

DOI : 10.16285/j.rsm.2015.S2.018

界面倾角对复合层状物理模型材料 力学特性的影响研究

王兵武¹, 李银平¹, 杨春和¹, 刘 伟¹, 张桂民²

(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. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 针对我国层状盐岩的地质赋存特征, 开展了层状模型材料的三轴压缩试验, 探讨了界面倾角对层状交互模型材料试样的应力-应变曲线、压缩强度、弹性模量、峰后应力跌幅和破坏形态的影响, 并对不同界面倾角试样的破坏形态进行了理论分析。分析结果表明, (1) 三轴峰值强度随界面倾角的增大呈先减小后增大的变化趋势, 60° 时取得最小值, 90° 时取得最大值; (2) 弹性模量随界面倾角的增大而增大, 刚开始随角度增大而增大的趋势很平缓, 倾角接近 90° 时增大趋势明显, 0° 时取得最小值, 90° 时取得最大值; (3) 随界面倾角增大, 峰后应力跌幅先减小后增大, 30° 最小, 90° 最大; (4) 破坏形态随界面倾角增大依次呈现出共轭剪切(0°)、沿弱面的剪切破坏(30°和 60°)和剪切-局部劈裂破坏形态(90°)三种破坏模式; (5) 储库腔顶和腔底部位强度较高, 但脆性很强, 须采取一定措施控制这些部位的变形和位移, 腔体 30°和 60°的腰部部位及附近强度较低, 塑性变形能力较强, 须对储库形状和运营压力进行精细设计。针对试验结果进行的理论分析, 可为进一步分析层状盐岩地层中储库的围岩稳定性和局部破损特性提供一定参考。

关 键 词: 层状盐岩; 模型材料; 界面倾角; 力学特性; 三轴压缩试验

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 - (2015) 增 2 - 0139 - 09

Influences of interface inclination on mechanical properties of composite bedded physical model material

WANG Bing-wu¹, LI Yin-ping¹, YANG Chun-he¹, LIU Wei¹, ZHANG Gui-min²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: Considering the geological formation characteristics of bedded salt rock in China, triaxial compression tests were carried out on samples of bedded model material. The influences of interface inclination on stress-strain curves, compressive strength, elastic modulus, stress decreases after the peak stresses and damage modes of samples of bedded model material are discussed; and theoretical analyses are carried out on the damage modes of samples with varying inclinations. Testing results and theoretical analyses show that: (1) The triaxial compressive strength increases firstly and decreases afterwards as the interface inclination increase; and it reaches the minimum and the maximum when the interface inclination is 60° and 90°, respectively. (2) Its elastic modulus increases as the inclination increase with the increasing trend slow at the start of inclination increasing, and then fast when the inclination gets near 90°. (3) The Stress decreases after peak stresses lessen firstly and increase afterwards as the interface inclination increase; and it reaches its minimum and maximum when the inclination is 30° and 90°, respectively. (4) As the interface inclination increase, damage modes show the law of damage from conjugate shear damage(the interface inclination is 0°), shear failure along the poor-strength surface(the interface inclinations are 30° and 60°) to shear and local splitting failure(the inclination is 90°). (5) The top and bottom of the storage are of high-strength but high brittleness; and measures should be taken to control their displacement and deformation; and the waist and adjacent places of the storage(30° and 60° of the storage) are of low strength and high plasticity; and careful design should be adopted for its shape and running pressure. Theoretical analyses are carried out on the results of the triaxial

收稿日期: 2014-01-28

基金项目: 国家自然科学基金(No.51274187); 国家自然科学基金青年基金(No.51104108)。

第一作者简介: 王兵武, 男, 1988 年生, 硕士研究生, 主要从软岩力学特性和盐腔沉渣破碎特性及其长期固结机理研究。E-mail: wbwle@126.com

compression experiments, so as to offer a certain reference to further analyses of storage stability in bedded salt rock areas.

Keywords: bedded salt rock; model material; interface inclination; mechanical properties; triaxial compression tests

1 引言

盐岩具有渗透性差、损伤自修复、可水溶开采等优良特性,被国内外公认为是石油、天然气储存或放射性废弃物和工业废物等处置的理想介质。相对国外,我国盐岩主要为层状分布,且盐层薄、夹层多、不溶物含量高,且我国地下能源建设方面起步较晚、尚无成熟可鉴的经验和完善的理论体系,在建设能源储备库或放射性废弃物处置库时面临更加复杂的地质特性和造腔困难^[1-3]。针对层状盐岩力学特性开展试验和理论研究,对于在层状盐岩中储库建造具有重要的理论和工程价值。

对于层状盐岩地层中运营的储库,其腔体内壁所受石油或天然气的作用力为法向面力,临近腔壁互层岩体的原始应力状态已发生变化,使得产生的最大主应力平行于腔壁,而最小主应力垂直于腔壁,随着腔壁位置的变化,岩层相对于主应力的倾角也发生变化,可等效为地层倾角变化($0^\circ \sim 90^\circ$)对互层盐岩体力学特性的影响^[4],围岩的应力状态如图1所示。而利用现场取心加工的试样具有可选范围小、层数少、倾角不可调等局限性,故采用均匀性好、重复性强的人工预制试样进行试验研究。在人工试样制备过程中,采用一种交互层状岩体模型材料来模拟层状盐岩体,已开展的单轴压缩试验^[5]证明了其能够较理想地反映层状盐岩的力学特性。

