

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.07.001

楔刀作用下软硬互层岩体贯入破坏试验研究

刘泉声¹, 刘 琪¹, 刘学伟², 孙 磊¹, 张晓波¹, 纪 杰¹

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院 岩土与结构工程安全湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 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)

摘 要: 隧道工程 TBM 施工中广泛遇到软硬复合地层, TBM 刀具作用下软硬互层岩体破坏特征与均质岩体存在较大差异。采用 RMT-301 刚性试验机, 对不同软硬互层组合下的类岩石板状试样进行了楔刀贯入破坏试验, 并对试验过程进行了声发射和高速摄像监测, 探讨了掘进轴向上软硬互层因素对 TBM 刀具破岩效果的影响。试验结果表明: 刀具破岩的难易不仅与刀具直接作用层岩石性质有关, 同时还受作用层与承压层岩石强度比值的影响; 板状试样的剥落破坏区反映了刀具作用下试样的压塑区, 作用层相同而承压层岩石越软时, 作用层岩石将在垂直于刀具贯入方向上具有更大的破碎范围; 板状试样的声发射事件平面定位点具有聚集分布的特点, 聚集区亦表现出随承压层材料由相对较硬到相对较软而有垂直于刀具加载方向发展的趋势, 表明声发射平面定位结果的聚集分布较好地反映了试样内部的损伤劣化情况。

关 键 词: 隧道掘进机; 声发射; 高速摄像; 软硬互层; 应力分布

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)07-1849-07

Experimental study on penetration failure of soft-hard interbedded rock mass under a wedge indenter

LIU Quan-sheng¹, LIU Qi¹, LIU Xue-wei², SUN Lei¹, ZHANG Xiao-bo¹, JI Jie¹

(1. The Key Laboratory of Safety for Geotechnical and Structural Engineering of Hubei Province, School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: During the tunnel boring machine (TBM) excavation of tunnel engineering, the soft-hard composite strata are widely encountered. Under the action of TBM cutters, the failure characteristics of soft-hard interbedded rock mass are clearly different from those of the homogeneous rock mass. By using the RMT-301 rigidity testing machine, fracture tests were carried out on rock-like specimens with various combinations of soft-hard interbeds. The monitoring data by acoustic emission (AE) and a high-speed camera were recorded as well during the testing process. Furthermore, we discussed the effects of the soft-hard interbed on rock breaking by the TBM cutter along its axial direction. Testing results show that the degree of rock fragmentation by TBM cutters was not only affected by properties of the cutter-acting layer but also strength ratio of the cutter-acting layer to the pressure-bearing layer. The spalling zone found in the plate specimen revealed the compressed plastic zone under the action of cutters. When the cutter-acting layer was the same but with a softer pressure-bearing layer, a greater crushing scope was observed in the cutter-acting layer along the direction perpendicular to the tool penetration. The characteristics of aggregation distribution were found on the plane localization point in the AE events of the plate specimen. In the aggregated area, the cutter-acting also exhibited a tendency to perpendicular to the loading direction of the cutter, when materials of the pressure-bearing layer changed from relatively hard to soft. Thus, it is proved that the distribution of the AE plane location to great extent reflects the damage degradation inside the specimen.

Keywords: tunnel boring machine (TBM); acoustic emission (AE); high-speed photography; soft-hard interbed; stress distribution

1 引 言

全断面隧道掘进机 (TBM) 相较于传统钻爆法具有施工速度快、成洞效果好、安全性高, 以及在

长大隧道中经济性好等显著优势, 因而在我国交通隧洞、水利水电和矿山开采领域得到了越来越广泛的应用^[1]。而施工过程中, 掌子面岩体产状的非连续性特点, 如节理发育、软硬互层等, 是 TBM 掘

收稿日期: 2015-08-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(No. 2015CB058102, No. 2014CB046904)。

This work was supported by the National Key Basic Research Program of China (973 Programs) (2015CB058102 and 2014CB046904).

