

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtk.2018.0144

刘国平. 引汉济渭隧洞TBM 施工环境热害扩散规律研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 200-205. LIU G P. Study on the thermal hazard of the TBM construction environment in tunnel of the Hanjiang to Weihe River Water Transfer Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 200-205. (in Chinese)

# 引汉济渭隧洞TBM 施工环境热害扩散规律研究

刘国平

(陕西省引汉济渭工程建设有限公司, 西安 710100)

**摘要:** 引汉济渭工程是解决关中、陕北缺水的重要工程, 其将穿越秦岭主脊段, 主要采用TBM法施工。理清TBM掘进段的施工环境热害扩散规律, 用以指导TBM掘进隧道内的现场施工。以引汉济渭隧洞工程为依托, 主要采用数值计算方法对不同围岩级别和不同通风条件下TBM掘进段的施工环境热害扩散规律进行计算研究。研究结果表明: 在Ⅰ级围岩中施工时, 掘进机段环境空气温度小于28℃, 满足规范要求。随着围岩级别提高, 掘进面附近区域温度和高温区范围逐渐扩大, 最高温度达到50℃, 最大热害扩散范围达到165m, 最小的通风有效降温距离仅为45m; 随着风管出风口风速的增大和送风温度的降低, 热害扩散范围逐渐减小, 但仍难以使掘进面附近环境温度满足规范要求, 建议在掘进面附近区域采用局部降温措施。

**关键词:** 引汉济渭; TBM; 施工环境热害; 数值模拟; 扩散规律

**中图分类号:** TV554    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2018)05-0200-06

## Study on the thermal hazard of the TBM construction environment in tunnel of the Hanjiang to Weihe River Water Transfer Project

LIU Guoping

(Hanjiang to Weihe River Valley Water Diversion Project Construction Co., Ltd., Shaanxi Province, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The Hanjiang to Weihe river water transfer project is an important project to solve water shortage in the central Shaanxi plain and northern Shaanxi. It will pass through the main ridge section of the Qinling Mountains and is mainly constructed by the TBM method. This paper intends to clarify the diffusion rule of thermal hazard in the construction environment of the TBM tunneling section to guide the construction of the TBM tunnel. This paper is based on the tunneling project of the Hanjiang to Weihe river water transfer project. Numerical calculation was used to calculate the thermal hazard diffusion rule in the construction environment of TBM tunneling sections under different surrounding rock grades and different ventilation conditions. Results showed that in the construction of class IV surrounding rock, the ambient air temperature of the TBM section was less than 28℃, which met the specification requirements. With the improvement of the surrounding rock grade, the temperature near the driving surface and the scope of high temperature area would gradually increase. The maximum temperature reached 50℃ and the maximum diffusion range of thermal hazard reached 165m. The minimum effective ventilation cooling distance was only 45m. With the increase of wind speed at the outlet of the air duct and the decrease of the supply air temperature, the diffusion range of thermal hazard would gradually decrease; but the ambient temperature near the driving surface still could not meet the specification requirements. Therefore, this paper recommends using local cooling measures in the vicinity of the driving surface.

**Key words:** the Hanjiang to Weihe river water transfer project; TBM; thermal hazard of the construction environment; numerical simulation; diffusion rule

收稿日期: 2018-03-25    修回日期: 2018-06-15    网络出版时间: 2018-06-25

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180622.0944.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51678493)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51678493)

作者简介: 刘国平(1980-), 男, 安徽六安霍邱人, 工程师, 主要从事工程建设管理方面研究。E-mail: 53123384@qq.com

引汉济渭工程是解决关中、陕北缺水的战略性水资源配置工程,调水工程主要由黄金峡水库、三河口水库、秦岭输水隧洞组成。秦岭输水隧洞全长 98.3 km<sup>2</sup>,穿越秦岭主脊段 34 km<sup>2</sup> 主要采用 TBM 法施工。TBM 穿越洞段围岩主要以  $\text{O}_1$ 、 $\text{O}_2$  级为主。由于 TBM 机在掘进过程中产生大量的热量,导致掘进面附近区域温度较高,人员和设备的工作效率大大降低。因此,理清 TBM 掘进段的热害扩散规律问题是引汉济渭工程及其他类似工程顺利实施的基本。

