

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2024.05.027

引用格式:任小平.聚能水压爆破在隧道施工中的应用现状及优化[J].公路与汽运,2024,40(5):151-156.

Citation:REN Xiaoping.Application status and optimization of shaped charge hydraulic blasting in tunnel construction[J].Highways & Automotive Applications,2024,40(5):151-156.

聚能水压爆破在隧道施工中的应用现状及优化*

任小平

(中铁建云南投资有限公司,云南昆明 610040)

摘要:目前岩质隧道施工仍以钻爆法为主,这种常规爆破方法存在超欠挖、围岩损伤、爆破振动大和隧道粉尘含量高等问题。聚能水压爆破技术结合聚能爆破和水压爆破的优点,能弥补常规爆破的缺陷。文中结合实际案例,对不同爆破方法进行对比分析,结果表明聚能水压爆破不仅能解决常规爆破存在的问题,还能提升隧道掘进效率、用于特殊地层、节约施工成本。

关键词:隧道;聚能水压爆破;常规爆破;应用效果

中图分类号:U455.4

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2024)05-0151-06

据统计,中国隧道数量约占全球隧道数量的 50%^[1]。截至 2020 年底,投入运营的铁路隧道约 16 800 条,总长约 19 600 km;城市地铁运营总里程约 7 660 km;公路隧道约 19 070 条,总里程约 18 966 km^[2-4]。以目前趋势来看,隧道工程建设仍将快速稳步发展,寻求高效的隧道掘进技术是促进隧道建设的有力途径。目前,岩质隧道施工仍以钻爆法为主,该方法具有施工简便、成本低、适应力强等优点^[5]。但这种常规爆破存在超欠挖、围岩损伤、影响周边建筑物和隧道粉尘含量高等问题^[6]。聚能水压爆破结合聚能爆破和水压爆破的优点,能优先在炮孔连线轮廓上生成裂缝,有利于定向破碎岩石,从而控制隧道超欠挖,降低对围岩的损伤,且可利用水的缓冲作用和雾化作用减少爆炸产生的振动和粉尘^[7]。根据相关试验、数值模拟研究结果,聚能水压爆破具有提升隧道掘进效率、提高光面爆破效果、减少围岩破坏、降低对周边环境扰动、节省成本和改善隧道施工环境等作用,在隧道工程施工中逐渐得到应用。

1 聚能水压爆破技术原理

聚能爆破技术利用聚能效应将爆炸产物集聚起来,提高炸药的能量集度,并利用爆炸产物的运动方向与药管垂直或大致垂直的规律^[8],使岩体在应力

波和爆轰气体压力共同作用下沿射流方向形成裂缝^[9]。如图 1 所示,钢板侵彻试验表明锥形槽及金属罩结构可以明显提高对钢板的侵彻深度^[10]。

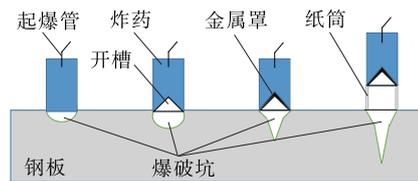


图 1 聚能效应试验

水介质在爆破中具有储能、缓冲、水楔作用,水压爆破与常规爆破的不同之处在于利用水的不可压缩性储存爆炸能并均匀传递至炮孔围岩壁上;由于水具有缓冲作用,能减缓爆炸产生的应力波的衰减速度,减少传播过程中能量损失,有利于岩体生成裂缝;水在爆炸气体膨胀作用下形成水楔效应和雾化作用,可进一步使裂缝扩展和贯通,降低粉尘含量^[11]。水压爆破岩石的过程见图 2^[12]。

2 聚能水压爆破技术在隧道中的应用效果

2.1 提高隧道掘进效率

聚能水压爆破产生聚能射流,伴随水楔作用,可解决常规爆破炮眼间距过密的问题^[5]。聚能水压光面爆破的周边眼间距为 80~100 cm,是常规爆破周

* 基金项目:中国铁建昆仑投资集团有限公司科技研究开发计划项目(KLTZ-KX01-2020-009);陕西省重点研发计划项目(2023-YBSF-511)

