

文章编号: 1006 - 2106(2013) 04 - 0074 - 05

瓦斯隧道的地质勘察问题探讨^{*}

熊灵阳^{**}

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要: 研究目的: 瓦斯爆炸是隧道施工中最严重的灾害之一, 危害性极大。而瓦斯隧道的地质勘察中需要收集哪些指标、做什么试验项目, 相关规范、规程虽然有要求, 但地质勘察人员运用起来还是模糊不清, 有必要进行进一步的研究, 提出更明确的操作要求。

研究结论: 地质勘察工作中应抓住影响瓦斯爆炸的三个条件来进行。在收集既有资料的基础上, 进入矿井并在采工作面进行实测瓦斯压力、吨煤瓦斯含量、煤的坚固性系数、瓦斯放散初速度、通风条件瓦斯浓度值等参数, 同时进行必要的深孔钻探, 在深孔内进行气体收集分析和测试瓦斯含量、涌出量、压力等指标, 室内以石门揭煤公式计算出隧道瓦斯涌出量, 进行隧道瓦斯工区、含瓦斯地段的等级划分, 为隧道设计提供详细的指标, 并有针对性地提出施工措施建议。

关键词: 瓦斯隧道; 地质勘察

中图分类号: U452.1 **文献标识码:** A

Discussion on Problems of Geological Exploration for Gas Tunnels

XIONG Ling - yang

(China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd , Chengdu , Sichuan 610031 , China)

Abstract: Research purposes: Gas explosion is one of the most severe disasters in construction of railway and road tunnels and it can produce the extremely serious consequence. Although the relative norms and regulations have provided the instructions on what parameters should be collected and what kinds of experiments should be done during the geological exploration , but in practice , it still remains vague. So it is necessary to do the further study on it and present the more specific operational requirements.

Research conclusions: The geological exploration should be conducted around the three conditions of having effects on the gas explosion. Based on existing data , the parameters , such as the gas pressure , gas content of per ton of coal , firmness coefficient of coal , initial velocity of gas diffusion and gas concentration under ventilation condition , have to be measured on the working face. At the same time , the necessary deep bore drilling should be conducted to collect the gas in the deep bore and measure the gas content , gas emission volume and gas pressure. The cross - hole uncovering coal formula is used to calculate the gas emission volume in tunnel for grading the gas working zone and gas area. All of these works can provide the parameters for the tunnel design and construction so that the relative measures can be taken.

Key words: gas tunnel; geological exploration

近年来, 随着国家贫困山区的成片扶贫开发建设政策的实施, 使山区道路工程建设越来越多, 铁路、公路建设中隧道工程比例也越来越大, 而瓦斯隧道成为控制铁路、公路安全建设的关键和重点工程。据初步

统计, 我集团公司从 2005 年至今为止, 承担铁路、公路瓦斯隧道近 100 座, 其中低瓦斯隧道占 70%, 高瓦斯隧道占 30%。

瓦斯爆炸是铁路、公路隧道施工中严重的灾害之

^{*} 收稿日期: 2012 - 10 - 22

^{**} 作者简介: 熊灵阳, 1965 年出生, 男, 教授级高级工程师。

一 据有关资料,1959年1月27日滇黔铁路岩脚寨隧道发生瓦斯爆炸,死亡34人;1994年4月3日达成铁路炮台山隧道发生浅层天然气爆炸,死亡13人;2005年12月22日都汶高速公路董家山隧道发生瓦斯爆炸,死亡44人;2010年成简快速公路龙泉上2号隧道发生天然气燃烧,损坏洞内机械设备3台。瓦斯爆炸灾害损失极其严重,后果极为严重,因此作为地质勘察人员,在瓦斯隧道勘察中究竟该收集些什么资料?哪些指标是必须提供给设计专业?大多数还不是很清楚,本文通过几个瓦斯隧道项目的勘察体会,探索勘察中应主要注意的几个问题。

1 瓦斯的定义及特性

根据《铁路瓦斯隧道技术规范》(以下简称《规范》),从煤(岩)层内逸出的各种有害气体的总称,叫瓦斯,主要成分是甲烷(CH_4),还含有少量的硫化氢(H_2S)等,是一种无色、无味、无臭、本身无毒的气体,比重是0.554,仅为空气比重的一半,密度 0.716 g/m^3 ,分布不均匀,但它常常赋存于开挖隧洞的顶部,当空气中瓦斯浓度增大,氧气浓度相对减少,可发生爆炸,瓦斯浓度大于19%~43%、氧含量降到17%~12%时能使人呼吸困难、窒息死亡。

