

硬岩隧道高压气体膨胀破岩开挖试验

彭怀德¹, 刘敦文¹, 褚夫蛟², 翦英骅¹

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 山东理工大学 资源与环境工程学院, 山东 淄博 255049)

摘 要: 为了解决传统钻爆法在隧道工程中振动大的问题, 引入一种新型破岩技术——高压气体膨胀破岩技术。通过在某隧道掌子面采用该技术进行现场试验, 获得该技术试验时的振动速度值和试验后的破岩效果, 将获得的结果与传统钻爆法得到的相应结果进行对比分析, 结果表明, 高压气体膨胀破岩技术在施工时产生的振动比钻爆法小, 证明了将该技术应用在隧道工程中是可行的, 解决了该隧道采用钻爆法施工振动风险大的问题, 为类似工程破岩提供了一种新途径。

关 键 词: 高压气体膨胀破岩技术; 膨胀管; 钻爆法; 振动速度

中图分类号: U 455.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 01-0242-07

Test on high pressure gas expansion rock fragmentation in hard rock tunnel

PENG Huai-de¹, LIU Dun-wen¹, CHU Fu-jiao², JIAN Ying-hua¹

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

2. School of Resources and Environment Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049)

Abstract: In order to solve serious blasting vibration problem of the traditional drilling and blasting method for tunnel construction, a new type of rock fragmentation technology—high pressure gas expansion rock fragmentation technology is provided. The values of vibration velocity and effect of rock fragmentation received from field tests by high pressure gas expansion rock fragmentation technology are compared and analyzed with that of traditional drilling and blasting method. The results show that high pressure gas expansion rock fragmentation technology has smaller values of vibration velocity than the traditional drilling and blasting method at the time of construction. The results also prove that it is feasible to use this technology in tunnel projects and the problem of high vibration risk by traditional drilling and blasting method in the tunnel could be resolved through high pressure gas expansion rock fragmentation technology. The high pressure gas expansion rock fragmentation technology provides a new way for relevant engineering projects to break rocks.

Keywords: high pressure gas expansion rock fragmentation technology; expansion pipe; drilling and blasting method; vibration velocity

1 引 言

随着我国经济的持续快速发展和土地的集约开发利用, 城市周边或关键区域的工程建设密度越来越大, 邻近既有建(构)筑物兴建新的工程, 已比比皆是, 因新建工程施工导致对既有建(构)筑物可能引起扰动和破坏的评价、监测和控制, 以及新型硬岩破岩技术及工法的研究, 均成为新建工程中被关注的重点, 其直接影响新建工程建设的成败。

到目前为止, 关于如何监测和控制新建工程施

工对既有建(构)筑物引起的扰动和破坏, 国内外研究人员对此进行了大量的研究试验及应用, 并取得了丰富的成果。文献[1-5]通过实测数据结合数值模拟的方法研究了既有工程爆破施工对邻近建(构)筑物的扰动和破坏, 对预测和控制爆破振动速度取得了较好的效果; 于建新等^[6]针对上下交叉隧道爆破施工特点, 通过实测数据回归反演法实现爆破振动强度的有效控制; 邹飞等^[7]针对萨道夫斯基公式中场地系数 K 、衰减系数 α 的确定具有模糊性及随机性的特点, 通过非对称三角模糊数对爆破

收稿日期: 2017-04-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51404303)。

This work was supported by the National Science Foundation of China (51404303).

