

高海拔

隧道工程

王明年 于 丽 李玉文 刘大刚 林国进 / 著

High Altitude Tunnels



科学出版社

高海拔隧道工程

王明年 于 丽 著
李玉文 刘大刚 林国进

科学出版社

北京

内 容 简 介

随着我国公路网和铁路网的日趋完善，隧道和地下工程的修建向着更高、更深和更长的方向发展。高海拔环境下低气压、低气温和低含氧量的“三低”自然条件，对人和机械都会产生影响。对人的影响主要体现为运动机能下降、反应时间增加；对机械的影响主要体现为机械效率降低、能耗和污染物增加，这种影响随着海拔的升高及隧道长度的增加而越发显著。隧道和地下工程的建设包括设计、施工和运营等多个阶段，而高海拔“三低”自然条件对人和机械的影响则贯穿隧道建设的全部阶段。

依托高海拔公路隧道工程建设实际，通过大量的实地测试、室内实验、理论分析等手段，对高海拔隧道在设计、施工和运营阶段面临的人员防护、机械升效、运营通风、照明、防灾救援等关键技术问题开展了研究，取得了一系列的技术成果。相关成果为高海拔隧道的设计、施工和运营技术提供了技术支撑，对于解决其他类似高海拔隧道的施工防护、通风、供氧、机械和照明等技术有着重要的理论意义和借鉴意义，对我国高海拔隧道的修建具有十分重要的意义。本书是作者和研究团队对近些年高海拔隧道建设相关研究成果的总结和凝练，可作为隧道及地下工程的研究、设计、施工及管理人员的参考书，也可以作为隧道及地下工程、通风与防灾等专业的教科书。

图书在版编目(CIP)数据

高海拔隧道工程 / 王明年等著. —北京：科学出版社，2019.1

ISBN 978-7-03-060435-4

I. ①高… II. ①王… III. ①高原-隧道施工 IV. ①U455

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 008940 号

责任编辑：张 展 于 楠 / 责任校对：贺江艳
责任印制：罗 科 / 封面设计：墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年1月第一版 开本：787×1092 1/16

2019年1月第一次印刷 印张：14 1/2

字数：360千字

定价：129.00元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前 言

根据我国“十三五”时期交通运输发展规划，铁路和公路交通路网布局将进一步完善，跨区域通道、国际通道连通将进一步加强，中西部地区交通将进一步发展。随着交通网络的不断完善，铁路和公路建设里程不断增加，隧道作为交通的重要结构物，必然向着数量更多、海拔更高、长度更长的方向发展。

我国是一个多山国家，山区面积占全部陆地国土面积的 $2/3$ ，青藏高原地区境内面积250万平方公里，平均海拔4000~5000米，海拔超过2000米的约占全部陆地国土面积的 $1/4$ 。高海拔地区的气候具有显著的三低特征，即低含氧量、低气压和低气温。高海拔环境下的隧道工程除了需要克服三低气候条件对人和机械带来的影响外，还需要根据自身交通量低等特征开展相关的人和机械效率的研究。在施工期，高海拔环境对人的影响主要体现为耗氧量增加、生产效率下降；对机械的影响主要体现为污染物排放量增加、风管漏风率增加、风机的有效功率降低；在运营期，主要体现为驾乘人员的反应时间增加、运动能力下降、应急反应的刹车距离变长；隧道内污染物排放量增加、CO和VI等高海拔系数升高等。

基于高海拔特殊复杂的气候条件，结合高海拔隧道的交通运输特征，以及人和机械在高海拔条件下的反应规律，作者依托国内诸多高海拔隧道工程实际，在多项国家自然科学基金项目、省部级课题等科研项目的支撑下，采用了现场测试、室内试验、理论分析和数值计算等多种方法，对高海拔隧道在施工期和运营期的关键技术问题开展了研究，凝练了相关的技术成果。该技术成果包括：①高海拔特长隧道建设中的人员安全防护标准及方法；②高海拔隧道施工期机械效率的变化规律及升效措施；③高海拔隧道建设的环境测试技术；④高海拔隧道照明环境评价标准及节能照明设计方法；⑤高海拔隧道运营安全保障技术等。以上研究成果在诸多高海拔隧道建设中得以应用。