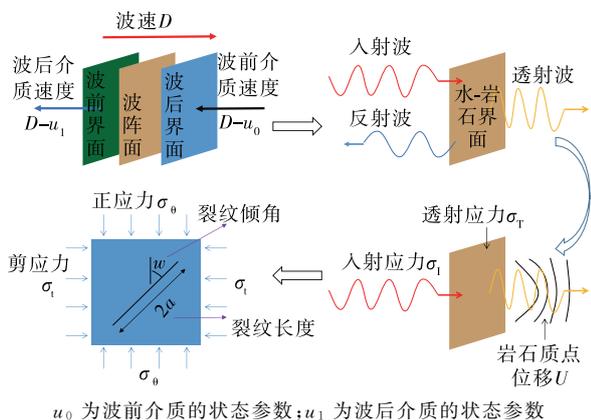


图 2 水压爆破岩石的过程^[12]

边眼间距的 2 倍,可减少钻孔数量和钻孔时间。聚能水压爆破增大了炸药装填不耦合系数,有利于能量释放,能显著增大循环进尺,缩短隧道开挖工期。与常规爆破相比,聚能水压爆破能使隧道循环进尺至少提升 10 cm,最大提升比例达 23.33%(见表 1)^[13-23]。

2.2 提升光面爆破效果

常规钻爆法掘进中存在超挖和欠挖情况,掌子面成型较差,需要进行二次爆破或增加混凝土喷射量。采用聚能水压爆破,隧洞轮廓面相对平整,二次施工情况得到有效控制。文献[24]的研究结果表

表 1 聚能水压爆破与常规爆破的循环进尺对比

隧道名称	围岩	围岩等级	隧道循环进尺/m		聚能水压爆破的提升比例/%
			常规爆破	聚能水压爆破	
镜岭隧道	中风化凝灰岩	Ⅲ级	3.37	3.55	5.34
紫林山隧道	中风化白云岩	Ⅲ级	3.00	3.70	23.33
双山隧道	石英砂岩	Ⅳ、Ⅴ级	2.70	2.92	8.15
轿顶隧道	白云岩	Ⅲ、Ⅳ级	3.20	3.50	9.38
关山隧道	砂岩夹砂质泥岩	Ⅳ、Ⅴ级	3.20	3.45	7.81
自一里隧道	石灰岩	Ⅲ、Ⅳ级	3.80	3.90	2.63
两当隧道	碳质板岩	Ⅳ级	3.02	3.34	10.60
金瓶岩隧道	砂岩、板岩	Ⅳ级	3.10	3.30	6.45
杨梅山隧道	凝灰岩	Ⅱ级	3.90	4.20	7.69
崮山隧道	流纹斑岩	Ⅲ级	3.01	3.35	11.30
罗家山隧道	灰岩、白云岩	Ⅲ、Ⅳ级	3.80	3.95	3.95

明,聚能水压爆破在提高隧道轮廓平整度方面具有显著优势(见图 3)。

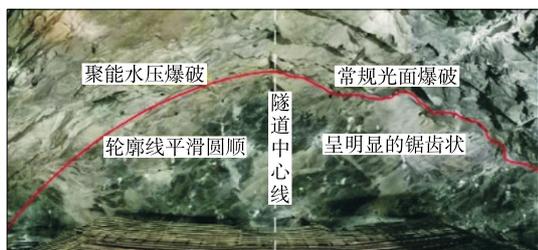
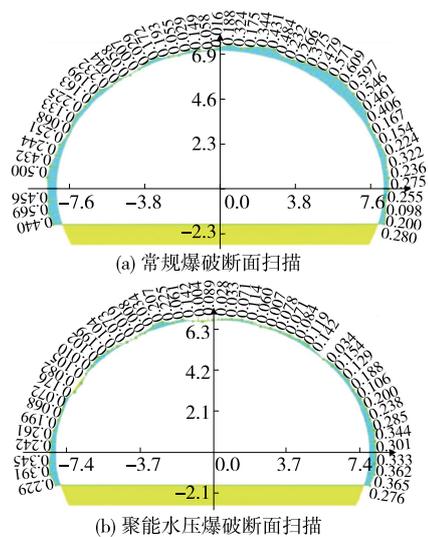