瓦斯具有三种基本特性:快速扩散性、可燃性、可爆炸性。

1.1 快速扩散性

瓦斯扩散速度比空气大1.6倍,很容易储存于煤层、裂隙、覆盖层较厚的断裂带和松散的岩层中,瓦斯的放出主要表现为:渗出、喷出、突出三种形式。

1.1.1 瓦斯渗出

在非煤系地层岩石裂隙中吸附的瓦斯,由于浓度低、压力小,隧道开挖时瓦斯缓慢、均匀、持续渗出,延续时间长,渗出时常常发出嘶嘶的声音。

1.1.2 瓦斯喷出

对于非煤系地层中赋存的“透镜状”、“鸡窝状”瓦斯,隧道开挖时瓦斯由岩层裂隙的空洞中喷出,包括短时间或长时间喷出,通常喷出时有较大的响声和压力。

1.1.3 瓦斯突出

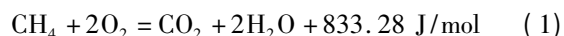
在煤系地层中赋存的大量瓦斯,浓度高、压力大,隧道开挖时瓦斯突然猛烈突出,时间由几分钟到几小时,瓦斯突出时有巨大的轰响声和机械效应(冲击力),常常会同时夹带煤块和岩石。

1.2 可燃性

瓦斯最主要的特性就是能燃烧,瓦斯与火接触并不立即燃烧,待吸收相当热量后才开始燃烧;瓦斯浓度低,燃烧时火焰为蓝色,随着浓度的增大,燃烧颜色变浅,当浓度达到5%时呈淡青色。

1.3 可爆炸性

瓦斯燃烧时遇到障碍而受压缩,立即转燃烧为爆炸,爆炸时体积扩大4倍以上,空气中充满灼热二氧化碳,几乎没有氧气。瓦斯爆炸是一种热-链式反应(链锁反应),当爆炸混合物吸收一定因引火源给予的热能后,反应分子的链立即断裂,离解成两个或两个以上的游离基(自由基)。这种游离基具有很大的化学活性,成为反应连续进行的活动中心。在适合条件下,每个游离基又进一步分解,再产生两个或两个以上的游离基,这样循环往复,游离基越来越多,化学反应速度越来越快,最后发展为爆炸式的氧化反应。



瓦斯发生上述爆炸,必须具备三个条件:瓦斯浓度、氧气浓度、火源温度。

1.3.1 瓦斯浓度

空气瓦斯浓度为5%~16%时,遇高温火源能引起爆炸,而瓦斯浓度为9.5%时,氧气与瓦斯发生完全反应,爆炸威力最大,当浓度大于16%时,遇火源既不会爆炸也不会燃烧;由此看出,瓦斯爆炸界限浓度是5%。

1.3.2 氧气浓度

空气中氧气浓度降低时,瓦斯爆炸浓度界限也随之缩小,当氧气浓度减小到12%时,瓦斯失去爆炸性。

1.3.3 火源温度

火源温度是引起瓦斯爆炸的必要条件之一,瓦斯的引火温度为 $650\sim 750\text{ }^\circ\text{C}$,并随瓦斯浓度、火源性质、混合气体压力等因素而变化。洞内抽烟、电源短路引起火花、灯泡打破、违章放炮、使用烈性炸药、煤炭自燃、电石灯照明等易引起瓦斯爆炸。

2 隧道瓦斯等级的划分及超前地质预报

2.1 隧道瓦斯等级的划分

公路隧道无专业规范来划分,目前公路、铁路勘察设计多是采用《规范》中有关概念参数来划分的。

2.1.1 瓦斯隧道分类

由于影响因素多,为了施工中的安全,《规范》对瓦斯隧道没有定量指标来划分,但规定:只要隧道穿越的地层中存在瓦斯(含天然气等);无论瓦斯出现的早晚、地点位置、时间长短、涌出量大小,该隧道即定义为瓦斯隧道。瓦斯隧道可分为:低瓦斯隧道、高瓦斯隧道、瓦斯突出隧道三种类型,而瓦斯隧道类型是按隧道内瓦斯工区(第2.1.2节)的最高级确定。

2.1.2 瓦斯工区划分

瓦斯隧道工区划分根据施工组织和瓦斯设防需要,依据隧道地表进行的洞身深孔钻探检测的瓦斯绝对涌出量和瓦斯压力,并结合周边矿井、气田调查来确定。《规范》对瓦斯工区划分为四类:当全工区未检