本书共分为7章，第1章为绪论；第2章为高海拔气象条件对人和机械作用的理论基础；第3章为高海拔隧道建设的测试技术；第4章为高海拔长大隧道施工人员需氧量计算方法及供氧技术；第5章为高海拔长大隧道施工机械效率预测方法及升效技术；第6章为高海拔低交通量隧道运营通风设计方法及控制技术；第7章为高海拔低交通量隧道运营照明设计方法及控制技术。

本书是作者所在研究团队近年来从事高海拔隧道关键技术研究成果的结晶，由王明年、于丽、李玉文、刘大刚和林国进等进行编写，所在团队的老师以及一大批博士和硕士也参与了相关的研究工作和资料整理等工作，如颜冠峰博士、李琦博士、晁峰博士、

徐湑源博士、董宇苍博士、谢文强硕士、刘祥硕士、张子晗硕士、代仲宇硕士、何家银硕士、李柯硕士等。同时书中还引用了国内外已有的专著、文章、规范等成果，在此对相关编者和作者一并表示感谢。虽然我们尽了很多的努力，但学识水平有限，不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

作者

2018年6月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 高海拔隧道建设的技术关键	3
1.1.1 高海拔隧道施工人员安全防护技术关键	3
1.1.2 高海拔隧道施工机械升效技术关键	4
1.1.3 高海拔隧道运营通风和照明技术关键	4
1.1.4 高海拔隧道节能技术关键	5
1.2 高海拔隧道关键技术研究进展	5
1.2.1 高海拔对施工人员和机械效率影响研究现状	5
1.2.2 高海拔隧道运营期关键问题国内外研究现状	7
1.2.3 高海拔隧道节能技术国内外研究现状	9
第2章 高海拔气象条件对人和机械作用的理论基础	12
2.1 高海拔气象条件	12
2.1.1 隧道洞外气象条件随海拔高度变化规律	12
2.1.2 隧道洞内气象条件随隧道进尺变化规律	16
2.2 高海拔环境对人体机能的作用机理	17
2.2.1 施工阶段高海拔环境对人体机能的作用机理	17
2.2.2 运营阶段高海拔环境对人体机能的作用机理	19
2.3 高海拔环境对机械作用机理	20
2.3.1 施工期高海拔环境对机械作用机理	20
2.3.2 运营期高海拔环境对机械作用机理	22
第3章 高海拔隧道建设的测试技术	28
3.1 高海拔环境测试技术	28
3.2 隧道内环境测试技术	29
3.2.1 隧道外气象长期数据采集和分析	29
3.2.2 施工期隧道内氧气浓度测试	33
3.2.3 运营期隧道内照明亮度测试	37
3.3 高海拔人员测试	39
3.3.1 施工期人员劳动能力测试	39
3.3.2 运营期人眼反应时间测试	47
3.4 高海拔机械测试技术	52
3.4.1 施工期风机功率及风管漏风率测试	52

3.4.2	运营期汽车污染物排放测试	55
第4章	高海拔长大隧道施工人员需氧量计算方法及供氧技术	58
4.1	高海拔隧道供氧的临界海拔高度	58
4.1.1	基于空气密度改变的临界供氧海拔计算方法	58
4.1.2	基于等效气管气氧分压的临界供氧海拔计算方法	59
4.2	高海拔隧道内人员劳动能力降低预测	62
4.2.1	高海拔地区劳动强度修正系数	62
4.2.2	高海拔地区劳动强度降低系数	65
4.3	隧道内需氧量计算方法	68
4.3.1	高海拔隧道施工人员供氧量计算	68
4.3.2	高海拔隧道施工弥散式供氧量分析	70
4.3.3	高海拔隧道施工个体式供氧量分析	71
4.3.4	高海拔隧道供氧量的确定	71
4.4	隧道内供氧技术	72
4.4.1	高海拔隧道施工供氧系统组成	72
4.4.2	高海拔隧道施工供氧系统供氧方式	72
4.4.3	高海拔隧道供氧系统主要参数	73
第5章	高海拔长大隧道施工机械效率预测方法及升效技术	75
5.1	高海拔隧道内 CO 控制标准	75
5.1.1	CO 作用机理及 CFK 理论模型	75
5.1.2	CO 对人体毒性影响	76
5.1.3	不同海拔高度 CO 控制标准模型	81
5.1.4	不同 CO 浓度下安全工作时间	84
5.2	隧道内机械排放预测方法	86
5.2.1	高海拔地区烟雾排放量研究	86
5.2.2	高海拔地区 CO 排放量研究	88
5.3	隧道内风管漏风率计算方法	91
5.3.1	风管漏风的原理	91
5.3.2	风管沿程漏风率理论计算	92
5.3.3	风管沿程漏风率验证	96
5.3.4	高海拔风管漏风率修正	99
5.4	隧道内机械升效技术	100
5.4.1	轴流风机工作原理	101
5.4.2	高海拔轴流风机参数修正	102
5.4.3	高原轴流风机结构优化	104
第6章	高海拔低交通量隧道运营通风设计方法及控制技术	115
6.1	汽油车污染物 CO 排放标准	115
6.1.1	人体与 CO 接触时间限值的影响因素	115

