

浅埋偏压连拱隧道现场监测与分析研究

陈 娱,张成良,王海强

(昆明理工大学 国土资源工程学院,云南 昆明 650093)

摘要:针对石红高速大中山1#双连拱浅埋偏压隧道,选择典型断面,埋设监控量测设备对隧道施工过程中围岩的变形和支护结构受力进行适时的监测,对监控量测的数据进行分析处理,根据监控量测的信息对隧道施工过程中出现的围岩变形和支护受力进行深入分析,得出了浅埋偏压隧道在偏压作用下和施工扰动下的受力特征和变形特性。结果表明,隧道在偏压作用下有向浅埋侧偏移的趋势,在进行隧道开挖过程中,减少偏压侧不平衡推力对于保证隧道的安全稳定有及其重要作用。

关键词:浅埋偏压;连拱隧道;监控量测;围岩变形;支护结构

中图分类号:TU45

文献标识码:A

On-site supervision measure and analysis of shallow multi-arch tunnel under unsymmetrical pressure

CHEN Yu, ZHANG Chengliang, WANG Haiqiang

(Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science&Technology, Yun'nan Kunming 650093, China)

Abstract: Considering the condition of Dazhongshan 1# shallow multi-arch tunnel unsymmetrical pressure in Shihong Expressway, and setting testing component in typical cross-sections, the tunnel's surrounding rock and supporting structure force are duly monitored. After the analysis of the monitoring date, according to site monitoring and information feedback, the surrounding rock deformation and supporting force were analyzed in-depth during the excavation of the tunnel and summarized the characteristics of force and deformation when the tunnel under unsymmetrical pressure. The results indicate that the tunnel has the inclination to the side of shallower depth of cover under the asymmetry, which makes an important role in guaranteeing the structure stability. Based on the engineering case, the article discussed the stability of tunnel during the excavation, which can provide reference for similar works.

Key words: shallow buried bias; multiple-arch tunnel; monitoring and measuring; surrounding rock deformation; supporting structure

近几年伴随着国民经济的快速发展,也带动了高速公路的飞速发展。由于公路隧道受到山岭重丘区的线型、展线、隧道选址区工程地质情况等因素的影响,线路中多选用连拱隧道施工方案^[1]。连拱隧道具有工序复杂,围岩多次被扰动,支护结构受力复杂等特点。目前我国建成的连拱隧道已有一定的数量,在设计、和施工方面积累了一定的经验,在加上近些年来国内外运用数值模拟、理论

分析、现场监测等手段对连拱隧道的围岩变形与应力分布、支护结构受力等方面进行了大量研究,也取得了不少的研究成果。但是,对于不同的隧址区,其地形地貌、地质条件各不相同,个例研究中取得的成果不具有普遍性,尤其在浅埋地形偏压条件下,连拱隧道在施工过程中易发生围岩坍塌、衬砌出现病害等一系列问题^[2]。我国《公路隧道设计规范》^[3]就明确指出:连拱隧道存在偏压

时,应对支护参数与施工工法进行特殊设计。因此本文以石红高速大中山1#隧道的监控量测为依据,分析了隧道在各开挖步骤中以及不平衡推力作用下围岩的变形特征^[4]。同时研究了隧道在偏压作用下不平衡推力是如何作用于支护结构,以及支护结构在复杂应力作用下的状态,为隧道支护结构的优化提供依据,更好的指导施工,减小病害的产生。

1 工程概况

大中山1#连拱隧道位于撮科河左岸大岔河一带,为构造侵蚀山地地形地貌区,沟谷纵横,切割较深,隧道起点K28+700,止点K29+165,隧道长465 m,位于沟谷中下部,自然坡度40~70°。隧址区地下水埋藏较深,雨季受大气降水补给。隧道地质条件复杂,隧道进口K28+700~K28+760段和隧道出口K29+037~K29+165段为V类围岩,其余段位IV类围岩,围岩岩性上部为碎石,呈松散状结构,下伏基岩为石英砂岩夹粉砂岩,呈强风化碎石状,节理裂隙发育,岩体破碎,围岩易坍塌。浅埋时易出现地表下沉或坍至地表。针对以上情况,本隧道V级围岩浅埋段采用三导洞法施