第一作者简介: 刘泉声, 男, 1962 年生, 博士生导师, 长江学者特聘教授。E-mail: liuqs@whrsm.ac.cn

进效率的重要影响因素^[2]。

围绕这一科学问题,众多学者开展了深入研究。邹飞等^[3-4]采用岩石相似材料进行了板状试样的楔形刀具贯入破坏试验,研究了不同节理倾角、间距条件下试样的荷载-侵深曲线、表面破坏发展过程及破坏形态特征,同时通过数字散斑相关方法和声发射监测,探讨了含水平节理试样在刀具作用下的表面位移场分布规律和微震裂源形成发展、聚集成核机制。Gong等^[5-6]采用离散元软件 UDEC 研究了节理间距及节理与隧道轴向夹角对滚刀破岩机制的影响,结果表明,不同节理条件下岩体的裂纹扩展模式不同。马洪素等^[7]对两种不同强度的混凝土试块进行了压头侵入试验,探讨了节理倾向对滚刀破岩模式、裂纹扩展方向和破岩速率的影响,同时发现,在破岩速率方面,高强度岩石受节理倾向影响明显高于低强度岩石。蒋喆^[8]则考虑了含不同充填特性节理的岩体在不同围压条件下的滚刀贯入破坏特征,发现低围压下,无充填节理试样强度明显低于有充填节理试样,而在高围压下,无充填节理趋向被压缩闭合,两者差距不大。

针对掘岩体的非连续性特点,现有研究大多集中于岩体的节理特性(方向、间距、充填状况等),而实际上,TBM 隧洞极长,往往须穿越多个性质差异较大地层,有关 TBM 穿越岩层间过渡带或“夹芯”地层(如岩脉带或断裂夹层带)时,掘进机刀具破岩效率的分析研究还较为鲜见。

对此,本文采用石膏材料制作了含层理面的不同软硬组合板状试样,开展楔形压头的贯入试验,并结合高速摄像和声发射监测,探讨了不同软硬互层组合形式下试样的变形破坏差异和损伤演化特征,可为 TBM 穿越过渡地层时选择合理的掘进参数提供参考依据。

2 试验概况

2.1 试样制备

鉴于 Nolen-Hoeksema 等的研究工作,板状试样的表面裂纹很好地代表了试样内部的开裂状况,不足之处在于加载过程中更容易崩落^[9]。同时,为了使试样的尺寸效应不受侧向自由边界的影响^[10-11],试验使用类岩石材料石膏在定制的可拆卸钢模中浇筑了尺寸为 190 mm×150 mm×20 mm(长×高×厚)的板状试样,通过控制水灰比获得了 3 种不同力学参数的材料类型,分别记为 H(hard)、M(medium)、S(soft),其物理力学参数见表 1。试样浇筑之前,在模具侧板的中间预留槽中插入已均匀涂抹润滑油的

波纹状铝片,如图 1 所示,波纹角度为 30°,长为 10 mm,以制作人工层理面^[12]。在铝片两侧分别倒入两种不同水灰比的石膏浆,并置于振动台上振捣密实。在石膏初凝前将铝片抽出,利用石膏的热膨胀性使层理面闭合并使两侧石膏粘结成整体。根据层理面上下材料类型不同,将试样按 XY 编号,其中 X 为层理面以上刀具直接作用层的材料类型,Y 为层理面以下承压层的材料类型。

表 1 不同水灰比石膏材料的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of gypsum types with different water-gypsum ratios

材料类型	水灰比 /%	单轴抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	E /GPa	μ	密度 /(g/cm ³)	纵波波速 /(km/s)
H	35	12.25	0.62	3.77	0.31	1.49	1.806
M	50	7.54	0.41	2.05	0.37	1.24	1.494
S	65	5.21	0.20	1.37	0.39	1.06	1.327

终凝硬化后的石膏,以硫酸钙晶体为主要成分,其晶粒为粗壮、均匀的短柱状,孔隙率较小,均质性较好,可用于模拟岩石的力学性质,相比于天然岩石,其离散型更小。同时,石膏浆流动性好,硬化速度快,便于成型,不同水灰比时其力学性质差别较大,故试验中选用石膏作为相似模拟材料,以研究软硬互层型地层产状对 TBM 掘进的影响。



图 1 波纹状铝片

Fig.1 Corrugated aluminum sheet

2.2 试验设备

试验在 RMT-301 电液伺服刚性试验机上进行,如图 2 所示。为模拟楔形刀具贯入过程,采用了自行设计加工的 120°楔形压头和刚性承压台,图 3 为试样加载示意图,其中波纹状层理面以虚线简化表示。