图 3 聚能水压爆破与常规光面爆破的爆破效果对比

文献[25]采用三维激光隧道断面仪对常规爆破断面和聚能水压爆破断面进行扫描,结果(见图 4)显示:采用聚能水压爆破的隧道,超欠挖情况得到明显改善;相比于常规爆破,聚能水压光面爆破最大超挖量减少 25%,平均超挖面积减少 46.8%,可有效减少湿喷混凝土用量。



坐标圆心为隧道两侧起拱线中心;横坐标为隧道截面水平方向;纵坐标为隧道截面竖直方向;周围数据为隧道超欠挖量

图 4 聚能水压爆破与常规光面爆破的断面扫描结果对比(单位:m)

2.3 提高炸药利用率

水介质受到爆轰气体作用时会产生水楔效应,并能更好地传递爆破能量,提高聚能水压爆破的炸药能量利用率。根据镜岭隧道爆破统计数据,周边眼聚能水压爆破和传统光面爆破的炸药用量分别为 0.8 kg/m^3 、 0.9 kg/m^3 ,每循环进尺可节省炸药 31.5 kg 、 11.0% ^[13]。紫林山隧道炮眼孔深为 3.5 m ,光面爆破和聚能水压爆破的实际有效进尺分别为 $3.1\sim 3.3 \text{ m}$ 、 $3.2\sim 3.4 \text{ m}$,炮眼利用率分别为 91.4% 、 94.2% ^[14]。可见,聚能水压爆破技术能使炸药能量充分作用于围岩,在炮眼深度不变的情况下利用较少的炸药增大循环进尺,从而提高炮眼利用率。图 5 为常规爆破与聚能水压爆破的炸药消耗量及炮眼利用率对比^[13-28]。

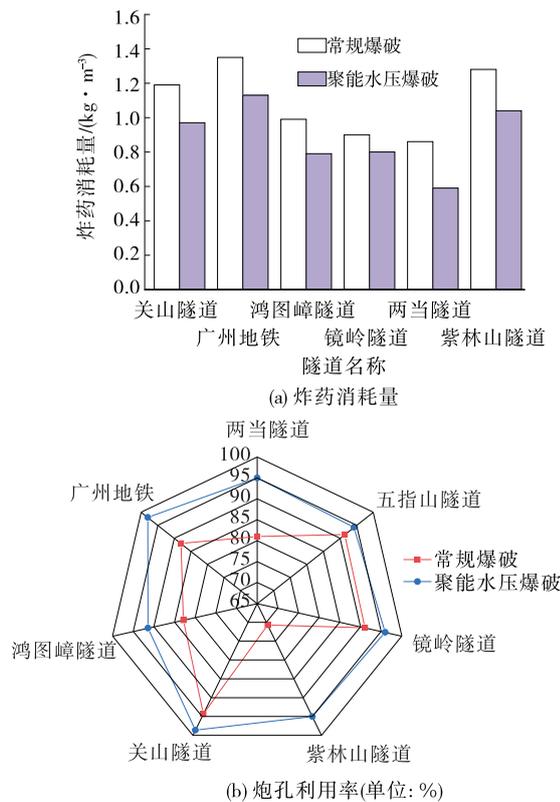


图 5 不同爆破方法的炸药消耗量和炮孔利用率对比

2.4 降低粉尘含量

水在爆破气体膨胀作用下会雾化,施工中可利用雾化水吸附爆破围岩产生的粉尘。聚能水压爆破和常规爆破的通风时间见图 6,聚能水压爆破的降尘作用显著,可缩短爆破后通风排除烟尘的时间^[14-30]。

