



## Engineering Achievements

## 特长超深埋山岭隧道挑战与发展展望

朱合华<sup>a</sup>, 严金秀<sup>b</sup>, 梁文灏<sup>c</sup><sup>a</sup> College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China<sup>b</sup> China Railway Academy Co., Ltd., Chengdu 611731, China<sup>c</sup> China Railway Construction Co., Ltd., Beijing 100855, China

## 1. 引言

社会发展对特长超深埋山岭隧道提出了高标准要求, 而特长超深埋山岭隧道的建造与运维面临着高地应力、高地温、高水压、特殊不良地层和工程活动诱发的各种灾害问题。本文综合分析了特长超深埋山岭隧道建造与运维中的挑战和相应解决思路。在特长超深埋山岭隧道建造过程中, 应重视高地应力下的地质条件不确定性, 需采用综合超前地质预报、精细化监测和信息化动态设计施工方法, 并进一步向智能化建造方向发展。在特长隧道的运维过程中, 其通风救援和能耗问题十分突出, 须充分体现动态疏散救援、主动防护和绿色节能的理念; 同时, 应强调“建养一体化”的理念, 实现数字化感知和智能化维养。通过新理念和新技术的采用, 旨在提高建造和运维全过程的质量和效率, 在安全高效的前提下建设环境友好型隧道, 最终实现特长超深埋隧道“安全、高效、绿色、智能”建设目标。

随着社会经济发展和交通网络规划的需要, 在崇山峻岭地区修建特长超深埋隧道越来越不可避免。中国《公路隧道设计规范》(1991版)将超过3 km的隧道称为超长隧道, 但一般将长度在10 km以上、埋深在500 m以上的山岭隧道工程称为特长超深埋隧道[1]。山岭隧道主要有公路、铁路等交通隧道和水工隧洞, 尽管这类隧道具有更加环保、安全和快速的优势, 但其立项、建造和运维的成本和难度却相当大。表1为全球已建和在

建特长超深埋隧道汇总, 据不完全统计, 国外特长超深埋隧道有21条, 中国特长超深埋隧道有56条, 包括世界最长、最深的瑞士圣哥达山底隧道(长度57.1 km)、海拔3000 m以上的世界第一长隧道——中国新关角隧道(长度32.7 km)、世界最长双洞高速公路隧道——中国秦岭终南山隧道(长度18 km)和亚洲最长单洞双线高铁隧道——秦岭天华山隧道(长度16 km)。

随着需求的增长和修建技术的进步, 特长超深埋山岭隧道建设也将迎来新的发展机遇。由于特长超深埋隧道具有高地应力、高地温环境下长距离建设与运营的显著特点, 其在设计、施工和运维上的挑战是前所未有的, 需要采取新的理念与工程措施以应对这种复杂的隧道工程。

## 2. 地质问题与灾害

尽管在高山重丘地表环境艰险地区, 特长超深埋隧道以其安全、便捷、环保及受自然环境、人类活动影响小的优点, 而在交通、水利、能源等领域不断广泛应用, 但随着隧道长度由数公里向数十公里、隧道埋深由数百米向数千米这两方面量级上的跃升, 隧道所赋存的深部复杂地质环境与浅部岩体条件迥异, 且隧道潜在穿越多个地质及构造单元, 使得特长超深埋隧道的建造与运维面临着高地应力、高地温、高水压、特殊不良地层等地质上的难题, 其施工环境将十分恶劣, 且工程建设将会

表1 主要特长超深埋山岭隧道汇总（已建成/在建）

Tunnel type	Tunnels (project)	Location	Start-completion dates	Length (km) / maximum depth (m)	Construction method
Mountain railway tunnels	Gotthard Base Tunnel	Switzerland	1996–2013	57.10 / 2450	TBM + drill and blast
	Brenner Base Tunnel (Brenner Railway)	Italy to Austria	2011–under construction	55.00 / 1600	TBM + drill and blast
	Lötschberg Base Tunnel (New Alpine Railway Passage)	Switzerland	Jul 1999–Apr 2005	34.60 / 2100	TBM + drill and blast
	Gaoligong Mountain Tunnel (Dali to Ruili Railway)	China	Dec 2014–under construction	34.50 / 1155	TBM + drill and blast
	Koralm Tunnel (Koralm Railway)	Austria	2011–under construction	32.90 / 1250	TBM + drill and blast
	New Guanjiao Tunnel (Qinghai–Tibet Railway)	China	Nov 2007–Apr 2014	32.65 / 900	Drill and blast
	Ping An Tunnel (Chengdu–Lanzhou Railway)	China	Oct 2013–Feb 2017	28.44 / 1700	Drill and blast
	Guadarrama Tunnel (Madrid–Bayadorid High-Speed Railway)	Spain	2002–2007	28.38 / 900	TBM
	West Qinling Tunnel (Lanzhou–Chongqing Railway)	China	2008.8–2014.7	28.24 / 1400	TBM + drill and blast
	Semmering Base Tunnel (Gloggnitz–Mürzzuschlag Railway)	Austria	2012.4–under construction	27.30 / 800	Drill and blast
	Hakkōda Tunnel (Shinkansen Line in Northeast Japan)	Japan	Jun 1999–Feb 2005	26.46 / 540	Drill and blast
	South Lyuliang Mountain Tunnel (Shanxi–Henan–Shandong Railway)	China	May 2010–Jun 2013	23.40 / 550	Drill and blast
	Yuntunpu Tunnel (Chengdu–Lanzhou Railway)	China	Oct 2014–under construction	22.92 / 750	Drill and blast
	Lushan Tunnel (Inner Mongolia–Jiangxi Railway)	China	May 2015–Aug 2018	22.77 / 500	Drill and blast
	Zhongtianshan Tunnel (Nanjiang Railway)	China	Apr 2007–Feb 2014	22.45 / 1728	TBM + drill and blast
	Daishimizu Tunnel (Joetsu Shinkansen)	Japan	Dec 1971–Jan 1979	22.22 / 1300	Drill and blast
	Qingyunshan Tunnel (Xiangtang–Putian Railway)	China	Aug 2008–Sep 2011	22.17 / 890	Drill and blast
	Yanshan Tunnel (Tang Zhang Railway)	China	Nov 2010–Sep 2014	21.18 / 557	Drill and blast
	Wushaoling Tunnel (Lanzhou–Xinjiang Railway)	China	Mar 2003–Aug 2006	20.05 / 1100	Drill and blast
	Simplon Tunnel (Simplon Pass route)	Italy–Switzerland	I: 1898–1906 II: 1912–1921	19.80 / 2150	Lower pit + parallel pit
	Gaogaishan Tunnel (Xiangtang–Putian Railway)	China	Oct 2008–Jun 2012	17.60 / 819	Drill and blast
	Muzhailing Tunnel (Lanzhou–Chongqing Railway)	China	Mar 2009–Jul 2016	19.06 / 715	Drill and blast
	Qinling Tunnel (Xikang Railway)	China	Jan 1995–Sep 1999	18.46 / > 1000	TBM
	Yingpanshan Tunnel (Chengdu–Kunming Railway Double Line)	China	Dec 2013–Feb 2018	17.90 / 833	Drill and blast
	Dalata Tunnel (Sichuan–Tibet Railway (Lallin Section))	China	Oct 2015–under construction	17.32 / 1760	Drill and blast
	Sangzhuling Tunnel (Sichuan–Tibet Railway (Lallin Section))	China	Dec 2014–Jan 2018	16.45 / 1347	Drill and blast
	Qinling Tianhuashan Tunnel (Xi'an–Chengdu High-Speed Railway)	China	Jan 2013–Jul 2016	15.99 / 1016	Drill and blast
	Dagushan Tunnel (Lanzhou–Wulumuqi High-Speed Railway)	China	Mar 2010–Feb 2014	15.92 / 1085	Drill and blast
	Daiyunshan Tunnel (Xiangtang–Putian Railway)	China	Dec 2008–Mar 2012	15.60 / 638	Drill and blast
	Zhujiashan Tunnel (Xuzhou–Lanzhou High-Speed Railway)	China	Jan 2013–Aug 2016	14.95 / 715	Drill and blast
Daqinling Tunnel (Xi'an–Chengdu High-Speed Railway)	China	Feb 2013–Sep 2016	14.84 / 1185	Drill and blast	
Beacon Hill Tunnel (Xuzhou–Lanzhou High-Speed Railway)	China	Mar 2013–May 2015	14.75 / 708	Drill and blast	