国内不少学者对 TBM 隧道施工热环境问题也做了相关研究。张建<sup>[1]</sup>通过理论分析的方法,阐明了 TBM 施工热源,并编制了 TBM 施工通风程序,确定风量,风压,风速等通风参数;陈红超<sup>[2]</sup>以隧道全长为研究对象,利用 CFD 对长距离引水隧洞 TBM 施工通风进行模拟,合理优化了施工通风参数;曹正卯等<sup>[3]</sup>利用 FLUENT 对敞开式 TBM 隧道段空气温度流场进行了进行模拟,将计算结果与现场温度测试数据进行比较,分析 TBM 施工隧道空气温度分布规律;王尽忠等<sup>[4]</sup>针对 TBM 施工过程中遇到的高温高湿环境问题,通过理论分析的方法,建立湿热环境数学模型;郭春等<sup>[5]</sup>采用数值计算与现场测试相结合的方法,主要针对特长 TBM 施工隧道环境安全控制进行了研究。此外,国内其他科研人员结合实际隧洞工程情况,对 TBM 施工通风系统方案进行了大量的比选研究<sup>[6,23]</sup>。这些研究成果对了解 TBM 施工通风有重要的意义,但针对不同围岩条件对 TBM 热害机理的影响规律还未见相关的研究报告。

因此,本论文以引汉济渭隧洞 TBM 施工过程为研究对象,主要采用三维数值计算软件 FLUENT,对不同围岩级别下 TBM 掘进段的空气温度分布情况、不同通风条件下 TBM 掘进段热害扩散规律进行计算和分析,为施工现场选择降温措施奠定研究基础,保证引汉济渭秦岭隧洞顺利施工并为今后相似工程提供科学依据。

## 1 TBM 施工热害环境计算方法

### 1.1 理论方法

由 TBM 施工引起的隧道热害环境问题需通过通风方式加以改善。利用大型数值计算软件 FLUENT 对 TBM 施工机械产热下的空气温度场进行模拟,根据隧道施工工况,设置边界条件,模拟通风条件下施工环境的热害扩散规律。假定隧道内空气流动不可压缩,隧道内气体流动遵循质量守恒,动量

守恒,能量守恒定理。采用雷诺标准  $k-\varepsilon$  双方程模型,模拟隧道内的空气流动规律,并忽略洞口自然风的影响。最后采用 SIMPLE 算法,解算得出 TBM 施工通风条件下的隧道空气温度场。

### 1.2 几何模型

根据引汉济渭秦岭隧洞 TBM 掘进段实际工程情况,建立 1 km 的隧道环境热害扩散计算模型。模型几何尺寸如下:隧道断面直径为 8 m;通风风管直径为 2.2 m,居中放置,距隧道顶面 0.5 m,通风管道出口位于 TBM 掘进机尾部;依据 TBM 机主要结构,建立简易的掘进机模型,模拟机身对空气的散热效果及对空气流动的影响。几何模型见图 1。