2.5 减弱爆破振动

文献[31]对桐梓隧道爆破振动进行测试,结果

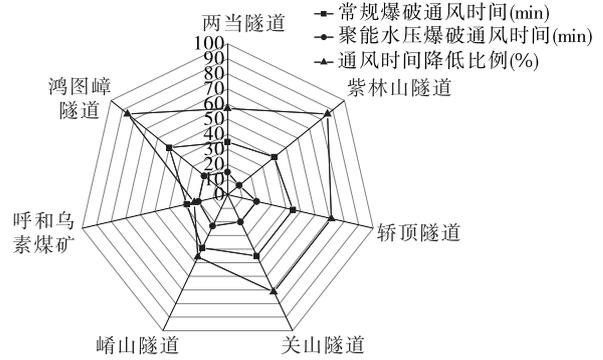


图 6 聚能水压爆破与常规爆破的通风时间对比

显示:传统爆破和聚能水压光面爆破引起的振动峰值速度分别为 0.57 cm/s 、 0.20 cm/s ,聚能水压光面爆破的降振率达 64.91% 。林家岙隧道与既有营运隧道黄山隧道并行,较大爆破振动会对邻近既有隧道造成严重影响,为此,采用聚能水压爆破技术进行施工。现场采用 TC-4850 爆破测振仪分别对常规爆破和聚能水压爆破的振速进行测试,结果(见图 7)表明:常规爆破方式下 Y 方向振动速度最大值为 1.8 cm/s ,不满足规范要求,而聚能水压爆破能使振动速度降低 45% 以上,即使开挖进尺增大,振动速度仍能控制在 1.8 cm/s 以下^[32]。聚能水压爆破能有效降低爆破振动。

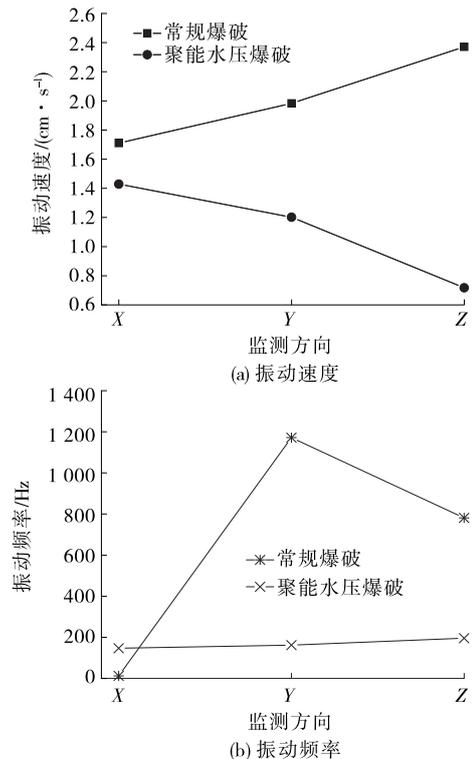


图 7 聚能水压爆破与常规爆破振动对比

此外,在城市地铁施工中经常面临复杂的工程

环境,周边存在各种管线和既有建筑物,常规爆破引起的振动、噪声和开挖效果等均难以达到城市施工要求。深圳市城市轨道交通 8 号线施工中,为避免对周边居民和商业街造成影响,采用聚能水压爆破替代常规爆破,应用效果表明电子数码雷管结合聚能水压爆破能使爆破振动降低 30%~60%,达到爆破振动速度不大于 1 cm/s 的施工要求^[33]。