第一作者简介: 彭怀德, 男, 1986 年生, 博士研究生, 主要从事土木工程安全、爆破工程等方面的研究工作。E-mail: 410536337@qq.com

通讯作者: 刘敦文, 男, 1971 年生, 博士生导师, 教授, 主要从事岩土工程和爆破工程方面的研究工作。E-mail: liudunwen@163.com

振动速度进行了预测分析,结果与工程实际较为接近。虽然对传统钻爆法的振动控制在理论和实践中取得了诸多重大的成果,但是对于某些特殊和敏感的地区,钻爆法仍然不能适用。比如,高铁路线附近、周围重要管线紧邻爆破点、争议性较大的敏感地区等等。而国内外对新型非爆破方法的研究主要集中在机械铣挖法^[8-9]、静态膨胀剂法^[10]、劈裂棒法、二氧化碳法^[11-12]、镐头机破岩法^[13-14]等。虽然这些非爆破方法在某些特殊地区具有一定程度的适用性,并且施工时振动小、噪声较小且安全可靠,但是它们也具有不可忽视的缺点:单价昂贵、破岩效率低、掘进速度慢、人员和设备用量大、需要多个临空面等等,而最制约其可适用性的则是其对岩性要求较高,这些非爆破方法基本只适用于煤层崩落和软岩的开挖,对较为致密的硬岩几乎束手无策。在此,提出一种可以适用于硬岩地区的非传统钻爆法的新型破岩技术——高压气体膨胀破岩技术,通过现场试验、振动监测和理论计算及与传统钻爆法进行对比分析,力求找到一种既能保证破岩效果,又能最大限度减少乃至完全避免传统钻爆法对周围建(构)筑物带来的扰动和破坏的方法,以便为工程破岩提供一条新途径。

2 研究背景

浙江宁波某隧道围岩岩质坚硬、节理裂隙不发育~较发育、滴水、未风化~微风化、较完整~完整。下穿一输水隧洞,该隧洞正常运营时水压为0.4 MPa,内径为4 m。输水隧洞拱顶到隧道左线和右线仰拱底距离分别为8.265、8.228 m。输水隧洞与隧道具体位置关系示意图如图1所示。

该工程的难点在于:①输水隧洞与隧道距离太短,传统钻爆法对爆破设计和现场操作要求极高,事故风险大;②设计围岩强度为21.8 MPa,实际围岩强度最大达到114.0 MPa,常见的非爆破方法开挖效果非常不理想;③全程爆破施工的方案审批及炸药审批较难。

3 试验介绍

试验主要利用膨胀管膨胀致裂技术破碎岩石,采用爆破测振仪对其产生的振动进行监测,得出合理的孔网参数。同时采用常规爆破手段进行岩石破碎试验,通过对两者的测试结果进行对比,证明高压气体膨胀破岩技术的可行性。

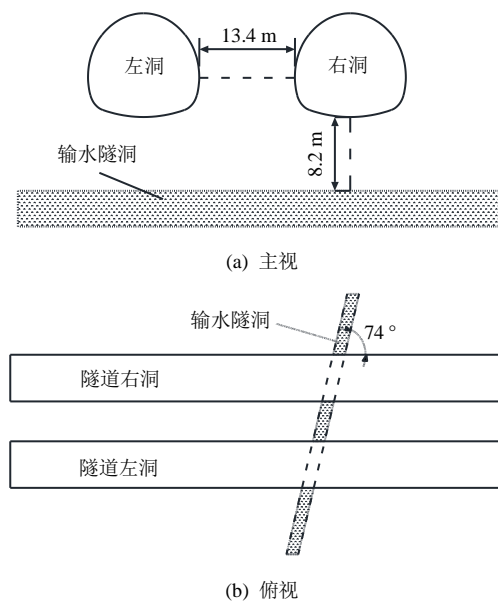


图1 输水隧洞与隧道相对位置示意图
Fig.1 Relative location of water conveying tunnel to the tunnel

由于高压气体膨胀破岩技术是一项全新的破岩技术,目前其在工程上的应用尚处于试验的前期阶段,加之膨胀管的本质属性,决定了它不能像炸药一样进行分段爆破,而只能进行齐发触发,或者通过分次手动的方式确定每次触发的膨胀管数量。虽然比较两种破岩方式振动速度大小最直接、最简明的方法是实测法,但考虑到现场实际条件无法直接比较两者振动速度大小,而高压气体膨胀破岩技术的振动速度计算还没有相应的经验公式,根据萨道夫斯基经验公式,钻爆法振动速度只与 K 、 α 、距离和最大段药量有关,因此,比较二者的振动速度,可以通过比较二者在相同破岩方量下相同距离时的齐发爆破产生的振动速度大小(此时,钻爆法的总药量即其最大段装药量),即高压气体膨胀破岩技术的振动速度为实测值,钻爆法的振动速度为计算值。如果该条件下高压气体膨胀破岩技术产生的振动明显小于钻爆法,则说明高压气体膨胀破岩技术相对于钻爆法具有更小的振动危害。据此,如果由于审批等原因,该隧道不能采用钻爆法开挖,即使单从控制开挖对输水隧洞的扰动影响方面考虑,高压气体膨胀破岩技术也是可行的。