测到瓦斯时为非瓦斯工区,当瓦斯绝对涌出量小于 $0.5 \text{ m}^3/\text{min}$ 时为低瓦斯工区,当瓦斯绝对涌出量大于 $0.5 \text{ m}^3/\text{min}$ 时为高瓦斯工区,当隧道有一处有煤层瓦斯突出危险时,即为瓦斯突出工区。是否是瓦斯突出工区,又必须同时满足四个指标:瓦斯压力大于或等于 0.74 MPa ;瓦斯放散初速度大于或等于 10 mmHg ;煤的坚固系数小于或等于 0.5 ;煤的破坏类型为Ⅲ类及以上。

2.1.3 瓦斯地段划分

《规范》中规定,不同的瓦斯地段采用不同的衬砌结构,瓦斯隧道衬砌结构须有防瓦斯的措施。因此根据吨煤瓦斯含量和瓦斯压力,又将瓦斯工区分为非瓦斯地段和瓦斯地段,瓦斯地段细分为三、二、一等级,表1中应按取较高者来提供给设计人员。

表1 瓦斯地段等级划分

地段等级	吨煤瓦斯含量/(m^3/t)	瓦斯压力/MPa
三	<0.5	<0.15
二	≥ 0.5	≥ 0.15 且 <0.74
一	—	≥ 0.74

以上划分是勘察、设计阶段采用的参数和方法。但由于施工单位在施工中,难以进行瓦斯压力和涌出量的测定,而是主要采用便携式瓦检仪及瓦斯自动检测系统,监测隧道施工中在通风条件下拱顶的瓦斯浓度,以此来管理隧道施工安全;通过实际监测到的瓦斯浓度,便能及时确定或调整设计阶段划分瓦斯工区及级别。表2列出了世界各国瓦斯矿井及隧道的分级情况。

表2 世界各国瓦斯矿井和隧道分级

国家	行业	低瓦斯	高瓦斯	评价分级标准
中国	矿井	$\leq 10 \text{ m}^3/\text{t}$	$> 10 \text{ m}^3/\text{t}$	吨煤相对瓦斯含量
		$\leq 40 \text{ m}^3/\text{min}$	$> 40 \text{ m}^3/\text{min}$	矿井绝对瓦斯涌出量
	铁路	$< 0.5 \text{ m}^3/\text{min}$	$\geq 0.5 \text{ m}^3/\text{min}$	全工区绝对瓦斯涌出量
	隧道	$< 0.15 \text{ MPa}$	$\geq 0.15 \text{ MPa}$	瓦斯压力
美国	矿井	$< 0.25\%$	$\geq 0.25\%$	通风下瓦斯浓度
英国	矿井	$< 1.25\%$	$\geq 1.25\%$	通风下瓦斯浓度
日本	矿井	$< 0.5\%$	$\geq 0.5\%$	通风下瓦斯浓度
		$< 3\%$	$\geq 3\%$	停风1小时瓦斯浓度
印度	矿井	$< 10 \text{ m}^3/\text{t}$	$\geq 10 \text{ m}^3/\text{t}$	吨煤相对瓦斯含量
德国	矿井	$< 20 \text{ m}^3/\text{t}$	$\geq 20 \text{ m}^3/\text{t}$	吨煤相对瓦斯含量
波兰	矿井	$< 15 \text{ m}^3/\text{t}$	$\geq 15 \text{ m}^3/\text{t}$	吨煤相对瓦斯含量
前苏联	矿井	$< 10 \text{ m}^3/\text{t}$	$\geq 10 \text{ m}^3/\text{t}$	吨煤相对瓦斯含量
中国台湾	铁路隧道	$< 0.25\%$	$\geq 0.25\%$	通风下瓦斯浓度

表2中美国、英国、日本、台湾等均采用瓦斯浓度来进行分级,这与我国隧道施工中用便携式瓦检仪及瓦斯自动检测系统监测瓦斯浓度,以此来管理施工安

全是一致的。因此勘察设计中更需要引入测试瓦斯浓度的概念。

2.2 瓦斯隧道的超前地质预报

瓦斯隧道灾害后果极其严重,风险高。因此,必须在前期地质勘查的基础上,采取直观、准确的超前探测预报,从而评价隧道瓦斯的严重程度及对工程的影响,及时确定或调整勘察设计阶段划分的瓦斯工区级别,修正施工方案及处理措施。可分为煤层超前探测和揭煤前瓦斯突出危险性预测。

