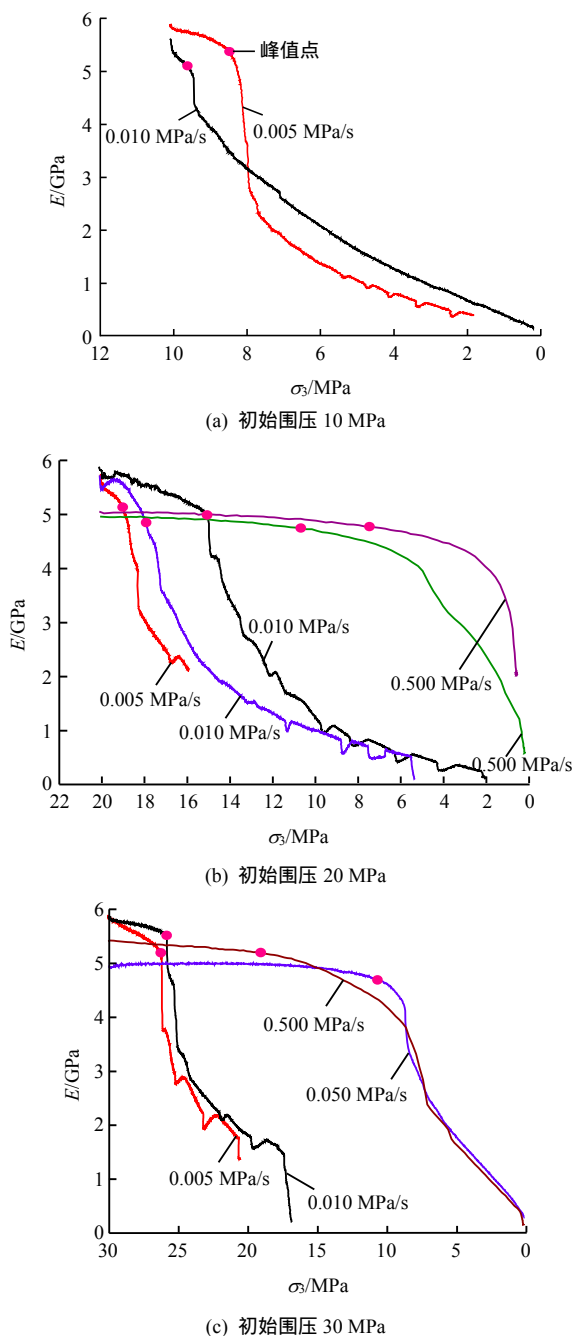


图 15 不同卸荷速率下变形模量随围压卸荷变化曲线
 Fig.15 Curves of deformation modulus changing with confining pressure under different unloading rates

(3) 卸荷速率对泊松比的影响规律

图 16 为不同初始围压、不同卸荷速率条件下泊松比随围压卸荷变化曲线。虽然这些试样所处的初始围压水平和轴向应力水平不同，卸荷速率也不同，但从图中可以看出，卸荷过程中，不同初始围压下试样泊松比均随围压降低而不断增加。卸围压初始阶段，泊松比缓慢增加，在峰值破坏点后，泊松比突然向上拐，急剧增大，非线性关系明显，较小的围压卸荷量即能引起较大的泊松比增加，在产生较

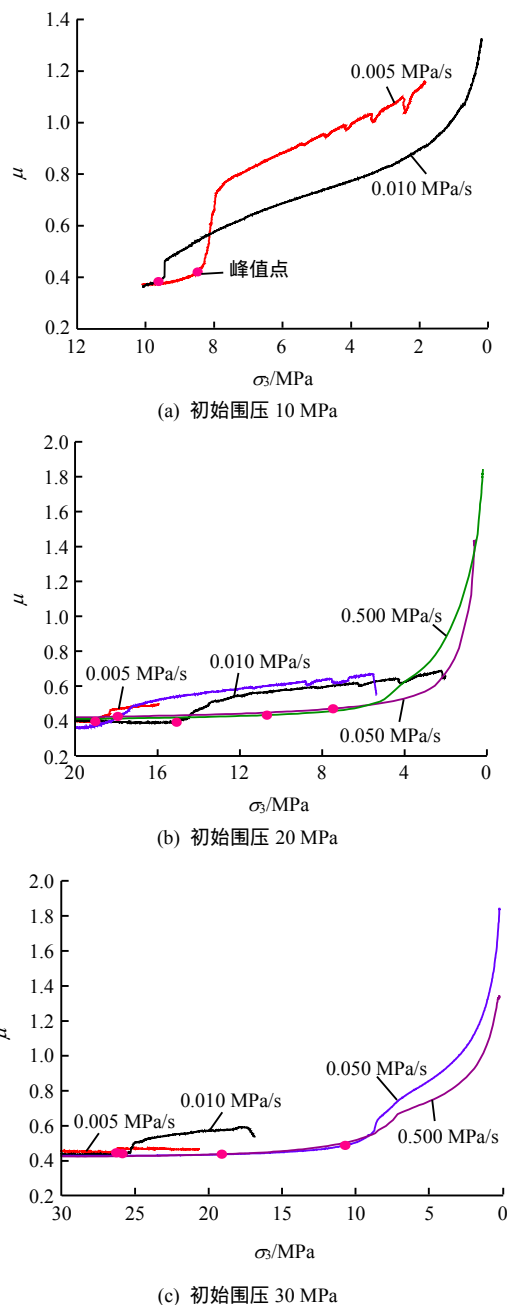


图 16 不同卸荷速率下泊松比随围压卸荷的变化曲线
 Fig.16 Curves of Poisson's ratio changing with confining pressure under different unloading rates