3.1 高压气体膨胀破岩技术试验设备及材料

高压气体膨胀破岩技术主要采用膨胀管膨胀破岩,膨胀管由三部分组成:气化剂储存管、铜管和导线,如图2所示。其中气化剂储存管是膨胀管的主体部分,也是膨胀管做功破岩的有效部分;铜管主要起导气加压作用;导线则用于连接电触发器。

气化剂储存管和铜管的长度可以任意制作, 试验中单个气化剂储存管为直径为 40 mm、长为 700 mm 的圆柱体, 内装气化剂质量为 500 g, 储存管和铜管可根据实际需要任意对接。

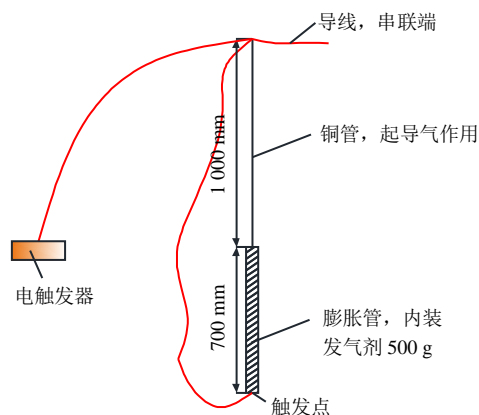


图2 膨胀管示意图

Fig.2 Schematic of expansion pipe

常规爆破试验主要采用2#岩石乳化炸药爆破破岩, 利用导爆管雷管进行起爆。

振动速度测试采用成都中科测控有限公司生产的TC-3850和TC-4850爆破测振仪。

3.2 高压气体膨胀破岩技术试验方案

每次试验前进行试验设计, 然后按设计要求在掌子面钻孔, 钻孔方向稍向下, 并与掌子面成 75° 夹角, 插入膨胀管, 用一种早强快硬微膨胀压浆料将膨胀管完全密实地封闭于围岩中, 通过铜管顶端的加气孔向膨胀管注入2.5 MPa的空气, 用导线将膨胀管串联后, 连接到远端的电触发器, 合上其开关, 即可通过电流触发膨胀管内的气化剂并瞬间释放大量的高温高压气体, 继而向周围岩体做功破岩。

首先, 设置不同的膨胀管埋置深度和孔间距, 以使膨胀管的孔网参数与隧道掌子面围岩岩性的匹配达到最佳。如图3(a)所示, 设计5组高压气体膨胀破岩试验, 每组布置3个从上往下的钻孔, 每组钻孔间距大于2 m, 互不干涉。第1、2和3组钻孔的孔间距分别为1.0、1.2、1.5 m, 孔深均为1.7 m, 膨胀管的埋置深度均为1.5 m; 根据前3组试验的效果设计了第4和第5组试验, 这两组试验的孔深分别为2.2、1.8 m, 其余参数与第2组钻孔保持一致。其次, 按照前述确定的最佳孔网参数在掌子面上进行更进一步的试验, 其孔网参数示意图如图3(b)所示, 同时采用爆破测振仪监测其振动速度值, 并统计每次试验的破岩方量。最后, 监测和记录传统

钻爆法时的相应数据, 将整理和计算后的结果与高压气体膨胀破岩技术的结果进行对比分析。

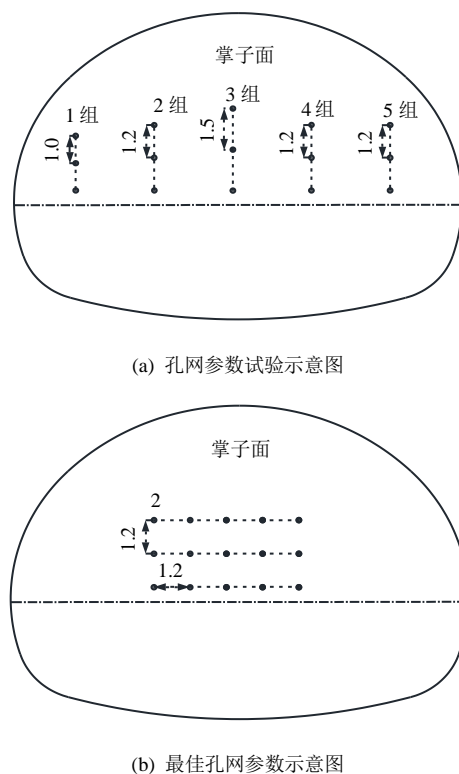


图3 膨胀管孔网参数示意图 (单位: m)

