

围岩-初支结合体的动力学特性试验

张丽龄¹, 叶洲元^{1*}, 周志华¹, 潘堃², 刘续斌¹, 刘文汇¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 中钢集团马鞍山矿山研究总院股份有限公司 金属矿山安全与健康国家重点实验室, 安徽 马鞍山 243000)

摘要: 隧道工程施工中, 隧道围岩与支护易受爆炸冲击、开挖扰动等复杂载荷影响, 其结构稳定性是工程设计的重要参考依据。采用砂岩和砂浆制作初支与围岩结合体试样, 基于大直径霍普金森实验系统进行冲击试验, 研究冲击荷载下结合体的变形与破坏特征, 分析初支和围岩的径向厚度及其比例特征对结合体破坏模式的影响机理。结果表明: 砂浆的厚度对结合体的应力应变及破坏特征影响显著; 由于砂浆的影响, 应力-时间曲线表现出“双峰特性”, 且当砂浆与砂岩厚度一致时, 试样的第二应力峰值明显增大; 冲击荷载下, 裂纹首先在砂岩与砂浆交界面处产生, 而后向四周扩散, 导致试件形成宏观拉伸破坏。该研究对隧道工程的结构设计及优化具有重要的参考价值。

关键词: 隧道支护结构; 冲击荷载; 动力学试验; 动载强度; 破坏模式

中图分类号: X754

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2024)02-0012-08

Experimental Investigation on the Dynamic Mechanical Properties of the Combination of Surrounding Rock and Primary Support

ZHANG Liling¹, YE Zhouyuan¹, ZHOU Zhihua¹, PAN Kun², LIU Xubin¹, LIU Wenhui¹

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. State Key Laboratory for Safety and Health of Metal Mines, China Steel Ma'anshan Mining Research Institute Co., Ltd., Ma'anshan 243000, China)

Abstract: In tunnel construction engineering, the surrounding rock and primary support are usually exposed to the complex loadings, such as explosion impact and excavation disturbance. The structural stability is an important reference for engineering designing. The sandstone and mortar are used to prepare the equal proportion specimens of primary support and surrounding rock in this paper. The dynamic tests are carried out by using variable diameter Hopkinson experimental system. The dynamic properties and failure characteristics of the combination structure under impact loads are studied. The influence of the radial thickness of the primary support and surrounding rock on the failure mode of the combination are analyzed. Results show that the thickness of mortar has a significant effect on the stress-strain and failure characteristics of the combination. The stress-time curves show bimodal characteristics because of the existence the mortar, and while the thickness of mortar and sandstone is consistent, the second peak of the stress increases significantly. The cracks firstly occur in the interface between sandstone and mortar, and then spread around the specimen causing macroscopic tensile failure further. The research shows an importantly referential significance for the designing and the optimizing of tunnel engineering.

Keywords: the surrounding structure of tunnel; impact load; dynamic mechanical test; dynamic strength; failure mode

收稿日期: 2022-11-24

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2021JJ30268)

* 通信作者, E-mail: yezhouyuan@126.com

自 20 世纪 90 年代起,我国隧道工程领域发展迅速,钻爆法在实际工程中得到广泛应用^[1].为了维持隧道围岩的稳定,多数隧道在开挖后将会进行初喷,并且形成 20~50 cm 厚的初喷层,之后在一定距离再进行其他形式的支护.然而,隧道工程施工中极易受到爆炸冲击、开挖扰动等影响,作为隧道工程设计及结构稳定性的重要组成部分,围岩与初期支护结合体在不同荷载作用下的力学性能和破坏特征对工程施工的安全性和可靠性具有重要意义.国内外学者分别采用室内试验^[2-3]、数值模拟^[4-5]及现场案例分析^[6-7]等方法分别针对隧道的结构强度、稳定性和破坏特征进行了深入探讨.