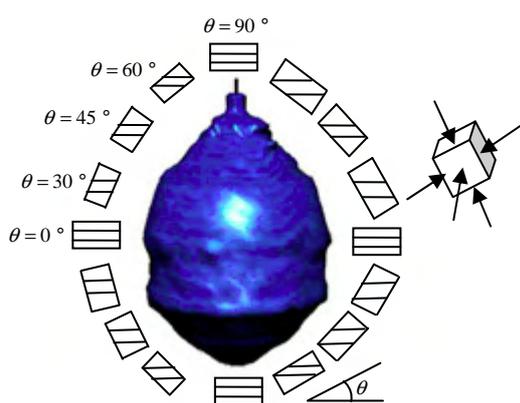


图1 腔壁围岩应力示意图^[4]
Fig.1 Sketch of stress state of surrounding rock on storage wall^[4]

针对层状岩体,国内外已开展了一系列试验与理论研究。Talierecio 等^[6]对层状岩石的破坏机制和强度准则进行了试验和理论研究。李银平等^[7]、梁卫国等^[8]对层状盐岩体的变形和破坏特性进行了试

验研究,并指出软弱夹层对层状岩体强度的决定作用。鲜学福等^[9]研究了由灰岩、砂岩和泥岩构成的层状复合岩体的微观结构,导出了含多层复合岩体的三维非线性损伤本构方程、损伤演化方程及破坏失稳准则。Tien 等^[10-12]通过互层类岩石材料模型试验,研究了横观各向同性体倾角对岩石整体强度和弹性模量的影响。张桂民等^[5]通过互层岩石材料的模型试验,研究了互层岩石材料模型试验单轴压缩强度和变形性质。

以往的研究主要针对介于结构性和材料问题之间的力学问题对一些层状岩石展开了试验研究,较少涉及互层层状模型材料的常规三轴压缩试验研究。本文结合软硬互层层状模型材料的单轴压缩试验,开展了一系列的常规三轴压缩试验,探讨了界面倾角对软硬互层模型材料强度和变形特性的影响,并讨论了层状盐岩地层中储库容易变形破坏的位置,为储库的建设和运行提供了参考。

2 试验概况

2.1 试验设备

本试验采用中国科学院武汉岩土力学研究所自主研发的 RMT - 150 C 电液伺服刚性试验机,可以进行岩石或混凝土材料的单轴、三轴、间接拉伸和剪切试验,并可跟踪记录荷载、应力和应变。该试验系统轴向最大输出荷载为 1000 kN,加载速率为 0.01 ~ 100 kN/s,变形速率为 0.000 1 ~ 1 mm/s。

2.2 试验方案

选取水泥、重晶石粉和石英砂^[5]作为模型材料,通过调节其配比制作模型材料,使模型材料的强度与变形参数分别与盐岩和夹层的参数接近,用以分别模拟盐岩和夹层。刘江^[13]开展的试验结果表明,纯盐岩的抗剪强度参数 $c = 6.2$ MPa,内摩擦角 $\varphi = 38^\circ$;泥岩夹层的抗剪强度参数 $c = 7.7$ MPa,内摩擦角 $\varphi = 38.9^\circ$ 。按质量比水泥:石英砂:水为 0.75:0.25:0.33 的配比,模拟泥岩(分层呈黑色),制成试样经标准条件养护后,其单轴抗压强度约为 7.45 MPa,弹性模量约为 2.25 GPa^[5]。按质量比水泥:重晶石粉:水为 0.75:0.25:0.347 的配比来模拟盐岩(分层呈白色),制成试样经标准条件养护后,其单轴抗压强度约为 5.74 MPa,弹性模量约为 1.0 GPa^[5]。取加水后的泥岩模型材料铺设在模具中一定厚度,压制密实后再铺设相同厚度的盐岩模型材料,压制密实;如此重复加模拟材料并压实,从

而制成互层状模型材料块体，然后对材料块体变角度取心，制成不同界面倾角的层厚约 12 mm 的交互层状试样。

本文选取界面倾角分别为 0°，30°，60° 和 90° 四种倾角的试样，如图 2 所示。试样按倾角变化分为 4 组，每组 3 个，其材料配比见表 1。

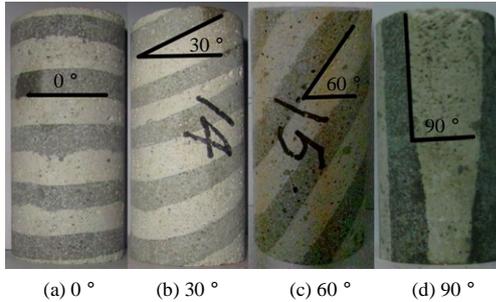


图 2 不同倾角典型试样

Fig.2 Typical samples at different inclinations

表 1 不同倾角试样参数

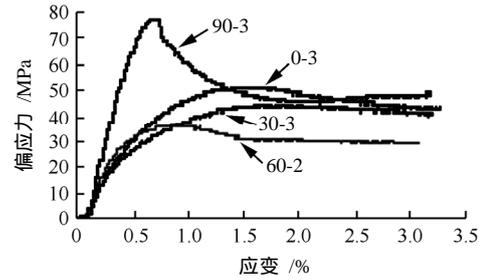
Table 1 Parameters of samples at different inclinations

倾角 / (°)	试样编号	围压 6 MPa		围压 10 MPa	
		直径 /mm	高度 /mm	直径 /mm	高度 /mm
0	0-1	49.66	99.86	49.86	100.22
	0-2	49.38	99.32	50.20	99.92
	0-3	49.24	100.12	50.16	100.16
30	30-1	49.76	99.46	49.64	99.68
	30-2	50.14	100.26	49.78	99.76
	30-3	49.64	99.58	49.42	99.58
60	60-1	49.54	99.80	50.12	100.28
	60-2	50.42	99.68	49.56	99.74
	60-3	50.18	99.94	49.64	99.90
90	90-1	49.86	100.06	49.74	99.52
	90-2	49.92	99.60	50.28	99.66
	90-3	49.60	99.74	49.92	100.26