大的峰后轴向变形的同时将产生非常大的峰后侧向扩容。对图 16 中各围压条件下的曲线进行拟合，泊松比随围压卸荷的变化规律总体上呈指数函数分布规律($\mu = \mu_0 + Ae^{\sigma_3/t}$)。当卸荷到一定程度后，名义泊松比超过 0.5 甚至超过了 0.8(弹塑性材料泊松比极限值为 0.5)，这是因为试样本身存在初始微裂纹，这些微裂纹在卸围压过程中不断演化发展，直至贯通破坏，以及产生许多新裂纹，从试件表面可以看出试样竖向方向上存在许多垂直于卸荷主方向的张性裂纹，从而导致侧向变形急剧增加，因此，此时

的泊松比已经不再是一般连续介质力学意义上的泊松比了,而是包括了竖向张性裂隙扩展、张开变形。当卸荷速率快时,峰值点后泊松比大幅度增加,这是因为卸荷速率快时,峰值点发生贯通的破裂面,且侧向约束解除得很快,峰后沿贯通的破坏面发生快速滑移;当卸荷缓慢时,泊松比在峰后增加,但增加的速率和幅度均较快速卸荷条件下小。

(4) 卸荷速率对应变围压柔量的影响规律
轴向应变围压柔量变化规律

本次三轴卸围压试验,采用的是轴向应变控制方式,在各卸荷速率下,轴向变形速率均设置成了 0.001 mm/s,因此根据式(2),可得各卸荷速率下轴向应变围压柔量均为常量,卸荷速率 0.005, 0.010, 0.050, 0.500 MPa/s 对应的轴向应变围压柔量分别为 0.002, 0.001, 0.000 2, 0.000 02。

侧向应变围压柔量变化规律

图 17 为卸荷过程中初始围压 10, 20, 30 MPa, 不同卸荷速率下侧向应变围压柔量 $\Delta\epsilon_y$ 随围压卸荷的变化曲线,初始围压为 40, 50 MPa 时有相同规律。

对比图 17 中同一围压不同卸荷速率条件下侧向应变围压柔量 $\Delta\epsilon_y$ 变化特征,可以发现,各围压下,侧向应变围压柔量随围压卸荷总体呈增加趋势,即随着卸荷的进行,每单位围压卸荷量将产生更大

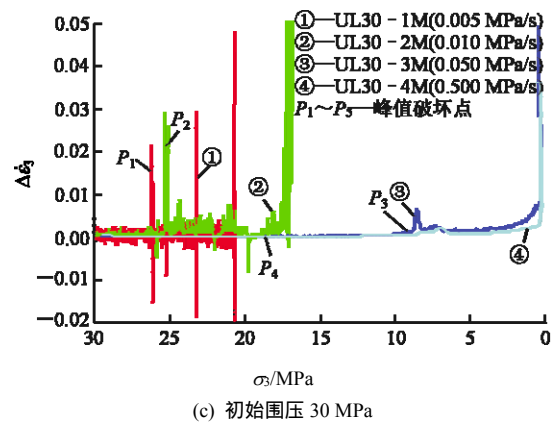


图 17 各卸荷速率下侧向应变围压柔量 $\Delta\epsilon_y$ 随围压卸荷的变化曲线

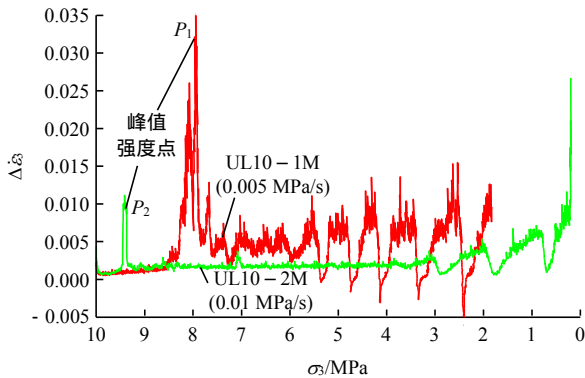
Fig.17 Curves of lateral strain and confining pressure compliance changing with confining pressure under different unloading rates

的侧向变形,且 $\Delta\epsilon_y$ 均要大于 $\Delta\epsilon_x$,尤其是峰后,侧向应变围压柔量比轴向应变围压柔量大许多,即侧向变形比轴向变形更加显著。卸荷速率对侧向应变围压柔量有显著影响,当卸荷速率较快时(0.050, 0.500 MP/s),峰值点前 $\Delta\epsilon_y$ 增加幅度非常小,峰值点后随峰后破裂面的贯通 $\Delta\epsilon_y$ 以较大速率增加,当围压接近卸除完时, $\Delta\epsilon_y$ 瞬间大幅度剧烈增大到初始值的 3~6 倍,如图 17(b)中曲线 和 , 17(c)中曲线 和 在峰值点之前, $\Delta\epsilon_y$ 增加的幅度非常小,待达到峰值点 P_i 后开始以较大幅度增加,最终大幅度剧烈增加;当卸荷速率缓慢时(0.005, 0.010 MP/s),如图 17(a)中曲线 和 , 17(b)中曲线 , , 17(c)中曲线 , 的 $\Delta\epsilon_y$ 变化曲线,卸荷过程中随着围压减小 $\Delta\epsilon_y$ 呈锯齿状波动,峰值破坏点处由于试样产生破裂,出现第一个跳跃,峰后伴随多级破裂的产生 $\Delta\epsilon_y$,曲线出现间断性的多级跳跃,且跳跃幅度越来越大。 $\Delta\epsilon_y$ 锯齿状波动时其平均值在不断增大,表明缓慢卸荷过程中,每单位围压卸荷量将引起更大的侧向变形,从而引起更大的体积扩容。