Fig.3 Parameters of expansion pipe drilling network (unit: m)

3.3 传统钻爆法试验方案

因传统钻爆法在隧道开挖中应用多年, 且该技术已经非常成熟, 所以文中简要叙述其试验方案。根据隧道工程地质条件, 综合考虑开挖断面尺寸(洞径为15.6 m)、进尺(每循环2.5 m)、钻孔机械、出渣能力和周围建(构)筑物的关系, 采用上、下台阶法进行开挖试验, 由于文中试验数据均来自于上台阶开挖, 故只对上台阶试验进行说明, 其炮孔分布和雷管段别如图4所示。上台阶开挖共分3次爆破, 第1次爆破的段别为1、3、5、7段; 第2次爆破的段别为9、11、13、15段; 第3次爆破的段别为17、19、20段。为了保证较好的爆破效果, 考虑到围岩的不均匀性和现场操作等客观因素, 实际装药量会与设计略有出入。

根据获得的最大段药量、监测距离和振动速度等数据, 利用萨道夫斯基经验公式求得 K 和 α 值, 参照高压气体膨胀破岩试验得到的方量, 计算相同破岩方量下不同距离的振动速度, 然后与高压气体膨胀破岩技术的结果进行对比分析。

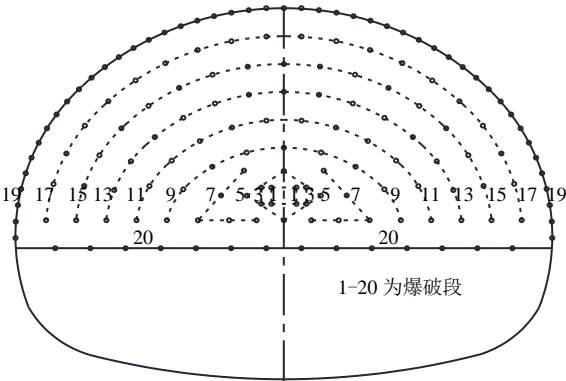


图 4 炮孔分布及雷管分段图
Fig.4 Hole pattern and detonator subsection

3.4 振动监测点的布置

高压气体膨胀破岩试验和传统钻爆法均采用相同的振动监测点布置方案。采取左、右洞错开的方式试验，分别将测点布置在试验掌子面正后方的地面基岩上，并将爆破测振仪传感器的 x 方向正对掌子面，即指向爆心。监测距离根据实际情况实时调

整。振动监测点的布置示意图如图 5 所示。

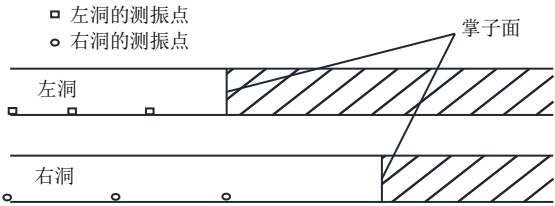


图 5 振动监测点布置示意图
Fig.5 Layout of vibration monitoring locations

4 试验结果及分析

4.1 高压气体膨胀破岩技术试验结果及分析

为了确定适合该隧道掌子面围岩的膨胀管的最佳孔距和埋置深度，进行 1~5 组试验。然后根据求得的孔距和埋置深度进行 6~10 组试验，得到相应的破岩方量、单耗和振动速度等信息。试验结果见表 1。

表 1 高压气体膨胀破岩技术试验结果

Table 1 Test results of high pressure gas expansion rock fragmentation technology