2.2.1 煤层超前探测

用钻探法进行煤层超前预报,钻机应采用防爆型,钻孔直径应大于 75 mm ,超前钻孔布置:在距煤层 $15 \sim 20 \text{ m}$ 的非煤系地层中布1孔进行初探,在距初探煤层位置 10 m 处的开挖工作面上布置3个孔,并取样。

超前钻探主要起到三个方面的预报作用:

(1) 探测瓦斯:通过在掌子面上打超前钻孔可测试瓦斯浓度,有瓦斯喷出时应进行瓦斯浓度测试;

(2) 揭露煤层:通过超前钻探能准确预见前方煤层的出露位置、煤层厚度、走向、与隧道关系等;

(3) 收集并掌握钻孔过程中瓦斯动力现象。

2.2.2 揭煤前瓦斯突出危险性预测

有瓦斯突出工期施工中,在距初探煤层垂距 $3 \sim 5 \text{ m}$ 处的开挖工作面进行突出危险性预测,先是在工作面打 $2 \sim 3$ 个钻孔,然后实测瓦斯压力、取煤样测坚固性系数、瓦斯放散初速度、测量钻屑质量等指标,计算瓦斯突出危险性预测指标的临界值,采用瓦斯压力法、综合指标法、钻屑指标法、钻孔瓦斯涌出初速度法、“R”指标法等两种以上方法来预测;在钻孔中如果出现顶钻、夹钻、喷孔等现象时,该工作面直接视为突出危险工作面。无实测值时可参照表3。

表3 突出危险性预测指标临界经验值

预测类型	预测方法	预测指标	突出危险性临界值
石门揭煤突出危险性预测	瓦斯压力法	P/MPa	0.74
	综合指标法	D	0.25
		K	20(无烟煤)、15(其他煤)
	钻屑指标法	$\Delta h_2/\text{pa}$ $K_1/[\text{mL}/(\text{g} \cdot \text{min}^{1/2})]$	160(湿煤)、200(干煤) 0.4(湿煤)、0.5(干煤)
煤巷开挖工作面突出危险性预测	钻孔瓦斯涌出初速度法	Q	4
	“R”指标法	R_m	6
	钻屑指标法	$K_1/[\text{mL}/(\text{g} \cdot \text{min}^{1/2})]$ 最大钻屑量/(kg/m)	0.4(湿煤)、0.5(干煤) 6

3 瓦斯隧道的地质勘察重点

3.1 收集、调查、测试工作重点

(1) 隧道穿越区内有关矿井、气田瓦斯赋存、突出、爆炸的实测资料和历史记载。

(2) 隧道穿过的地质构造、地层岩性及时代、各类岩层及煤层的分布里程、煤的层数、每层煤厚度、倾角、隧道穿越煤层的长度。

(3) 隧道的瓦斯生成来源、运移、储存、封闭条件。

(4) 煤层的主要物理性质、工业成分分析指标,特别是煤的光泽、断口性质、坚硬程度(硬度);煤层结构构造、节理发育程度、节理面性质;测试煤层密度 ρ 、挥发分 V^r 、坚固系数 f 、吨煤瓦斯含量 W_0 、瓦斯初始压力 P 、瓦斯气体密度 ρ_a 、瓦斯放散初速度 ΔP 、煤的破坏类型等指标。

根据压力-时间曲线上稳定的压力值与测定地点的大气压值之和即为瓦斯初始压力 P ,如图1所示。

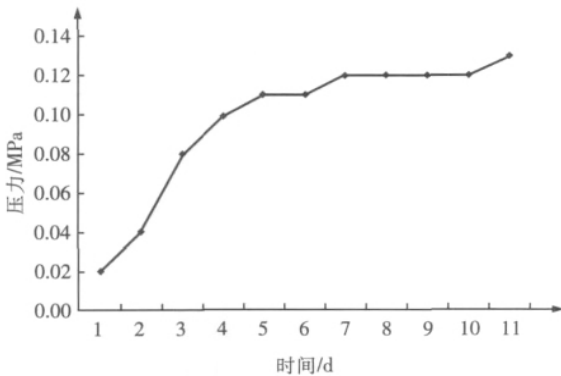


图1 煤层瓦斯压力测试(压力-时间图)