6.1.2	基于接触时间限值的洞内 CO 浓度控制标准	117
6.2	柴油车污染物 VI 排放标准	121
6.2.1	安全停车视距的影响因素	121
6.2.2	基于安全停车视距的 VI 浓度控制标准	125
6.3	高海拔低交通量隧道通风控制标准	140
6.3.1	地下空间工程换气控制因素及标准	140
6.3.2	隧道异味气体成分组成	142
6.3.3	隧道异味气体对人体健康影响机理	143
6.3.4	高海拔低交通量隧道异味气体分布影响因素	145
6.4	高海拔低交通量隧道运营通风换气临界条件	150
6.4.1	隧道异味气体浓度计算方法	150
6.4.2	基于异味气体浓度控制标准的换气频率	153
6.4.3	基于异味气体浓度控制标准的换气临界条件	153
6.5	高海拔低交通量隧道运营换气频率控制技术	155
6.5.1	高海拔低交通量隧道交通流分布特征	155
6.5.2	川西高原低交通量隧道运营通风换气标准	157
第 7 章	高海拔低交通量隧道运营照明设计方法及控制技术	164
7.1	汽车灯发光照度计算方法	164
7.1.1	汽车灯具照明效果	164
7.1.2	汽车灯具照明与隧道灯具照明效果对比	167
7.1.3	中间段仅车灯照明条件下行车安全性分析	168
7.2	隧道内照度规律计算方法	169
7.2.1	高海拔隧道中间段布灯形式	169
7.2.2	高海拔隧道中间段灯具间距	176
7.2.3	高海拔隧道中间段工程经济性分析	177
7.3	高海拔隧道照明控制标准	178
7.3.1	高海拔隧道安全停车视距确定	178
7.3.2	高海拔隧道停车视距确定	181
7.3.3	高海拔隧道中间段照明标准	196
7.4	高海拔隧道照明设计方法	196
7.4.1	高海拔隧道进出口加强段长度确定	198
7.4.2	高海拔隧道进出口段灯具布置形式及数量	204
7.4.3	高海拔隧道进出口灯具布置	208
7.5	高海拔隧道照明控制技术	209
7.5.1	公路隧道照明控制技术	209
7.5.2	高海拔隧道灯具布置方法	210
7.5.3	高海拔隧道照明调控技术	211
主要参考文献		214

第 1 章 绪 论

我国地势复杂多变，整体呈西高东低的走势，高原占我国陆地国土面积的 60% 以上。其中，海拔高度超过 2000m 的约占高原的 33%，超过 3000m 的约占 26%，最具代表性的是青藏高原，平均海拔高度为 4000m，面积约为 240 万平方公里，约占国土陆地面积的 1/4。根据海拔高度的划分标准，1500~3500m 为高海拔，在这个高度，如果有足够的时间，大多数人都是可以适应；3500~5500m 为超高海拔，在这个高度，个体的差异决定能否适应；5500m 以上为极高海拔，在这个高度，人体机能会严重下降，有些损害是不可逆的。