在室内实验方面,XIN 等^[8]采用振动相似模拟试验对隧道衬砌中初支和二次衬砌之间不同的接触形式进行研究,分析衬砌结构在地震作用下的相互作用及力学特性;Wang 等^[9]采用比例隧道模型进行振动台试验,扫描受损的隧道衬砌,对隧道衬砌的损伤状态和损伤结果进行分析;对于环状砂岩围岩试样,WU 等^[10-11]进行了一组单调无侧限压缩试验,研究使用空心圆柱形砂岩的环状材料的破坏机理,并揭示了有夹杂物的环状花岗岩试样与无夹杂物的环状花岗石试样之间的差异;基于统一强度理论,谷拴成等^[12]将锚杆作用力视为围岩加固体内的体力,分析蠕变条件下隧道围岩应力的变化规律,得到在不同强度初支条件下蠕变隧道二次衬砌的受力变化规律;梁鹏等^[13]将岩体破坏接近度引入隧道支护设计,考虑岩体峰后应变软化特性,建立一种确定隧道最优支护时机的方法.

结合现场案例分析隧道稳定性方面,孙明社等^[14]依托某新建铁路隧道工程采用监测位移反向分析评价围岩和支护应力,确定一种计算初期支护和衬砌背后压力的方法;田鹏^[15]依托兰新铁路大梁隧道段,分别对隧道围岩与初期支护、初期支护与二次衬砌之间的接触压力进行现场监测;韩常领等^[16]在连城山大断面软岩隧道实施 4 种初期支护,并进行实测,得到 4 种初支的受力特征;仇文革等^[17]在蒙华铁路不同工段开展隧道初期支护下拱顶沉降、水平收敛、混凝土应变等项目的现场测试,分析初支的受力规律;朱泽奇等^[18]基于雅安市石棉县境内水电站地下厂房围岩变形实测资料分析围岩应力释放特征,得到较为合适的支护时机.

由于室内试验与现场案例分析的局限性,也有部分学者通过数值模拟的手段进行分析研究.聂浩等^[19]通过数值模拟分析爆破掘进的隧道初支滞后掌子面不同距离条件下围岩的位移量等,并在浆水泉隧道Ⅲ级围岩段进行实地验证;斯郎拥宗等^[20]通过 Midas/GTS NX 模拟爆破条件下不同龄期的初支的动力响应;张顶立等^[21]、孙振宇等^[22]利用数值模拟试验和现场试验获取型钢钢架与格栅钢架 2 种初支结构下围岩荷载释放规律和初支受压分布特点,并建立数值模型分析喷射混凝土支护力的发展阶段,分别给出了 2 种支护的特点与最佳适用条件.

通过采用数值试验及物理试验方法,上述学者分别研究了隧道结构组合体在不同外部荷载或边界条件下的强度和破坏特征,然而,针对冲击载荷下围岩与支护结合体本身的结构特征对其强度与变形特性的影响研究相对较少.基于此,本文利用自建的变直径一维分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)实验系统,通过采用砂岩和砂浆自行配制的支护与围岩结合体模拟隧道的室内等比例物理试验,研究隧道施工围岩与主支护组合在冲击荷载作用下的变形与破坏特征,分析初支和围岩的径向厚度及其比例特征对冲击载荷下结合体破坏模式的影响,该研究对复杂荷载作用下的隧道工程设计具有重要的参考价值.

1 组合体结构及其基本性能

1.1 组合体试件的结构

针对隧道工程中的围岩与初支结合体,本文分别使用砂岩与水泥砂浆进行代替,制作的组合体试样如图 1 所示.围岩层选用整体性良好且材料相对均匀的砂岩,内部初支层以水泥砂浆代替.制作步骤:通过将天然砂岩进行加工形成大小合适的圆环,再选用 42.5 MPa 的普通硅酸盐水泥、粒径小于 1mm 的沙及自来水配制而成的砂浆进行浇筑并成为一个整体,其中,水为 185 kg/m³,水泥为 425 kg/m³,砂为 735 kg/m³,并在常

温下进行 28 d 养护.依据中华人民共和国行业标准^[23]中特细混凝土标准选定水泥:砂:水的质量配比为 1.00:1.66:0.41.成型后试件的整体尺寸主要有 5 种,见表 1,其中初支层和围岩层的厚度有相应变化.