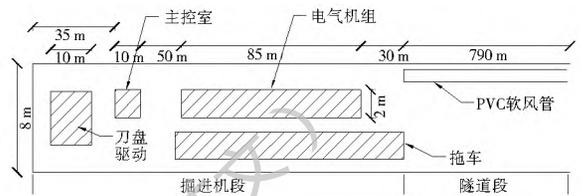


图 1 几何模型纵断面示意图

Fig. 1 Sketch of a geometric model

### 1.3 网格划分及边界条件

采用适应性较强的四面体网格,对已建好的三维数值计算模型进行网格划分,网格边长取 0.5 m,局部网格划分情况见图 2。

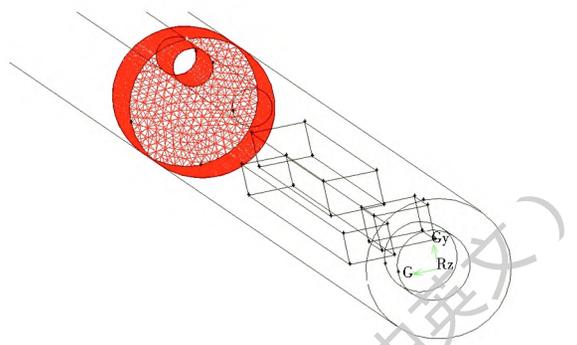


图 2 网络划分部分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the meshing part

基本计算边界条件如下:(1)软风管进风口为速度入口(velocity inlet);(2)隧道模型洞口设为压力出口(pressure outlet);(3)隧道壁面不与周围空气发生热交换;(4)TBM 掘进机段电机设备设为热交换模型,由机械表面施放到空气中。

## 2 TBM 掘进机段施工热害环境计算结果与分析

### 2.1 热源的计算

#### 2.1.1 电动机械设备散热

TBM 是大型的电力机械,一般认为,电动机散

热与工艺设备实际消耗的电能最终都转化为热能,由 TBM 机身表面传递到空气中。TBM 机身单位时间实际散热量  $Q_1$  计算公式为:

$$Q_1 = P n_1 n_2 n_3 n_4 \eta \quad (1)$$

式中:  $Q_1$  为机身散热量(kW);  $P$  为设备最大功率(kW);  $n_1$  为掘进机利用系数,一般等于掘进机利用率;  $n_2$  为负荷系数,一般取 0.8;  $n_3$  为同时使用系数;  $n_4$  为热转换系数,一般取 0.5;  $\eta$  为机器效率,一般取 0.8。

### 2.1.2 人员集体热负荷

人员在 TBM 掘进机内比较集中的工作时,人体散热对工作区间内的环境空气温度也有一定的影响。人体的代谢散热量近似计算公式为:

$$Q_2 = q n n' \quad (2)$$

式中:  $Q_2$  为人员散热(kW);  $q$  为在不同室温和劳动强度情况下成年男子的散热量,一般取  $0.2 \times 10^{-3}$  kW;  $n$  为 TBM 工作区域内部总人数,一般取 20 人;  $n'$  为群集系数,一般取 1.0。

### 2.1.3 照明设施散热

照明设备所消耗的电能几乎全部转化为热能散入空气中。隧道内白炽灯的散热量大小计算公式为:

$$Q_3 = W \cdot m \quad (3)$$

式中:  $W$  为白炽灯的装置总功率;  $m$  为同时使用系数。

## 2.2 围岩级别对掘进段热害的影响

引汉济渭秦岭隧洞施工开敞式硬岩掘进机( $s=795$ ),设备额定总功率为 3 736 kW。针对不同的围岩条件,采用 TBM 进行隧洞施工时,需选取不同的掘进参数。根据 TBM 施工统计分析实例,TBM 在不同围岩等级下的掘进机利用率不同,Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级围岩中掘进机利用率分别为 44.2%、29.17% 和 9.09%<sup>[24]</sup>。依据上述隧洞热源产热量计算,TBM 机身在不同围岩状态下施工时,掘进机利用率不同,隧洞内总产热量差距较大。根据隧洞内不同的总散热量,并假定散热量沿机身均匀分布,得出单位面积 TBM 机向空气的散热值,见表 1。

表 1 散热率计算

Tab. 1 Thermal rate calculation

围岩等级	TBM 利用率 (%)	产热量 /kW	模型表面积 /m <sup>2</sup>	散热率 / (W · m <sup>2</sup> )
Ⅰ	44.2	473	1150	411
Ⅱ	29.17	312	1150	271
Ⅲ	9.09	97	1150	84