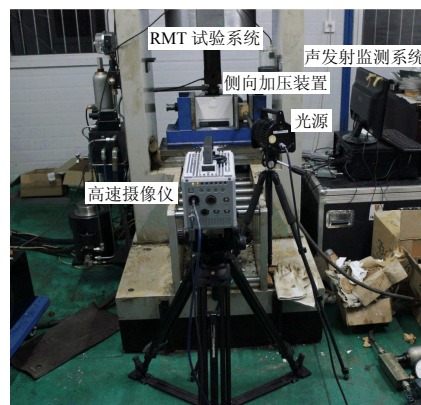


图 2 试验加载及数据采集系统

Fig.2 Loading facility and data acquisition system

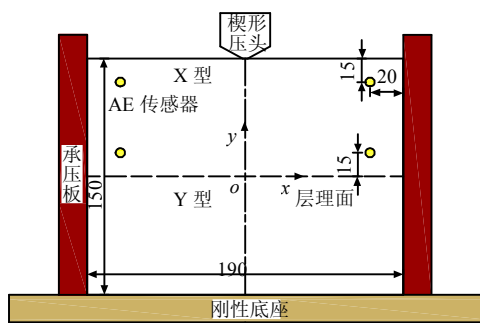


图3 试样加载示意图 (mm)

Fig.3 Schematic of experimental test

试验过程中采用日本 Photron 公司生产的 FASTCAM SA5 型高速摄像仪,记录试样表面破坏、裂隙扩展的瞬态过程。该型相机可实现全帧 1024×1024 像素下 7000 帧/s,分段时最高 100 万帧/s 的高速拍摄。本次试验采用 5000 帧/s 的拍摄速率。

声发射监测采用美国 PAC 公司生产的 PCI-2 型声发射测试分析系统。试验中使用 4 个 Nano30 型声发射探头紧密贴合于试样作用层的四角,构成矩形阵列对损伤微破裂事件进行平面定位,并在试验前做了断铅试验,以保证传感器与试样具有良好的耦合效果。

2.3 试验方案

试验前,将板状试样竖直置于承压台上,保持其中轴线与楔形压头轴线基本重合,正面与高速摄像仪轴线垂直。同时,将一直尺紧贴试样放置,用于破碎区域的尺寸标定,调节镜头焦距使试样成像清晰,此时镜头距试样约 86 cm。声发射探头布置于试样背面。试验中,先控制液压驱动贯入装置进行预加载,待楔形压头接触试样暂停之后,开始以 0.01 mm/s 速率进行正式加载,同时启动声发射监测,对微破裂事件进行平面定位。由于石膏试样质地较软,在侧压作用下表现出明显的延性特征,不能很好地反映刀具贯入作用下试样的变形破坏过程,故本次试验均无侧压条件下进行。

3 试验结果及分析

3.1 荷载-侵深曲线特征

刀具侵入岩石是机械方法破碎岩石的一个基本过程^[13]。以作用层为 M 型材料的试样为例,图 4 为不同软硬互层组合型试样在楔形刀具贯入作用下的荷载-侵深曲线 ($F-P$ 曲线)。由图可见,试验所得 $F-P$ 曲线中荷载并非从 0 点开始,而是加载初始便有了一定的数值。这是由于试验机进行自动预加载时是在力传感器检测到试样对刀具产生了一定的抗力后才停止,因此,当正式加载开始时,刀具下

已经存在了微小的贯入深度,在 $F-P$ 曲线上则表现为加载初始即有一定的荷载。

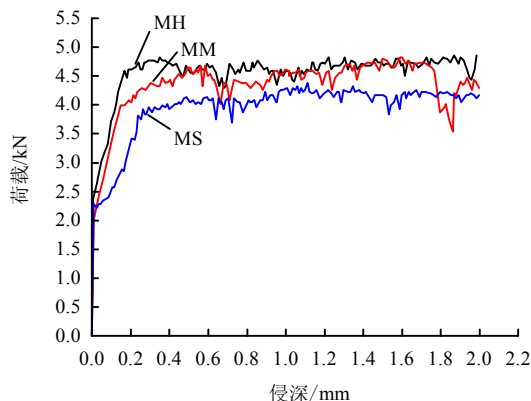


图4 MH-MS 试样的荷载-侵深曲线

Fig.4 Force-penetration curves of specimens (MH, MM and MS)