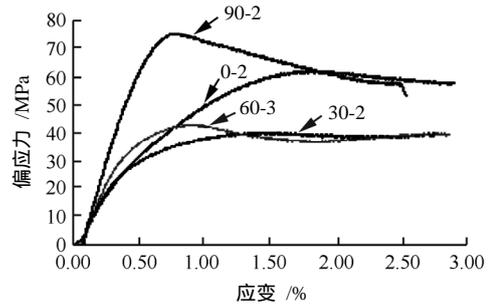
3 试验结果及分析

3.1 典型的偏应力-应变曲线

本次三轴试验采用围压为 6 MPa 和 10 MPa，其依据为储气库气体运行的压力下限和上限。通过试验获得了试样在不同角度、两种围压下的偏应力-应变曲线如图 3 所示，峰值强度与弹性模量结果见表 2。从图 3 中可以看出，不同界面倾角试样的偏应力-应变关系呈现明显不同的特征。整体趋势上，偏应力-应变曲线均表现出压密阶段、线弹性阶段、弹塑性发展阶段和峰后应变软化四个阶段^[14]。在线弹性发展阶段，倾角为 90° 的试样的偏应力-应变曲线弹性模量最高，而 60° 和 30° 倾角的试样相对 90° 夹角试样较低，而 0° 试样弹性模量相对最低。



(a) 围压 6 MPa



(b) 围压 10 MPa

图 3 不同倾角试样的偏应力-应变曲线

Fig.3 Partial stress-strain curves of samples at different inclinations

表 2 三轴压缩试验结果

Table 2 Results of triaxial compression test

倾角 / (°)	试样编号	围压 6 MPa		围压 10 MPa	
		峰值 /MPa	弹性模量 /GPa	峰值 /MPa	弹性模量 /GPa
0	0-1	55.70	7.10	76.34	7.92
	0-2	60.43	6.63	70.76	7.58
	0-3	56.52	8.29	67.61	9.13
30	30-1	52.16	7.91	53.32	8.56
	30-2	46.34	7.13	55.18	9.93
	30-3	48.86	7.37	61.17	7.88
60	60-1	40.19	10.12	47.19	10.37
	60-2	41.49	9.96	59.23	11.53
	60-3	44.62	7.88	51.68	9.63
90	90-1	81.92	14.96	89.31	17.32
	90-2	87.45	16.31	84.68	16.83
	90-3	79.15	14.45	81.76	14.42

当偏应力-应变曲线达到峰值强度后，偏应力-应变曲线均出现了不同程度的下降，呈现出一定程度的应变软化特征。界面倾角为 90° 试样的应变软化特征最为明显，达到峰值强度后应力较快速地下降，而其余倾角试样则表现出较为平缓的应变软化趋势。主要原因是倾角为 90° 试样软硬材料相间，强度较大的硬层在受载中为主要承载部分，当材料发生破坏时，首先是硬性层开始破坏，导致试样结

构受损,使应力迅速下降。其他倾角试样应变软化特征相对于 90° 试样并不明显。

围压为 6、10 MPa 时各试样偏应力-应变曲线均以相似的趋势发展,但围压越高,峰值强度都有一定的提高,说明围压对强度的影响较为显著。此外,围压越高,峰后软化的程度也越微弱,表现为峰后软化斜率变小,峰后应力下降平缓。

3.2 峰值强度与界面倾角关系

常规三轴压缩时不同界面倾角试样表现出不同的峰值强度。从图 3 偏应力-应变曲线及表 2 可以看出,界面倾角为 0° 试样在围压 6 MPa 时峰值强度达 57.55 MPa,围压 10 MPa 时达 71.57 MPa;倾角为 30° 试样在围压 6 MPa 时峰值强度 49.12 MPa,围压 10 MPa 时达 54.37 MPa;倾角为 60° 试样在围压 6 MPa 时峰值强度 42.1 MPa,围压 10 MPa 时达 52.7 MPa;倾角为 90° 试样在围压 6 MPa 时峰值强度达 82.84 MPa,围压 10 MPa 时达 85.25 MPa。整体而言,界面倾角为 90° 试样峰值强度最高, 60° 试样峰值强度最低。倾角为 90° 试样为软硬层竖直分布,硬性层充当了试样中的结构骨架,上下端面如同被柱形支撑支持着,荷载承受能力较强;倾角为 60° 试样由于软硬层间界面倾斜,易发生弱面斜向剪切破坏,强度最低;倾角为 30° 试样也表现出较低的峰值应力,但比 60° 试样略高;倾角为 0° 试样则表现出仅次于 90° 试样的较高峰值强度,但比 30° 、 60° 试样要高,由于 0° 试样界面水平,层面上受力相对均匀,轴向受压后易发生共轭剪切。峰值强度与界面倾角的关系如图 4 所示。

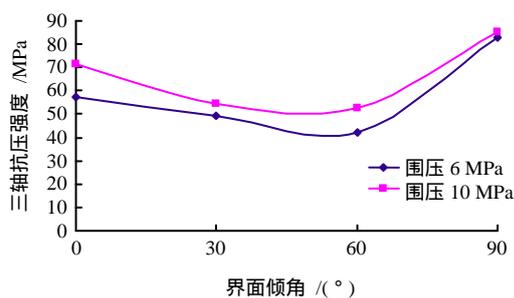


图 4 峰值强度与界面倾角关系

Fig.4 Curves of peak strength vs. interface inclination at different inclinations