根据工程现场及通风布置情况确定数值计算边

界条件如下: (1) 风管进风口风速为 15 m/s, 进口风温为 15 °C 且与洞外相同; (2) 隧道模型洞口相对压强为 0; (3) TBM 掘进机段电机设备单位时间散热率分别取 411 W/m<sup>2</sup>、271 W/m<sup>2</sup> 和 84 W/m<sup>2</sup>; (4) 计算 30 分钟后,数值模拟计算完全收敛时,洞内空气温度分布规律。

模拟计算收敛完成后,沿隧道延伸方向取竖向纵断面,得三种散热率下掌子面至电机段附近温度分布云图,见图 3。



图 3 不同产热量下隧洞空气温度分布云图(左端为掌子面)  
Fig. 3 Distribution of air temperature in the tunnel under different heat production quantities (the tunnel face at the left end)

依据图 3 可知,围岩等级越高,TBM 机单位时间产热量越高,隧洞内空气温度越高,高温环境分布范围越广。引汉济渭秦岭隧洞主要穿越Ⅰ、Ⅱ级围岩,根据 TBM 实际施工时空气温度的实测数据,主控室周围空气温度为 34~38 °C。数值计算结果显示,Ⅰ、Ⅱ级围岩条件下主控室附近温度平均值约为 37 °C,则计算结果与实际温度测量结果相符。进一步分析出风口处隧道内温度分布规律,选择距洞顶 2.5 m 的人员呼吸区域,提取距离风管出风口不同距离的温度计算值,以此得到通风降温的长度范围,见图 4。

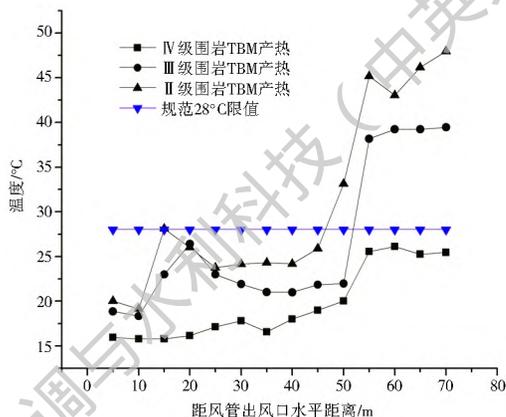


图 4 不同产热量下空气温度沿风管口距离分布规律  
Fig. 4 Distribution of air temperature along the air duct under different heat production quantities

由图 4 可知,相同通风条件下,隧洞内产热量越大,热害扩散距离越长。在 15 m/s 的风管送风条件

下, TBM 在 0 级围岩中的掘进空气温度较高, 在距风管口约 45 m 处已超过规范限值<sup>[25]</sup>, 距离风管口越远温度越高, 最高可达 50 ℃。在 0 级围岩中施工时, 隧道环境温度在距风管口约 55 m 处超过规范限值, 通风降温距离相对更长。在 0 级围岩中施工时, 空气温度符合规范值, 通风基本能满足 TBM 机身段散热要求。通风后, 风管出口处的温度有明显的改善, 但随着距离风管出风口的距离越来越远, 隧洞内的环境温度逐渐升高。与此同时, 在距出风口约 50 m 处空气温度产生了较大的变化, 这个区域恰好位于 TBM 电机热源区域, 大量的热量从电机表面释放出来, 因此, 在该区域确实出现了温度的突然升高。

### 2.3 通风风速对掘进段热害的影响

依据上述, TBM 机在较好围岩条件下掘进时产热量较高, 隧洞内空气温度较大, 通风能对一定范围内的掘进机环境温度起到改善作用。则依据独头压入式通风实际情况, 分析计算不同风速下施工环境热害扩散范围。