图 1 围岩与初支结合体试验试样

表 1 成型试件的整体尺寸表

参数	组别				
	1	2	3	4	5
外径 R/mm	160	170	180	190	200
内径 r/mm	60	60	60	60	60
高度 h/mm	50	50	50	50	50

1.2 材料性能

为使试验数据更加真实可靠,在冲击试验之前进行静态力学试验,分别利用 2 种材料制作标准试样(直径 50 mm、高度 100 mm),采用位移控制的方式进行单轴抗压试验和劈裂试验,得到两者的基本力学参数,见表 2.

表 2 砂浆和砂岩的基本力学参数

名称	单轴抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	泊松比	弹性模量/GPa
砂浆	43.38	3.72	0.22	8.17
砂岩	30.26	2.67	0.20	5.43

2 试验方案及设备

2.1 试验方案

基于隧道围岩初支结构的荷载条件,利用厚壁圆筒理论及叠加原理进行位移分析,以岩石冲击动力学为理论基础观察和分析结合体的力学性能,对试件分组进行控制单一变量试验以便研究其破坏的关键因素.变量分别为初支径向厚度、围岩径向厚度、初支径向厚度在围岩与初支结合体径向总厚度的占比.因此试验方案分为 3 组:第一组,改变初支(水泥砂浆)径向厚度,分别为 10,15,20,25,30 mm,保持围岩径向厚度不变(40 mm),试件总体径向尺寸发生变化,分别为 160,170,180,190,200 mm,如表 3 所示.第二组,改变围岩径向厚度,分别为 30,35,40,45,50 mm,保持初支(水泥砂浆)径向厚度不变(20 mm),试件总体径向尺寸发生变化,分别为 160,170,180,190,200 mm,如表 4 所示.第三组,改变初支径向厚度在围岩与初支结合体径向总厚度的占比,分别为 2/12,3/12,4/12,5/12,6/12,当初支厚度为 10,15,20,25,30 mm 时,其对应的围岩径向厚度为 40,45,40,35,30 mm,试件总体径向尺寸不变(180 mm),如表 5 所示.3 组试验的冲击气压均为 1.8 MPa,不加静载荷.

表 3 水泥砂浆厚度变化组试件尺寸表

编号	冲击气压/MPa	静载/MPa	空心环直径/mm	水泥砂浆厚度/mm	砂岩厚度/mm	试件直径/mm
1-1	1.8	0	60	10	40	160
1-2	1.8	0	60	15	40	170
1-3	1.8	0	60	20	40	180
1-4	1.8	0	60	25	40	190
1-5	1.8	0	60	30	40	200

表 4 砂岩层厚度变化组试件尺寸表

编号	冲击气压/MPa	静载/MPa	空心环直径/mm	水泥砂浆厚度/mm	砂岩厚度/mm	试件直径/mm
2-1	1.8	0	60	20	30	160
2-2	1.8	0	60 </td <td>20</td> <td>35</td> <td>170</td>	20	35	170
2-3	1.8	0	60	20	40	180
2-4	1.8	0	60	20	45	190
2-5	1.8	0	60	20	50	200

表 5 水泥砂浆总材料占比变化组试件尺寸表

编号	冲击气压/MPa	静载/MPa	空心环直径/mm	水泥砂浆厚度/mm	砂岩厚度/mm	试件直径/mm
3-1	1.8	0	60	10	50	180
3-2	1.8	0	60	15	45	180
3-3	1.8	0	60	20	40	180
3-4	1.8	0	60	25	35	180
3-5	1.8	0	60	30	30	180

2.2 试验设备与试验过程

本文主要采用霍普金森压杆(SHPB)装置及其他的一些变形装置完成.原有的 SHPB 装置^[24-26]主要由冲击装置、压杆部件、数据收集仪器组成.冲击装置包括高压氮气瓶、气压控制阀、高压气室、发射腔、冲击头等;压杆部件由入射杆、透射杆等组成;数据采集系统由应变片、接线桥盒、SDY2107A 超动态应变仪、Yokowaga-DL850E 示波记录仪等组成;冲击头呈纺锤体,冲击波形呈正弦波,压杆杆径为 50 mm,压杆与冲击头的材料为 40 Cr 合金钢,密度为 $7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,弹性模量为 210 GPa.研究受试件尺寸影响需使用大尺寸压杆的霍普金森实验装置.经过改变后的大尺寸压杆的霍普金森实验装置具体构造如图 2 所示,大端直径 200 mm,长为 1 000 mm;变直径长度为 150 mm;小端直径 50 mm,长度 50 mm.大尺寸压杆的霍普金森试验装置的材料、密度与常规 SHPB 装置杆件一致.为防止变直径装置在试验的过程中移动,将支撑架焊接在底板上用以承受变直径装置,使其与入射杆进行同轴校准.底板装有滑轮,可以沿轴向移动.在距离试件受力端面 700 mm 处和透射杆中间处各贴 1 枚应变片.