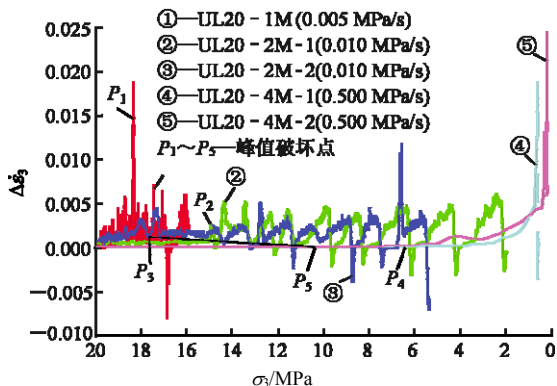
5.3 卸荷速率对岩石强度特征影响规律

(1) 卸荷速率对极限强度的影响规律

尤明庆和华安增^[25]认为,三轴压缩破坏是使岩石的轴向应力增大到其承载能力,而卸围压破坏是使试样承载能力降低到其轴向应力水平。由于达到岩石最终破坏的应力路径存在差异,所以三轴卸围压试验试样破坏时的峰值应力已不再是传统单轴和三轴加载试验中峰值强度的概念,围压在岩石破坏过程中是不断降低的,破坏应力更多的是反映岩石



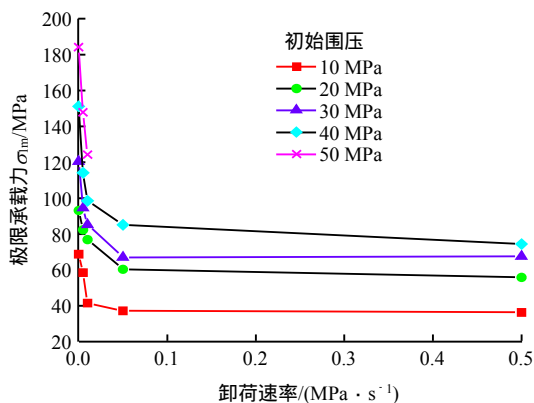
(a) 初始围压 10 MPa



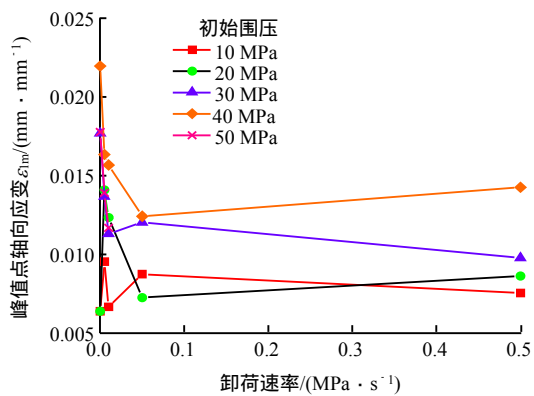
(b) 初始围压 20 MPa

的围压丧失后的极限承载能力。因此为了区别于加载试验中峰值强度的概念，邱士利等^[22]采用极限承载强度来表示卸围压试验破坏时的轴压应力水平，本文也采用这一概念分析围压卸荷速率对试样达到破坏时极限承载应力状态、应变状态的影响规律。

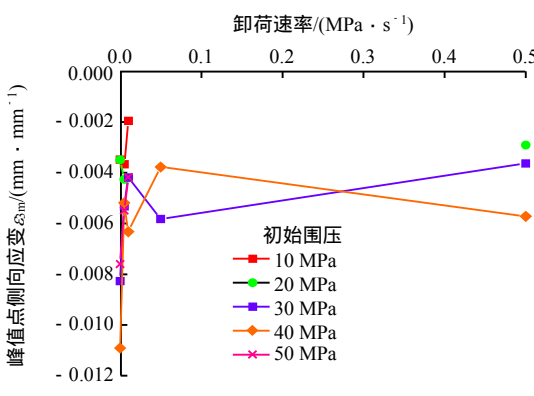
根据表 3 得到各围压下卸荷速率对极限承载强度、应变的影响规律，见图 18。



(a) 极限承载强度



(b) 峰值破坏点轴向应变



(c) 峰值破坏点侧向应变

图 18 极限承载强度、应变随卸荷速率变化曲线

Fig.18 Strength limit and strain changing with unloading rate

根据图 9~13, 18 可以看出，卸荷速率对试样破坏时极限承载强度、应变影响规律，具体如下：

卸荷速率对极限承载强度和围压卸荷量的影响规律。从图 18(a)可以看出，试样破坏时的极限承载强度和最大差应力均比常规三轴加载条件下的值低，并且随卸荷速率的增大而降低，总体呈指数规律($\sigma_{lm} = \sigma_{lm0} + Ae^{-r/t}$)。当卸荷速率较低时，极限承载强度和最大差应力随卸荷速率的增大快速降低；试样达到破坏时围压卸荷量随卸荷速率增大而增大，即卸荷速率越大，达到破坏时侧向解除的约束越多，同时可发现，当卸荷速率增至 0.050 和 0.500 MPa/s 时，围压卸荷量随卸荷速率的变化很小。