(5) 煤的自燃及煤尘爆炸性判断,煤及瓦斯突出危险性、突出危险区域预测。

对煤样进行煤尘爆炸性试验:测试抑制煤尘爆炸最低岩粉量、最大火焰长度、爆炸指数、煤吸氧量 V_d 等指标,以此判定煤层是否具有自燃及煤尘爆炸性;煤及瓦斯突出危险性预测采用表4指标。

表4 突出煤层临界值表

判别指标	煤破坏类型	瓦斯放散初速度 ΔP /mmHg	煤的坚固性系数 f	煤层瓦斯压力 P /MPa
有突出危险	Ⅲ类以上	≥ 10	≤ 0.5	≥ 0.74

当上述判定煤层有突出危险性时,须进行突出危险区域判断。隧道开挖以石门形式揭露煤层的,按表3中的综合指标法,计算 D 、 K 值来判定, $D = \left(\frac{0.0075H}{f-3}\right)(P-0.74)$ 、 $K = \frac{\Delta P}{f}$,当2个值全部满足表3中 D 、 K 临界值要求时,即判断为突出危险区域,否

则为突出威胁区域。

(6) 煤层瓦斯带和瓦斯风化带分布位置划分。

煤层中瓦斯由地下深部向地表运移,空气和表土中其他气体向深部扩散,使煤层瓦斯成分随埋深呈规律性变化,瓦斯分带现象明显;因此,勘察中应进行煤层瓦斯风化带划分;煤层瓦斯风化带一般应根据煤矿采用的标准划分,当无标准时,可采用瓦斯中 CH_4 含量 $\leq 80\%$ 、瓦斯压力 ≤ 0.15 MPa,相对瓦斯涌出量 ≤ 2 m³/t标准划分。

(7) 地下水对瓦斯运移、储存的影响。

(8) 进行隧道洞身深孔钻探,在深孔中用便携式瓦斯解吸仪收集气样进行成分分析,并在现场进行瓦斯含量、吨煤瓦斯逸出(涌出)量、压力测试工作。在既有矿井工作面测试瓦斯浓度值。

3.2 地质报告编写重点

(1) 根据临近矿井、气田情况评述煤层、瓦斯的分布情况,进行瓦斯地质分析。

(2) 根据煤与瓦斯参数,分段分煤层预测隧道及辅助坑道的绝对瓦斯涌出量。由于隧道施工是以石门形式揭露煤层的,根据《规范》隧道瓦斯涌出量(m³/min)计算公式如下:

$$q = q_1(\text{爆落煤块瓦斯}) + q_2(\text{新暴露煤壁瓦斯}) + q_3(\text{喷射混凝土段洞壁瓦斯逸出量}) \quad (2)$$

$$\text{其中 } q_1 = \frac{V_a \rho W}{1440} \quad (3)$$

$$q_2 = A Q_0 f(t) \quad (4)$$

$$q_3 = \frac{10^5 KVS}{2P_2 \rho_a \Delta} \left[\frac{p_0^2 (e^{-2a_1} - e^{-2a_1(n+1)})}{1 - e^{-2a_1}} - np_2^2 \right] \quad (5)$$

(3) 根据煤体结构及有关参数,按照第2.1、2.2节进行煤层突出危险性预测和瓦斯隧道的瓦斯工区、含瓦斯地段的等级划分。

(4) 隧道瓦斯严重程度预测及对工程的影响、建议结构设计类型、施工技术安全管理、监测通风、施工中瓦斯浓度控制量等措施建议。

3.3 施工期地质复查工作重点

(1) 对于揭露的煤层,应取样复测煤层的瓦斯含量和其他有关参数,必要时打超前钻孔埋管实测瓦斯压力等指标。

(2) 在通风中及停风1 h用瓦斯检测仪检测瓦斯浓度,计算全巷道的瓦斯涌出量,以核实施工工区和煤系地层的瓦斯等级,及时进行必要的修正,同时修正设计和施工方案。

4 结论

瓦斯隧道安全风险极高,为减少爆炸事故的发生,

确保施工安全,地质勘察工作应抓住影响瓦斯爆炸的三个条件来进行。在调查、收集矿井、气田既有资料的基础上,应进入矿井在采工作面进行实测瓦斯压力、吨煤瓦斯含量、煤的坚固性系数、瓦斯放散初速度、通风条件瓦斯浓度值,同时在隧道洞身进行一定数量的深孔钻探,并在深孔内进行气体收集分析和现场测试孔内瓦斯含量、涌出量、压力等指标,通过计算出隧道瓦斯涌出量,进行瓦斯隧道的瓦斯工区、含瓦斯地段的等级划分,这样才能详细地提供瓦斯隧道设计需要的指标,并有针对性地提出施工措施建议。