加载初期,荷载随侵深按一定比例增加。不同于脆性岩石,石膏材料所模拟的塑性岩石没有明显的跃进点,而是在一定贯入度后开始进入塑性侵入阶段。图 5 为典型塑性岩石的荷载-侵深曲线,定义其弹性侵入阶段的直线斜率为塑性侵入硬度 K ^[13],进入平稳塑性阶段后的荷载值为塑性侵入强度 F_{\max} 。分别计算不同软硬互层组合试样的 K 、 F_{\max} 值,结果如表 2。

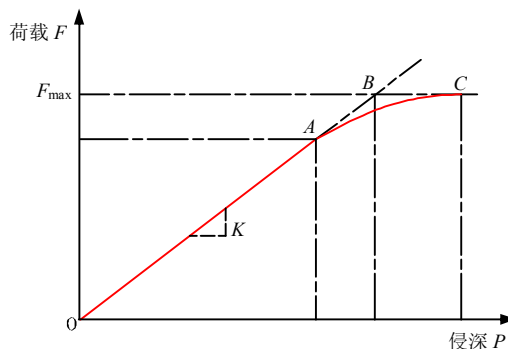


图5 塑性岩石的荷载-侵深曲线

Fig.5 Force-penetration curve of the plastic rock specimen

表2 K 及 F_{\max} 值的统计结果

作用层	承压层	$K/(kN/mm)$	F_{\max}/kN
H	H	15.86	4.88
	M	11.08	4.44
	S	13.48	4.47
M	H	14.57	4.77
	M	13.66	4.38
	S	8.43	4.02
S	H	10.45	4.47
	M	8.37	4.26
	S	9.52	4.05

比较可知,当刀具下方作用层材料相同时,若

承压层材料相对越硬,即水灰比越小,则 K 、 F_{\max} 也有增大的趋势。这说明刀具破岩的难易程度不仅与刀具直接作用下岩石的性质有关,还与直接作用层与承压层岩石的相对软硬程度有关。进一步分析见 3.2 节。

3.2 试样变形破坏特征和应力场分析

3.2.1 试样变形破坏特征

图 6 为不同软硬互层组合试样的破坏裂纹扩展素描图。其中,环向裂纹的扩展贯通使试样在刀具作用下方产生了局部剥落掉块,即发生剥落破坏。试样的破坏类型可分为两种:一是仅有剥落破坏;二是剥落破坏同时伴有纵向贯通裂纹产生,这是由试样本身具有的离散性造成的。图中采用 HX、MX、SX 分别示意刀具作用层材料类型为 H、M、S 而承压层不同的系列试样,以研究承压层对贯入破坏特征的影响。同理,图 7 中以 XH、XM、XS 分别示意承压层材料为 H、M、S 而作用层不同的系列试样,用以研究作用层的影响。

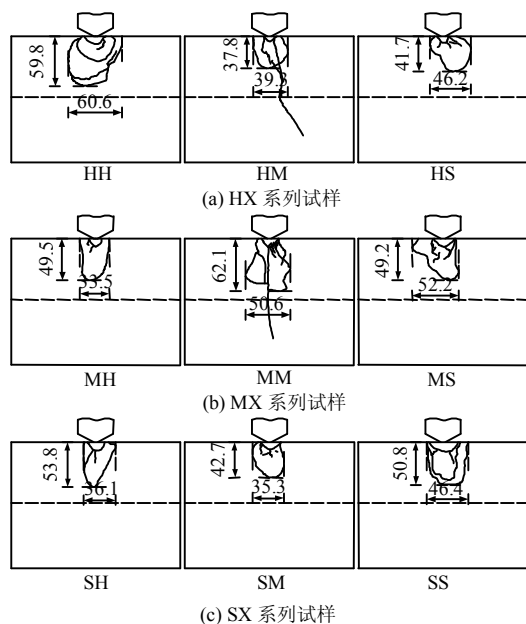


图 6 各试样破坏裂纹扩展素描图 (单位: mm)

Fig.6 Crack sketches of damaged specimens(unit: mm)