卸荷速率对试样破坏时应变状态的影响规律。从图 18(b), (c)可以看出，试样峰值破坏时轴向、侧向应变均低于常规加载条件下的应变值，且随卸荷速率增大而降低。此外，当卸荷速率较大(如 0.050, 0.500 MPa/s)时，试样破坏时的轴向应变、侧向应变随卸荷速率的变化也较小；试样破坏时体积应变随卸荷速率的变化比较复杂，总体上也是随卸荷速率减小而减小。

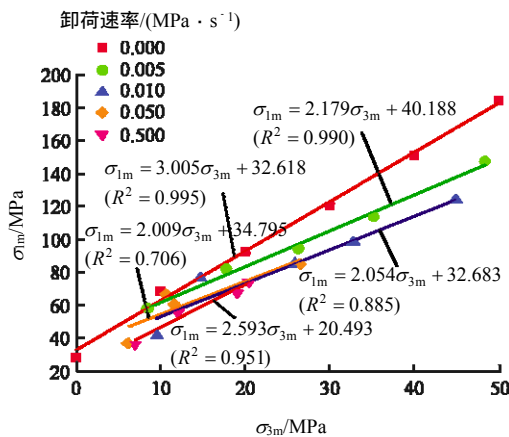
综上，卸荷速率较快(0.050, 0.500 MPa/s)时，试样达到峰值的应力、应变随卸荷速率的变化都很小。因此可得出结论：卸荷速率较快时，卸荷速率对岩石极限承载强度的影响较小，卸荷速率越低，极限承载强度越高，越接近常规加载条件下的强度值。

(2) 卸荷速率对强度参数的影响规律

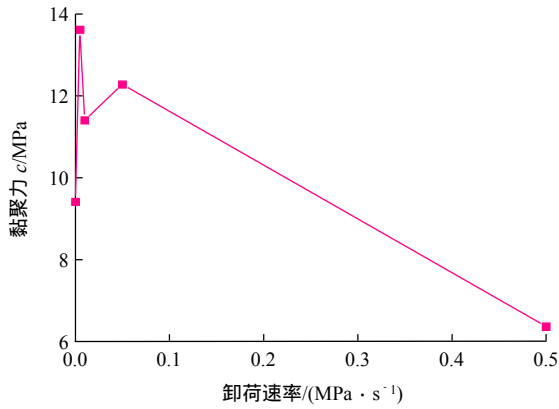
图 19(a)给出了不同初始围压和卸荷速率条件下的极限承载强度。从图 19(a)可以看出，极限承载强度服从线性分布，Mohr-Coulomb 强度准则能较好地反映不同卸围压速率下极限承载强度变化规律，Mohr-Coulomb 强度准则可表示为

$$\sigma_{lm} = K\sigma_{3m} + c_0 \tag{3}$$

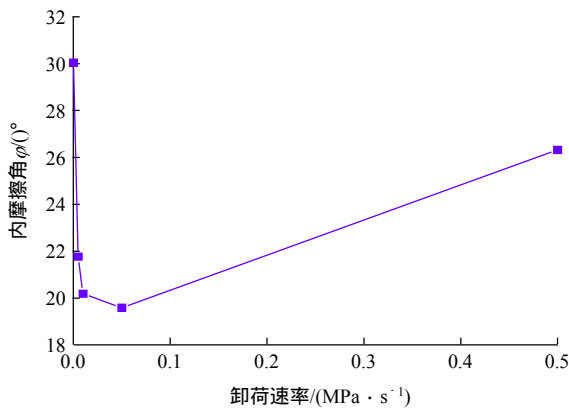
式中： K 为 Mohr-Coulomb 强度准则的斜率， c_0 为与纵轴的截距。拟合结果见表 5。



(a) 极限承载强度



(b) 黏聚力 c



(c) 内摩擦角 φ

图 19 不同卸围压速率下强度参数

Fig.19 Strength parameters changing with unloading rate

表 5 不同卸荷速率条件下破坏时黏聚力与内摩擦角
 Table 5 Cohesion and internal friction angle of rock at failure under different unloading rates

试验类型	卸荷速率/ (MPa·s ⁻¹)	K	c/ MPa	黏聚力 c/MPa	内摩擦 角 φ(°)	R ²
常规三轴压缩	0.000	3.005	32.618	9.408	30.041	0.995
	0.005	2.179	40.188	13.612	21.769	0.990
三轴卸围压	0.010	2.054	32.683	11.402	20.189	0.885
	0.050	2.009	34.795	12.274	19.592	0.706
	0.500	2.593	20.493	6.363	26.319	0.951

从图 19 中可以看出，卸荷速率对岩石强度参数(黏聚力和内摩擦角)影响显著。卸荷速率缓慢时，黏聚力 c 值均高于常规加载条件下的 c 值，当卸荷速率较快(0.500 MPa/s)时，黏聚力低于常规加载条件下的黏聚力，并且卸荷速率缓慢时，黏聚力随卸荷速率加快总体呈下降趋势。卸荷条件下岩石内摩擦角均低于常规加载条件下的内摩擦角。卸荷速率缓慢时，内摩擦角随卸荷速率增大而降低，当卸荷速率较快(0.500 MPa/s)时，黏聚力又随卸荷速率增加而增加。上述影响规律表明，当试样围压卸荷速