根据工程现场及通风布置情况确定数值计算边界条件如下: (1) 风管进风口分别设置为 5 m/s、15 m/s 和 25 m/s, 进口风温设为 15 ℃且与洞外相同; (2) 隧道模型洞口相对压强为 0, 洞口气温为 15 ℃; (3) TBM 掘进机段电机设备单位时间散热率为 411 W/m<sup>2</sup>; (4) 计算 30 分钟后, 数值模拟计算完全收敛时, 洞内空气温度分布规律。

模拟计算收敛完成后, 沿隧道延伸方向取竖向纵断面, 得三种风速下掘进机掌子面至电机段温度分布云图, 见图 5。



图 5 不同风速下隧洞空气温度分布云图(左端为掌子面)  
Fig. 5 Distribution of air temperature in the tunnel at different wind speeds (the tunnel face at the left end)

依据图 5 可知, 隧洞内产热量一定时, 加大风速, 隧洞内的低温环境分布范围越广, 通风降温效果越好。15 m/s 的送风条件下主控室周围的空气温度较 5 m/s 时明显降低。进一步分析出风口处隧洞内温度分布规律, 选择距洞顶 2.5 m 人员呼吸区域, 提取距离风管出风口不同距离的温度值进行研

究, 以此得到通风影响的长度范围, 如图 6 所示。

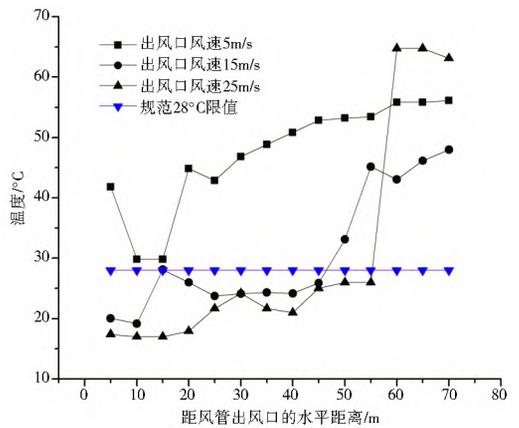


图 6 不同风速下空气温度沿风管口距离分布规律  
Fig. 6 Distribution of air temperature along the air duct at different wind speeds

由图 6 可知, 隧洞热源产热量一定时, 风管出风口风速越大, 热害扩散距离越短。风管出口风速为 5 m/s 时, 监测点的温度均超过规范要求; 风管出口风速为 15 m/s 时, 热害扩散范围约到达风管前端 45 m; 风管出口风速为 25 m/s 时, 热害扩散范围约到达风管前端 60 m, 且此时 TBM 中前段空气温度较高。

分析其主要原因是由于风管送风速度的提高, 在出风口处形成了较大的正压, 使得电机附近区域产生的热量向掘进面方向扩散, 致使 TBM 机身的中前段温度较高; 当风管送风速度降低时, 这种扩散明显减弱, 热量在电机附近区域就扩散, 致使 TBM 机身的后段即出风口到电机区域的温度较高。因此, 建议在加大通风速度的同时, 在 TBM 掘进面附近区域采用局部降温措施。根据引汉济渭隧洞施工现场措施和效果可知, 在主控室附近放置一定量冰块, 可使温度降低 3~ 4 ℃。

### 2.4 出口风温对掘进机段热害的影响

不同的送风温度及洞内的初始环境温度对 TBM 施工热害扩散规律影响较大。依据四季及昼夜的洞外温差变化, 设置数值计算边界条件如下: (1) 风管进风口风速分别设置为 15 m/s, 进口风温分别为 5 ℃、15 ℃和 25 ℃且与洞外相同; (2) 隧道模型洞口相对压强为 0; (3) TBM 掘进机段电机设备设为热交换模型, 由机械表面施放到空气中的单位时间散热率为 411 W/m<sup>2</sup>; (4) 计算 30 分钟后, 数值模拟计算完全收敛时, 洞内空气温度分布规律。