参考文献:

- [1] TB 10120—2002,铁路瓦斯隧道技术规范[S].
TB 10120—2002, Technical Code for Railway Tunnel with Gas[S].
- [2] 国家安全生产监督管理总局,国家煤矿安全监察局.煤矿安全规程[M].北京:煤炭工业出版社,2004.
State Administration of Work Safety, State Administration of Coal Mine Safety. Safety Regulations in Coal-mine[M]. Beijing: Coal Industry Press 2004.
- [3] 铁建设[2008]105号,铁路隧道超前地质预报技术指南[S].
Railway Construction [2008] No. 105, Guidelines for Advanced Geological Prediction Technology in Railway

Tunnelling [S].

- [4] JTG/T D70—2010,公路隧道设计细则[S].
JTG/T D70—2010, Guidelines for Design of Highway Tunnel [S].
- [5] 张民庆,黄鸿健,孙国庆.铁路瓦斯隧道安全设计、施工与管理[J].现代隧道技术,2012(3):25-31.
Zhang Mingqing, Huang Hongjian, Sun Guoqing. The Safe Design, Construction and Management of Railway Tunnels with a Presence of Gas [J]. Modern Tunnelling Technology 2012(3):25-31.
- [6] TB 10304—2009,铁路隧道工程施工安全技术规程[S].
TB 10304—2009, Safety Constructional Regulations for Railway Tunnel Engineering [S].
- [7] 康小兵,许模,丁睿.隧道瓦斯灾害危险性评价初探[J].铁道工程学报,2010(5):39-42.
Kang Xiaobing, Xu Mo, Ding Rui. Discussion on Danger Assessment of Gas Disaster in Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010(5):39-42.
- [8] TB 10027—2001,铁路工程不良地质勘察规程[S].
TB 10027—2001, Code for Unfavorable Geological Condition Investigation of Railway Engineering [S].

(编辑 赵立兰)

(上接第73页)

- [3] 王晓放,李存德,宋玉香.双跨连拱隧道侧导洞扩挖动力分析[J].石家庄铁道学院学报,2002(5):5-7.
Wang Xiaofang, Li Cunde, Song Yuxiang. Analysis of the Blasting Vibration Effect for Enlargement of Double-arch Tunnel [J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2002(5):5-7.
- [4] 林刚,何川.连拱公路隧道施工方法模型试验研究[J].现代隧道技术,2003(6):1-6.
Lin Gang, He Chuan. Study on the Reasonable Construction Method for a Double-arch Road Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2003(6):1-6.
- [5] 王军,夏才初,朱合华,等.不对称连拱隧道现场监测与分析研究[J].岩石力学与工程学报,2004(2):267-271.
Wang Jun, Xia Caichu, Zhu Hehua, etc. Site Monitoring and Analysis of Non-Symmetrical Multi-Arch Highway Tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2004(2):267-271.
- [6] 邓建,朱合华,丁文其.不等跨连拱隧道施工全过程的有限元模拟[J].岩土力学,2004(3):477-480.
Deng Jian, Zhu Hehua, Ding Wenqi. Finite Element Simulation of Whole Excavation Operation of a Unequal-span Double-arch Tunnel [J]. Rock and Soil

Mechanics, 2004(3):477-480.

- [7] 王伟,黄娟,彭立敏,等.不同施工顺序对偏压连拱隧道结构稳定性的影响分析[J].西部探矿工程,2004(10):105-108.
Wang Wei, Huang Juan, Peng Limin, etc. Analysis on the Structure Stability of the Unsymmetrically Loaded and Connecting-arch Tunnel Caused by Different Construction Orders [J]. West-china Exploration Engineering, 2004(10):105-108.
- [8] 何川.公路双联拱隧道[M].北京:人民交通出版社,2006.
He Chuan. Highway Arch Tunnel [M]. Beijing: China Communications Press 2006.
- [9] 申玉生,赵玉光.偏压连拱隧道围岩变形的现场监测与分析研究[J].公路,2005(4):194-198.
Shen Yusheng, Zhao Yuguang. Site Monitoring and Analysis Research on Surrounding Rock Deformation of a Biased Double-arch Tunnel [J]. Highway, 2005(4):194-198.

(编辑 赵立兰)