率缓慢时，黏聚力和内摩擦角 φ 的值均较高，充分调动了试样的摩擦机制。因为卸荷缓慢时，试样内部应力调整平缓、均匀，萌生更多裂纹，裂纹间相互作用更充分，试样内部充分微裂化(试样破坏断口上可以清晰地看到许多因摩擦和剪切作用产生的细岩粉)，损伤程度高，黏聚力和内摩擦角的值均比较高，充分调动了试样的摩擦机制，因而试样强度比较接近三轴加载条件下的强度，比快速卸荷条件下的强度高。而当试样所处围压快速卸荷时，剪切局部化过程加快，摩擦效应集中在变形局部化区域，主要由剪切带内动摩擦阻力和凹凸界面间的镶嵌作用所产生的摩擦阻力来控制。



(a) 0.005 MPa/s (b) 0.050 MPa/s (c) 0.100 MPa/s (d) 0.500 MPa/s

图 20 不同卸荷速率条件下试样破坏照

Fig.20 Photos of samples after failure under different unloading rates

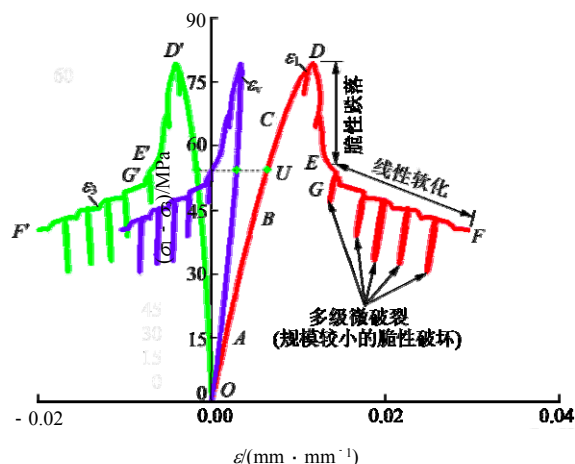
5.4 卸荷速率对软岩破坏特征的影响规律

卸荷速率对砂质泥岩破坏特征也有重要影响。如图 20 所示，缓慢卸荷(0.005, 0.010 MP/s)条件下，试样呈张剪复合破坏，伴有轴向劈裂裂纹。破裂面为由劈裂裂纹相互贯通形成具有一定宽度的剪切带，并在轴向挤压力和沿剪切面的剪切力共同作用下，剪切带内劈裂岩片被挤压和摩擦成许多细小岩石颗粒和粉末。卸荷速率越小，剪切破裂面宽度越大、破裂程度越高，被挤压和摩擦出的细小岩石颗粒和粉末越多，轴向张性劈裂裂纹也在增多。随着卸荷速率的增大，当增大到 0.050, 0.500 MP/s 时，试样瞬间脆性跌落，形成较单一的剪切破裂面，该破裂面宽度较小，并且较光滑，破裂面经历的摩擦较小。

6 TBM 缓慢准静态卸荷软弱围岩变形破坏特性

通过上述卸荷速率对砂质泥岩变形破坏特性的影响规律，可以总结归纳出 TBM 机械开挖缓慢准静态卸荷条件下软弱围岩的力学特性。

三轴缓慢卸荷试验应力-应变曲线如图 21 所示。以试样 UL10-1M(围压 10 MPa, 卸荷速率 0.005 MPa/s)为例, 进一步详细分析砂质泥岩在围压缓慢卸荷条件下的变形规律。围压卸荷速率缓慢(0.005, 0.010 MPa/s)时, 三轴卸荷条件下的峰前应力-应变曲线与三轴压缩条件下的应力-应变曲线较接近(OD 段), 临近峰值点时变形略增大, 轴向应力-应变曲线略向右偏移。这一阶段(BD 段)塑性变形增加, 内部损伤不断积累, 而且体积应变开始明显往左偏移(开始扩容), 该阶段称为峰前损伤扩容段^[26]。这也证明了 TBM 掘进围岩扰动损伤区和围岩收敛变形要比常规钻爆法开挖条件下小。在峰值点后, 试样往往发生 1~2 级规模较小的脆性跌落(DE 段), 然后沿一条斜率较小的近似斜直线发生线性应变软化(EF 段)。由于 MTS 试验机的刚度约为 RMT 试验机刚度的 2 倍, 通过 MTS 卸荷试验应力-应变曲线还可以看出, 砂质泥岩在缓慢卸荷峰后线性应变软化段(EF 段)出现多级规模较小的脆性跌落(FG 段), 然后应力值又能及时基本沿脆性跌落的直线上恢复至约为发生该级脆性跌落前应力值的 90%, 然后继续按照线性应变软化规律变形。在后续卸围压过程中, 依次产生多级这样的小规模脆性跌落和应力值的及时上升恢复, 即在峰后线性软化段(EF 段), 由于卸荷作用不断产生次生微破裂(FG 段)。对于其他试样, 也有类似的规律(如图 2 所示的试样 UL50-2M, 其峰后 FG 段也出现了多级破裂)。因此可以得出结论: 缓慢卸荷条件下, 峰值点后线性应变软化段出现多级规模较小的破裂, 不断产生多级微破裂, 裂纹不断演化扩展、汇聚, 形成次生裂纹。此阶段应力-应变曲线总体上服从线性软化变形规律。这一特征是软岩在缓慢卸荷条件下比较



(b) UL50-2M(初始围压 50 MPa, 卸荷速率 0.01 MPa/s)