(续表)

Tunnel type	Tunnels (project)	Location	Start-completion dates	Length (km) / maximum depth (m)	Construction method
Mountain highway tunnels	Dayaoshan Tunnel (Hengyang-Guangzhou Railway)	China	Nov 1981-May 1987	14.30 / 910	Drill and blast
	Tianping Tunnel (Chongqing-Guiyang Railway)	China	Apr 2013-Jul 2016	13.98 / 900	Drill and blast
	Maijishan Tunnel (Xuzhou-Lanzhou High-Speed Railway)	China	Jan 2013-Apr 2016	13.93 / 675	Drill and blast
	Shin-Shimizu Tunnel (Joetsu Shinkansen)	Japan	Unknown-1967	13.50 / 1200	Drill and blast
	Mont Cenis Tunnel (Turin-Modane railway)	Italy-France	Aug 1857-Dec 1870	13.70 / 1800	Drill and blast
	Tuan Tunnel (Chengdu-Kunming Railway Double Line)	China	Mar 2014-Nov 2017	13.37 / 550	Drill and blast
	Ba Yu Tunnel (Sichuan-Tibet Railway (Lalin Section))	China	Dec 2014-under construction	13.07 / 2080	Drill and blast
	East Qinling Tunnel (Ningxi Railway)	China	Jan 2005-Jan 2007	12.27 / 580	Drill and blast
	Zongfa Tunnel (Chengdu-Kunming Railway Double Line)	China	Sep 2014-May 2017	11.97 / 570	Drill and blast
	Yuanliangshan Tunnel (Yuhuai Railway)	China	Mar 2001-Feb 2004	11.07 / 780	Drill and blast
	Arlberg Railway Tunnel (Arlberg Railway, Western Austria)	Austria	Jun 1880-Jul 1885	10.65 / 1311	NATM
	Qiyueshan Tunnel (Yiwan Railway)	China	Dec 2003-Dec 2009	10.53 / 670	Drill and blast
	Laerdal Tunnel (Oslo-Bergen Highway)	Norway	1995-2000	24.51 / 1400	TBM + drill and blast
	Zhongnanshan Tunnel (Xikang Expressway)	China	Mar 2002-Jan 2007	18.02 / 1640	Drill and blast
	Jinpingshan Tunnel (Traffic Channel of Jinping Hydropower Station)	China	Oct 2003-Aug 2008	17.5 / 2375	Drill and blast
	Gotthard Road Tunnel (The North-South Trunk of the Swiss State-Owned Highway)	Switzerland	May 1970-Sep 1980	16.92 / 1000	Drill and blast
	Muzhailing Tunnel (Weiyuan-Wudu Expressway)	China	Apr 2016-under construction	15.23 / 629	Drill and blast
	Arlberg Road Tunnel (S16 Arlberg Highway)	Austria	1974.7-1978.12	13.98 / 736	
	Micangshan Tunnel (Sichuan Ba Shan Expressway)	China	Oct 2013-Aug 2018	13.81 / 1070	Drill and blast
	Xishan Tunnel (Taigu Expressway)	China	May 2009-Oct 2012	13.65 / 700	Drill and blast
	New Erlang Mountain Tunnel (Ya Kang Expressway)	China	Aug 2012-Sep 2017	13.46 / 1500	Drill and blast
	Hongtieguan Tunnel (Lin Chang Express)	China	Jun 2009-Sep 2013	13.12 / 600	Drill and blast
	White Horse Tunnel (Jiu Mian High-Speed)	China	Apr 2016-under construction	13.01 / 1092	Drill and blast
	Fréjus Road Tunnel (Bardonecchia-Modane route)	Italy-France	1974-1980	13.00 / 1800	Drill and blast
	Snow Mountain Tunnel (Taiwan National Highway No. 5)	China	Jul 1991-Apr 2004	12.90 / 600	TBM + drill and blast
	Maijishan Tunnel (Baotian Expressway)	China	Dec 2005-Jun 2009	12.29 / 675	Drill and blast
	Gaoloushan Tunnel (Pingliang-Mianyang Expressway)	China	Jul 2017-under construction	12.25 / 1500	TBM + drill and blast
	Grand Canyon Tunnel (Ehan Expressway)	China	Sep 2016-under construction	12.17 / 1830	Drill and blast
	East Tianshan Tunnel (Barikun-Hami Highway)	China	Aug 2016-under construction	11.77 / 1225	Drill and blast
	Mont Blanc Tunnel (European Route E25)	Italy-France	1958-Aug 1962	11.61 / 2400	Drill and blast
	Old Camp Tunnel (Baoshan-Lushui Expressway)	China	Mar 2016-under construction	11.52 / 1268	Drill and blast
	Yunshan Tunnel (Dongying-Lvliang Expressway)	China	2011-2014	11.39 / 743	Drill and blast
	Yingpanshan Tunnel (Huali Expressway)	China	Dec 2016-under construction	11.31 / 868	Drill and blast
Baojiashan Tunnel (Xikang Expressway)	China	Apr 2006-Jan 2009	11.20 / 700	Drill and blast	
Kan-Etsu Tunnel (Kan-Etsu Expressway)	Japan	1985-1991	11.06 / 1190		
Hida Tunnel (Tokai-Hokuriku Expressway)	Japan	Oct 1996-May 2008	10.74 / 1015	TBM + NATM	
Tongzi Tunnel (Lanzhou-Haikou Expressway)	China	Mar 2018-under construction	10.50 / 649	Drill and blast	