从图 4 中可知,不同倾角试样峰值强度与倾角近似呈 U 型关系,倾角为 60° 时峰值强度最低。

3.3 弹性模量与界面倾角关系

弹性模量是应力-应变曲线中直线段应力与应变之比,即直线段斜率^[15]。三轴压缩条件下,由于围压的存在,材料内部微裂隙与孔隙在一定程度上

比单轴试验中更为压密,而使其具有更大的刚度,进而使弹性模量也更大。

单轴压缩下不同倾角试样弹性模量不同,根据张桂民、李银平等^[5]开展的试验研究, 0° 试样弹性模量为 6.91 GPa, 30° 试样弹性模量为 5.84 GPa, 60° 试样弹性模量为 11.64 GPa, 90° 试样弹性模量为 10.94 GPa。

三轴压缩时,不同界面倾角试样的弹性模量也明显不同,见表 2。 0° 试样在围压 6 MPa 时,弹性模量为 7.34 GPa;围压 10 MPa 时,弹性模量为 8.21 GPa,相同条件下均为最小值。倾角为 90° 试样在围压 6 MPa 时,弹性模量为 15.24 GPa;围压 10 MPa 时,弹性模量为 16.19 GPa,相同条件下为最大值。弹性模量和界面倾角间的关系如图 5 和表 3 所示。

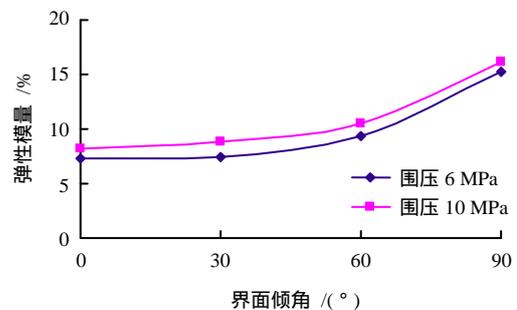


图 5 三轴压缩下弹性模量与界面倾角的关系

Fig.5 Curves of elastic modulus vs. interface inclination of samples at different inclinations under triaxial compression tests

表 3 不同倾角试样弹性模量

Table 3 Elastic modulus of sample at different inclinations

围压 /MPa	不同倾角($^\circ$) 试样弹性模量 /MPa				
	0	30	60	90	
单轴	6.91	5.84	11.64	10.94	
三轴	6	7.34	7.47	9.32	15.24
	10	8.21	8.79	10.51	16.19

总体上,三轴压缩时试样弹性模量随倾角增大而增大,增大趋势开始较平缓,界面倾角接近 90° 时增大趋势很迅速。三轴压缩时,试样的弹性模量比单轴压缩时要大,且围压 10 MPa 时比 6 MPa 时要大。本次试验设置围压有限,未能得出围压变化时弹性模量随界面倾角间的变化关系,后续工作中将继续研究。

3.4 破坏形态与界面倾角关系

围压 6、10 MPa 时,试样破坏形态随界面倾角不同而不同。倾角为 0° 试样呈现出对顶锥共轭剪切破坏; 30° 与 60° 试样呈现沿软层的剪切破坏;

90°呈贯穿软硬层的剪切破坏。0°试样由于软硬层间界面呈水平状,软硬层共同承受轴压作用,轴向压力超过承载极限后,强度较低的软层先发生破裂,当应力达到并超过硬层强度后,硬层也出现破裂,且软硬层受压后形成竖向和斜向发展的张拉裂纹,裂纹伸长发展,当贯穿水平界面互相联通时,便形成共剪剪切破坏;30°、60°试样由于软弱层面呈倾斜状,当轴向压力增大至一定程度时,软层内最先生成微裂纹,而随着压力不断增大,微裂纹逐渐扩展并沿软层贯穿,从而形成沿软层的剪切破坏;90°试样软硬层垂直相间分布,,试样抗压能力较强,当峰值压力增大到强度极限后,微裂纹最先从软层中形成,软层抗压解除,硬层承压,当应力继续增大,软层中裂纹继续扩展,应力超过硬层抗压强度时,硬层也产生裂纹,与软层中的裂纹贯穿形成贯穿软硬层的剪切破坏面,伴有局部劈裂破坏。典型破坏的现象见图6。

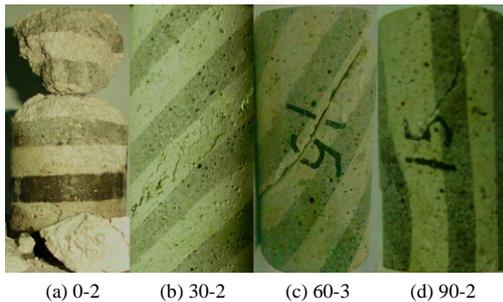


图6 层状模型材料试样典型破坏现象

Fig.6 Typical damages of sample at different inclinations under triaxial compression tests

3.5 应变软化程度与界面倾角关系

围压 6 MPa 和 10 MPa 时不同界面倾角试样的应力-应变曲线均出现了不同程度的较弱的应变软化现象,典型偏应力-应变曲线中应力下降幅度与界面倾角的关系如图7所示。结合图3应力-应变曲线和图7应力下降幅度-界面倾角关系曲线可以看出,不同围压下随界面倾角增大,试样应力-应变曲线中应力下降幅度呈现先减小后增大的趋势,应变软化现象先减弱后增强。倾角为30°试样应力达峰值后,随应变增大,应力呈现先微弱下降,然后近似保持不变的变化趋势,相对其他倾角试样,倾角为30°试样应变软化现象最弱;倾角为90°试样应力达峰值后,出现较明显、较陡的应力跌落,随应变增大,应力较快下降至最小值,然后随应变发展而出现小幅上涨,相对而言,倾角为90°试样应力跌落幅度最大,应变软化现象最强。