试验 序号	膨胀管数量 /根	气化剂质量 /kg	孔距 /m	埋置深度 /m	监测距离 /m	破岩方量 /m ³	单耗 /(kg/m ³)	拾振 方向	振动速度 /(cm/s)	爆破效果
1	3	1.5	1.0	1.5	/	/	/	/	/	无底坎，90%的岩渣在掌子面 25 m 以内，偶有飞石超过 50 m
2	3	1.5	1.2	1.5	/	/	/	/	/	几乎无底坎，90%的岩渣在掌子面 4.5 m 以内，最远飞石 37 m
3	3	1.5	1.5	1.5	/	/	/	/	/	有明显底坎，90%的岩渣在掌子面 25 m 以内，偶有飞石超过 50 m
4	3	1.5	1.5	2.2	/	/	/	/	/	试验围岩表面无任何变化，未成功破岩
5	3	1.5	1.5	1.8	/	/	/	/	/	试验围岩表面未见明显裂缝，未成功破岩
6	2	1.0	1.2	1.5	22.0	1.4	0.714	垂直	0.107	/
7	10	5.0	1.2	1.5	14.3	7.5	0.666	垂直	0.640	/
8	13	6.5	1.2	1.5	8.3	9.0	0.722	垂直	1.638	/
9	30	15.0	1.2	1.5	12.5	20.0	0.750	垂直	1.480	/
10	40	20.0	1.2	1.5	25.0	26.0	0.769	垂直	1.469	/

从表 1 可以看出，膨胀管的孔距为 1.2 m 且埋置深度为 1.5 m 时，破岩的效果最佳，因此，后面的掌子面试验都采用此参数；气化剂的单耗波动较大；结合以往工程经验，从气化剂的单耗来看，0.7~0.8 kg/m³ 并不高，在硬岩隧道的开挖中是完全可以接受的。

4.2 钻爆法试验结果与分析

通过对不同药量爆破进行监测，利用萨道夫斯基公式对监测结果进行回归分析，得到的结果见表 2。

表 2 钻爆法振动速度监测结果

Table 2 Vibration velocity monitoring results of drilling and blasting method

监测 序号	总药量 /kg	最大段装 药量/kg	分段数	监测距离 /m	拾振 方向	振动速度 /(cm/s)
1	20	8.8	4	24.2	垂直	2.132
2	20	8.8	4	51.5	垂直	0.947
3	20	8.8	4	76.8	垂直	0.442
4	22	10.4	4	22.1	垂直	2.584
5	22	10.4	4	49.5	垂直	1.106
6	48	14.0	4	20.2	垂直	3.784
7	48	14.0	4	47.5	垂直	1.168
8	48	25.0	3	40.1	垂直	1.896
9	48	25.0	3	65.4	垂直	0.935

根据《爆破工程》^[15], 结合表 2 可以得出, $K=59.401$ 且 $\alpha=1.321$, 刚好位于 $K=50\sim150$, 且 $\alpha=1.3\sim1.5$ 的硬岩区间, 与实际围岩情况相符; 相比之下, 炸药的单耗波动范围要小于气化剂。

4.3 对比分析

4.3.1 岩石破碎形态及振动波形图对比分析

为了研究高压气体膨胀破岩技术的振动速度波形特征, 结合两种破岩方法的岩石破碎形态, 如图 6 所示, 将高压气体膨胀破岩技术典型的振动波形与钻爆法的振动波形进行对比分析, 如图 7 所示。其中图 7(a)的主频是 35.714 Hz, 图 7(b)的主频是 99.999 Hz。

从图 6 中可以看出, 两种破岩方式的岩石破碎形态区别较大。高压气体膨胀破岩后岩渣的块度明显比钻爆法的大, 且岩渣的破坏面基本保留着原有的结构面, 而钻爆法产生的岩渣的破坏面多为新鲜的断裂面; 结合二者振动波形的主频, 从图 7 中可以看出, 高压气体膨胀破岩技术的振动波形的起跳点到出现峰值的时间短, 峰值降低慢; 而钻爆法则是峰值出现的时间较长, 峰值降低较快, 高压气体膨胀破岩技术的振动波形比钻爆法从峰值到趋于平缓的时间长 5~10 ms, 也就是说, 地震波峰值出现