Tunnel type	Tunnels (project)	Location	Start-completion dates	Length (km) / maximum depth (m)	Construction method
Mountain hydraulic tunnels	Baota Mountain Tunnel (Pingyu Expressway)	China	Jun 2009–Jun 2012	10.20 / 700	Drill and blast
	Plabutsch Tunnel (A9 Motorway (Austria))	Austria	Unknown–1987	10.09 / 763	NATM
	Niba Mountain Tunnel (Iasi Expressway)	China	Dec 2007–Dec 2011	10.00 / 1650	Drill and blast
	Tunnels in the water diversion project for the central area of Yunnan Province (Water diversion project for central area of Yunnan Province)	China	2017–2025	— / 607.4	TBM + drill and blast
	Hanjiang–Weihe water conveyance tunnel	China	2012–2020	81.60 / 2012	TBM + drill and blast
	Pahang Selangor Raw Water Transfer Tunnel (Pahang Selangor Raw Water Transfer Tunnel Project)	Malaysia	2010–Feb 2014	44.60 / 1246	NATM + TBM
	Diversion tunnel of Jinping II Hydropower Station (Jinping II Hydropower Station)	China	Jan 2007–Aug 2011	16.67 / 2525	TBM + drill and blast
	Futang Hydropower Station Diversion Tunnel (Futang Hydropower Station)	China	Apr 2001–Feb 2004	19.32 / 700	Drill and blast

诱发岩爆、大变形、塌方甚至突泥涌水等灾害。

### 2.1. 高地应力

初始地应力场的存在是岩体有别于其他介质的最主要特征之一。随着隧道埋深的增大，地应力水平逐渐增高，高地应力（最大主应力 $\sigma_1 > 20$  MPa或岩石强度应力比 $S_0 = R_c/\sigma_1 < 7$ ）环境对深埋隧道围岩压力、变形和稳定性影响显著，主要会引起岩爆和大变形灾害，对隧道建设造成极大的安全危害、经济损失和工期延误。例如，锦屏二级水电站引水隧洞，最大埋深达到2525 m，埋深超过1500 m的洞段占比75%，实测最大主应力 $\sigma_1$ 为46 MPa，岩体强度应力比 $S_0 = R_c/\sigma_1$ 约为2.13，施工中发生700多次岩爆，特别是2009年11月28日发生的极强岩爆，沿洞轴线28 m范围内支护系统全部毁损，隧道掘进机（TBM）永久被埋，造成人员伤亡的惨痛后果；兰渝铁路木寨岭隧道全长19.02 km，最大埋深约715 m，实测最大主应力27.16 MPa，岩体强度应力比 $S_0$ 为0.49，隧道穿越板岩/炭质板岩地层岭脊核心段共2000 m，施工时挤压大，变形显著，衬砌结构受到严重破坏。

### 2.2. 高地温

一般将围岩温度超过30 °C的隧道称为高地温隧道，受地温梯度及活跃的构造运动影响，深埋隧道常伴有高地温现象，且一般埋深越大高地温现象越严重。随着中国西部川藏铁路等重大基础设施项目的建设，出现了一批典型的高地温隧道工程，如拉林铁路桑珠岭隧道最大埋深1347 m，最高地温达89.9 °C，接近水在西藏的沸

点；大瑞铁路高黎贡山隧道最大埋深1155 m，最高地温达45 °C。高地温问题容易使施工作业环境恶化，劳动生产效率降低，对作业人员健康和安全产生威胁；高地温产生的附加温度应力会引起隧道初期支护及二次衬砌开裂，影响结构安全和耐久性，需研究适应高地温条件的混凝土配合比及防排水材料。

### 2.3. 高水压

富水区深埋山岭隧道、高压输水隧洞将不可避免地遇到高水压问题，尤其是在遇到断层破碎带、岩溶等不良地质条件时[2]。断层破碎带、岩溶地区的高水压导致突泥涌水问题，易危及隧道建设安全、扰动围岩地下水平衡和破坏周边环境，如中国云南大瑞铁路大柱山隧道涌水量达 $7 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ，2008年开工至今仍未贯通，已涌水 $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ （相当于15个西湖水体），澜沧江两岸原始生态环境遭受破坏。针对高水压隧道，通常采用超前注浆的方式加固围岩体，形成高水压承载体并阻止透水通道，但目前尚未有科学系统的降压减排技术。

### 2.4. 特殊不良地层

与中短隧道和长隧道相比，超过10 km的特长隧道遇到各种不良地质条件的概率会大大增加，典型不良地质条件有断层破碎带、软岩、岩溶、煤系地层等。前文已述及断层破碎带、岩溶地层的高水压问题，而特长隧道中的煤系地层瓦斯突出易导致爆炸和人员窒息等安全事故，救援难度极大。这里重点讨论隧道穿越断层破碎

带的震害和软岩大变形问题:

(1) 隧道穿越断层破碎带时, 围岩稳定性差, 在活动断层地区的震害容易直接切断隧道线路。尤其是在高地地震烈度地区, 隧道结构难免出现损坏, 甚至局部垮塌。Yu等[3]对汶川震中区的55座隧道进行震后调查, 发现有38条隧道结构表现出不同程度的损坏, 以洞口破坏为主, 洞身亦有破坏, 这很可能是因为隧道结构和周围地层变形不协调导致的。为此需要在高地地震烈度区开展特长超深埋隧道结构的韧性设计, 且依据围岩地质条件研究制定隧道衬砌结构的设计标准、设计寿命和结构型式。

(2) 软岩 (soft rock) 可分为地质型软岩和工程型软岩。地质型软岩指强度低、孔隙度大、胶结程度差、受构造面切割及风化影响显著或含有大量膨胀性黏土矿物的松、散、软、弱岩层, 该类岩石多为泥岩、页岩、粉砂岩和泥质矿岩, 是天然形成的复杂地质体; 工程型软岩是指在工程力作用下产生显著塑性或黏塑性变形的工程岩体。在高地应力条件下, 软岩在隧道施工中极易因应力释放产生显著的流变和大变形问题。对于新奥法 (NATM) ——一种钻爆法 (drilling-blasting method) 施工隧道, 因开挖临空面大, 若初期衬砌施作不及时, 难以控制高地应力区的软岩大变形问题; 对于TBM施工隧道, 高地应力区软岩大变形造成的卡机现象非常突出。