图 21 三轴缓慢卸荷试验应力-应变曲线

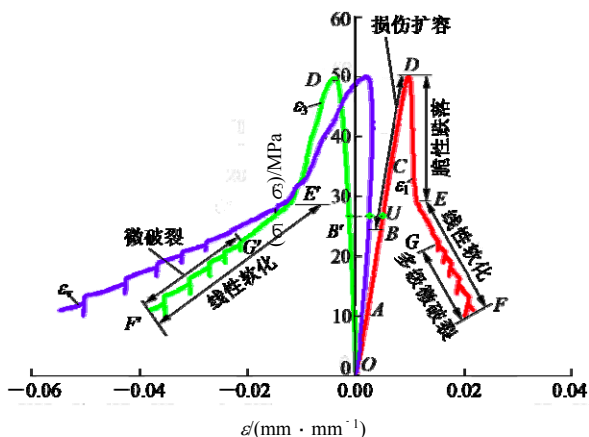
Fig.21 Stress-strain curves in smooth unloading tests

特有的, 伍向阳^[27]中的大理岩三轴松弛应力-应变曲线虽然也出现了个别类似的峰后微破裂, 但并未明确指出这一现象及其产生的原因。本文通过试验, 首次发现和明确指出软岩缓慢卸荷条件下峰后线性软化段出现多级微破裂这一现象, 并在后续研究中对其内在的机制进行分析。

因此, 可以将缓慢卸荷条件下软弱围岩的变形规律概况为: 缓慢卸荷过程中, 峰值点前岩石产生损伤扩容, 体积应变曲线明显往扩容方向发展, 达到峰值强度后, 岩石首先沿已贯通的破裂面滑移, 由于围压卸荷缓慢、残余围压较高, 岩石随围压卸荷总体服从线性应变软化规律继续变形, 且线性软化变形过程中伴随多级微破裂。

虽然本次试验中并未获取残余强度阶段的应力-应变曲线, 但只要在线性应变软化段结束后停止卸围压, 试样便进入残余强度阶段。因此, TBM 开挖缓慢卸荷条件下偏应力-应变全过程曲线大致可分为弹性段(OB)、峰前卸荷损伤扩容段(BD)、峰后脆性破坏段(DE)、含有多级微破裂的线性软化段(EF), 以及残余强度阶段。

缓慢卸荷(0.005 和 0.010 MP/s)时, 卸荷破坏过程中伴有轴向劈裂裂纹, 试样卸荷断面为具有一定宽度的剪切带, 并在轴向挤压力和沿剪切面的剪切力共同作用下, 剪切带内劈裂的岩片被挤压和摩擦成细颗粒和岩粉。缓慢卸荷条件下, 试样达到极限承载强度之前围压卸荷量均较小, 随着初始围压由低到高(10~50 MPa), 侧向约束逐渐增强, 试样破坏时凹凸破裂面间的摩擦作用也不断增强, 从而导



(a) UL10-1M(初始围压 10 MPa, 卸荷速率 0.005 MPa/s)

致试样剪切破裂面破碎程度增加, 剪切带内被研磨成的岩粉和细颗粒增多, 且出现大量岩粉, 从试样破坏断面上可以清楚地观察到这一现象。

不同卸荷速率下, 围岩变形破坏特性的上述变化规律是与其相应的内在机制紧密相联系的。当卸荷速率较快时, 试样环向应力约束快速大幅度地解除, 承载力急剧降低, 首次瞬间脆性破坏破裂面已基本贯通, 从峰值点发生破坏时基本沿已贯通的破裂面滑移、错动和扩容, 因此峰后呈瞬间剧烈的脆性跌落。围压缓慢卸荷时, 应力水平达到峰值点时, 试样内部形成宏观贯通裂纹, 发生一级较大规模的脆性破坏, 因此应力-应变曲线峰值点后发生 1~2 级脆性跌落。然后继续以缓慢速率卸围压, 残余围压较高, 而轴向采用变形控制, 即卸荷过程中仍然保持一定的轴向压缩应变速率。轴向一直处于加载状态, 于是在挤压和剪切作用下, 使得试样已形成的剪切破坏面内劈裂岩片扭曲破碎成粉末和细小颗粒, 诱发拉应力作用下在剪切带外侧形成许多二次劈裂裂纹。同时, 围压卸荷过程中岩石吸收了轴向应力做功, 并转化为相应的应变能和表面能, 因此轴向加载应力对围压卸荷过程中岩样的损伤破裂也在一定程度上起到了压致拉裂的促进作用, 加快了裂隙扩展, 增强了裂隙扩展的规模。故在这一阶段可观察到多级微破裂, 这一阶段岩石变形随围压卸荷总体服从线性应变软化规律。

7 结论与展望

本文分析了深埋隧(巷)道 TBM 机械开挖卸荷的本质特征。为了反映这一卸荷特征, 开展了不同卸荷速率条件下的砂质泥岩三轴卸围压试验, 研究了卸荷速率效应, 获取了 TBM 机械开挖卸荷条件下软弱围岩变形破坏特性, 主要结论如下:

(1) 开挖卸荷方式对围岩扰动具有显著影响, 深埋隧道 TBM 机械开挖卸荷的本质特征明显区别于常规钻爆法, 为高初始围压下的缓慢准静态卸荷。

(2) 卸荷条件下, 从卸荷点起, 轴向变形曲线变缓, 向右发展, 侧向变形加速增长, 体积变形从体积压缩开始转向扩容; 相同的差应力作用下, 卸荷产生的扩容量大于加载条件下的扩容量。在接近峰值应力时, 较小的偏应力增量便能产生较大的轴向和侧向应变, 卸荷条件下的峰值强度明显低于加