工,从出口端开挖,先行洞超前后行洞30 m,施工工序如图1。由于隧道存在偏压,施工工序复杂,围岩多次扰动,在大中山隧道群中,已有隧道边墙出现裂缝的现象。

2 现场监测点的布置

根据现场实际情况,地表沉降观测点在隧道进出口各布置两排,间距15 m,每排布置9个观测点,在隧洞拱顶上部地表测点布置稍密一些。不动点布置在隧道进出口正对的山上,使用Leica全站仪进行数据采集。拱顶沉降和周边收敛布置在同一个断面上,本隧道V级围岩段拱顶沉降和周边收敛量测断面间距15 m,IV级围岩段断面间距20 m。数据采集使用钢尺收敛计,测点初读数要保证在开挖12 h内和下一循环开挖前完成。具体布置如图2。为了更好的掌握隧道在偏压作用下围岩和支护结构的受力状态,在隧道V级围岩段K28+850断面和K29+125断面分别布置一个综合监测断面,量测项目包括:拱顶下沉、周边收敛、围岩应力状态、钢支撑轴力、层间支护压力以及初支、二衬混凝土内应力。各监测项目布置如图3。

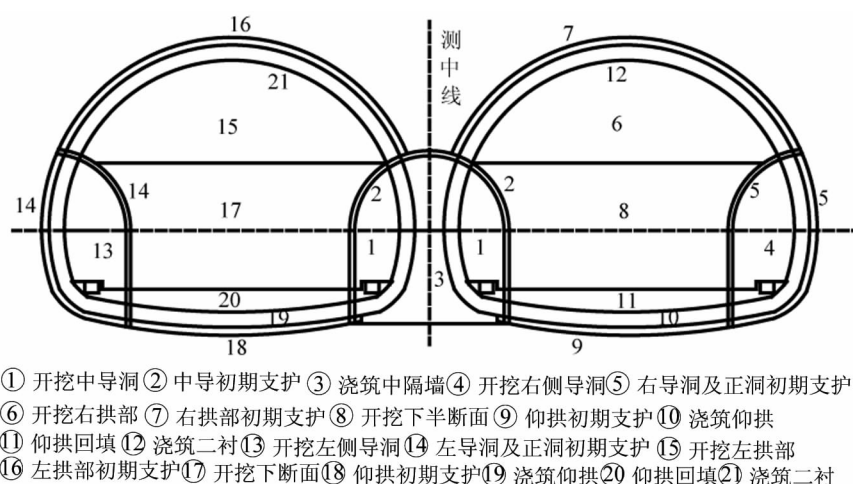


图1 大中山1#隧道出口段施工顺序图

Fig.1 Construction steps of exit of Dazhongshan 1# shallow multi-arch tunnel