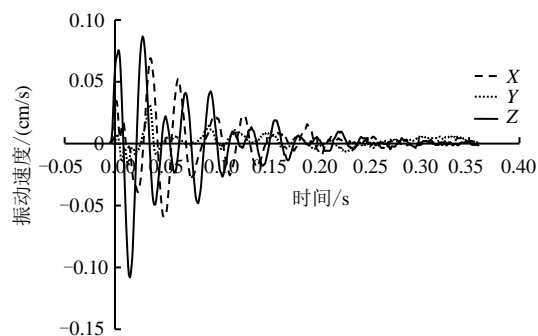
(a) 高压气体膨胀破岩技术



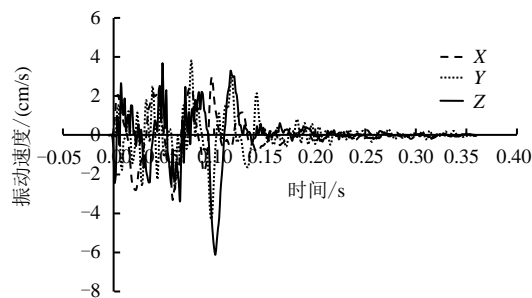
(b) 钻爆法

图 6 两种破岩方式的岩石破碎形态

Fig.6 Rock breaking caused by two types of rock fragmentation



(a) 高压气体膨胀破岩技术



(b) 钻爆法

图 7 两种破岩方式的典型振动波形

Fig.7 Vibration waveforms of two types of rock fragmentation

后, 高压气体膨胀破岩时对岩体做功的时间更长。根据爆破破岩机制, 出现上述现象的原因可能是炸药爆炸对岩石的破坏是爆轰波和应力波共同作用的结果。首先爆轰波作用于炸药周围岩壁, 形成冲击波并很快衰减成应力波, 冲击波在药包岩石中形成压缩粉碎区, 应力波则在该区之外产生径向裂隙, 然后才是爆生气体对岩石中原生裂隙和次生裂隙的“楔入”作用; 而高压气体膨胀破岩, 有一定的应力波作用, 但主要还是高压气体在对岩石做功。相对来说, 高压气体的破岩过程更加简单、直接。

4.3.2 振动速度对比分析

根据《爆破安全规程》^[16], 对于硬度系数 $f=9\sim15$ 的岩石爆破炸药单耗取最小值为 0.6 kg/m^3 , 小于实际爆破炸药单耗, 此时, 对于齐发爆破的总药量, 也即最大段装药量来说, 相同的破岩方量需要的炸药量最少, 采用通过钻爆法试验所得萨道夫斯基公式参数, 计算在不同破岩方量情况下不同监测距离的爆破振动速度, 并与高压气体膨胀破岩技术试验监测结果进行对比, 如果高压气体膨胀破岩技术的振动速度小于最小炸药单耗产生的振动速度, 则一定小于实际单耗的炸药量齐发爆破产生的振动速度, 从而证明高压气体膨胀破岩技术在振动危害上面的优势。两种方法的对比结果见表 3。

表 3 高压气体膨胀破岩技术与钻爆法振动速度对比

Table 3 Comparison of vibration velocity between high pressure gas expansion rock fragmentation technology and drilling and blasting method

监测距离 /m	破岩方量 /m ³	高压气体膨胀破岩技术				钻爆法			
		平均单耗 /(kg/m ³)	气化剂质量 /kg	振动方向	振动速度 /(cm/s)	单耗 /(kg/m ³)	最大段装药量 /kg	振动方向	振动速度 /(cm/s)
8.3	9.0		6.5	垂直	1.638		5.481	垂直	7.674
12.5	20.0		15.0	垂直	1.480		12.180	垂直	6.351
14.3	7.5	0.724	5.0	垂直	0.640	0.600	4.568	垂直	3.452
22.0	1.4		1.0	垂直	0.107		0.853	垂直	0.933
25.0	26.0		20.0	垂直	1.469		15.834	垂直	2.853

为了更加直观地比较两种破岩方式的振动速度大小，绘制在相同监测距离以及相同破岩方量时两种破岩方式的振动速度比较图，如图 8 所示。

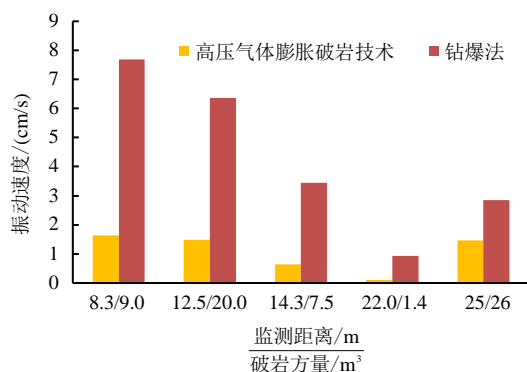


图 8 相同破岩方量时两种破岩方式的振动速度比较

Fig.8 Comparison of vibration velocity between two rock breaking approaches in the same rock volume