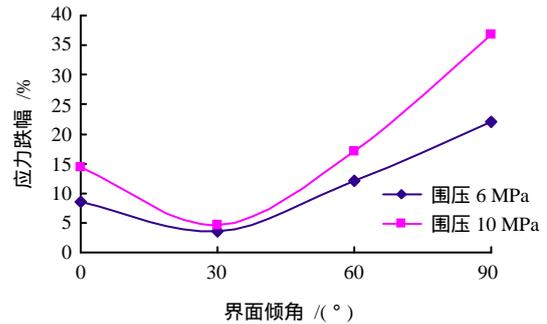


图7 应力下降幅度与界面倾角关系

Fig.7 Curves of samples stress decrease vs. interface inclination at different inclinations

应变软化现象与材料的损伤和裂纹发展有密切关系,也与试样内部结构的微调整、能量的积聚和释放等有密切关系。界面倾角不同,使试样的变形破坏发展和能量积聚释放不同,进而使应变软化特征也不同。倾角为30°试样峰后应力跌幅最小,应力-应变曲线峰后曲线呈缓慢降低趋势,表明试样在破坏后结构上的微调整使其承载力逐渐弱化而非迅速下降,积聚的应变能也得到缓慢的释放。由于30°试样在破坏后应变软化不明显,应力随应变增大缓慢下降,表现出较强的塑性变形能力,而试样在破坏后应力随应变发展下降较少,塑性变形阶段仍表现出较高的承载能力;90°试样则表现出最大的峰后应力跌幅,这与其硬层构成“柱形支撑”有较大的关系。当压力超过硬层承载能力后,试样发生破坏,软层也相应破裂,形成了贯穿软硬层的剪切面和局部的劈裂面,试样承载结构破坏,较明显的应变软化现象说明试样积累的应变能得到较快的释放。90°试样在破坏后,相对其他倾角试样,随应变发展,应力下降速率最快,峰后应力跌幅最大,应变软化特征最显著,表现出最强的脆性,而且试样破坏后,应力随应变发展下降较多,塑性变形阶段承载能力也明显减弱。

4 不同界面倾角下软硬互层模型材料破坏模式与强度曲线的理论分析

针对上述不同倾角软硬互层模型材料近似呈两边高、中间低形态的峰值强度与界面倾角关系曲线,本节从理论角度对三轴压缩下不同倾角试样的破坏模式和强度曲线进行探讨。由于软硬互层材料试样不同于常规岩性均一的层状岩体,且不同倾角试样出现不同的破坏模式,参考相关文献[4, 16 - 18]的研究,本节采用 Jaeger 准则和摩尔-库仑准则进行分析。

针对层状岩体, Jaeger 等^[16-19]曾提出横观各向同性岩体的抗剪强度准则:

$$s = s_1 + s_2 \cos(2(\alpha - \beta)), \quad \left(\beta \in \left[0, \frac{\pi}{2} \right] \right) \quad (1)$$

式中: s 、 s_1 、 s_2 分别为 σ 、 c 或 φ 等强度参数, 本文中取为 σ ; s 为 Jaeger 准则下的最大主应力 σ_1^j 且本文中, s_1 、 s_2 分别取为 σ_1 、 σ_3 ; α 、 β 分别为破坏面和分层界面与最大主应力 σ_1 的夹角, 见图 8 (浅红色为破坏面, 浅蓝色为界面, 最小主应力为水平方向)。从图中可以看出, 倾角为 0° 试样 $\alpha = 45^\circ$, 30° 试样 $\alpha = 32^\circ$, 而 60° 、 90° 试样 $\alpha = 60^\circ$, 则本文中 Jaeger 准则表示为

$$\sigma_1^j = \sigma_1 + \sigma_3 \cos(2(\alpha - \beta)), \quad \left(\beta \in \left[0, \frac{\pi}{2} \right] \right) \quad (2)$$

Jaeger 准则适用于页岩、板岩等层状岩体, 其分层厚度较薄且分层岩性差异较小。试验所用的模拟层状盐岩的为不同倾角的软硬层互层模型材料, 其软层材料与硬层材料具有一定的强度差, 软硬分层之间物质发生突变, 强度准则与 Jaeger 准则不尽相同, 须考虑物质分界面的影响^[4, 19]。

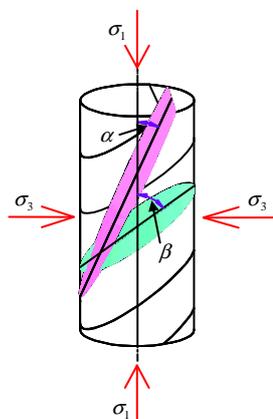


图 8 最大主应力 σ_1 与破坏面、界面夹角 α 、 β 关系
Fig.8 Relation of σ_1 vs. failure plane, α and β

对发生剪切破坏的层状岩体, 设 c_m 和 φ_m 分别为试样材料的黏聚力和内摩擦角, θ 为界面倾角, 则根据摩尔-库仑强度准则及斜截面上应力公式, 可得^[9, 13]

$$\left. \begin{aligned} \tau &= c_m + \sigma \tan \varphi_m \\ \tau &= \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin(2\theta) \\ \sigma &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos(2\theta) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: 界面倾角与 β 关系为

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \beta, \quad \left(\theta \in \left[\varphi_m, \frac{\pi}{2} \right] \right) \quad (4)$$

将式 (3) 中第二式代入第一式, 可得

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{2(c_m + \sigma_3 \tan \varphi_m)}{(1 - \tan \varphi_m \cot \theta) \sin(2\theta)} \quad (5)$$

当 c_m 、 φ_m 为定值时, 对式 (5) 求极值, 当 $\theta_0 = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_m}{2}$ (界面与最小主应力夹角) 时, 式 (5) 取得最小值:

$$\sigma_{1 \min} = \sigma_3 + \frac{2(c_m + \sigma_3 \tan \varphi_m)}{\sqrt{1 + \tan^2 \varphi_m} - \tan \varphi_m} \quad (6)$$