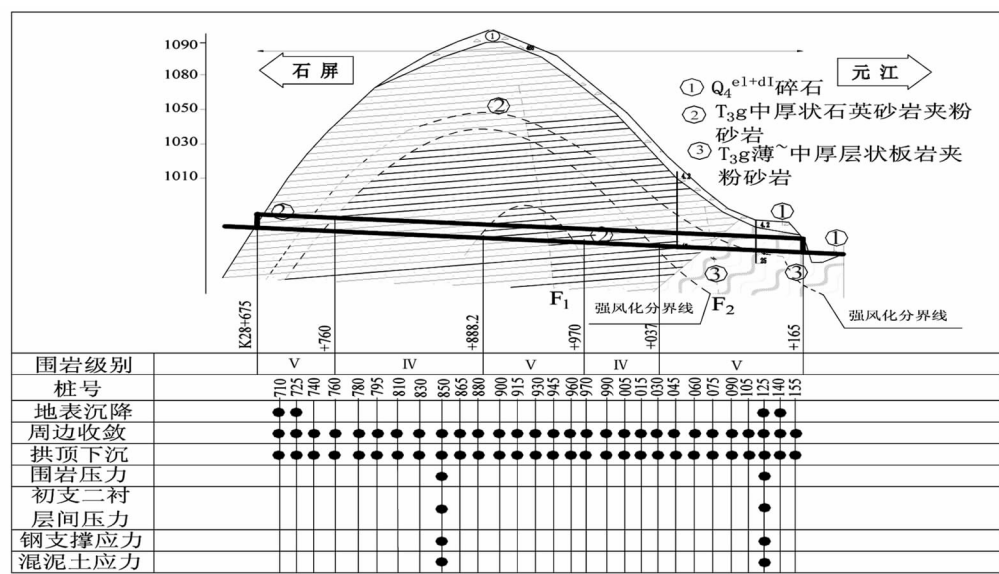


图2 监控量测项目布置示意图
Fig.2 Layout of surveying project on measurement section

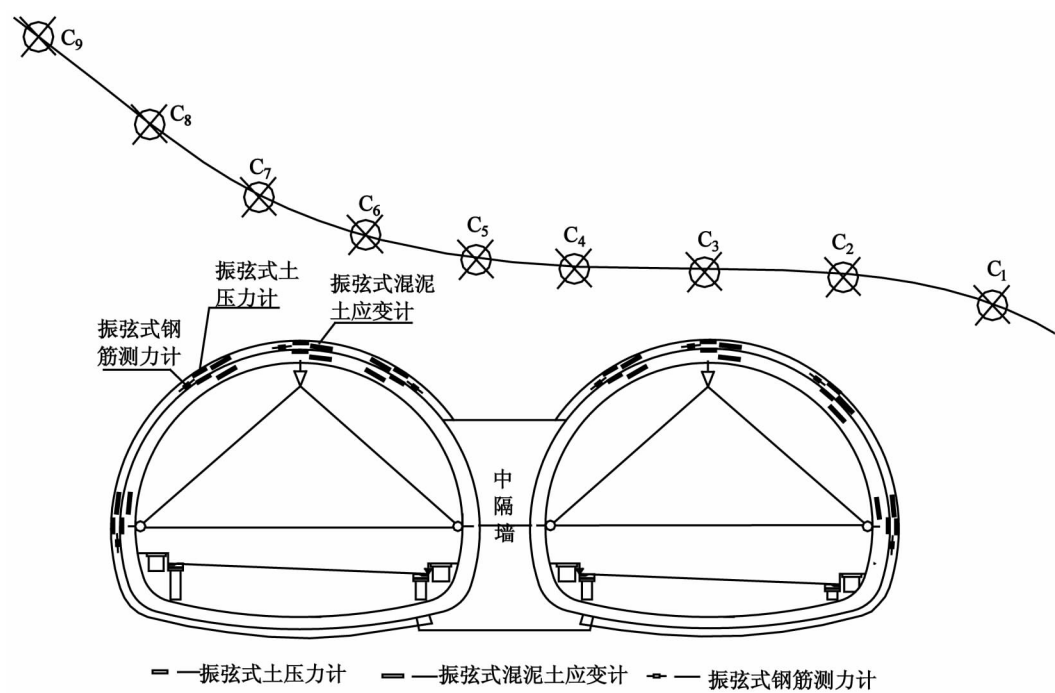


图3 K29+125断面测点布置示意图
Fig.3 Sketch map of K29+125 section measuring points

3 数据的整理及分析

3.1 量测数据的对比分析

由于1#隧道进出口段为浅埋偏压段,围岩岩

性V级。开挖从隧道出口端开始,所以地表沉降取 K29 + 140、K29 + 125 断面进行分析,水平收敛取 K29 + 125 和 K29 + 090 断面进行分析,拱顶下沉、选测项目取 K29 + 125 综合断面进行对比分析。

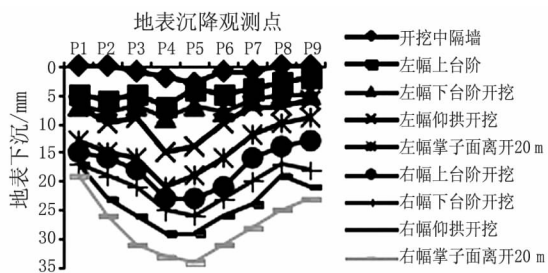


图4 K29+125断面在不同开挖步下地表下沉变化曲线图
Fig.4 Curves of subsidence for K29+125 section measuring points in different steps