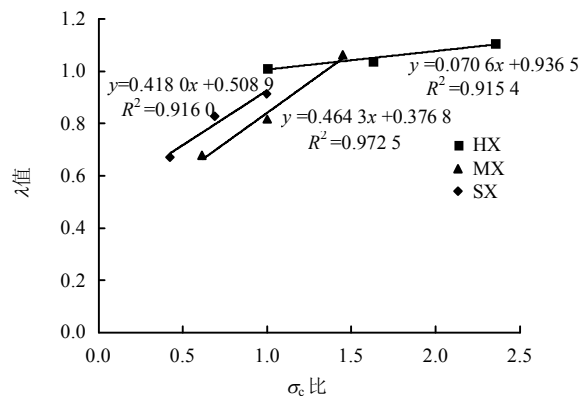
比较各试样剥落区域特征,分别量测其横向宽度 d 和纵向长度 h ,计算其宽纵比值 $\lambda (=d/h)$ 以及层理面上、下材料单轴抗压强度 σ_c 之比,结果见表 3,并做出相应散点图见图 7。

由图 7 可知,当刀具作用层材料类型相同时,随着承压层材料由硬变软,即层理面上、下 σ_c 比值逐渐增大时, λ 值也逐渐增大,说明当承压层或下垫面岩石相对刀具作用层越软时,作用层岩石的破碎范围将有垂直于贯入轴线方向发展的趋势。而承压层材料类型相同时,随着作用层材料由软变硬

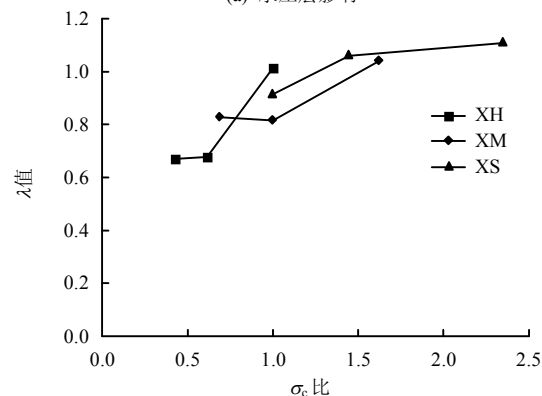
(σ_c 比值增大), λ 值亦逐渐增大,这说明在相同下垫层条件下,刀具作用在相对更硬岩层中具有更大的横向破碎范围。

表 3 各试样剥落区域特征值
Table 3 Characteristic values of the spalling zones of different specimens

试样编号	宽 d /mm	纵 h /mm	$\lambda/(d/h)$	σ_c 比
HH	60.6	59.8	1.01	1.0
HM	39.3	37.8	1.04	1.6
HS	46.2	41.7	1.11	2.4
MH	33.5	49.5	0.68	0.6
MM	50.6	62.1	0.81	1.0
MS	52.2	49.2	1.06	1.4
SH	36.1	53.8	0.67	0.4
SM	35.3	42.7	0.83	0.7
SS	46.4	50.8	0.91	1.0



(a) 承压层影响



(b) 作用层影响

图 7 σ_c 比与 λ 值关系

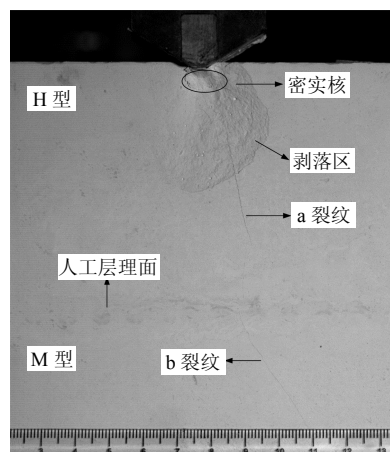
Fig.7 Relationships between σ_c ratio and λ

由于 TBM 破岩是靠相邻滚刀间侧向裂纹的扩展、贯通而形成大的岩片剥落,从而达到破岩掘进的目的^[14],因此,当掌子面由相对较硬或较为完整岩层逐渐过渡到相对较软或较为破碎岩层时,由于承压层变软而在刀具作用层岩石中产生的了应力扩散现象,刀具作用下岩层将具有更广的破碎范围,掘进机破岩效率更高。反之,刀具作用层岩石中将产生应力集中现象,岩层的破碎范围反而不如在相对均质岩层中。