假设层状岩体分别沿软弱层、分界面或硬层发生剪切破坏, 可分别将式 (5) 中的 c_m 、 φ_m 替换成软弱层、分界面和硬层的抗剪强度参数。然后进行计算分析, 从强度准则的角度判断试样破坏的发生, 由于试验条件的限制, 未能开展大量不同围压条件下的三轴压缩试验, 故结合张桂民等^[4]单轴压缩试验结果与本文中围压分别为 6 MPa 和 10 MPa 三轴压缩试验下得出的试验结果。根据直线型摩尔-库仑强度准则^[13]式 (7):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \\ \sigma_1 &= A \sigma_3 + B \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

通过拟合函数曲线得出系数 A 和常数项 B , 再按照式 (7) 可得

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \arcsin \left(\frac{A - 1}{A + 1} \right) \\ c &= \frac{B(1 - \sin \varphi)}{2 \cos \varphi} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

按式 (8) 求取均值得出了软层、硬层和界面抗剪强度参数, 见表 4。式 (7) \ (8) 中, c 、 φ 分别为抗剪强度参数。

表 4 软层、硬层及界面平均抗剪强度参数
Table 4 Average shear strength parameters of soft, hard layers and interlayer

界面	c /MPa	φ /($^\circ$)
软层	6.15	16.70
硬层	9.33*	28.44*
界面	6.86*	26.53*

注: 带*数据为参考文献[10-11, 19]等资料的经验值仅供参考, 需硬层三轴压缩和界面直剪试验获取实际值, 因试样制备、操作等出现问题, 界面和硬层参数测试试验未能顺利开展。

将表 4 中得到的参数分别代入式 (5)，结合式 (2)，利用绘图软件得出了三轴压缩试验下沿软层、界面、硬层发生剪切破坏的强度曲线以及 Jaeger 准则趋势线，剔除不符合物理规律的数据，得出最终的强度趋势线如图 9 所示。因软层、硬层及界面的强度参数可变，图中沿软层、硬层及界面破坏曲线位置可左右变动。

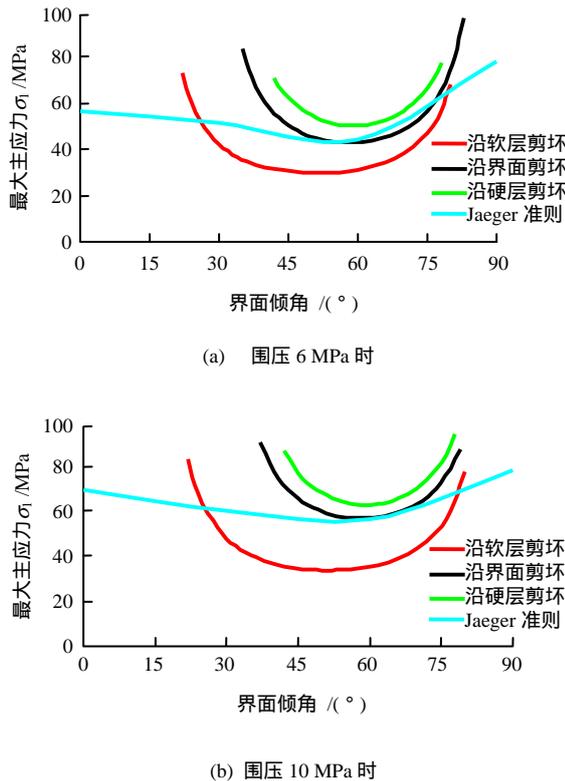


图 9 软硬互层层状岩体强度曲线

Fig.9 Strength curves of soft and hard interbedded rock

图 9 中，Jaeger 准则、沿软层破坏曲线及沿界面破坏曲线出现相交部分，交点左右部分的强度曲线由较小者控制，则当软层强度低于界面强度时，强度由软层强度曲线部分控制，强度曲线取软层强度曲线部分；当 Jaeger 准则对应的强度低于软层强度时，强度由 Jaeger 准则曲线部分控制，强度曲线取 Jaeger 准则曲线部分；沿界面和硬层剪坏的强度曲线位于三者之上，当试样达到 Jaeger 准则或软层强度破坏条件时试样会发生破坏，但破坏强度小于沿界面或硬层发生破坏时的应力值，故舍去界面或硬层强度曲线部分。针对围压分别为 6 MPa 和 10 MPa 的情况，分别取 4 条强度曲线的值最小的下包络线作为三轴压缩试验条件下软硬互层层状模型材料的强度曲线，如图 10 所示。

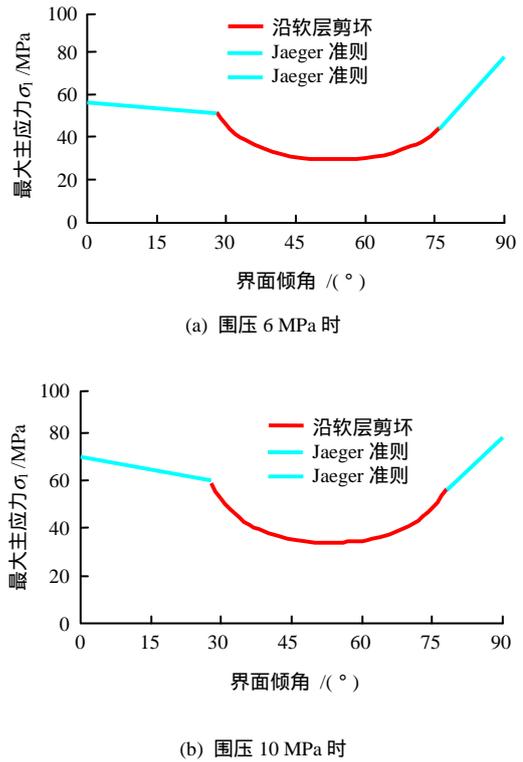


图 10 软硬互层层状模型材料试样强度曲线
Fig.10 Strength curves of samples of soft and hard interbedded modeling material