### 3. 挑战与工程措施

#### 3.1. 综合超前地质预报

在特长超深埋隧道中, 上述地质问题出现的概率更高且后果更加严重, 然而要防治这些地质问题, 首要任务是准确的超前地质预报工作。对于埋深超过500 m的山岭隧道传统的竖向钻孔等调查方式十分困难且参考价值非常有限, 因此在采用常规地质分析方法的基础上, 综合使用钻探和物探预报是当前有效的超前地质预报方法, 也是将来的重要研究方向[4,5]。此外, 对于如岩爆、大变形等特定地质灾害的专项监测预报, 也是保证隧道建设安全必不可少的手段。

##### 3.1.1. 钻探预报法

钻探预报法有超前钻探法和超前导坑法, 其效果直观精确、预报内容全面, 但时间较长、成本高且预报距离短, 通常用于地质条件较复杂或富含水的地层中。掌

子面超前钻探 (probing ahead of the face with drilling) 可较好地预测平行于隧道掌子面的地质结构, 却无法准确预测垂直于隧道掌子面的地质结构。超前导坑 (advance heading) 又分为超前平行导坑和超前正洞导坑: ①超前平行导坑 (advance heading parallel to the main tunnel) 预报直观精确, 可在施工过程中用于通风、运送矿碴、排水、注浆, 且可横向切入正洞隧道轴线开辟新的工作面加快施工进度, 也可扩建成新的隧洞; ②超前正洞导坑 (advance heading in the main tunnel) 在隧道正洞掌子面向前开挖, 是正洞的一部分, 预测效果比平行导洞更佳。

#### 3.1.2. 物探预报法

物探法通常是采用发射电磁波、弹性波 (地震波、声波)、红外辐射, 以及电流等方法来检测掌子面前方的岩体结构面、岩体性质和地下水, 且随着物探技术的不断发展, 其预测精度和范围也在不断提高, 越来越成为隧道超前地质预报中不可缺少的一部分, 典型物探法包括: ①弹性波法探测距离通常可以达到100 m, 通过地质体中传播的反射波预报隧道掌子面前方及周围临近区域的地质情况。典型方法有隧道地震预测 (TSP)、真反射层析成像 (TRT)、隧道地震层析成像 (TST)、地震负视速度法 (隧道VSP)、隧道地质预测 (TGP)、水平声波剖面法 (HSP, horizontal sound profile)、陆地声呐法; ②电磁波超前预报法探测距离通常不大于30 m, 可用来探测水体, 分为通过发射和接收高频电磁波进行检测的地质雷达法 (ground probing/penetrating radar, GPR)、发射脉冲磁场接收二次感应涡流磁场的瞬变电磁法 (transient electromagnetic method, TEM)、接收物体发射的红外电磁波的红外探水法 (infrared water exploration technology); ③电法, 其以地质体电性差异为基础, 典型方法有隧洞钻孔电法超前预报 (bore-tunneling electrical ahead monitoring, BEAM) 方法、三维 (3D) 激发极化法 (three-dimensional induced polarization method) [6], 可用来预报岩体性状和含水情况, 通常与TBM结合进行近距离预报。

#### 3.1.3. 高地应力及诱发灾害监测

小型压裂地应力测试是目前深层地应力测试最有效的方法[7,8]。高地应力诱发的岩爆及大变形成因机制复杂, 预测预报难度较大, 监测预警是切实有效的安全保障手段。为预警岩爆的需要, Feng等[9,10]提出基于开

挖过程中微震信息时空演化的岩爆动态调控理论, 在施工过程中根据实测到的微震信息演化规律进行岩爆等级预警, 据此进行反馈分析和动态调控, 研发了岩爆微震实时监测解译分析系统, 在锦屏水电站及Neelum–Jhelum水电站引水隧洞、川藏铁路深埋隧道等工程中得到了成功应用。Ma等[11]通过岩体损伤过程特征提取对应的微震监测事件, 总结出微震事件密度云图、微震事件震级与频度的关系、微震事件震级、能量集中度等微震监测指标规律, 并以地震学中的3S (stress buildup, stress shadow, stress transference) 原理作为岩爆判断基础, 提出4个岩爆判据, 揭示出微震的时空演化与岩爆之间的关系, 并且在锦屏二级水电站引水隧洞岩爆预测预报中成效显著。

#### 3.1.4. 软岩大变形监测

隧道施工过程中, 应对拱顶下沉、周边收敛、锚杆轴力、围岩压力等进行系统的监控测量, 特别需要对掌子面的挤出变形进行动态监测。通过数据趋势分析, 对施工初期的围岩变形进行科学预测和阶段控制, 再根据预测值动态及时调整施工方案和施工参数, 实现动态反馈设计。

### 3.2. 设计与施工

#### 3.2.1. 设计方法

隧道设计需充分考虑隧道本身工程与水文地质条件, 而特长超深埋隧道的勘察资料相当有限, 施工过程中一直会动态更新工程师对地质情况的认知, 对此宜发展高精度采集与分析方法进行动态设计[12,13]。

特长深埋岩体隧道面临的地质复杂性, 使施工前的设计方案难以同时满足安全和经济要求, 需要高水平的动态设计体系。而囿于目前的工程施工组织形式, 施工过程中的动态设计面临着以下3个主要难点:

(1) 设计所需的基础数据获取速度慢、准确度低。地应力的分布难以准确获取, 施工中缺乏高精度、自动化的手段获取岩体几何力学参数, 超前地质预报的准确性严重依赖操作人员的经验, 监测数据易受干扰并无法及时反馈。

(2) 从现场基础数据得到设计参数过程比较粗糙。基于围岩分级的设计方法不够精细化, 面对特殊条件岩体时各参数间的权重难以调整, 系统锚杆支护体系缺乏应对各向异性围岩的灵活性, 部分基础数据的现场获取难度过高, 数值分析等手段难以及时、准确地应用于动

态设计过程。

(3) 施工管理过程中责任主体不明确。目前往往是施工方或者监测方在施工中发现问题后, 反馈给业主方或设计方, 经设计方或第三方的再次调查确认, 并经多方协商确定更改设计方案后, 再交给施工方执行, 缺乏责任主体, 过程冗长, 效率低, 其中一个环节的问题往往引发连锁反应。

深埋隧道岩体特征及受力状态与浅埋隧道有很大不同, 深埋隧道处构造应力影响较小, 其三向应力均较大, 应力各向异性较浅处低, 有必要采用真三维强度准则 (Zhang-Zhu 强度准则[14]) 以考虑中主应力的影响。深部地层应力特点使大埋深隧道断面采用圆形相对于马蹄形在结构受力方面具有一定优势。深埋隧道所处位置的地应力和地质构造更难以全面准确地掌握, 岩爆和大变形的风险相对较大, 支护型式和参数的选取也与浅埋隧道有很大不同。