从图4可以看出,隧道出口地表下沉,受施工步距影响较大,特别是左右幅隧道下台阶和仰拱开挖时,隧道地表沉降速率明显增加,所以在施工时应加快仰拱的浇注速度,尽早让隧道闭合成环。另外深埋侧隧道在各开挖步骤中地表累计下沉明显,可以看出在偏压存在的情况下,开挖深埋侧隧道围岩应力释放较浅埋侧剧烈。如图5所示,K29+140断面各测点地表下沉量均较大,特别是中隔墙上部测点4累计下沉量达到了53 mm。说明左右幅隧道交错施工,对中隔墙上部区域的覆岩沉降影响较大。此外,该段属于隧道浅埋偏压段,围岩强度较低,开挖后围岩很难形成承载拱^[5],易形成滑动面,产生大范围的塑性流动区,所以造成各沉降点下沉量普遍增大。针对浅埋偏压段上覆岩层下沉剧烈的情况,在开挖过程中,应采用喷锚和管棚注浆预加固围岩。

从图6可以看出,先行洞拱顶下沉在开挖15 d后开始趋于稳定,当深埋侧后行洞掌子面开挖到该断面时,浅埋侧隧洞拱顶下沉又有所增加,说明深埋侧隧道开挖对浅埋侧围岩变形有一定的影响。由拱顶随掌子面开挖距离沉降变化图可以看出,浅埋侧该断面距离掌子面离开20 m,开始趋于稳定,时间约为13 d,深埋侧在掌子面离开37 m后开始趋于稳定,时间大约为25 d。而且,深埋侧最大累计沉降为21.4 mm,浅埋侧最大累计下沉为8 mm,深埋侧累计下沉速率远远大于浅埋侧。说明连拱隧道在偏压存在的情况下,深埋侧隧道的开挖对围岩的扰动较浅埋侧明显^[6],围岩变形较浅埋侧剧烈。

图7是K29+090与K29+125断面左右幅隧道水平收敛累计曲线图。从图中可以看出,两个断面水平收敛累计曲线具有相似的变化趋势。该断面掌子面开挖前后左右洞都迅速收敛,先行洞水平收敛在开挖15 d后开始趋于稳定,当后行洞

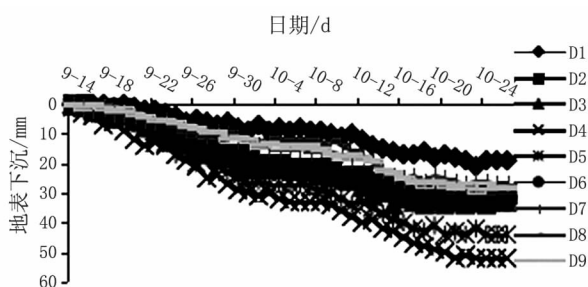


图5 K29+140断面地表沉降-时间关系曲线图(2014年)
Fig.5 Curves of subsidence-time for K29+140 section measuring points(2014)

掌子面开挖到该断面后,其水平收敛又缓慢的增加,说明施工扰动引起的围岩变形比较明显。当后行洞掌子面开挖13 d后,深埋侧隧洞水平收敛向洞内累计位移达到最大,随后开始扩张,而浅埋侧水平收敛位移速率有所增加,可以看出偏压形成的不平衡推力,作用于隧道衬砌结构,再通过初期支护传递到中隔墙,同时隧道上部地表为斜坡,上覆围岩的不均布荷载也直接作用于中墙顶部,从而使中隔墙有向浅埋侧偏移的趋势^[7]。另外,深埋侧隧道开挖后引起的围岩前后差异变形与浅埋侧围岩向洞内缓慢的收敛,说明,先开挖浅埋侧后开挖深埋侧可以有效减弱深埋侧隧道开挖后不平衡推力以及上覆围岩对中隔墙的作用,减小中隔墙顶部的应力集中^[8]。对于保证隧道结构的稳定具有重要意义。