载峰值强度, 岩石在卸荷应力状态下更容易破坏, 破坏程度更剧烈。

(3) TBM 开挖缓慢准静态卸荷过程中, 岩石在峰前产生损伤扩容, 体积应变曲线明显向扩容方向发展, 达到峰值强度后, 岩石首先沿已贯通的破裂面滑移, 发生 1~2 级规模较小的脆性跌落, 然后随着继续卸围压, 岩石沿一条斜率较小的近似斜直线发生线性应变软化, 且线性软化变形过程中发生多级次生微破裂。

(4) 软岩缓慢卸荷下的偏应力-应变全过程曲线由弹性段、峰前卸荷损伤扩容段、峰后脆性破坏段、含有多级微破裂的线性软化段、以及残余强度段组成。

(5) TBM 开挖缓慢卸荷条件下软岩的上述变形规律与其相应的内在机制紧密相联。应力水平达到峰值强度时, 试样内部形成宏观贯通裂纹, 因此应力-应变曲线峰值点后发生 1~2 级脆性跌落。随着继续缓慢卸围压(但残余围压较高), 而轴向采用变形控制, 即轴向一直处于加载状态, 于是试样在挤压和剪切力作用下使得剪切破坏面内的岩片不断扭曲、破碎, 轴向加载应力对围压卸荷过程中岩石的损伤破裂在一定程度上起到了压致拉裂的促进作用, 加快了裂隙扩展、增强了裂隙扩展的规模, 故在这一阶段出现多级微破裂, 这一阶段岩石变形随围压卸荷总体服从线性应变软化规律。

(6) 三轴压缩条件下试样以剪切破坏为主, 而卸荷应力状态下, 试样呈张剪复合破坏。快速卸荷时, 峰后呈瞬间剧烈的脆性跌落, 形成较单一的剪切破裂面, 该破裂面宽度较小, 较光滑、平整。缓慢卸荷过程中伴有轴向劈裂裂纹, 试样卸荷断面为具有一定宽度的剪切带, 且剪切带内劈裂的岩片在轴向挤压力和沿剪切面的剪切力共同作用下被挤压和摩擦成许多细颗粒和岩粉。

通过砂质泥岩在不同卸荷速率下的三轴卸围压试验结果的对比研究, 获取了 TBM 缓慢准静态卸荷下深部软弱围岩的变形破坏特性。对于初始围压对深部软岩变形参数和强度参数的影响规律, TBM 开挖缓慢卸荷条件下软弱围岩的变形机制, 以及同时考虑强度参数和变形参数劣化的损伤扩容-破裂碎胀本构模型将在下一步研究中深入分析。此外, TBM 开挖后软弱围岩具有显著的时效变形特性, 也将在后续进一步研究。

参考文献(References)：

- [1] 刘泉声,黄兴,时凯,等. 煤矿超千米深部全断面岩石巷道掘进机的提出及关键岩石力学问题[J]. 煤炭学报, 2012, 37(12): 2 006 – 2 013.(LIU Quansheng, HUANG Xing, SHI Kai, et al. Utilization of full face roadway boring machine in coal mines deeper than 1 000 km and the key rock mechanics problems[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(12): 2 006 – 2 013.(in Chinese))
- [2] 王梦恕,李典璜,张镜剑,等. 岩石隧道掘进机(TBM)施工及工程实例[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004: 121 – 124.(WANG Mengshu, LI Dianhuang, ZHANG Jingjian, et al. Tunneling with rock TBM and related case histories[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004: 121 – 124.(in Chinese))
- [3] 张镜剑,傅冰骏. 隧道掘进机在我国应用的进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 226 – 238.(ZHANG Jingjian, FU Bingjun. Advances in tunnel boring machine application in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 226 – 238.(in Chinese))
- [4] 时凯. 复合地层TBM盘形滚刀破岩机制及刀盘-掘进面相互作用[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2013.(SHI Kai. Mechanism of rock fragmentation by disc cutters and interaction between cutterhead of TBM and mixed-face[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013.(in Chinese))
- [5] 刘泉声,黄兴,时凯,等. 超千米深部全断面岩石掘进机卡机机制[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 78 – 84.(LIU Quansheng, HUANG Xing, SHI Kai, et al. Jamming mechanism of full face tunnel boring machine in over thousand-meter depths[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 78 – 84.(in Chinese))
- [6] 黄兴. 深部软弱地层TBM掘进围岩挤压大变形与卡机致灾机制[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2014.(HUANG Xing. Mechanism of large squeezing deformation and shield jamming in deep soft ground tunnelling by TBM[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2014.(in Chinese))
- [7] 尚彦军,史永跃. 昆明上公山隧道复杂地质条件下TBM卡机及护盾变形问题分析和对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3 858 – 3 863.(SHANG Yanjun, SHI Yongyue. TBM Jamming and deformation in complicated geological conditions and engineering measures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3 858 – 3 863.(in Chinese))
- [8] 黄润秋,黄达. 卸荷条件下花岗岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2 205 – 2 213.(HUANG Runqiu, HUANG Da. Experimental research on mechanical properties of granites under unloading condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2 205 – 2 213.(in Chinese))
- [9] 张成良,赵晓霞. 辉绿岩在加、卸荷条件下的岩体力学特性试验[J]. 煤炭学报, 2011, 36(增2): 224 – 230.(ZHANG Chengliang, ZHAO Xiaoxia. Experiment on mechanics properties of diabase under the press of loading and unloading[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(Supp.2): 224 – 230.(in Chinese))
- [10] 李建林,王瑞红,蒋昱州,等. 砂岩三轴卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2 034 – 2 041.(LI Jianlin, WANG Ruihong, JIANG Yuzhou, et al. Experimental study of sandstone mechanical properties by unloading triaxial tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 2 034 – 2 041.(in Chinese))
- [11] RAMONI M, ANAGNOSTOU G. The interaction between shield, ground and tunnel support in tbm tunnelling through squeezing ground[J]. Rock Mechanics Rock Engineering, 2011, 44: 37 – 61.
- [12] GRAZIANI A, CAPATA A, ROMBADI P. Analysis of rock-TBM-lining interaction in squeezing rock[J]. Felsbau Magazin, 2007, 25(6): 23 – 31.
- [13] 李清,杨仁树,李均雷,等. 爆炸荷载作用下动态裂纹扩展试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2 912 – 2 916.(LI Qing, YANG Renshu, LI Junlei, et al. Experimental study on propagation of dynamic cracks under blasting loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2 912 – 2 916.(in Chinese))
- [14] 陈静曦. 裂纹扩展速度监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(4): 425 – 428.(CHEN Jingxi. Monitoring analysis for the velocity of crack propagation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(4): 425 – 428.(in Chinese))
- [15] 严鹏,卢文波,陈明,等. 深部岩体开挖方式对损伤区影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1 097 – 1 106.(YAN Peng, LU Wenbo, CHEN Ming, et al. In-situ test research on influence of excavation method on induced damage zone in deep tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1 097 – 1 106.(in Chinese))
- [16] 严鹏,卢文波,许红涛. 高地应力条件下隧洞开挖动态卸荷的破坏机制初探[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(3): 283 – 288.(YAN Peng, LU Wenbo, XU Hongtao. A primary study to damage mechanism of initial stress dynamic unloading when excavating under high