岩体隧道动态设计是一个包括信息获取、数据分析及应用反馈的体系化过程。基础信息随着施工过程不断获取和更新, 其速度和准确性是动态设计的必要基础。施工前勘察阶段得到的地应力信息覆盖面难以准确反映其在隧道掘进过程中的不断变化, 可以通过施工中在隧道内部进行的小型地应力测试, 获取地应力的变化信息[7,8]。施工过程暴露出的岩体, 可以通过双目数字照相[15]和3D激光扫描技术[16]快速获取岩体表面3D点云, 再通过空间提取算法得到岩体表面结构面产状、粗糙度等几何信息[17]。采用施密特锤快速冲击测试获取岩体回弹刚度, 再换算为岩体强度、泊松比等力学参数[18]。采用远程无线传输系统及时反馈现场超前预报及其他监测信息, 在后台服务器进行计算机辅助识别和处理。

数据分析需要通过数字化信息平台, 连接现场数据与服务器, 将基础数据分类存储, 自动提取动态设计需要的间接数据, 如围岩分级所需的各类参数。将岩体和结构的监测数据及时纳入信息平台进行分析, 可以对动态支护效果进行快速评价。对于支护设计, 除了采用更加精细化的围岩分级系统, 还可以结合快速的数值计算, 通过数值分析结果对支护效果进行预测。采用关键块体分析和非连续变形分析[19]方法, 还可以直接反映岩体的各向异性特征, 对支护进行局部差异化设计。

施工管理过程中, 对于隧道动态设计宜采用以设计方为主体进行组织, 由设计方直接负责信息流的获取、传递、分析、应用和反馈, 业主方和监理方以监管为主, 施工方以执行设计方案为主, 以减少信息传递环节, 提

高效率 and 准确度。

此外，由于特长超深埋隧道自身特点，其抗震设计将面临非一致地震动空间效应、高地应力稳定性两大难题[20,21]。

特长隧道通常延伸数公里以上的距离，沿线的地形地质条件会发生很复杂的变化，因而地震波在隧道纵向各点引起的振动也存在一定的差异，即非一致地震动空间效应。以往对隧道抗震设计集中于一致地震动输入，不考虑地震动的空间变化性。Yu等[22]、Yuan等[23]通过实验观测发现，相比一致输入，非一致地震动输入会显著放大隧道结构的受力和变形响应，并据此推导出行波效应下长隧道纵向地震响应的理论解[21,24]，可以简便、快速地对长隧道结构的抗震安全性进行评估，为实际长隧道工程抗震设计提供了理论依据和快速简化分析手段。

随着隧道埋深的增大，地应力也随之增高，超深埋隧道必将处于高地应力环境，在地震作用下会更易发生失稳破坏。汶川震中区隧道震害调查表明，处于高地应力环境中的隧道衬砌更易发生损害[3]。强震作用下高地应力环境还有触发岩爆等地质灾害的可能。目前缺乏高地应力、高地震烈度区隧道结构的抗震设计与分析方法，需加强对特长、超深埋隧道强震灾变机制及设计对策研究，以及对隧道抗减震技术及抗震构造措施的研究工作，形成合理统一的抗震性能概念设计。此外，如何将抗震减震措施优化组合，并使其适应于复杂不利地质条件下特长超深埋隧道工程的地震响应特性仍是当前亟待解决的主要问题之一。

### 3.2.2. 施工方法

特长超深埋岩石隧道施工方法主要有钻爆法和TBM法（日本、中国等特指用于岩石地层）。钻爆法的核心思想为NATM法理念，即充分利用围岩的自稳性能，使支撑系统和围岩形成一个整体。钻爆法成本相对较低，施工较灵活且适应性强，易展开多工作面作业，但掘进速度慢，尤其在硬岩地层中开挖难度大，工序复杂且各工序间相互影响，无法连续掘进，另外钻爆法产生的冲击容易诱发岩爆涌突水等灾害。TBM法具有机械化、自动化的特点，施工速度快（一般是常规钻爆法的3~10倍）[25]、施工质量好（洞壁更光滑不易超欠挖，安全环保，可以减少辅助洞室避免地表破坏，自动化程度高，工人劳动强度低），当隧道长径比大于600时采用TBM施工是经济的[25]，但其成本大，对工人技术水平

要求高，且施工灵活性、适应性较差（无法改变洞径、对地层的适应性差），在深埋软岩中施工时易发生卡机事故。

特长隧道出碴应提高机械化水平，实现快速出碴，钻爆法施工出碴时应注意工序连续性，另外弃碴堆积可能占用大量土地，诱发地质灾害和水土流失，严重影响环境，应将其作为工程材料综合利用，减少弃碴堆放对土地资源的侵占，对有害弃碴进行处理或填埋。

在特长超深埋隧道施工过程中，应对可能的地质灾害问题的措施有：

（1）岩爆。提前释放应力、主被动支护相结合和机械化施工降低安全风险。

（2）大变形。①以下措施可用于解决大变形：新法[岩土控制变形分析法（ADECO-RS）]，临时保护超前核心围岩，充分调动和发挥超前核心围岩的自承能力；②NPR锚杆/索大变形控制技术：何满潮等[26]基于负泊松比（negative poisson's ratio, NPR）材料或结构在抗冲击、抗剪切及吸收能量等方面的优异性能，研发具有NPR结构的新型恒阻大变形锚杆/索。③Li等[27]等研发的D-Bolts新型吸能锚杆，锚杆全长用水泥砂浆锚固，锚头被牢固固定的同时光滑的钢筋可随着岩体变形自由伸缩，延伸性可达15%。D-Bolts将岩体变形的拉力均布在每个锚固段之间，避免了由于裂隙张开引起应力集中导致的过早达到荷载峰值而失效，能较好地适应岩爆和大变形。

（3）高地温。应采取措施进行降温除湿，包括：①加大通风量，放置冰块；②设置保温隔热层；③埋置冷却管；④注意钢筋混凝土配合比和配筋，注意抗裂。

（4）高水压。由于环保的高要求，同时也考虑到隧道结构的保护，应采用以堵为主、限量排放[28]的治理原则，宜结合超前地质预报确认掌子面前方的地下水状态，在对水文地质数据分析管理时可以采用地理信息系统（GIS）平台[27]。根据易发生涌水突泥地段的情况，选择以排为主（高压富水岩溶区等）、以堵为主（小于0.5 MPa的基岩裂隙水）和排堵结合（小于5 MPa的裂隙水或已经过排水处理的岩溶水）的治理方式[29]。隧道围岩地下水的治方式有：①在高压富水的岩溶区，可用超前掘进来释放岩溶水中集聚的能量，但不应在雨季采用，因为此时过多的水量会对隧道造成危害[30]；②采用超前注浆堵住裂隙或溶洞并作为长期加固的措施[31]；③超前喷射注浆可以用于涌水突泥问题的快速处理[32]。