由表 3 结合图 8 可以看出，相同破岩方量时，不同距离下高压气体膨胀破岩技术产生的振动远比钻爆法产生的振动要小，从而证明了高压气体膨胀破岩技术在控制振动危害方面比钻爆法更有优势。同时，随着距离的增加，二者的振动速度值有接近的趋势，这主要是因为，钻爆法振动波形的主频较高，衰减较快，而高压气体膨胀破岩技术的振动波形的主频较低，衰减较慢。

由于输水隧洞离该隧道的最近距离为 8.228 m，特邀专家根据爆破安全规程^[16]的规定，并结合现场实际情况，制定了 5 cm/s 的安全振动速度限值。根据该限值，结合隧道围岩的实际情况和萨道夫斯基公式，得到输水隧洞距离隧道仅为 8.3 m 时的最大段装药量为 2.07 kg，再乘以炸药的单耗 0.60 kg/m³，得到最大段装药量的破岩方量为 3.399 m³。根据实测数据，若采用高压气体膨胀破岩技术，6.5 kg 的气化剂在距离监测点 8.3 m 时触发的振动速度值为 1.64 cm/s，小于 5 cm/s，而其破岩方量却达到 9 m³，在安全振动限值下，破岩方量和振动速度的控制明

显优于钻爆法。因此，建议该隧道掌子面在邻近输水隧洞时，采用高压气体膨胀破岩技术开挖隧道，以解决输水隧洞距离该隧道过近，采用钻爆法风险大的难题。

综上所述，在相同的破岩方量和相同的监测距离下，高压气体膨胀破岩技术与采用齐发爆破或最大段装药量的传统钻爆法相比，对邻近建（构）筑物的振动危害更小，为其他邻近重要建（构）筑物，需要减小振动危害而又无法使用炸药的类似工程提供了一条新的破岩途径。

5 结 论

(1) 通过现场高压气体膨胀破岩技术试验，获得了某隧道掌子面围岩和膨胀管之间的最佳匹配参数为孔距 1.2 m、埋置深度 1.5 m。

(2) 对钻爆法现场测试结果进行回归分析，得到了某隧道岩石爆破的萨道夫斯基公式参数 $K = 59.401$ ， $\alpha = 1.321$ ，为进行后续爆破设计提供了依据。

(3) 对两种破岩方式的岩石破碎形态和振动速度波形图进行比较和分析，得出采用膨胀管进行破岩时做功时间比钻爆法破岩的振动速度峰值后做功时间长 5~10 ms，高压气体膨胀破岩过程更为简单。

(4) 通过对现场高压气体膨胀破岩技术试验和钻爆法施工时的振动监测和测量计算，得到了两种破岩方式的破岩方量、平均单耗和振动速度等数据，利用萨道夫斯基公式，对相同破岩方量下两种破岩方式的振动速度大小进行了比较分析，证明在振动速度控制上，高压气体膨胀破岩技术要优于钻爆法。为同类工程破岩提供了一项新技术。

参 考 文 献

- [1] 刘敦文, 杨光, 彭怀德. 爆破作用下拱顶衬砌脱空对隧道结构安全的影响分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(10): 4214—4220.