冲击荷载由高压氮气作为冲击动力推动冲击头撞入入射杆产生,在试验的过程中,通过控制高压氮气气压强度来控制冲击荷载大小.在试验时将 3 类试件夹在入射杆与透射杆之间,利用冲击装置对大尺寸霍普金森压杆入射端头输入应力脉冲(即入射波),入射波由入射杆传送至杆件与试件界面处,由于二者波阻不同,入射波在界面处产生反射和透射,透射部分会进入试件与杆的界面,同时也产生透反射,经过多次透反射后,两界面达到稳定状态,此时记录下入射波、透射波、反射波,可求得试件的应力、应变和应变率随时间的变化.

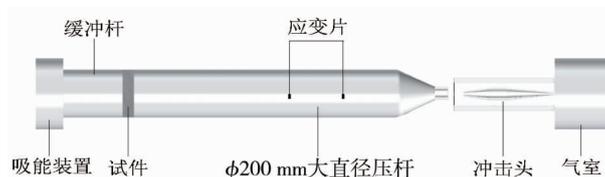


图 2 冲击变直径 SHPB 试验台

3 试验结果分析

3.1 应力-时间关系

在3组试验中,冲击气压均保持不变,在冲击头撞击压杆时产生的应力波传递至信息采集装置,经过换算可得出该条件下试件的应力随时间变化的曲线,如图3~图5.由图3~图5可知:各个试件的应力随时间变化的趋势相似,由于砂浆的影响,曲线表现出“双峰特性”^[27].当试件受到瞬时冲击时,所受的应力会瞬间增大,其内部空隙将被压密,出现第一个应力峰值.但是由于砂岩的抗压强度较低,会先产生裂隙,试件所受的应力开始减小,然而此时的砂浆还未产生较大的破坏,内部空隙继续被压密导致整体试件抗压能力有所提升,直到产生第二个应力峰值.当达到第二个应力峰值后,砂浆与砂岩均产生裂隙直到完全破坏,最终试件的结构完全失稳.

从图3可见,砂浆厚度对整体试件应力变化情况影响较大.由图4可知:在砂浆厚度不变的情况下,改变砂岩厚度,试件整体应力变化趋势均有明显双峰特性.分析图5可知:砂浆与砂岩厚度比例逐渐增大,应力变化情况逐渐明显,尤其当砂浆与砂岩厚度一致时,第二峰值明显增大.