3.2 选测项目数据整理和分析

如图8所示,围岩所受应力分布复杂,深埋侧隧洞拱顶受力达到0.093 MPa,约为浅埋侧拱顶的5倍,而浅埋侧左拱腰上部受力达到最大为0.095 MPa,这是由于围岩在浅埋偏压形成的不平衡荷载作用下,致使各个测点受力差异突出。同时,围岩所受应力较大将导致初期支护在较短的时间内向洞内收敛^[9]。在施工过程中应注意观察围岩的变形,适当增加毛洞拱腰上部范围注浆小导管的密度,防止其变形过大而失稳。

图9为该断面钢支撑轴力图,和围岩接触应力状态图有所不同,表现为浅埋侧隧道钢支撑轴力均较深埋侧相应部位大,这是由于左右幅隧道埋深不同,深埋侧隧洞开挖后传递给中墙的应力比浅埋侧大,同时左右幅隧洞通过衬砌传递给中墙的应力也大小不等^[10],为平衡深埋侧隧道的推力,促使浅埋侧隧道初期支护与围岩作用力加大。所以在锚喷初支的过程中,除了采用锚喷支护体系

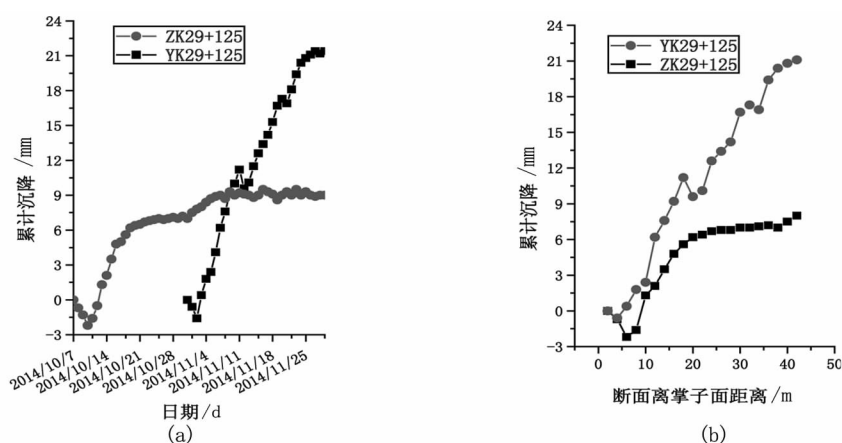


图6 K29+125断面左右隧道拱顶下沉时程曲线图和拱顶随开挖距离沉降变化图

Fig.6 Curves of arch crown subsidence-time and subsidence-distance right tunnels at K29+125

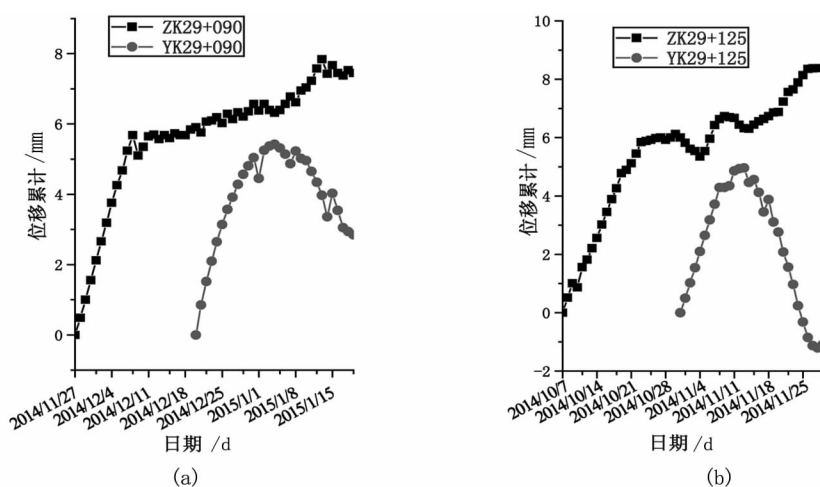


图7 K29+090与K29+125断面左右幅隧道水平收敛时程曲线图

Fig.7 Horizontal deformation curves of left and of left and right tunnel at K29+090 and K29+125