(5) 地震震害。在特长超深隧道地震震害的防治方法中,除了衬砌注浆和隧道支护的构造措施外,重要的防治思路应该保证隧道结构和地层的变形协调,使得隧道结构和地层在几何上紧密贴合,在物理性质上具有相近的刚度。

### 3.3. 运营与维护

#### 3.3.1. 特长隧道通风

(1) 施工通风。隧道施工通风常用的方法有机械压入式、抽出式和混合式通风,以及利用辅助通道通风等方法。特长超深埋山岭隧道具有建设规模大,开挖、支护工程量大等特点,随着隧道长度显著增加,传统的中短隧道施工通风方法不再适用,特长超深埋隧道施工通风面临着诸多难题。例如,通风方案设计不当、通风系统布局不合理、通风机械设备选型不合理;前期环境气压监测不到位、造成通风效果差,洞内施工空气环境恶劣;同时,施工通风方式较为单一,不能根据隧道施工进尺掌握动态的施工通风方案。

随着我国公路、铁路交通和引水工程的不断发展,特长超深埋隧道的施工通风理论得以不断发展和完善;应借助计算流体力学(CFD)等软件精细分析施工期有毒气体的扩散规律,尤其是在煤系地层中,需要同时结合隧道施工通风安全措施和管理体系考虑通风方案。

(2) 运营通风。隧道运营通风除了满足正常运营工况下的污染物稀释要求,还需满足突发火灾工况的排烟要求[33]。对于运营期的特长隧道,传统的自然通风和机械通风方法已经无法满足节能和安全的要求。随着隧道长度增加,车辆在隧道中行驶时间增加,导致隧道内污染物排放量和隧道需风量显著增大,借助竖井、斜井等辅助坑道通风,将隧道内封闭环境与大气环境联通是工程上常见的方法,但超深埋隧道的竖井、斜井的建设工程量和运营能耗均较大。此外,火灾、高地温和瓦斯气体也给特长隧道运营通风提出了新的挑战。

隧道通风方式在20世纪七八十年代经历了由横向和半横向通风方式为主向纵向通风为主的发展历程。随着绿色节能环保的理念的推广,双洞互补通风[34]、单通道送风式通风和服务隧道通风(平行导洞)等新型方法不断涌现,自然通风及各种新通风方法在长隧道中的应用也日渐增多。

特长超深埋隧道通风控制技术存在通风设备闲置率高、预测车流量和污染物浓度不准确和浪费严重等问题。随着现代控制理论和智能控制研究的不断进展,智

能通风控制方法逐渐在隧道中得到应用,取得了较好的效果[35]。

#### 3.3.2. 特长隧道的防灾救援与标识

(1) 防灾救援。隧道火灾产生的有毒有害烟气是造成火灾中人员伤亡的主要原因[36]。另外,由于空间封闭,特长隧道中火灾产生的热量不易散除,热量积累导致隧道内温度迅速升高,将对隧道结构的稳定性和完整性构成严重的威胁。

特长隧道发生火灾时,疏散与救援难度大,借助于数字化动态疏散救援技术和人工智能(AI),实现隧道智慧防灾[37]。正常运营时应实时监测隧道内温度、火灾报警系统、消防灭火系统运行状态。火灾工况时应利用火灾理论、数据挖掘及数字化等技术,实时重构隧道火情,提供关键信息和隧道内实时状态,指导火灾扑救及人员救援疏散。隧道通风系统应根据火灾工况和人员疏散救援方案进行相应的通风排烟,从而降低隧道火灾所带来的危害及损失。

近年来,隧道火灾防治新思路不断涌现。隧道衬砌结构主动防火方面有微胶囊自防火混凝土材料[38];隧道消防系统有水幕屏蔽消防系统[39]等为隧道智慧防治火灾提供了新思路。

(2) 运营期隧道标识。隧道由于空间封闭、轮廓单一、没有自然光线、内外信息阻隔、识别性差,驾驶员对目的地的判断完全取决于标识系统。如果标识设置不合理,极容易错过重要标示信息,同时也造成驾驶员精神上的紧张与精力上的消耗。若隧道突发交通事故,由于隧道内视野差、横向宽度窄,很容易发生二次事故[40],特长隧道中这种问题更加严重。

目前隧道标识设置的主要问题有:出入口处标识牌不醒目。在隧道出入口附近,由于内外光强度有着显著的差异,驾驶员在出入口附近产生明显的“明适应”或者“暗适应”,导致驾驶员对标识的识认性急剧下降,严重时甚至导致交通事故。同时隧道标识安装位置较高、不易打扫,隧道内的标识牌容易积满灰尘,驾驶员难以判断标识牌的内容。对进出隧道段即:接近段、入口段、过渡段、隧道段、出口段的光照需采用专项设计。未来,我国特长隧道照明标识重点在于研发新型光源,并朝着节能绿色照明和大数据智能照明控制方向发展。

#### 3.3.3. 运营期隧道性能

由于地质条件、气候环境、施工质量、维养匮乏等



原因,隧道在其运营期内常面临着不同形式与程度的变形与病害作用,其中以横、纵向轮廓变形,渗漏水,开裂为主。这些变形与病害的出现,往往会导致隧道结构性能的退化,从而影响其安全性、适用性和耐久性。此外由于地下结构本身的复杂性、隐蔽性以及其与周边环境的相互作用[41],隧道结构常表现出功能复合、监测困难、灾害频发、风险聚集等特点。对此,国内外研发了多种智能检测系统与公路检测车设备[42]以弥补传统的人工巡检技术带来的主观误差、检测效率低、安全隐患等问题。而无线传感网络(wireless sensor network, WSN)的搭建[43-45],雷达[46]、无人机(UVA)[47]以及其他先进技术设备的使用也促使隧道健康状况检测与评估进入了全新的数字化纪元。

在大数据的背景下,不再仅仅是发生故障后的及时治理,更多的是实现灾前预报。关于隧道服役性能退化的量化分析目前尚处于起步阶段:Li等[48]提出了隧道服役性能指标(tunnel serviceability index, TSI)的概念,它是盾构隧道样本变形病害组合的1~5级评分系统;Chen等[49]采用多指标多因素模型建立了TSI与观测变量之间的线性映射关系。

### 3.4. 工程投资与管理

特长超深埋隧道工程量大、难度高,存在投融资难度大和管理困难等技术问题和非技术问题。标准化管理合作模式、更有效的沟通方式和员工教育有助于这些非技术问题的解决。有关特长超深埋隧道的投资问题,有诸多基础设施建设经验可供学习,如Build-Operate-Transfer (BOT)模式[50]和Public-Private-Partnership (PPP)模式[51]。在建设施工过程中,各方的利益诉求其实难以协调,应通过规范化的管理沟通方式和员工培训的改变加以改善[52]。