- geo-stress condition[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(3): 283–288.(in Chinese)
- [17] 薛备芳. 掘进机开挖法与钻爆法对围岩稳定性影响比较[J]. *水利电力施工机械*, 1995, 17(4): 16–17.(XUE Beifang. Comparison of the influence on the tunnel surrounding rock between TBM and blasting excavation[J]. *Construction Machinery for Hydraulic Engineering and Power Station*, 1995, 17(4): 16–17.(in Chinese))
- [18] 陈炳瑞, 冯夏庭, 曾雄辉, 等. 深埋隧洞 TBM 掘进微震实时监测与特征分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(2): 275–283.(CHEN Bingrui, FENG Xiating, ZENG Xionghui, et al. Real-time microseismic monitoring and its characteristic analysis during tbn tunneling in deep-buried tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(2): 275–283.(in Chinese))
- [19] 李建林, 王乐华. 节理岩体卸荷非线性力学特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(10): 1968–1975.(LI Jianlin, WANG Lehua. Study on unloading nonlinear mechanical characteristics of jointed rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(10): 1968–1975.(in Chinese))
- [20] 刘恺德. 采动条件下含瓦斯煤岩力学行为变异机制研究[博士学位论文][D]. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所, 2013.(LIU Kaide. Study on variation mechanism of mechanical behavior of coal containing gas under mining conditions[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013.(in Chinese))
- [21] 朱杰兵. 高应力下岩石卸荷及其流变特性研究[博士学位论文][D]. 北京:中国科学院研究生院, 2009.(ZHU Jiebing. Study on unloading mechanics and its rheological properties of rock under high stress[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2009.(in Chinese))
- [22] 邱士利, 冯夏庭, 张传庆, 等. 不同卸围压速率下深埋大理岩卸荷力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(9): 1807–1817.(QIU Shili, FENG Xiating, ZHANG Chuanqing, et al. Experimental research on mechanical properties of deep-buried marble under different unloading rates of confining pressures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(9): 1807–1817.(in Chinese))
- [23] 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的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(1): 21–33.(HUANG Runqiu, HUANG Da. Experimental research on 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.(in Chinese))
- [24] 张凯, 周辉, 潘鹏志, 等. 不同卸荷速率下岩石强度特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(7): 2072–2078.(ZHANG Kai, ZHOU Hui, PAN Pengzhi, et al. Characteristics of strength of rocks under different unloading rates[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(7): 2072–2078.(in Chinese))
- [25] 尤明庆, 华安增. 岩石试样的三轴卸围压试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 1998, 17(1): 24–29.(YOU Mingqing, HUA anzeng. Triaxial confining depressure test of rocks ample[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998, 17(1): 24–29.(in Chinese))
- [26] LU X L, LIU Q S, SU P F. Deformation mechanism and support measures for stress-induced cracked rock mass of deep coal mine roadway[C]// *International Symposium on Geomechanics and Geotechnics: From Micro to Macro*. London: Taylor and Francis Group, 2011: 845–853.
- [27] 伍向阳. 岩石的应力松弛、应变硬化和应变软化[J]. *地球物理学进展*, 1996, 11(4): 71–76.(WU Xiangyang. Stress relaxation, strain hardening and strain softening in rocks[J]. *Progress in Geophysics*, 1996, 11(4): 71–76.(in Chinese))