联合格栅钢架,同时应适当增加钢支撑的密度,保证隧道在偏压作用下,其浅埋侧初期支护不发生屈服破坏。

如图10所示,隧道左幅边墙受力比右幅边墙大,而且隧道右幅拱顶与左幅靠中隔壁顶部部位受力分别达到了25.98 MPa和26.76 MPa,已超过C25混凝土的极限抗压强度,说明偏压荷载对隧道初期支护个别点的作用突出。由于只是初喷混凝土个别点达到了极限强度,对初期支护整体的稳定性不会造成太大的影响。同时,隧道处在斜坡上,在上覆围岩自身重力和不平衡推力共同作用下,围岩变形较大,隧道初期支护拱顶范围受力较大^[11],在施工过程中应予以重视。

图11为K29+125断面左右幅隧道层间支护压力状态图,按设计要求,隧道二次衬砌应在围岩变形和初期支护变形稳定以后施作,同时施做二衬时与初期支护间留有预留空间,二衬接触受力应该很小,量测结果显示二衬接触受力较大,主要是该

断面所处浅埋偏压段,围岩较破碎,在偏压作用下,围岩与初期支护变形较大,为了保证隧道的稳定,在初支变形还未稳定,便紧跟二衬,所以导致层间支护压力很大。二次衬砌作为隧道的永久承重结构,在施工过程中,还应优化浇注二衬的时机。

从图12可以看出,浅埋侧隧道中墙上部到拱顶范围二衬混凝土受力较大,最大达到了5.75 MPa,其所受内应力已达到了C30混凝土的抗剪强度,说明偏压通过深埋侧隧洞衬砌结构传递过来的荷载对该范围衬砌结构作用较大。从现场发现,浅埋侧隧道从右拱腰到拱顶范围有大量裂缝产生。裂缝分布形态多为纵向、斜向、或x型裂缝,裂缝的倾向大多与地表坡向一致,这是典型的剪切裂缝^[12]。通过对裂缝监测,未见长度宽度有所增加,玻璃片也未破裂,可以确定隧道在偏压作用下支护结构受力已趋于稳定,对隧道的稳定性不会造成破坏。对于裂缝病害,应采取有效的措施治理,防止隧道出现渗水。

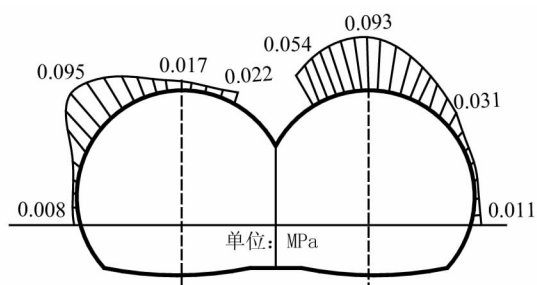


图8 K29+125断面左右幅隧道围岩接触应力状态图

Fig.8 Surrounding rock stress map of left and right tunnels at K29+125

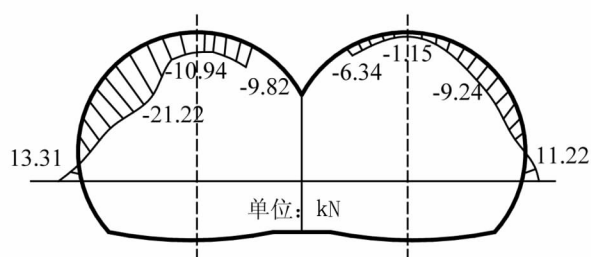


图9 K29+125断面左右幅隧道刚支撑轴力图

Fig.9 Force of steel support of left and right tunnels at K29+125

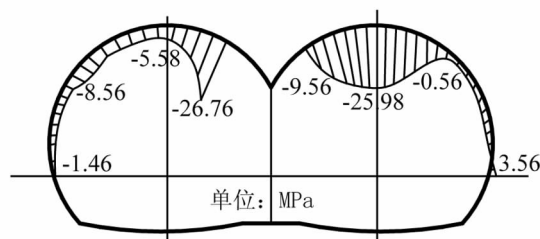


图10 K29+125断面左右幅隧道初喷混凝土内应力状态图

Fig.10 Stress state map of initial supporting concrete of left and right tunnels at K29+125