模拟计算收敛完成后, 沿隧道延伸方向取竖向纵断面, 得三种风温下掘进机掌子面至电机段的温度分布云图, 如图 7 所示。

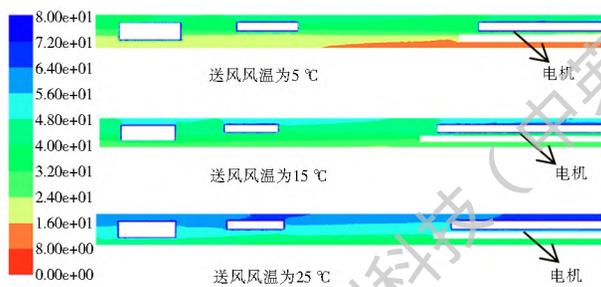


图 7 不同风温下隧洞空气温度分布云图(左端为掌子面)

Fig. 7 Distribution of air temperature in the tunnel at different wind temperatures (the tunnel face at the left end)

依据图 7 可知,隧洞内产热量及通风风速一定时,送风温度越低,隧洞内的低温环境分布范围越广,通风降温效果越好。进一步分析出风口处隧洞内温度分布规律,选择距洞顶 2.5 m 人员呼吸区域,提取距离风管出风口不同距离的温度值,如图 8 所示。

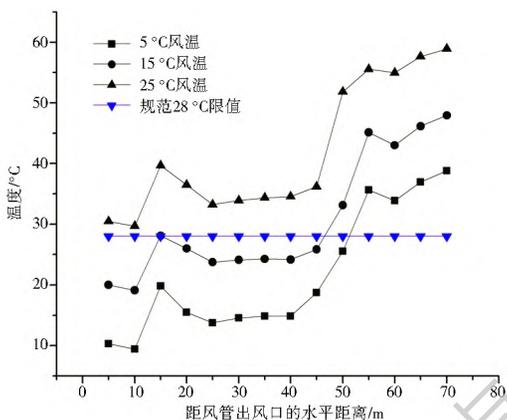


图 8 不同风温下空气温度沿风管口距离分布规律

Fig. 8 Distribution of air temperature along the air duct at different wind temperatures

由图 8 可知,隧洞热源产热量及风速一定时,送风风温越小,热害扩散范围越短。风管送风风温为 5 °C 时,距风管出口 55 m 隧洞范围内,空气温度均满足规范要求且相对较低;风管送风温度为 15 °C 时,热害扩散范围约到达风管前端 45 m,45 m 范围以外空气温度升高明显;风管送风温度为 25 °C 时,TBM 掘进机全长范围内空气温度均超过规范限制,不利于人员和机械的正常工作。

### 3 结论

针对引汉济渭秦岭输水隧道 TBM 施工中遇到的高温环境问题,结合数值计算的方法,分析了 TBM 热害影响因素,模拟计算了隧洞环境热害的扩散规律,得出以下结论。

(1) 敞开式 TBM 机施工洞段内,电动机械,人员以及照明设备为主要热源,散热量传递给洞内空

气,造成掘进机段高温环境。

(2) 通风参数一定时,TBM 施工产热量越大,通风影响范围越小,0、0、0 级围岩施工产热下,热害扩散范围分别到达风管前端 45 m、55 m 和掘进机全长。

(3) 隧洞内热源产热量一定时,风管出风口风速越大,热害扩散范围越小,5 m/s、15 m/s、25 m/s 通风条件下,热害扩散范围分别到达风管前端 5 m、45 m、60 m,加大送风风速,掘进机段空气温度有一定的改善,还需辅助其他措施为局部工作区域降温。

(4) 隧洞内热源产热量及风速一定时,送风风温越小,热害扩散范围越小,风温为 5 °C、15 °C、25 °C 时,热害扩散范围分别到达风管前端 55 m、45 m、5 m。