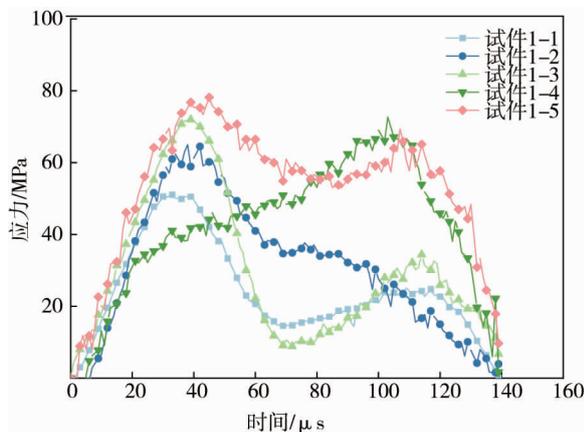


图3 第一组试件应力-时间曲线

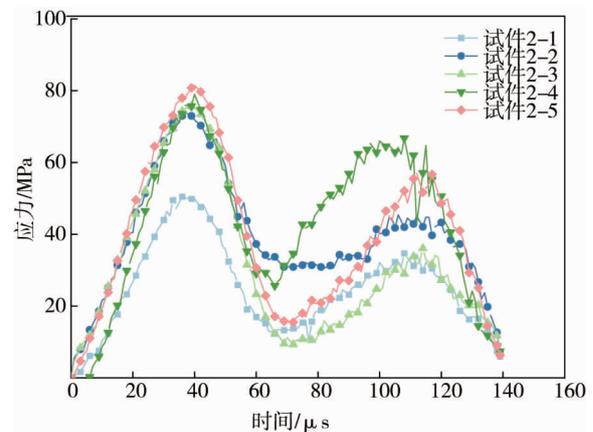


图4 第二组试件应力-时间曲线

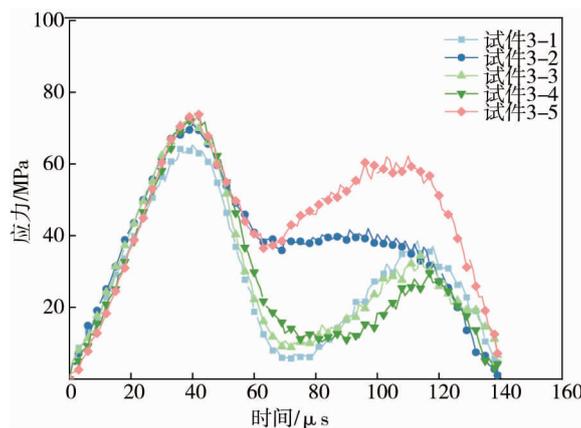


图5 第三组试件应力-时间曲线

3.2 冲击应力-应变关系

通过分析3组试件的典型试验数据,可得到3组试件各变量的应力-应变曲线,见图6~图8.由图6~图8可知:3组试件的应力-应变曲线形式上大体一致,但因2种材料厚度不同,导致曲线之间存在区别;当应变大于0.002左右时,应力-应变曲线急剧下滑,说明此时动荷载已经超过试件的整体极限强度,试件已经进入塑性变形阶段,内部已经萌发了不可逆转的裂缝,材料损伤严重;在3组所有未完全破坏的试件中其曲线峰值大小都有差异,这表明结合体的抗冲击强度受支护尺寸影响.