近年来，随着我国交通路网的不断完善和延伸，高海拔公路隧道和铁路隧道数量日益增多，到 2018 年 6 月为止，我国已建成的部分高海拔隧道如表 1-1 所示。

表 1-1 高海拔隧道

序号	隧道名称	类型	长度/m	海拔/m
1	雀儿山隧道	公路	7079	4371
2	达坂山隧道	铁路	1530	3790
3	鹧鸪山隧道	公路	4448	3200
4	列衣隧道	公路	2107	3490
5	日尔郎山隧道	公路	1625	3476
6	拉纳山隧道	公路	3451	3049
7	嘎隆拉隧道	公路	3350	3250
8	才公卡隧道	公路	4615	4055
9	雪山梁隧道	公路	8330	3380
10	剪子湾山隧道	公路	2238	4250
11	红土山隧道	公路	3170	4280
12	雁口山隧道	公路	4016	4285
13	珠角拉山隧道	公路	4605	4200
14	拉丁拉山隧道	公路	1470	4178
15	理塘隧道	公路	2831	4148
16	巴朗山隧道	公路	7954	3850
17	黄土梁隧道	公路	4895	2700
18	米拉山隧道	公路	5727	4700
19	老折山隧道	公路	2778	4053
20	风火山隧道	铁路	1338	4905

续表

序号	隧道名称	类型	长度/m	海拔/m
21	昆仑山隧道	铁路	1668	4665
22	河卡山隧道	公路	2315	3700
23	祁连山隧道	铁路	9490	4345
24	色麦村隧道	铁路	6693	3900
25	帕当山隧道	铁路	2836	3898
26	新关角隧道	铁路	32690	3497
27	长拉山隧道	公路	2400	4500
28	知亥代隧道	公路	4570	4468
29	姜路岭隧道	公路	2825	4343
30	鄂拉山隧道	公路	4710	4295
31	鸡丑山隧道	公路	2745	4150
32	大武隧道	公路	2770	4125
33	雅克夏雪山隧道	公路	2302	3900
34	拉脊山隧道	公路	10023	3820
35	拉庚拉隧道	公路	2735	4375
36	斜拉山隧道	公路	4073	4430
37	玉希莫勒盖隧道	公路	1943	3200
38	米林隧道	铁路	11560	3076
39	盆因拉隧道	铁路	10410	3750
40	羊八井1号隧道	铁路	3345	4264
41	羊八井2号隧道	铁路	1643	4264

随着海拔高度的增加,气候环境变得恶劣,主要表现在以下几方面。

(1)含氧量降低。大气的空气密度随着海拔升高变的稀薄,空气中氧气的含量也逐渐减少,4000m时,氧气浓度只有平原地区的66.8%。

(2)气压降低。大气的压强随着海拔的升高逐渐降低,空气中的氧分压也随之降低,4000m以上高原地区空中的氧分压比海平面减少38%~46%。

(3)温度降低。高原地区空气稀薄,大气温度易于散失,气候寒冷,日平均气温在0℃以下的时间长,一天之内的昼夜温差为15~30℃。

(4)湿度降低。大气气流流动速度随海拔升高而加快,因此,高原地区风沙大,而强风不仅进一步降低了气温,而且加快了空气中水分的蒸发,使得空气更为干燥,年平均相对湿度只有50%左右。

高海拔特殊的气候环境和地理位置对高海拔隧道的施工和管理都带来极大的挑战。在施工方面,目前高海拔隧道多采用钻爆法施工,施工过程中包括钻眼、爆破、出渣、架钢拱架等多道工序,施工人员和施工机械数量较大。随着隧道掘进长度的增加,洞内氧气含量呈降低趋势,如何建立供氧标准,从而最大限度地保护施工人员劳动安全,保证机械效率的发挥成为高海拔隧道施工中需要解决的重大技术难题。而在运营方面,

受高海拔特殊地理位置的影响,高海拔公路隧道的交通量通常比较小,且呈现出与季节相关的特性。另外,地处高海拔、人烟稀少、电缆的保护及通风照明设备的维护都是公路隧道运营管理中的难点问题。尽管存在诸多技术难题,高海拔也有其得天独厚的优势,如丰富的太阳能资源、地热资源等,都可以成为绿色节能运营的可利用技术。

因此,针对高海拔隧道,一方面要解决人和机械在施工中的供氧问题;另一方面要解决高海拔隧道运营中的通风照明标准和设计方法问题。同时,如何因地制宜地利用自然资源,实现绿色节能的高海拔隧道建设,也是高海拔隧道建设中的重要技术问题。

1.1 高海拔隧道建设的技术关键

1.1.1 高海拔隧道施工人员安全防护技术关键

海拔高度变化对人体机能的影响包括对神经系统、呼吸系统、消化系统、血液循环系统、新陈代谢、感觉器官及其他系统的影响,具体描述如下。

(1)神经系统:中枢神经系统特别是大脑对缺氧极为敏感。人们在轻度缺氧下,神经系统首先表现为兴奋性增强,如紧张、易激动等,随时间推移继而出现头痛、头晕、健忘等系统较强反应。在重度缺氧下,大脑则由兴奋转入抑制,表现出嗜睡、神志淡漠、反应迟钝等症状,少数严重者则会出现意识丧失,需要转入低海拔处进行恢复。