## 4. 进一步发展方向

随着社会发展,特长超深埋隧道的修建越来越有必要,“安全、高效、绿色、智能”是未来的发展方向。第一,隧道建设要保证施工运维的安全高效。首先应发展高效的超前地质预报方法,钻探、物探等多种超前预报方法的综合运用,并结合隧道掌子面地质信息的数字化快速采集和全自动提取技术,开展围岩地质体大数据的深度学习和机器学习,为安全施工提供有

力基础。同时,要大力发展机械化施工设备,不仅要推进TBM机械化施工,还应考虑钻爆法各个施工工序的机械化,灵活地将TBM法与钻爆法结合起来,在各种地质问题面前保证安全和效率。通过采用新材料等提高隧道防灾抗灾能力、加强数据监测分析提高救灾能力、借助现代控制技术改善隧道通风效果与隧道施工环境、采用合理隧道性能评估指标有助于隧道长期安全可靠运营。

第二,在安全高效建设隧道的基础上,应加强绿色隧道的建设理念,充分体现“四节一环保”的思想,注重环境保护的重要性,即:①节能:节约电能、化石燃料,开发地热资源;②节水:保护地水平衡;③节材:洞碴综合加工利用;④节地:实现弃碴场的生态、经济、合理复垦;⑤环境保护:做到隧道施工尽可能少扰动、微扰动,将隧道建设对周边生态环境的破坏降低到最小化的程度。

第三,将现代信息技术与特长超深埋隧道建设全过程有机融合起来,是今后相当长时期的工作任务。特长超深埋隧道的特征是地处艰险地区,人迹罕至,且超长、超埋深,人类需要借助智能化装备、数字化信息采集技术、新一代通信网络[如5G网络、物联网(IOT)、移动通信等]、大数据AI分析方法、云/物计算方法等现代信息手段,开展隧道建造和运维的智能化乃至智慧化服务。在边远供电和通信严重短缺的地区,对感知和发射等元件实行无源化非常必要。智能化的前提是数字化和信息化,要能够精细化快速监测隧道全寿命周期的信息,进行动态信息化设计施工,突出建养一体化管理,并建立开放共享的信息服务平台[12],对建造与运维的各环节实现智能化,如智能地质预报、智能设计、智能施工和智能运维等,并结合智能化设备和新材料的研发,最终实现完全智慧化的隧道建养。

## 致谢

在本文撰写过程中,同济大学研究生王熙、陈子扬、郭超、朱梦琦和副教授禹海涛博士、助理研究员武威博士付出了辛勤的劳动,崔俊芝院士、王华军教授级高级工程师、章连洋教授和庄晓莹教授对论文做了精心的指导、审阅和修改,在此表示衷心的感谢。同时感谢国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目(41827807)的资助。