2.6 用于特殊地层

在特殊地质情况下,聚能水压爆破取得了良好爆破效果。文献[34]的研究表明,在节理裂隙发育的围岩中实施聚能水压爆破,能减小对围岩的扰动,有利于保障围岩的稳定。薄层水平围岩在爆破扰动较大时会造成围岩拱顶岩块掉落、围岩失稳等。聚能水压爆破能降低对洞身径向的影响,减少爆破后拱顶掉块现象,且聚能水压爆破的应力波能沿轮廓线有效传播,衰减作用较小。聚能水压爆破在破碎岩层和薄层水平岩层中的应用见图 8^[23,33]。

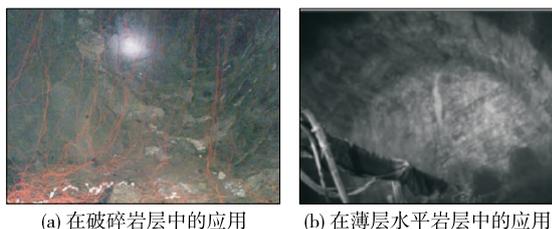


图 8 聚能水压爆破技术应用于特殊岩层

2.7 降低施工成本

聚能水压爆破除在技术上具有优越性外,在经济效益方面也具有较大优势,主要体现在爆破材料、支护成本和生产效率等方面。如前所述,聚能水压爆破的周边眼间距较大,能大幅度减少钻孔数量、钻孔时间和炸药用量;随着超欠挖现象得到有效控制,隧道喷射混凝土使用量明显减少;各工序的时间减少使生产效率大幅度提升。表 2 为聚能水压爆破与常规爆破每延米费用对比,聚能水压爆破不仅能减少钻孔时间,还能节约钻孔费用^[35]。

表 2 聚能水压爆破与常规爆破每延米费用对比

爆破方式	钻孔爆破费用/元			喷射混凝土费用/元
	钻孔	爆破	总计	
常规爆破	618.09	322.32	940.41	16 572.11
聚能水压爆破	317.96	274.53	592.49	15 485.63
费用减少/元	300.13	47.79	347.92	1 086.48
节约比例/%	48.56	14.83	37.00	6.56

3 聚能水压爆破效果的影响因素及优化

3.1 影响爆破效果的因素

相邻炮孔的炸药同时爆炸时,产生的应力波向围岩内传播,在炮孔之间岩体中发生干涉,从而产生拉伸应力波;当应力超过围岩的抗拉强度时,岩石发生破碎并形成裂隙,然后爆轰气体膨胀,进一步使裂缝贯通(见图 9)。

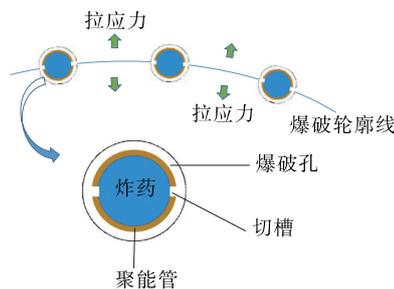


图 9 掌子面围岩聚能爆破原理

施工中,如果掌子面上周边眼炮孔未在同一条开挖轮廓线上、相邻炮孔聚能槽方向不一致,均会影响爆破效果,造成隧道开挖轮廓线不平顺或超欠挖;如果水袋设置不合理,会降低水楔效应的作用,影响岩体裂缝的延伸和贯通,而且会失去水雾除尘效果;如果炮泥长度不足或堵塞不密实,空气排出炮孔,会影响爆破效果。有研究表明,钻孔精度、聚能槽方向、测量放线、水袋放置、炮泥封堵等是影响现场爆破效果的主要因素,在所有影响因素中其影响高达 89%(见图 10)^[36]。