LIU Dun-wen, YANG Guang, PENG Huai-de. Analysis

- for impact of structural safety of tunnel induced by cavity on vault of lining under blasting[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2013, 44(10): 4214—4220.
- [2] 刘冬, 高文学, 孙宝平, 等. 既有隧道扩建爆破振动数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 3011—3016.
LIU Dong, GAO Wen-xue, SUN Bao-ping, et al. Numerical simulation of blasting vibration on existing tunnel extension[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(10): 3011—3016.
- [3] 管晓明, 傅洪贤, 王梦恕. 隧道近距下穿山坡楼房爆破振动测试研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1995—2003.
GUAN Xiao-ming, FU Hong-xian, WANG Meng-shu. Blasting vibration characteristics monitoring of tunnel under-passing hillside buildings in short-distance[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(7): 1995—2003.
- [4] 王春梅. 小间距隧道爆破对既有隧道振动影响分析[J]. 爆破, 2013, 30(2): 84—90.
WANG Chun-mei. Analysis of vibration influences of small spacing tunnel blasting on existing tunnel[J]. **Blasting**, 2013, 30(2): 84—90.
- [5] 龚健伍, 夏才初, 郑志东, 等. 鹤上三车道小净距隧道爆破振动测试与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1882—1887.
GONG Jian-wu, XIA Cai-chu, ZHENG Zhi-dong, et al. Measurement and analysis of blasting vibration in Heshang three-lane tunnels with small clear space[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(9): 1882—1887.
- [6] 于建新, 陈卫忠, 杨建平, 等. 上下交叉隧道爆破振动控制技术[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 2): 445—452.
YU Jian-xin, CHEN Wei-zhong, YANG Jian-ping, et al. Study of blasting vibration control technology of up and down cross tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(Supp. 2): 445—452.
- [7] 邹飞, 唐旭, 方正峰. 基于非对称三角模糊数的爆破振动速度预测公式参数确定方法研究[J]. 公路, 2016, (7): 140—145.
ZOU Fei, TANG Xu, FANG Zheng-feng. Study of determining method for parameters of forecasting formula of blasting vibration velocity based on asymmetric triangular fuzzy numbers[J]. **Highway**, 2016, (7): 140—145.
- [8] 孙伟刚, 王成武, 陈建. 两水隧道软岩铣挖法施工技术[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(2): 170—173.
SUN Wei-gang, WANG Cheng-wu, CHEN Jian. Milling excavation technique of Liangshui tunnel embedded in soft rocks[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2011, 48(2): 170—173.
- [9] 赵慧君, 李永. 铣挖施工技术在大断面软岩隧道施工中的应用[J]. 公路, 2016, (8): 263—265.
ZHAO Hui-jun, LI Yong. Application of milling excavation construction technology in soft rock tunnel construct with large section[J]. **Highway**, 2016, (8): 263—265.
- [10] 谢雄刚, 刘锦伟, 王磊, 等. 静态膨胀剂膨胀开裂突出煤层的测试研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(10): 2620—2625.
XIE Xiong-gang, LIU Jing-wei, WANG Lei, et al. Testing study of expanding and cracking outburst coal seam by the static expansion agent[J]. **Journal of China Coal Society**, 2016, 41(10): 2620—2625.
- [11] 徐颖, 程玉生. 高压气体爆破破煤机理模型试验研究[J]. 煤矿爆破, 1996, (3): 1—4, 15.
XU Ying, CHENG Yu-sheng. Experimental study on the mechanism of broken coal model of high pressure gas blasting[J]. **Coal Mine Blasting**, 1996, (3): 1—4, 15.
- [12] 郭志兴. 液态二氧化碳爆破筒及现场试爆[J]. 爆破, 1994, (3): 72—74.
GUO Zhi-xing. Field blasting test of liquid carbon dioxide cartridge[J]. **Blasting**, 1994, (3): 72—74.
- [13] 袁捷, 杜浩, 凌建明, 等. 镐头机拆除工况下机场水泥道面的力学行为[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(8): 1225—1230.
YUAN Jie, DU Hao, LING Jian-ming, et al. Mechanical behaviors of airfield Portland cement concrete slabs in process of breaking with pickaxe machine[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2013, 41(8): 1225—1230.
- [14] 程月红, 张厚斌. 支撑下硬质岩非爆破开挖施工技术[J]. 施工技术, 2015, 44(13): 80—82, 91.
CHENG Yue-hong, ZHANG Hou-bin. Non-lasting excavation construction technology in hard rock under supports[J]. **Construction Technology**, 2015, 44(13): 80—82, 91.
- [15] 徐颖, 梦益平, 吴德义. 爆破工程[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2014.
XU Ying, MENG Yi-ping, WU De-yi. **Blasting Engineering**[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2014.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB6722—2014 Safety regulations for blasting[S]. Beijing: China Standard Press, 2014.