## References

- [1] Xu Z, Huang R, Wang S. Tunnel classifying in light of depth (i.e thickness of overburden). *Chin J Geol Hazard Control* 2000;11(4):5–10. Chinese.
- [2] Li SC, Xu ZH, Huang X, Lin P, Zhao XC, Zhang QS, et al. geological identification, hazard mode and typical case studies of hazard-causing structures for water and mud inrush in tunnels. *Chin J Rock Mech Eng* 2018;37:1041–69. Chinese.
- [3] Yu H, Chen J, Yuan Y, Zhao X. Seismic damage of mountain tunnels during the 5.12 Wenchuan earthquake. *J Mt Sci* 2016;13(11):1958–72.
- [4] Chen G, Wu Z, Wang F, Ma Y. Study on the application of a comprehensive technique for geological prediction in tunneling. *Environ Earth Sci* 2011;62(8):1667–71.
- [5] Li SC, Liu B, Sun HF, Nie LC, Zhong SH, Su MX, et al. State of art and trends of advanced geological prediction in tunnel construction. *Chinese J Rock. Mech Eng* 2014;33:1090–113. Chinese.
- [6] Li S, Liu B, Liu Z, Nie L, Song J, Sun H, et al., inventors; Shandong University, assignee. Advanced detection device, system and method using forward three-dimensional induced polarization for TBM construction tunnel. China Patent CN2013/000041; 2014 Jul 10.
- [7] Haimson BC. Standard test method for determination of the in-situ stress in rock using the hydraulic fracturing method. *Annu Book ASTM Stand* 1989;4:851–6.
- [8] Haimson BC, Cornet FH. ISRM suggested methods for rock stress estimation—part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF). *Int J Rock Mech Min Sci* 2003;40(7–8):1011–20.
- [9] Feng X, Wu S, Li S, Qiu S, Xiao Y, Feng G, et al. Comprehensive field monitoring of deep tunnels at Jinping underground laboratory (CJPL-II) in China. *Chin J Rock. Mech Eng* 2016;35(4):649–57. Chinese.
- [10] Feng X, Zhang Z, Chen B, Feng G, Zhao Z, Ming H, et al. Dynamical control of rockburst evolution process. *Chin J Rock Mech Eng* 2012;31(10):1983–97. Chinese.
- [11] Ma T, Tang C, Tang L, Zhang W, Wang L. Mechanism of rock burst forecasting based on micro-seismic monitoring technology. *Chin J Rock Mech Eng* 2016;35(3):470–557. Chinese.
- [12] Zhu H, Li X, Lin X. Infrastructure Smart Service System (iS3) and its application. *China Civ Eng J* 2018;51:1–12.
- [13] Zhu H, Wu W, Li X, Chen J, Huang X. High-precision acquisition, analysis and service of rock tunnel information based on iS3 platform. *Chin J Rock Mech Eng* 2017;36(10):2350–9. Chinese.
- [14] Zhang L, Zhu H. Three-dimensional Hoek-Brown strength criterion for rocks. *J Geotech Geoenviron Eng* 2007;133(9):1128–35.
- [15] Zhu H, Wu W, Chen J, Ma G, Liu X, Zhuang X. Integration of three dimensional discontinuous deformation analysis (DDA) with binocular photogrammetry for stability analysis of tunnels in blocky rockmass. *Tunn Undergr Space Technol* 2016;51:30–40.
- [16] Gigli G, Casagli N. Semi-automatic extraction of rock mass structural data from high resolution LIDAR point clouds. *Int J Rock Mech Min Sci* 2011;48(2):187–98.
- [17] Chen J, Zhu H, Li X. Automatic extraction of discontinuity orientation from rock mass surface 3D point cloud. *Comput Geosci* 2016;95:18–31.
- [18] Aydin A. ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version. *Int J Rock Mech Min Sci* 2009;46(3):627–34.
- [19] Wu W, Zhu H, Lin JS, Zhuang X, Ma G. Tunnel stability assessment by 3D DDA key block analysis. *Tunn Undergr Space Technol* 2018;71:210–4.
- [20] He C, Geng P, Yan Q, Feng K. Status of seismic analysis methods for traffic tunnel and their applicability suggestions in China. *J Earthq Tsunami* 2013;7(3):1350026.
- [21] Yu H, Yuan Y, Bobet A. Seismic analysis of long tunnels: a review of simplified and unified methods. *Undergr Sp* 2017;2(2):73–87.
- [22] Yu H, Yong Y, Xu G, Su Q, Xiao Y, Chong L. Multi-point shaking table test for long tunnels subjected to non-uniform seismic loadings—part II: application to the HZM immersed tunnel. *Soil Dyn Earthq Eng* 2016;108:187–95.
- [23] Yuan Y, Yu H, Li C, Xiao Y, Yuan J. Multi-point shaking table test for long tunnels subjected to non-uniform seismic loadings—part I: theory and validation. *Soil Dyn Earthq Eng* 2016;108:177–86.
- [24] Yu H, Zhang Z, Chen J, Bobet A, Mi Z, Yong Y. Analytical solution for longitudinal seismic response of tunnel liners with sharp stiffness transition. *Tunn Undergr Space Technol* 2018;77:103–14.
- [25] Zhou J, Yang Z. Discussion on key issues of TBM construction for long and deep tunnels. *Rock Soil Mech* 2014;35:299–305. Chinese.
- [26] He MC, Li C, Gong WL, Wang J, Tao ZG. Support principles of NPR bolts/cables and control techniques of large deformation. *Chin J Rock Mech Eng* 2016;35:1513–29.
- [27] Li X, Li Y, Zhou S. Study and application of forecasting system for water inrush under high pressure in Xiamen submarine tunnel construction based on GIS. *Proc Environ Sci* 2011;10(Pt B):999–1005.
- [28] Wang X, Tan Z, Wang M, Zhang M. Analysis of interaction between surrounding rock and lining in high water-level tunnels with controlled drainage. *Rock Soil Mech* 2008;29(6):1623–8.
- [29] Zhao Y, Li P, Tian S. Prevention and treatment technologies of railway tunnel water inrush and mud gushing in China. *J Rock Mech Geotech Eng* 2013;5(6):468–77.
- [30] Zhang M. Yichang–Wanzhou Railway tunnel construction technology of karst fault. Beijing: Science Press; 2010. Chinese.
- [31] Zhuang H, Mu J. The prevention and treatment of large cross section tunnel mud gushing in karst areas. *Railw Eng* 2009;6:49–51.
- [32] Yang D, Zhang P. Study on the rapid treatment method of mud gushing and land-slide at shallowly covered karst section in Yunwu Mountain Tunnel. *West-China Explor Eng* 2008;10:192–4.
- [33] Yan ZG, Zhu HH, Yang QX. Large-scaled fire testing for long-sized road tunnel. *Tunn Undergr Sp Technol* 2006;21(3–4):282.
- [34] Berner MA, Day JR. A new concept for ventilating long twin-tube tunnels. *Aerodyn Vent Veh Tunnels* 1991:811–20.
- [35] Huang Y, Fang G, Li X. An optimal control method of long tunnel ventilation based on variable domain fuzzy control. In: Proceedings of the 2018 Chinese Automation Congress; 2018 Nov 30–Dec 2; Xi'an, China. New York: IEEE; 2018. p. 2626–30.
- [36] Hu LH. Studies on thermal physics of smoke movement in tunnel fires [dissertation]. Hefei: University of Science and Technology of China; 2006. Chinese.
- [37] Yan Z, Tian Y, Zhu H, Yu L. Tunnel fire dynamic early-warning, evacuation and rescue system and its application. *Mod Tunn Technol* 2016;53(6):31–5.
- [38] Zhang Y, Ju JW, Zhu H, Guo Q, Yan Z. Micromechanics based multi-level model for predicting the coefficients of thermal expansion of hybrid fiber reinforced concrete. *Constr Build Mater* 2018;190:948–63.
- [39] Yang P, Shi C, Gong Z, Tan X. Numerical study on water curtain system for fire evacuation in a long and narrow tunnel under construction. *Tunn Undergr Space Technol* 2019;83:195–219.
- [40] Yeung JS, Wong YD. Road traffic accidents in Singapore expressway tunnels. *Tunn Undergr Space Technol* 2013;38:534–41.
- [41] Shi P, Li P. Mechanism of soft ground tunnel defect generation and functional degradation. *Tunn Undergr Sp Technol* 2015;50:334–44.
- [42] Shen ZY, Tan Z. Application research on GRP5000 tunnel inspection car in Shanghai subway. *Shanxi Archit* 2013;39(27):158–9.
- [43] Hada A, Soga K, Liu R, Wassell IJ. Lagrangian heuristic method for the wireless sensor network design problem in railway structural health monitoring. *Mech Syst Signal Process* 2012;28:20–35.
- [44] Schwamb T, Soga K, Mair RJ, Elshafie MZ, Sutherland R, Boquet C, et al. Fibre optic monitoring of a deep circular excavation. *Geotech Eng* 2014;167(2):144–54.
- [45] Hoults NA, Soga K. Sensing solutions for assessing and monitoring tunnels. In: Wang ML, Lynch JP, Sohn H, editors. Sensor technologies for civil infrastructures. Cambridge: Woodhead Publishing; 2014. p. 309–46.
- [46] Huang H, Liu T, Xie X. Application of GPR to grouting distribution behind segment in shield tunnel. *Rock Soil Mech* 2003;24:353–6.
- [47] Lyu X, Gu H, Wang Y, Li Z, Shen S, Zhang F. Design and implementation of a quadrotor tail-sitter VTOL UAV. In: Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation; 2017 May 29–Jun 3; Singapore, Singapore. New York: IEEE; 2017. p. 3924–30.
- [48] Li X, Lin X, Zhu H, Wang X, Liu Z. Condition assessment of shield tunnel using a new indicator: the tunnel serviceability index. *Tunn Undergr Space Technol* 2017;67:98–106.
- [49] Chen X, Li X, Zhu H. Condition evaluation of urban metro shield tunnels in Shanghai through multiple indicators multiple causes model combined with multiple regression method. *Tunn Undergr Space Technol* 2019;85:170–81.
- [50] Yu C, Lam KC, Yung P. Factors that influence the concession period length for tunnel projects under bot contracts. *J Manage Eng* 2014;30(1):108–21.
- [51] Zhou X, Pan H, Shen Y. China's underground comprehensive utility tunnel project of PPP mode risk identification. In: Proceedings of the International Conference on Construction and Real Estate Management 2017; 2017 Nov 10–12; Guangzhou, China. Reston: American Society of Civil Engineers; 2017. p. 318–27.
- [52] Ma JQ. Influence of non-technical factors on the construction of tunnels. *Adv Mater Res* 2011;201–203:1300–7.