### 参考文献(References):

- [1] 张建. TBM 施工中的通风和散热问题研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004. (ZHANG J. Research on ventilation and heat dissipation in TBM construction [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004. (in Chinese))
- [2] 陈红超. 长距离引水隧洞 TBM 施工通风数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2007. (CHEN H C. Numerical simulation of long distance water diversion tunnel TBM construction [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese))
- [3] 曹正卯, 杨其新, 郭春. 敞开式 TBM 掘进工作面通风环境研究[J]. 铁道建筑, 2014(9): 47-51. (CAO Z M, YANG Q X, GUO C. Study on ventilation environment of open TBM excavation face [J]. Railway Construction, 2014(9): 47-51. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-1995. 2014. 09. 14.
- [4] 王尽忠. 中天山特长隧道 TBM 施工湿热环境控制技术研究[J]. 隧道建设, 2014(3): 212-215. (WANG J Z. Study on the control technology of wet and hot environment for TBM construction in the Central Tianshan long tunnel [J]. Tunnel Construction, 2014(3): 212-215. (in Chinese)) DOI: 10. 3973/j. issn. 1672-741X. 2014. 03. 005.
- [5] 郭春, 孙志涛, 王明年. 特长 TBM 施工隧道环境粉尘安全控制研究[J]. 工业安全与环保, 2015(7): 63-66. (GUO C, SUN Z T, WANG M N. Study on the control of environmental dust in the extra long TBM construction tunnel [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2015(7): 63-66. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-425X. 2015. 07. 020.
- [6] 张姣, 张建. TBM 施工中通风和散热问题的研究[J]. 江西科学, 2006(1): 26-30. (ZHANG J, ZHANG J. Research on ventilation and heat dissipation in TBM construction [J]. Jiangxi Science, 2006(1): 26-30. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-3679. 2006. 01. 008.
- [7] 姚晓明. TBM 在超长隧洞施工方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011. (YAO X M. Research on construction method of TBM in super long tunnel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese))
- [8] 罗占夫, 职常应, 乐晟. 关角隧道施工通风斜井分隔技术研究