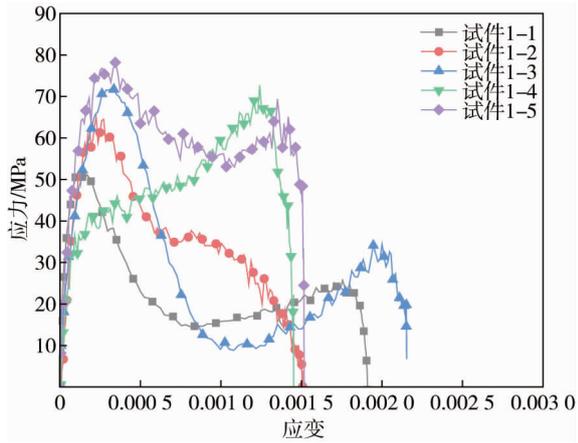


图 6 第一组试件应力-应变曲线

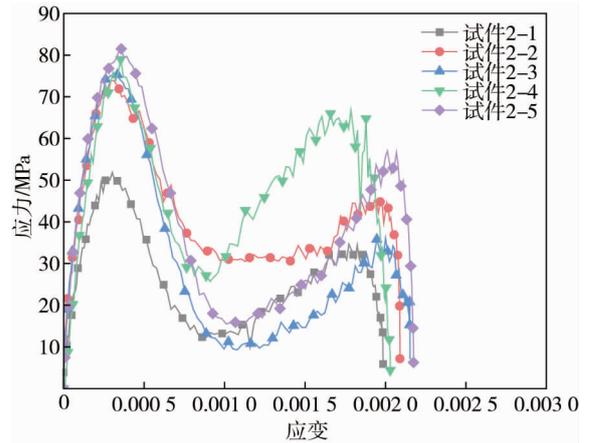


图 7 第二组试件应力-应变曲线

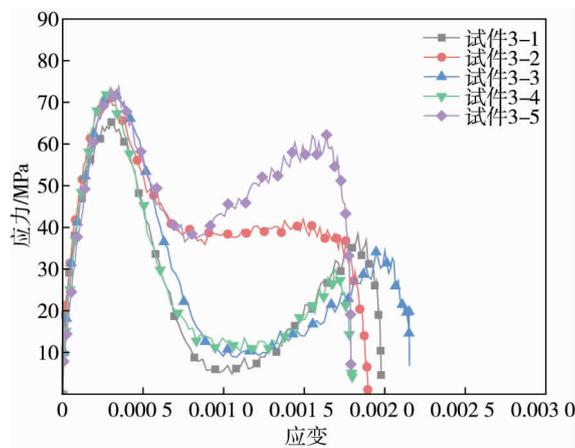


图 8 第三组试件应力-应变曲线

3.3 峰值强度分析

通过应力、应变进行计算可以得出每一试件的峰值强度,峰值强度反映出在物体受到冲击荷载下的最大抗压能力.通过分析峰值强度,可以总结出砂浆与砂岩对结构体强度的影响,具体如图 9~图 11.

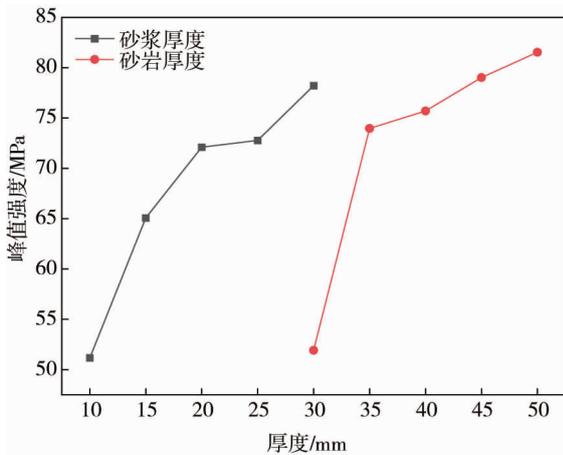


图 9 水泥砂浆、砂岩厚度与强度关系

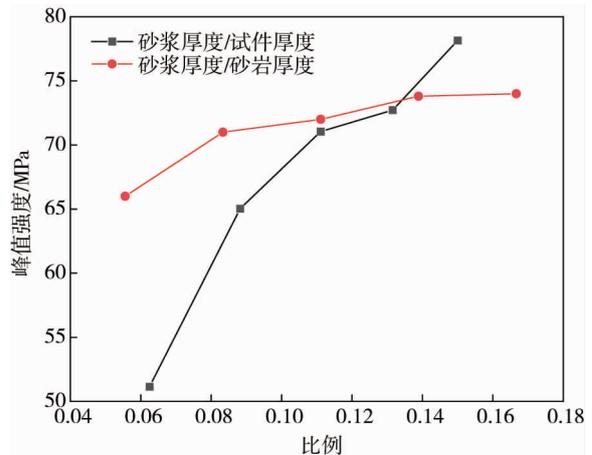


图 10 水泥砂浆厚度占比与强度关系

由图 9 可知:随着初支厚度增加,结合体强度随之增大;随着围岩厚度增加,结合体强度随之增大.图 10 可看出:随着初支厚度的占比增大,结合体的强度随之增大,但增大的趋势在变缓,因此当初支部分达到一定厚度时,其给围岩增强的作用减弱.

3.4 破坏情况分析

在岩石力学领域,裂隙作为评判岩体缺陷特征的标准之一.在实际冲击中,由于应力波与岩石相互作用引起的受力分布不均匀,因此岩体裂纹扩展较为复杂,岩石破坏的程度以及破碎状态均有较大差异.