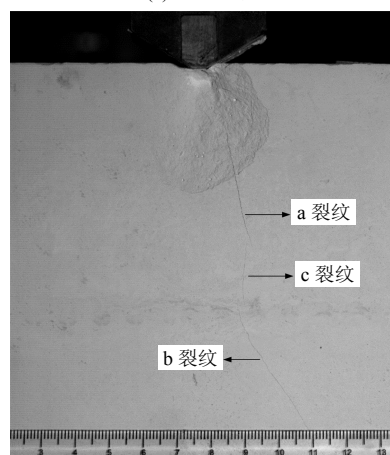
然而，当 TBM 穿越岩层过渡带，岩层软硬、强度的变化将不可避免地会对破岩机械造成冲击，由此带来的刀盘振动加剧和刀具磨损增加对破岩效率的影响还有待进一步研究。

3.2.2 板状试样变形破坏过程及应力场分析

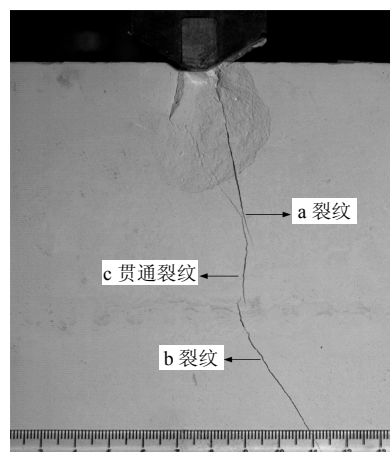
以 HM 试样为例，图 8 为高速摄影仪捕捉到的部分裂纹形成、扩展、贯通直至试样产生最终破坏的过程。



(a) 第 165 帧



(b) 第 3 240 帧



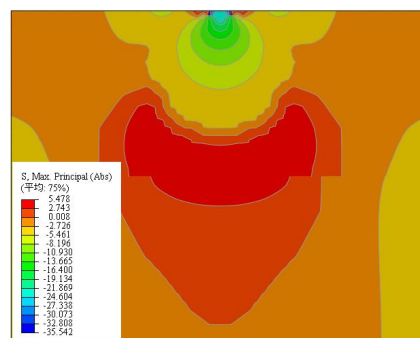
(c) 最终贯通破坏

图 8 HM 试样裂纹扩展过程

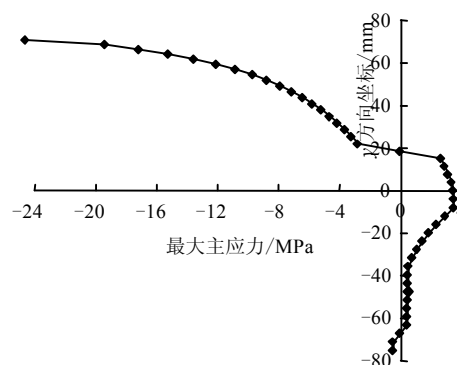
Fig.8 Crack propagation process of specimen HM

楔形压头侵入试样，首先在压头正下方形成一球状密实核，这是材料在承受巨大压力作用时发生局部粉碎或显著塑性变形形成的^[13]。试验中，随着压头逐步侵入，在密实核外围逐渐产生环向裂纹并扩展、贯通，形成剥落掉块。侵入深度的逐渐增加，使得环向裂纹开始向外发展，剥落范围也逐步扩张。同时，由于密实核具有高压流动性质，将荷载均匀地传给周围区域，会在周围区域切向方向上产生拉应力，导致径向裂纹的出现。

裂纹起裂的位置、方向与破坏前材料内的应力场分布息息相关^[15]。采用有限元软件 ABAQUS 对 HM 试样的刀具贯入过程进行弹性分析，图 9 分别为试样最大主应力分布云图和最大主应力在试样竖向轴线上的分布情况，其中负值表示压应力，正值表示拉应力。由图可知，刀具下方将产生逐层分布的压应力区，压应力由内向外以一定的应力梯度逐渐减小。对于板状试样，材料在压应力作用下由于泊松效应，必将在前、后两临空面方向产生拉伸应变。当拉伸应变达到某极限值时将导致材料的拉伸破坏，表现为试样表面剥落掉块。因此，板状试样的剥落破坏区很好地反映了压头作用下材料的压塑区。