(2)呼吸系统:一般情况下,人们在进入高海拔地区后,由于空气稀薄、氧分压低的影响,呼吸会加深加快。在高山上进行肌肉活动,可使肺换气量增大,但这种肺换气量的增加,仍不能满足机体在活动中的耗氧量,因此在长时间活动后即可因剧烈的心悸、气喘和肌肉疲乏无力而被迫停止。

(3)血液循环系统:人们进入高原会出现心跳加速、脉搏次数增加等症状,这是由于高山缺氧所致,若再进行体力负荷,则症状增加更加显著。此外,还会引起血流量增大,对心脏功能(尤其是冠状机能)不全者较为不利。

(4)感觉器官:在登高时缺氧逐渐加剧的情况下,嗅觉逐渐降低,甚至不能辨别气味,这是缺氧与高原严寒结合的影响。根据不同的报告表明,有28%~60%的人呈现视力衰退现象。

空气含氧量是指单位体积空气中含有氧气的质量,随着海拔高度的增加不断地下降,不同海拔高度下人体缺氧反应如表1-2所示。

表 1-2 不同海拔高度下人体缺氧反应

海拔高度/m	0	1320	2400~3510	3510~6440	6440~10860
氧浓度/%	21	<18	16~14	14~10	10~6
等效气压/atm	1	0.86	0.76~0.67	0.67~0.48	<0.48
机体缺氧表现	正常	组织细胞处于缺氧环境,有轻度表现	呼吸加深,脉搏加快,血压升高,机体协调功能变差,睡眠较差	疲劳感,精神不振,注意力下降,头昏脑涨,容易迷失方向	头痛耳鸣,视物不清,恶心呕吐,无法自主动作,无法讲话,很快进入昏迷状态

据有关资料介绍,在2001年6~12月的青藏线建设期间,施工人员发生急性高原反应的就达36例之多。其中,发生在海拔3000~4600m的有4例,占11.1%;发生在海拔4600~4800m的有8例,占22.2%;发生在海拔4800~5010m的有24例,占66.7%。可见,随着海拔高度的升高,高原反应人数呈增加趋势;同时人的劳动能力也会下降,经统计,人体在海拔3500~4000m的地区时其劳动能力比平原降低40%~50%。

因此,高海拔隧道施工人员的安全防护技术关键包括:①基于安全性和舒适性标准的临界海拔高度;②施工期隧道内氧气含量降低趋势;③高海拔隧道施工人员需氧量标准;④高海拔隧道施工供氧方式。

1.1.2 高海拔隧道施工机械升效技术关键

钻爆法施工中的主要工程机械有挖掘机、装载机、掘进机、自卸车、风机、除尘机等,以上施工机械多为柴油驱动,内燃机为输出功率较大的柴油机。柴油机在高海拔环境下工作时,因为大气压力低、空气密度小,所以进入柴油机的新鲜空气量明显下降,从而破坏了柴油机原有的空燃比,使得燃烧不充分、着火延迟、后燃现象严重,导致柴油机功率下降、动力性能变差。不同的海拔高度对内燃机气缸内的有效压力有一定影响,随着海拔的升高,空气逐渐稀薄,进气中的含氧量随之减少,造成燃油不充分燃烧,进而气缸内的有效压力降低,造成活塞与活塞环的摩擦损失减小。除此之外,随着海拔的升高,其温度不断降低且温差不断增大,也降低了润滑剂的工作性能,增加了很大摩擦损失。

另外,隧道施工过程中需要采用机械通风,通过风管将新风送到隧道掌子面,从而保证隧道内的施工环境要求。而在高海拔地区,受大气压力降低的影响,风管漏风率会随着海拔高度的升高和隧道长度的增加而呈增加趋势,导致隧道内通风效率降低。