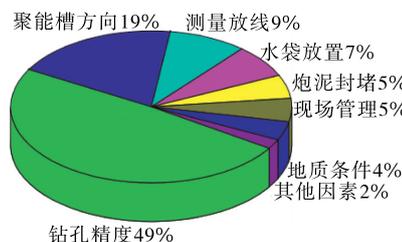


图 10 聚能水压爆破影响因素占比

3.2 聚能水压爆破技术参数的优化

聚能水压爆破技术在实际工程运用中取得了良好效果,但目前对该技术的理论研究较少。从已有文献来看,对聚能水压爆破技术参数的优化主要通过数值模拟进行。

胡东荣以套管切缝聚能爆破法为基础,模拟研究聚能水压光面爆破在不同切缝宽度和壁厚条件下的爆破效果。结果表明:达到最佳爆破效果时切缝宽度为 4 mm,但壁厚大小与炸药充填是否耦合有

关,聚能管内外径及切缝宽度一致的情况下,聚能管与炸药是否耦合时最优壁厚分别为 3 mm、4 mm(见图 11)^[25]。

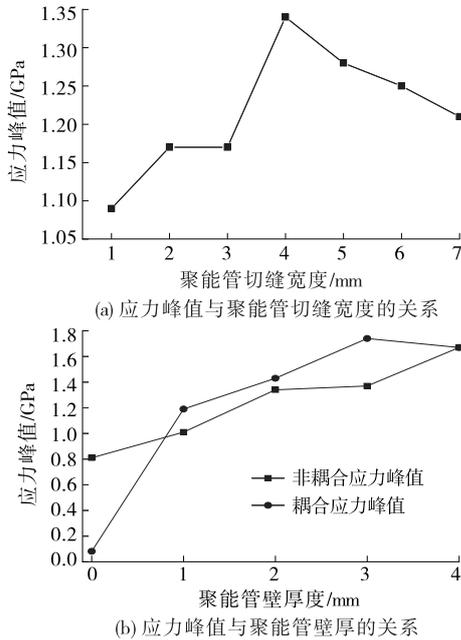


图 11 应力峰值与聚能管参数的关系

王汪洋建立双孔爆破模型,分析不同炮孔间距下聚能水压爆破与常规爆破的爆破效果。结果表明:常规爆破的最佳孔距为 50 cm,聚能水压爆破的最佳孔距可扩大至 70 cm;炮孔间距为 50 cm 时,两种装药结构均能形成粉碎区贯通,而孔距增大至 70 cm 时,只有聚能水压爆破可使围岩贯通(见图 12)^[32]。但该模型中双孔间距设置不连续,需进

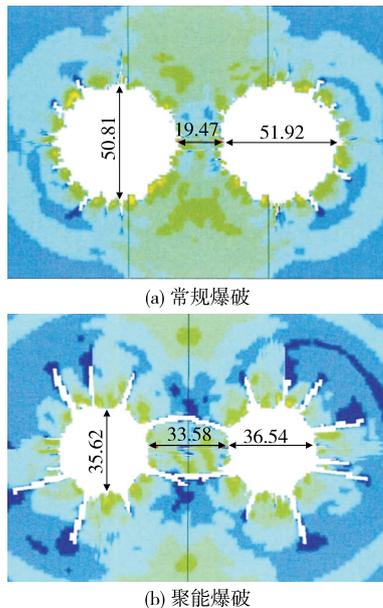


图 12 炮孔间距 70 cm 时不同爆破技术下围岩的破坏范围(单位:cm)

一步加密间距进行更深入的研究。

冯加强针对 IV、V 级围岩分别建立模型,通过图 13 所示研究方法分析不同周边眼间距及装药集度下聚能水压爆破的爆破效果。结果表明:围岩等级为 IV 级时,周边眼间距取 60 cm,装药集度取 0.55 kg/m,能达到较好爆破效果;在 V 级围岩中,周边眼间距取 80 cm,装药集度取 0.48 kg/m,开挖轮廓面较平顺,且围岩受到爆破的扰动较小^[37]。