(a) HM 试样的最大主应力云图



(b) HM 试样中轴线上的最大主应力

图 9 HM 试样最大主应力分布

Fig.9 The maximum principal stress distribution of specimen HM

由于层理面的存在, 上下不同材料的两层其应力场并不连续, 同时在试样贯入轴线与层理面的交汇处附近产生了明显的拉应力集中区, 这也解释了图 8 中从层理面起裂的 b 张拉裂纹与从密实核附近起裂的 a 裂纹几乎同时产生, 而后在两者之间才出现 c 裂纹形成贯通现象。

3.3 声发射监测平面定位结果

声发射是材料内部单元损伤破坏时, 局部应力应变能以弹性波形式快速释放的一种物理现象。将多个传感器布置形成一定的空间阵列, 由于弹性波被各传感器接收存在到时差, 通过反演计算便可确定声源位置^[16]。以 SX 系列试样为例, 其声发射事件平面定位结果如图 10 所示, 图中已将层理面以

下事件定位点舍去。

可以发现, 楔形压头下声发射平面定位点存在明显的聚集分布特点。聚集区 a 对应于压头下方的压应力集中区, 声发射主要由材料单元受压破坏产生。而小范围聚集区 b 则对应着层理面附近的拉应力集中区, 声发射是由于拉应力超过材料单元的抗拉强度所致。同时, 随着层理面以下材料由硬变软, 声发射聚集区有垂直于压头加载方向发展的趋势, 这与压头下剥落区范围随承压层材料相对变软而表现出宽纵比增大的现象相一致。这表明声发射事件定位结果的聚集分布较好地反映了试样内部的损伤劣化情况。

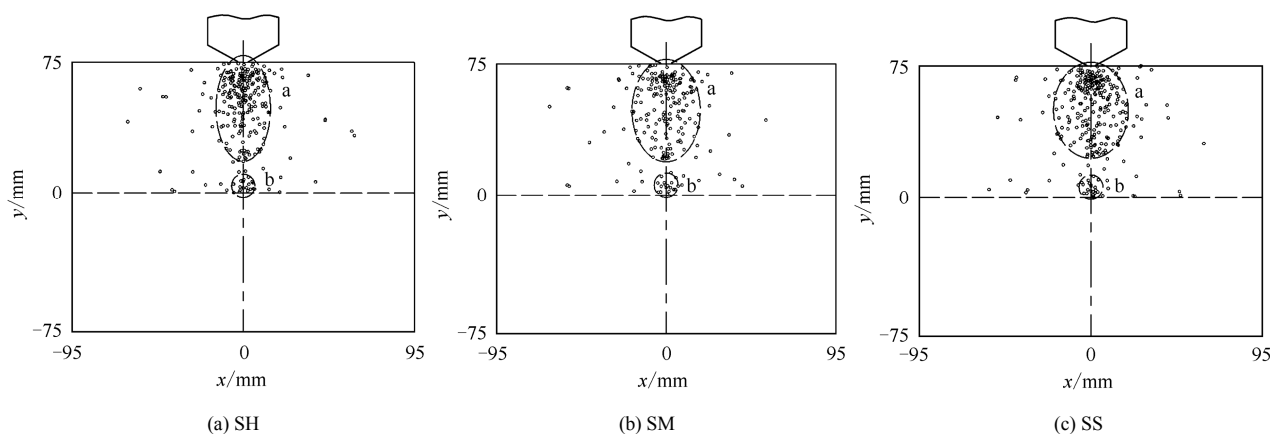


图 10 声发射事件平面定位结果
Fig.10 AE plane locations of different specimens

4 结 论

(1) 对于开挖轴线上呈软硬互层分布的岩体, 刀具破岩的难易程度不仅与刀具直接作用下岩石的性质有关, 同时还受作用层与承压层岩石的相对软硬程度影响。相同作用层时, 承压层相对越硬, 则需要相对更大的贯入力破岩。

(2) 板状试样贯入破坏试验中, 剥落破坏区反映了压头作用下试样的压塑区。对于同种作用层岩石, 当承压层逐渐由硬变软时, 刀具作用层岩石将在垂直于贯入轴线方向上有着更大的破碎范围。这是由于下垫层由相对较硬变为相对较软时, 刀具作用层岩石中将由具有的应力集中效应向应力扩散效应转变。