因此,高海拔隧道施工机械升效技术关键包括:①高海拔隧道施工机械降效原理与机制;②高海拔隧道风管漏风率预测方法;③高海拔隧道施工机械升效措施。

1.1.3 高海拔隧道运营通风和照明技术关键

高海拔隧道的运营能耗主要是通风和照明,目前高海拔隧道的通风和照明均根据《公路隧道通风设计细则》进行计算。但受高海拔地理特征的影响,高海拔隧道的运营特征和平原公路隧道显著不同。例如,交通量低且受季节影响显著,如四川的二郎山隧道、巴朗山隧道等;驾乘人员在高海拔隧道中行驶时,受低含氧量的影响,反应时间增加,刹车距离变长,对隧道内外明暗适应时间增加;机动车在不同海拔高度下排放的污染物浓度和分布差异较大。

海拔越高,空气越稀薄,柴油机的燃油消耗率就越高,从柴油机的尾气中排出的有害物质就越多。对汽油车也是一样,受空气中低含氧量的影响,车辆在缺氧状态下行驶,废气排放量将会成倍增加。另外,目前通行的汽车实行了新的环保标准,较规范采用的烟雾海拔高度系数和CO海拔高度系数都有比较大的偏差,不能直接指导现行高海拔隧

道的运营通风设计。

受低含氧量的影响,高海拔隧道中驾乘人员可能出现的高原反应增加了驾车反应时间,当行车速度为 36km/h 时,反应时间每增加 0.1s,汽车就向前驶进 1m。有研究表明,约 40%的撞人和撞车事故就发生在 0.1s 的瞬间。

因此,高海拔隧道运营通风和照明技术关键包括:①高海拔公路隧道机动车污染物海拔高度系数;②高海拔隧道运营通风控制标准及设计方法;③高海拔隧道运营照明控制标准及设计方法。

1.1.4 高海拔隧道节能技术关键

21 世纪,全球能源危机已成为世界各国发展面临的一大问题,引起了普遍重视。高海拔隧道的施工和运营过程中会消耗大量的能源,而高海拔地区丰富的自然资源为绿色节能技术的利用提供了条件。

例如,地源热泵利用了地球所储藏的太阳能资源作为冷、热源,是进行能量转换的供暖空调系统。其中,可以利用土壤或水体,包括地下水或河流、地表的河流、湖泊及海洋。地源热泵可利用的地下水或土壤温度冬季为 8~15℃,热源温度比环境空气温度高,所以其循环的蒸发温度提高,能效比也会提高。而夏季地下水或土壤温度为 10~24℃,冷源温度比环境空气温度低,所以制冷的冷凝温度降低,使得冷却效果好于风冷式和冷却塔式,机组效率提高。据美国环保署估计,设计安装良好的地源热泵,平均来说可以节约用户 30%~40%的供热制冷空调的运行费用。

又如,太阳能随着热转换理论日趋成熟,以热交换的方式实现太阳能的热转换早已成功应用。以巴朗山隧道为例,隧道址区全年日平均气温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$,日数共有 117 天,全年日最低气温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$,日数共有 198 天。日最低气温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 的天数主要集中在当年 10 月至次年 4 月。隧道址区热辐射条件好,日照时间长,太阳能充足,出口段年总辐射为 7857.6 MJ/m²,日平均总辐射为 21.3MJ/m²。年日照时数为 1471.7h,月日照时数为 79.4~166.2h。

因此,高海拔隧道节能技术关键包括:①高海拔地区自然资源的利用技术;②高海拔隧道太阳能蓄热技术及应用;③高海拔隧道地源热泵技术及应用。

1.2 高海拔隧道关键技术研究进展

1.2.1 高海拔对施工人员和机械效率影响研究现状

在隧道的施工中,有毒、有害气体对施工人员的健康和生命安全构成一定威胁。高海拔隧道的施工建设环境恶劣,人体对 CO 的抵抗能力减弱,因此,平原地区隧道施工的 CO 浓度控制标准在高原地区不再适用,国内外对高原地区的 CO 容许浓度也进行了一定的研究。

2007年,《工作场所有害因素职业接触限值·化学有害因素》(GBZ 2.1—2007)中规定高原地区工作场所CO最高容许浓度在海拔高度2000~3000m时应为 $20\text{mg}/\text{m}^3$,3000m以上应为 $15\text{mg}/\text{m}^3$ 。

2011年,谢尊贤等研究了高原地区隧道施工作业环境卫生标准,认为在高原地区,将隧道施工通风污染物CO最高容许浓度定为50ppm是合适的,且该值完全能够满足施工作业卫生健康的要求。