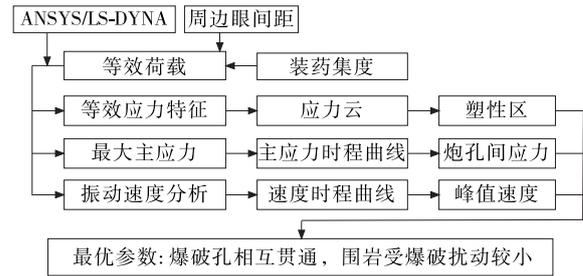


图 13 炮孔间距和炸药集度对聚能水压爆破效果的影响分析

计算机分析软件可以对复杂的工程项目进行模拟,弥补现场试验条件的不足。利用数值模拟方法可对聚能水压爆破参数进行优化^[38]。但目前的研究较少,虽然对聚能管的切缝宽度和壁厚、炮孔间距、炸药集度进行了研究,但炸药的不耦合系数和水等关键性参数的最优取值仍然具有不确定性,且存在最优参数取值有偏差和影响因素考虑不全面等问题,需进一步对聚能水压爆破参数进行优化。

4 结论

(1) 聚能水压爆破中聚能效应在特定方向产生高温、高压、高速聚能射流,使岩体内产生应力集中而生成裂缝;水介质具有储能、缓冲和水楔作用,可降低爆破振动,减少粉尘。

(2) 与常规爆破相比,聚能爆破具有开挖轮廓线平顺、超欠挖得到控制、循环进尺增大、粉尘减少、对围岩扰动减小等优点。目前,聚能水压爆破在 II~V 级围岩隧道中均有应用,在 IV、V 级破碎围岩和薄层水平岩层等特殊地质中取得了显著效果。

(3) 聚能水压爆破技术问世时间较短,缺乏相应技术标准。聚能水压爆破效果受钻孔精度等因素影响,需进一步规范操作来提升爆破质量。对于爆破参数的优化主要利用数值模拟软件 ANSYS/LS-DYNA,缺乏解析法及试验法的共同论证,需制定相应技术标准来应对复杂多变的工程环境。

(4) 已有工程应用结果表明聚能水压爆破在各方面都优于常规爆破,已成为隧道工程开挖技术发展的重要方向,随着理论的发展和参数的优化,其在隧道工程建设中将逐渐得到更广泛的应用。

参考文献:

- [1] 严金秀.世界隧道工程技术发展主流趋势:安全、经济、绿色和艺术[J].隧道建设(中英文),2021,41(5):693-696.
- [2] 田四明,王伟,巩江峰.中国铁路隧道发展与展望(含截至2020年底中国铁路隧道统计数据)[J].隧道建设(中英文),2021,41(2):308-325.
- [3] 叶晓平,冯爱军.中国城市轨道交通2020年数据统计与发展分析[J].隧道建设(中英文),2021,41(5):871-876.
- [4] 洪开荣,冯欢欢.中国公路隧道近10年的发展趋势与思考[J].中国公路学报,2020,33(12):62-76.
- [5] 徐世祥,王汪洋,韦汉,等.隧道聚能水压控制爆破技术研究现状与展望[J].科技创新与应用,2019(26):1-4+8.
- [6] 钟放平.公路隧道超欠挖原因分析及控制措施[J].西部探矿工程,2007,19(12):172-173.
- [7] 何广沂,段昌炎,荆山,等.节能环保工程水压爆破研究与应用[J].中国工程科学,2003,5(9):43-48.
- [8] 李林.东鞍山铁矿聚能不耦合装药预裂爆破试验研究[D].鞍山:辽宁科技大学,2014.
- [9] 谢华刚.复合型切缝药包控制爆破应用分析[M].武汉:武汉大学出版社,2017.
- [10] 李必红.椭圆双极线型聚能药柱爆炸理论及预裂爆破技术研究[D].长沙:中南大学,2013.
- [11] 闫海伦.长大山岭隧道聚能水压光面爆破研究与应用[D].青岛:山东科技大学,2020.
- [12] 邵珠山,杨跃宗,米俊峰,等.水压爆破中波衰减规律及致裂机理的理论研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2017,49(6):820-826.
- [13] 陈航,孙振华,芦杰,等.公路隧道周边眼聚能水压爆破技术应用[J].山西建筑,2019,45(21):124-126.
- [14] 危超.紫林山隧道工程聚能水压爆破[J].交通世界(上旬刊),2019(1):166-167+272.
- [15] 李应涛.水压聚能爆破技术在隧道施工中的应用[J].黑龙江交通科技,2018,41(6):192-193.
- [16] 拜晓亮.聚能水压光面爆破技术在隧道施工中的应用[J].中国高新科技,2020(12):51-52.
- [17] 周亦玲,刘鹏舟,李养成.聚能水压光面爆破技术在关山隧道施工中的应用研究[J].施工技术,2018,47(16):44-48.
- [18] 苏黎明.聚能水压爆破在水平薄层围岩隧道中的应用价值研究[J].建筑技术开发,2021,48(2):55-57.
- [19] 李峰.聚能水压爆破在公路隧道中的应用研究[J].低温建筑技术,2018,40(7):74-76+83.
- [20] 刘海波,白宗河,刘学攀,等.隧道掘进聚能水压光面爆破新技术与应用[J].工程爆破,2017,23(1):81-84.
- [21] 葛伟.长大隧道聚能水压光面爆破施工技术[J].工程建设与设计,2021(1):153-154+157.
- [22] 王军.聚能水压光面爆破技术在崮山隧道施工中的应用研究[J].铁道建筑技术,2017(5):81-84.
- [23] 刘运泽.聚能水压爆破在水平薄层围岩隧道中的应用[J].施工技术,2020,49(8):110-113.
- [24] 崔长贵.聚能水压爆破技术在渝黔高速扩能项目应用分析[J].中国水能及电气化,2022(1):21-26+33.
- [25] 胡东荣.大断面隧道聚能水压光面爆破机理与效果研究[D].杭州:浙江科技学院,2019.
- [26] 王涛.聚能水压光面爆破技术在隧道施工中的应用[J].四川建材,2019,45(4):94-95+98.
- [27] 张战友.隧道聚能水压爆破新技术研究[J].四川建材,2021,47(2):116-118.
- [28] 邹瑾.聚能水压爆破控制技术在城市地铁中的应用[J].价值工程,2017,36(7):134-136.
- [29] 张晓军.聚能水压光面爆破与水压爆破配合施工应用[J].公路交通科技(应用技术版),2017,13(8):202-203.
- [30] 李伟,袁绍国,高文磊.聚能水压光面爆破在岩巷掘进中的研究[J].煤炭技术,2019,38(6):25-27.
- [31] 熊成宇,魏忠锋,赵全江.隧道聚能水压光面爆破技术原理及其应用[J].施工技术,2019,48(18):130-133.
- [32] 王汪洋.隧道聚能水压控制爆破岩机理与参数优化研究[D].南宁:广西大学,2019.
- [33] 褚长焜.复杂苛刻环境下爆破减振技术的应用[J].工程技术研究,2021,6(7):135-137.
- [34] 沈显才.地铁暗挖隧道聚能水压光面爆破新技术应用分析[J].铁道建筑技术,2017(5):102-105+123.
- [35] 刘海波.聚能水压光面爆破新技术在成兰铁路隧道施工中的应用[J].现代隧道技术,2019,56(2):182-187.
- [36] 常树才.聚能水压光面爆破技术在官田隧道的研究与应用[J].建筑技术开发,2019,46(18):89-91.
- [37] 冯加强.聚能水压光面爆破中围岩动力响应特性研究[D].武汉:华中科技大学,2019.
- [38] 黎胜根,向宙,肖正航,等.施工隧道多传感器融合定位方法研究[J].公路与汽运,2023(4):143-148+152.

收稿日期:2023-06-27