(3) 楔形压头下声发射事件定位点具有聚集分布的特点, 聚集区亦表现出随承压层材料由相对较硬到相对较软而有垂直于加载轴线方向发展的趋势, 表明声发射平面定位结果的聚集分布较好地反

映了试样内部的损伤劣化情况。

参 考 文 献

- [1] 龚秋明. 掘进机隧道掘进概论[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
Gong Qiu-ming. TBM tunnelling: An overview[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [2] BARTON N. TBM tunnelling in jointed and faulted rock[M]. Rotterdam: Balkema, 2000.
- [3] 邹飞, 李海波, 周青春, 等. 楔刀作用下含水水平节理岩体的位移场特征及损伤演化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 982—990.
ZOU Fei, LI Hai-bo, ZHOU Qing-chun, et al. Variation of displacement field and damage evolution of rock with horizontal joint under wedge indenter[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 982—990.

- [4] 邹飞, 李海波, 周青春, 等. 岩石节理倾角和间距对隧道掘进机破岩特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1640—1646.
ZOU Fei, LI Hai-bo, ZHOU Qing-chun, et al. Experimental study of influence of joint space and joint angle on rock fragmentation by TBM disc cutter[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(6): 1640—1646.
- [5] GONG Q M, JIAO Y Y, ZHAO J. Numerical modelling of the effects of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2006, 21(1): 46—55.
- [6] GONG Q M, ZHAO J, JIAO Y Y. Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2005, 20(2): 183—191.
- [7] 马洪素, 纪洪广. 节理倾向对 TBM 滚刀破岩模式及掘进速率影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 155—163.
MA Hong-su, JI Hong-guang. Experimental study of the effect of joint orientation on fragmentation modes and penetration rate under TBM disc cutters[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(1): 155—163.
- [8] 蒋喆. TBM 盘形滚刀破岩机理的试验与模拟研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
JIANG Zhe. Experimental and numerical study on rock cutting mechanism of TBM cutters[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [9] 朱珍德, 张勇, 陈卫忠. 应用数字图像分析法评价红砂岩渐进损伤破坏特性[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 203—208.
ZHU Zhen-de, ZHANG Yong, CHEN Wei-zhong. Analysis of gradual damage breakage properties of red sandstone with digital image technique[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(2): 203—208.
- [10] 陈立宪, 黄国忠, 陈尧中. 岩体贯切破坏在不同侧向自由边界的声发射演化[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2411—2420.
CHEN Li-hsien, HUANG Kuo-chung, CHEN Yao-chung. Acoustic emission evolution in indentation fracture of rocks under different lateral stress-free boundaries[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(12): 2411—2420.
- [11] CHEN L H, LABUZ J F. Indentation of rock by wedge-shaped tools[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2006, 43(7): 1023—1033.
- [12] 李海波, 刘博, 冯海鹏, 等. 模拟岩石节理试样剪切变形特征和破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1741—1746.
LI Hai-bo, LIU Bo, FENG Hai-peng, et al. Study of deformability behaviour and failure mechanism by simulating rock joints sample under different loading conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(7): 1741—1746.
- [13] 徐小荷, 余静. 岩石破碎学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
XU Xiao-he, YU Jing. Theory of rock fragmentation[M]. Beijing: Coal Industry Press, 1984.
- [14] 莫振泽, 李海波, 周青春, 等. 楔刀作用下岩石微观劣化的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1333—1340.
MO Zhen-ze, LI Hai-bo, ZHOU Qing-chun, et al. Experimental study of rock microscopic deterioration under wedge cutter[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(5): 1333—1340.
- [15] HUANG H, DAMJANAC B, DETOURNAY E. Normal wedge indentation in rocks with lateral confinement[J]. **Rock Mechanics & Rock Engineering**, 1998, 31(2): 81—94.
- [16] 赵兴东, 唐春安, 李元辉, 等. 花岗岩破裂全过程的声发射特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 3673—3678.
ZHAO Xing-dong, TANG Chun-an, LI Yuan-hui, et al. Study on AE activity characteristics under uniaxial compression loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp.2): 3673—3678.