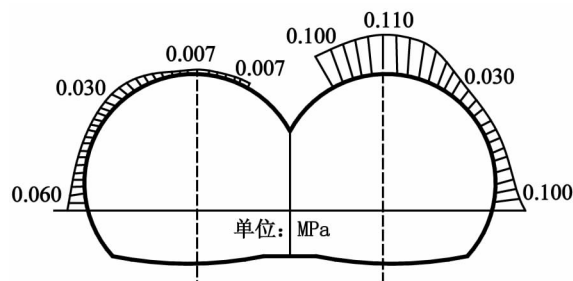


图11 K29+125断面左右幅隧道层间支护压力状态图

Fig.11 Stress map between the supporting of left and right tunnels at K29+125

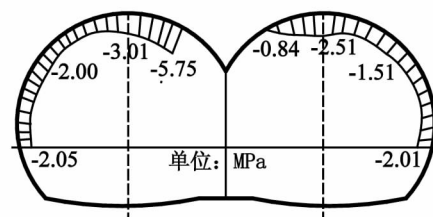


图12 K29+125断面左右幅隧道二衬混凝土内应力状态图

Fig.12 Stress state map of secondary lining concrete of left and right tunnels at K29+125

4 结语

1) 隧道偏压严重,在围岩与不平衡推力共同作用下中隔墙有向浅埋侧运动的趋势,所以在施工中隔墙时,应增加其抗压、抗弯强度。同时不平衡推力通过深埋侧隧道衬砌结构以及中隔墙作用于浅埋侧隧道的衬砌结构,使其初支和二次衬砌受到破坏,所以在施工过程中应优化二次衬砌浇注的时机,同时应提高浅埋侧隧道初支及二衬的强度,确保隧道的稳定性。

2) 由于隧道地处浅埋偏压段,围岩变形剧烈,左右幅隧道结构受力不均,使浅埋侧隧道结构与围岩作用力加大,导致初期支护变形较大,钢支撑受力增加,所以在施工过程中应优化锚喷初期支护,适当增加浅

埋侧钢支撑的密度,以确保其支撑强度。

3) 隧道偏压现象明显,在施工过程中减小不平衡推力的作用,保证隧道结构的稳定就变得十分重要了。

4) 在偏压作用下,先开挖浅埋侧后开挖深埋侧,可以有效减小隧道开挖后不平衡推力对中隔墙的作用,减小中隔墙顶部的应力集中,对隧道结构整体的稳定性起到积极的作用。

参考文献:

- [1] 闫计瑞,刘 海,王 强. 灰色理论在偏压连拱隧道中的应用[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2015,3(32): 75-78.

(下转第102页)