图 10 中 软硬互层层状模型材料试样强度曲线与图 3 所示峰值强度与倾角规律吻合较好，两边高，中间低，近似呈 U 型。考虑到本文中试样破坏现象，对于两种较低围压下的强度曲线， 0° 试样发生共轭剪切破坏，强度主要由软层和硬层共同控制，可以用 Jaeger 准则描述 ($\theta < 30^\circ$)； 30° 与 60° 试样发生沿软弱层的剪切破坏，主要由软层剪切破坏强度曲线进行描述 ($30^\circ < \theta < 60^\circ$)； 90° 试样发生贯穿软硬层的剪切破坏和局部的劈裂破坏，并没有出现沿分界面的剪切破坏，可以用 Jaeger 准则进行描述 ($60^\circ < \theta < 90^\circ$)。

由于预制的不同倾角试样种类和试验条件的限制，今后将会继续开展大量不同倾角试样在不同围压下的三轴压缩试验，更加深入地探讨不同界面倾角软硬互层模型材料破坏模式与强度曲线之间的关系。

实际造腔工程中层状盐岩物质组成和含量各有差异，力学特性并不均一，也需开展大量的三轴压缩和直剪试验，并结合统计学的方法来准确获取相关的力学参数，进而结合上述理论为层状盐岩强度和变形特性研究、造腔工艺优化设计和储库运营压力设计提供更可靠的技术支持。

5 讨论与工程应用

前文探讨了三轴压缩时层状模型材料界面倾角与力学特性之间的联系, 得出了偏应力-应变曲线、峰值强度、弹性模量、破坏形态及破坏后应变软化程度与界面倾角之间的关系。实际的近似呈水平分布的盐岩地层可看作盐岩与夹层互层的层状岩体, 而在盐穴造腔后, 腔体以外地层的应力状态将进行重新分布, 应力场发生偏转, 当垂直于腔体内壁的应力为最小主应力时, 平行腔体内壁的应力为最大主应力, 此时腔壁应力场基本趋于平稳。腔内壁及其附近地层为三向应力状态, 且腔体内不同部位可近似看作不同界面倾角的地层, 参考以腔体中心为原点, 水平和竖向为轴向的大地坐标 $O-XYZ$ 坐标系, 并以腔体中部为 0° 部位, 腰部位置为 30° 至 60° 部位, 腔体顶部和底部为 90° 部位。出于安全考虑, 针对出现破坏的部位选择最小强度作为最终强度取值, 进而对腔壁强度和变形予以分析。利用上述试验结果, 可以预测腔体 90° 顶部和底部部分的承载力很强, 但是塑性变形能力很弱, 表现出较强的脆性破坏特征。当顶底部所受应力状态超过承载极限后, 岩层发生破损, 其承载能力会随变形的发展而迅速下降, 表现出较强的应变软化特征, 极有可能发生更为严重的破坏, 因此在储库建设和运营期间, 需要结合该部位特点, 采取一定的技术措施以控制该部位的变形和位移, 从而防止该部位破坏的发生。而 30° 和 60° 的腔体腰部岩层的承载力较弱, 而塑性变形能力较强。当腰部所受应力状态超过极限承载能力后, 岩层发生破损, 其承载能力会随变形发展而缓慢降低, 表现出很弱的应变软化特征。由于腰部强度相对很低, 容易出现破损而导致更严重的破坏发生, 因此在储库建设和运营期间, 需要结合该部位的特点对腔体形状设计、运行压力设置进行精细设计。对于 0° 腔体中部部分的盐岩地层, 其峰值强度与变形特性基本介于上述两种情况之间, 也需在腔体形状和运营压力设计时予以一定考虑。

6 结 论

(1) 三轴抗压强度随界面倾角增大呈现出先减小后增大的变化趋势, 且其在 60° 时取得最小值, 而在 90° 时取得最大值。

(2) 弹性模量随界面倾角增大而增大, 开始增大趋势很平缓, 倾角接近 90° 时增大趋势明显, 在 0° 时取得最小值, 90° 时取得最大值。

(3) 峰后应力跌幅随界面倾角增大呈现出先减小后增大的变化趋势, 在 30° 时峰后跌幅最小, 在 90° 时峰后跌幅最大。

(4) 破坏形态随界面倾角增大呈现出共轭剪切 (0°)、沿弱面的剪切破坏 (30° 和 60°) 和剪切-局部劈裂破坏形态 (90°) 的变化规律, 且裂纹最先从软层开始发生。

(5) 储库腔体 90° 顶部和底部部位强度较高, 但脆性很强, 须采取一定措施控制这些部位的变形和位移, 防止破坏发生。腔体 30° 和 60° 的腰部部位及附近强度较低, 塑性变形能力较强, 须在储库建设和运营期间, 对储库形状和运营压力进行精细设计。