- [J]. 隧道建设, 2009, 29(4): 411-414. (LUO Z F., ZHIC Y. Le S. Separation of ventilation deviated wells in Guanjiao tunnel construction[J]. Tunnel Construction, 2009, 29(4): 411-414. (in Chinese))
- [9] 武金明. 关角隧道施工中隔板与压入式通风组合方案通风设计参数的确定[J]. 兰州交通大学学报, 2013(3): 118-121. (WU J M. Determination of Ventilation Design Parameters of Combination Scheme of Clapboard and Push-in Ventilation in Construction of Guanjiao Tunnel[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2013(3): 118-121. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-4373.2013.03.026.
- [10] 曹正卯. 关角隧道运营通风防灾技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011. (CAO Z M. Research on Ventilation Disaster Prevention Technology in Guanjiao Tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese))
- [11] 高玄涛, 王英学, 张超, 等. 锦屏二级水电站特长隧洞群施工通风方案选择[J]. 铁道建筑, 2013(7): 49-51. (GAO X T, WANG Y X, ZHANG C, et al. Selection of construction ventilation scheme for extra long tunnel of Jinping II Hydropower Station[J]. Railway Construction, 2013(7): 49-51. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2013.07.15.
- [12] 郭树生. 深埋小断面输水隧洞TBM施工通风技术研究与应用[J]. 水利建设与管理, 2017(7): 1-4. (GUO S S. Research and application of TBM construction ventilation technology for deep buried small cross section tunnel[J]. Water Resources Construction and Management, 2017(7): 1-4. (in Chinese)) DOI: 10.16616/j.cnki.11-4446/TV.2017.07.001.
- [13] 杨胜, 陈霞, 高旭. 深埋长隧洞TBM施工通风除尘技术的应用[J]. 东北水利水电, 2009(7): 18-20. (YANG S, CHEN X, GAO X. Application of TBM construction ventilation and dust collection technology in deep long tunnel[J]. Northeast Water Resources and Hydropower, 2009(7): 18-20. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-0624.2009.07.006.
- [14] 朱齐平, 刘进志, 赖涤全. 特长隧洞TBM施工通风系统设计[J]. 现代隧道技术, 2007(3): 50-53. (ZHU Q P, LIU J Z, LAI D Q. Design of ventilation system for extra long tunnel TBM construction[J]. Modern Tunneling Technology, 2007(3): 50-53. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1009-6582.2007.03.010.
- [15] 张全洲. 特长隧洞施工通风系统设计及应用[J]. 铁道建筑技术, 2011(7): 102-107. (ZHANG Q Z. Design and application of extra long tunnel construction ventilation system[J]. Railway Construction Technology, 2011(7): 102-107. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1009-4539.2011.07.026.
- [16] 常晓珂, 柴军瑞, 许增光, 等. 引汉济渭椒溪河隧洞施工通风数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2017(6): 137-143. (CHANG X K, CHAI J R, XU Z G, et al. Numerical simulation of construction ventilation in jiaoxi river tunnel of Han-Ji River[J]. South to North Water Transfers and Water Conservancy Science and Technology, 2017(6): 137-143. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.06.020.
- [17] 贺广学. 小断面特长隧洞TBM施工独头通风技术浅析[J]. 价值工程, 2017(29): 104-106. (HE G X. Analysis of single head ventilation technology for TBM construction of tunnels with small cross sections[J]. Journal of Value Engineering, 2017(29): 104-106. (in Chinese))
- [18] 李凌志. 引汉济渭秦岭输水隧洞施工通风方案研究[J]. 施工技术, 2015(13): 109-112. (LI L Z. Research on construction ventilation schemes of water conveyance tunnel in Qinling of Shanxi Province[J]. Construction Technology, 2015(13): 109-112. (in Chinese)) DOI: 10.7672/sjgs2015130109.
- [19] 张民仙, 宋永军. 引红济石调水工程输水隧洞通风方案研究[J]. 陕西水利水电技术, 2007(1): 15-19. (ZHANG M X, SONG Y J. Research on the ventilation scheme for the water conveyance tunnel of the Hongjishi Water Transfer Project[J]. Shaanxi Water Resources and Hydropower Engineering, 2007(1): 15-19. (in Chinese))
- [20] 罗春红. 长大隧道施工通风系统优化研究与应用[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2009. (LUO C H. Research and application of ventilation system optimization for long tunnel construction[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2009. (in Chinese))
- [21] 曹正卯. 长大隧道与复杂地下工程施工通风特性及关键技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016. (CAO Z M. Study on ventilation characteristics and key technologies of construction of long tunnels and complex underground works[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese))
- [22] 杨凯. 中天山隧道TBM施工通风环境测试与分析[J]. 兰州交通大学学报, 2010(6): 40-43. (YANG K. Test and Analysis of the ventilation environment of TBM Construction in Zhongtianshan Tunnel[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2010(6): 40-43. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-4373.2010.06.009.
- [23] 朵生君. 中天山隧道TBM长距离施工通风方案研究[J]. 隧道建设, 2013(5): 419-422. (DUO S J. Study on long distance construction ventilation scheme of TBM in Zhongtianshan tunnel[J]. Tunnel Construction, 2013(5): 419-422. (in Chinese))
- [24] 杜士斌. 开敞式TBM的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011. (DU S B, ed. Open TBM Application[M]. Beijing: China Water Power Press, 2011. (in Chinese))
- [25] DL/T 5099-2011. 水工建筑物地下工程开挖施工技术规范[S]. (DL/T 5099-2011. Technical Specifications for Excavation of Underground Works of Hydraulic Structures[S]. (in Chinese))