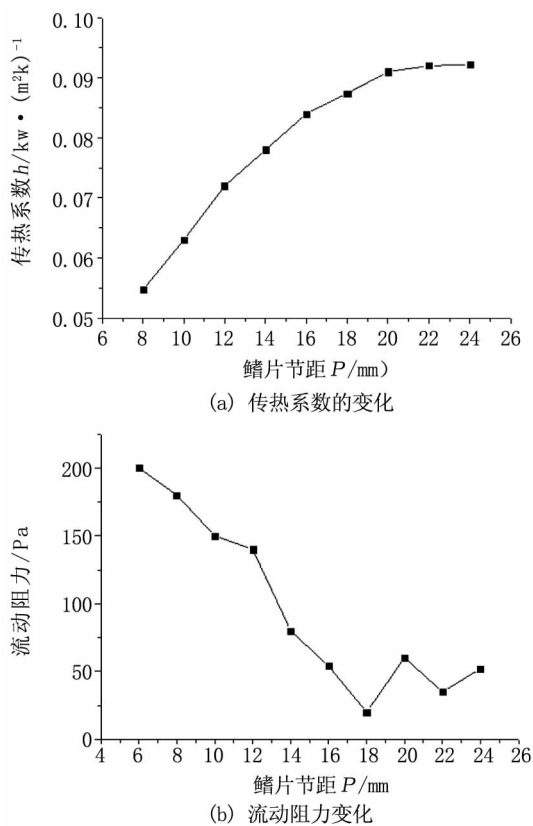


图6 鳍片节距的影响

Fig.6 Influence of the pitch of finned tube

3 结论

1) 鳍片区域是换热的主要区域,在鳍片管壁附近出现的漩涡能够冲刷流体边界层,加强通道内绕流作用,强化传热。

2) 随着烟气流速的增加,H型鳍片管换热系数越大,流动阻力越大,在烟气流速大于 11 m/s 时,流动阻力随着烟气流速的增加急剧增加。

3) 随着鳍片节距增加,H型鳍片管换热系数越大,流动阻力越小,当鳍片节距为 18 mm 时,综合性能达到最好。

参考文献:

- [1] 林万超. 火电厂热系统定量分析[M]. 西安:西安交通大学出版社,1985.
- [2] 冯丽丽,杜小泽,杨勇平,等. 椭圆管矩形翅片间空气流动的扰流特征[J]. 工程热物理学报,2011,32(1):119-122.
- [3] 吴艳艳,孙奉仲,李飞,等. H型翅片管束空气流动及换热特性[J]. 山东大学学报:工学版,2014,44(6):90-94.
- [4] 刘聿拯,袁益超,徐世洋,等. H形鳍片管束传热与阻力特性实验研究[J]. 上海理工大学学报,2004,26(5):457-460.
- [5] 王桂玲. 670 t/h 锅炉 H型肋片管式省煤器的改造[J]. 锅炉制造,2009,23(3):62-64.
- [6] 吴新,商宇薇,王军龙,等. H型鳍片管束传热特性实验研究[J]. 东南大学学报:自然科学版,2013,43(1):88-93.
- [7] 李飞,史月涛,孙奉仲,等. H型翅片椭圆管束传热及阻力特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报,2014,34(14):2261-2266.
- [8] 张知翔,王云刚,赵钦新. H型鳍片管性能优化的数值研究[J]. 动力工程学报,2010,30(12):941-946.
- [9] 孙钟平,吴新,王亚欧. H型鳍片管束传热及流阻特性的数值模拟[J]. 动力工程学报,2014,34(5):382-389.
- [10] 王为术,雷佳,张斌,等. 周向不均匀加热圆管内熔盐传热特性数值研究[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2015,32(4):108-112.

(责任编辑 王利君)

(上接第 68 页)

- [2] 苏生瑞,朱合华,李国峰. 连拱隧道衬砌病害及其处治[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(1):2510-2515.
- [3] JTG D70/2-2014,公路隧道设计规范[S].
- [4] 郑凯,刘保国. 复杂地质条件下大跨度双连拱隧道监控量测技术的运用[J]. 隧道建设,2006,26(2):53-56.
- [5] 曹云钦,王小林. 偏压连拱隧道中墙优化分析[J]. 岩土工程学报,2006,28(4):537-540.
- [6] 朱正国,乔春生,高保彬. 浅埋偏压连拱隧道的施工优化及支护受力特征分析[J]. 岩土力学,2008,29(10):2747-2753.
- [7] 段海澎,徐干成,刘宝国. 富溪偏压连拱隧道围岩与支护结构变形和受力特征分析[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(2):3763-3768.

- [8] 张志强,何川. 偏压连拱隧道优化施工研究[J]. 岩土力学,2007,28(4):723-727.
- [9] 申玉生,高波. 双连拱隧道施工偏压力学特性的监测与分析研究[J]. 岩土力学,2006,27(11):2061-2065.
- [10] 庄宁,朱苦竹,李军伟. 偏压连拱隧道施工的动态模拟及最优化分析[J]. 岩土力学,2009,30(9):2875-2880.
- [11] 丁文其,王晓彤,朱合华,等. 连拱隧道设计荷载的确定方法[J]. 中国公路学报,2007,20(5):78-82.
- [12] 王建秀,朱合华,唐益群,等. 双连拱公路隧道裂缝成因及防治措施[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(2):195-202.

(责任编辑 李军)