参 考 文 献

- [1] 杨春和, 梁卫国, 魏东吼, 等. 中国盐岩能源地下储存可行性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4409 - 4417.
YANG Chun-he, LIANG Wei-guo, WEI Dong-hou, et al. Investigation on possibility of energy storage in salt rock in China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(24): 4409 - 4417.
- [2] 杨春和, 李银平, 屈丹安, 等. 层状盐岩力学特性研究进展[J]. 力学进展, 2008, 38(4): 484 - 494.
YANG Chun-he, LI Yin-ping, QU Dan-an, et al. Advances in researches of the mechanical behaviors of bedded salt rocks[J]. *Advances in Mechanics*, 2008, 38(4): 484 - 494.
- [3] 刘伟, 李银平, 霍永胜, 等. 盐岩地下储库围岩界面变形与破损特性分析[J]. 岩土力学, 2013, 35(6): 1621 - 1628.
LIU Wei, LI Yin-ping, HUO Yong-sheng, et al. Analysis of deformation and fracture characteristics of wall rock interface of underground storage caverns in salt rock formation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(6): 1621 - 1628.
- [4] 张桂民, 李银平, 杨春和, 等. 软硬互层盐岩变形破损物理模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1813 - 1820.
ZHANG Gui-min, LI Yin-ping, YANG Chun-he, et al. Physical simulation of deformation and failure mechanism of soft and hard inter-bedded salt rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(9): 1813 - 1820.
- [5] 张桂民, 李银平, 施锡林, 等. 一种交互层状岩体模型材料制备方法及其初步试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 284 - 289.
ZHANG Gui-min, LI Yin-ping, SHI Xi-lin, et al. Experimental study on damage and breakage of bedded

- composite rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32 (Supp. 2): 284 - 289.
- [6] TALIERCIO A, LANDRIANI G S. A failure condition for layered rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1988, 25(5): 299 - 305.
- [7] 李银平, 刘江, 杨春和. 泥岩夹层对盐岩变形和破坏特征的影响分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2006, 25(12): 2461 - 2466.
LI Yin-ping, LIU Jiang, YANG Chun-he. Influence of mudstone interlayer on deformation and failure characteristics of salt rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(12): 2461 - 2466.
- [8] 徐素国, 梁卫国, 莫江, 等. 软弱泥岩夹层对层状盐岩体的力学特性影响研究[J]. **地下空间与工程学报**, 2009, 5(5): 878 - 883.
XU Su-guo, LIANG Wei-guo, MO Jiang, et al. Influence of weak mud stone intercalated layer on mechanical properties of laminated salt rock[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2009, 5(5): 878 - 883.
- [9] 鲜学福, 谭学术. 层状岩体破坏机理[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1989: 40 - 91.
- [10] TIEN Y M, KUO M C. A failure criterion for transversely isotropic rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38(3): 399 - 412.
- [11] TIEN Y M, KUO M C, JUANG C H. An experimental investigation of the failure mechanism of simulated transversely isotropic rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2006, 43(8): 1163 - 1181.
- [12] TIEN Y M, TSAO P F. Preparation and mechanical properties of artificial transversely isotropic rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2000, 37(6): 1001 - 1012.
- [13] 刘江. 层状盐岩力学特性试验研究及其理论分析[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006.
- [14] 刘佑荣, 唐辉明. 岩体力学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 42 - 65.
- [15] 郭印同, 杨春和. 硬石膏常规三轴压缩下强度和变形特性的试验研究[J]. **岩土力学**, 2010, 31(6): 1776 - 1780.
GUO Yin-tong, YANG Chun-he. Experimental investigation on strength and deformation properties of anhydrite under conventional triaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(6): 1776 - 1780.
- [16] JAEGER J C. Shear failure of anisotropic rocks[J]. **Geological Magazine**, 1960, 97(1): 65 - 72.
- [17] 刘卡丁, 张玉军. 层状岩体剪切破坏面方向的影响因素[J]. **岩石力学与工程学报**, 2002, 21(3): 335 - 339.
LIU Ka-ding, ZHANG Yu-jun. Influence factors on shear failure orientation of layered rocks[J]. **China Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(3): 335 - 339.
- [18] 张玉军, 刘谊平. 层状岩体抗剪强度的方向性及剪切破坏面的确定[J]. **岩土力学**, 2001, 22(3): 254 - 257.
ZHANG Yu-jun, LIU Yi-ping. Anisotropy of shear strength of layered rocks and determination of shear failure plane[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(3): 254 - 257.
- [19] 许金泉. 界面力学[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 10 - 19.

上接第 138 页

- [8] KILBAS A A, SRIVASTAVA H M, TRUJILLO J J. Theory and applications of fractional differential equations[M]. Amsterdam: Elsevier, 2006.
- [9] 袁海平, 曹平, 许万忠, 等. 岩石黏弹塑性本构关系及改进的 Burgers 蠕变模型[J]. **岩土工程学报**, 2006, 28(6): 796 - 799.
YUAN Hai-ping, CAO Ping, XU Wan-zhong, et al. Visco elasto-plastic constitutive relationship of rock and modified Burgers creep model[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(6): 796 - 799.
- [10] 杨文东, 张强勇, 陈芳, 等. 辉绿岩非线性流变模型及蠕变加载历史的处理方法研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2011, 30(7): 1405 - 1413.
YANG Wen-dong, ZHANG Qiang-yong, CHEN Fang, et al. Research on nonlinear rheological model of diabase and treatment for creep loading history[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(7): 1405 - 1413.
- [11] 樱井春辅, 黏弹-塑性介质中隧道的稳定性[C]//第二届国际岩石力学会议论文选集. 北京: 冶金工业出版社, 1980.
桜井春輔, 弾塑性媒体にくっついて-トンネルの安定性[C]//The Selected Paper of Second International Rock Mechanics Conference. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1980.
- [12] 余启华. 岩石的流变破坏过程及有限元分析[J]. **水利学报**, 1985, 30(1): 55 - 61.
YU Qi-hua. Rheological failure process of rock and finite element analysis[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1985, 30(1): 55 - 61.
- [13] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization[C]//International Conference on Neural Networks IV. Perth, Australia: [s.n.], 1995: 1942 - 1948.
- [14] METROPOLIS N A. Equation of state calculations by fast computing machines[J]. **The Journal of Chemical Physics**, 1953, 21(6): 1087 - 1092.