在试验中总结试样的破碎特征,有助于进一步了解其破坏形式.在本试验中,第一组试件各尺寸如表3所示,试验变量为内部混凝土层径向厚度,试验后试件破坏情况见图11.由图11可知:1-1试件冲击后初支出现破坏,围岩也出现环向裂纹;1-2试件和1-3试件冲击后初支和围岩都出现径向裂隙;1-4试件和1-5试件初支出现径向裂隙,围岩几乎未破坏.对比这一组试件破坏形式可推测:在实际情况中,隧道的破坏一般是初支先受到外力冲击伴有裂纹的产生,直到围岩部分产生径向破坏;如果所受到的外力并不足以使初支破坏,此时的初支为围岩起到保护作用,围岩破坏可能性很小.第二组试件的试验变量为外部砂岩层径向厚度,尺寸见表4,破坏情况见图12.由图12可知:这一组试件冲击后都产生径向裂隙,但2-4试件围岩表面未现裂隙;前3个试件冲击破坏较严重,后2个试件冲击后破坏较轻微,从而可知后2个试件强度较高.第三组试件的试验变量是水泥砂浆层径向厚度在总体材料厚度中的占比,各试件尺寸如表5,冲击后破坏情况见图13.由图13可知:3-1试件和3-2试件有径向破坏,并伴随环向破坏;后面3个试件受冲击后产生径向裂隙.前2个试件产生环向裂隙可能是因为围岩径向厚度比后3个试件大.



图11 第一组试件破坏形式

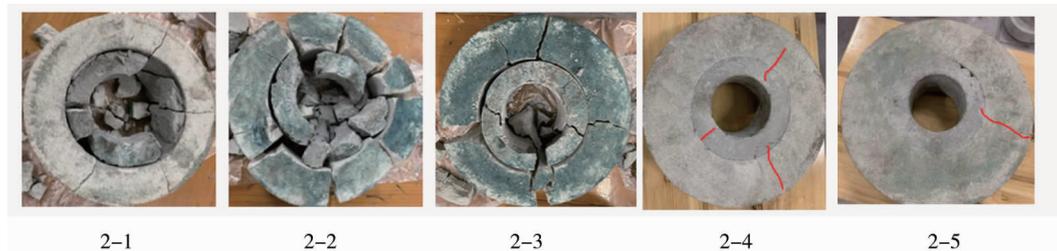


图12 第二组试件破坏形式

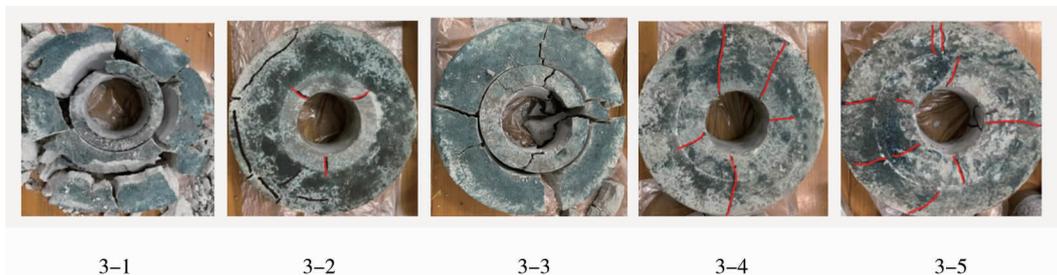


图13 第三组试件破坏形式

4 结论

1) 砂岩厚度不变的条件下,围岩与支护结合体的动载强度随初支径向厚度的增加表现出显著的增长趋势;初支厚度不变时,结合体的动载强度随着围岩径向厚度的增加而增大;随着初支径向厚度占比的增加,结合体动载强度的增长速度逐渐放缓.

2) 冲击载荷作用下初支与围岩结合体试件内部裂纹首先在其交界面产生,而后沿径向扩散,导致试件内部生成大量径向裂纹,在冲击应力波的持续作用下,该径向裂纹逐渐发展为宏观裂隙,使得结合体主要形成拉伸破坏。

3) 结合体试件的动载强度受支护厚度、围岩厚度及其比例关系等因素影响,支护厚度越大,或结合体试件内支护厚度占比越高,其动载强度越大。

参考文献:

- [1] 王梦恕,谭忠盛.中国隧道及地下工程修建技术[J].中国工程科学,2010,12(12):4-10.
- [2] 唐先习,夏顶顶,李旦合,等.隧道爆破施工对初支混凝土的影响研究[J].铁道工程学报,2022,39(1):73-78.
- [3] 王海龙,李帅,赵岩.累积效应下初支混凝土爆破损伤规律研究[J].工程爆破,2021(4):29-33.
- [4] 伍国军,陈卫忠,戴永浩,等.浅埋大跨公路隧道施工过程和支护优化的研究[J].岩土工程学报,2006,28(9):1118-1123.
- [5] 王建华.深埋隧道软弱围岩与初期支护相互作用研究[D].重庆:重庆大学,2005.
- [6] 李鹏飞,张顶立,赵勇,等.大断面黄土隧道二次衬砌受力特性研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(8):1690-1696.
- [7] 彭宇峰,单仁亮,宋永威,等.隧道爆破引起喷射混凝土累积损伤研究[J].混凝土,2020(8):61-66.
- [8] XIN C L, WANG Z Z, GAO B. Shaking table tests on seismic response and damage mode of tunnel linings in diverse tunnel-void interaction states[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 77: 295-304.
- [9] WANG Z Z, JIANG Y J, ZHU C A, et al. Shaking table tests of tunnel linings in progressive states of damage[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50: 109-117.
- [10] WU Q H, WENG L, ZHAO Y L, et al. Influence of infilling stiffness on mechanical and fracturing responses of hollow cylindrical sandstone under uniaxial compression tests[J]. Journal of Central South University, 2021, 28(8): 2485-2498.
- [11] WU Q H, WENG L, ZHAO Y L, et al. Deformation and cracking characteristics of ring-shaped granite with inclusion under diametrical compression[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(14): 681.
- [12] 谷拴成,黄荣宾,苏培莉.考虑隧道围岩蠕变的复合式衬砌受力规律[J].交通运输工程学报,2018,18(2):53-60.
- [13] 梁鹏,高永涛,周喻,等.隧道初支合理支护时机确定方法及其工程应用[J].工程科学学报,2022,44(2):265-276.
- [14] 孙明社,马涛,申志军,等.复合式衬砌结构中衬砌分担围岩压力比例的研究[J].岩土力学,2018,39(增刊1):437-445.
- [15] 田鹏.高地应力软岩隧道围岩压力及二衬受力特征研究[J].铁道标准设计,2016,60(8):108-112.
- [16] 韩常领,张天,徐晨,等.大断面软岩隧道变形特征及多层初支控制研究[J].公路,2021,66(1):335-339.
- [17] 仇文革,李冰天,田明杰,等.基于现场实测的隧道初期支护受力模式分析[J].隧道建设(中英文),2017,37(12):1508-1517.
- [18] 朱泽奇,盛谦,刘继国,等.坚硬围岩初期支护合理时机研究[J].地下空间与工程学报,2010,6(6):1240-1245.
- [19] 聂浩,张继春,任武.基于爆破损伤隧道初支与掌子面合理距离研究[J].路基工程,2018(4):166-171,187.
- [20] 斯郎拥宗,吕光东,范凯亮.隧道爆破施工对混凝土初支喷层的影响研究[J].地下空间与工程学报,2019,15(增刊1):327-332.
- [21] 张顶立,陈峰宾,房倩.隧道初期支护结构受力特性及适用性研究[J].工程力学,2014,31(7):78-84.
- [22] 孙振宇,张顶立,房倩,等.隧道初期支护与围岩相互作用的时空演化特性[J].岩石力学与工程学报,2017,36(增刊2):3943-3956.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部.砌筑砂浆配合比设计规程:JGJ/T9-2010[S].2011.
- [24] 刘孝敏,胡时胜.大直径 SHPB 弥散效应的二维数值分析[J].实验力学,2000,15(4):371-376.
- [25] 叶洲元,赵伏军,周子龙.动静组合载荷下卸荷岩石力学特性分析[J].岩土工程学报,2013,35(3):454-459.
- [26] LUO S, GONG F Q, PENG K, et al. Influence of water on rockburst proneness of sandstone: Insights from relative and absolute energy storage[J]. Engineering Geology, 2023, 323: 107172.
- [27] 吕太洪,陈小伟,陈刚.基于混凝土试件 SHPB 实验的波形特征分析[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2016,17(4):345-349.