谢尊贤等对高原隧道施工工程机械有害气体的排放特性进行了研究,指出了高原环境下工程机械CO排放量以指数方式变化,随转速增大而增大。

2009年,唐志新等对高原地下矿气体浓度标准进行探讨,认为人体呼吸吸入污染物的量与污染物的质量浓度、人的呼吸速率、暴露时间成正比。在高原地区,缺氧会加快呼吸的频率,从而增强呼吸作用,并吸入更多的污染物。因此,在高原地区有毒气体的浓度限值应该减少。

目前,隧道施工相关规范中有关有害气体容许浓度的规定均是针对一般地区的,国内外还没有高原隧道施工的作业环境标准(如在《公路隧道施工技术规范》(JTG F60—2009)中,分不同海拔高度规定了CO容许浓度,但对于海拔高于3000m的地区规范中仅规定当取值超过规定上限时,按照线性进行延伸,而该值是否符合实际仍值得考究)。因此,依托不同海拔高度的高原隧道,确定一个与海拔高度相关的隧道作业环境标准,确保CO和氧气的含量能够满足施工人员和机械设备的要求,并为行业内隧道施工提供合理的通风设计显得尤为必要。

高玉功等通过对青藏铁路客车人员的供氧研究,得到了考虑车内氧气分压的下限值,也就是人体必需的氧分压水平,供氧水平没有必要达到平原标准,加上对氧气使用安全问题的考虑,就可确定车厢内氧分压的上限值。

张西洲等通过对青藏高原官兵在不同氧环境下的工作状态进行了研究,并得出了氧浓度升高对人员生理状态有影响的结论。

刘应书等研究了室内富氧可以改善人在高原地区的缺氧状况,同时也会带来火灾危险,通过试验研究对高原地区的富氧安全问题进行了分析,确定了富氧的安全氧浓度上限。

谢文强依托巴朗山隧道,基于对人员舒适性和安全性的考虑,提出需要供氧的海拔高度建议值。同时通过建立海拔高度与劳动强度及施工工种的关系,分析海拔高度对劳动强度的具体影响,并结合高原地区劳动强度的分级标准,提出了高海拔地区施工人员的供氧标准。

目前,高原地区供氧量的相关研究多集中在人体基本处于静息状态时,而对于施工人员的供氧量研究较少。此外,对于供氧浓度的下限值及不同劳动强度等级的供氧量研究还很缺乏。因此,有必要对高原隧道施工环境供氧控制标准进行深入的研究,以保障施工人员的安全和健康。

我国在高海拔地区工程机械领域进行了机械装备环境适应性方面的研究,制定了相应的标准,如《装备环境工程通用要求》(GJB 4239—2001),但到目前为止,还没有真正意义上的高原机械,对于高海拔地区机械使用时所带来的一些问题并未彻底解决。利

用机械储备动力也只能适用于 3000m 以下地区,但仍然要受到低温、缺氧的影响,生产能力也有不同程度的下降。国内外对于机械性能方面的研究较多,主要集中在柴油机的动力性、经济性、排放性和增压系统等方面,而对于高海拔地区的施工机械降效方面的研究比较少,还没有高海拔隧道机械设备效率计算的理论方法。

1.2.2 高海拔隧道运营期关键问题国内外研究现状

高海拔寒冷地区特长隧道环境恶劣、地质条件复杂,具有低氧、严寒、高海拔的特点。平原地区的 CO 浓度控制标准在高原地区不再适用,国内外对高原地区的 CO 容许浓度也进行了一定的研究。

1996 年,张世杰等依据不同海拔的 CO 染毒动物毒性比较和人群流行病学研究,提出了高原地区车间空气中 CO 的卫生标准:建议海拔 2000~3000m 地区车间空气中 CO 卫生标准为 $20\text{mg}/\text{m}^3$,海拔 3000m 以上地区可参照此值进行适当降低。

1999 年,张世杰等对高原地区 CO 中毒特征进行了探讨,并得到结论:高原低氧加重了 CO 中毒的程度,并由此推荐高原 CO 卫生标准为:海拔 2000~3000m 为 $20\text{mg}/\text{m}^3$,海拔 3500~4500m 为 $15\text{mg}/\text{m}^3$ 。

冯国胜等以新关角隧道为依托,进行了施工机械和车辆尾气排放的现场测试,测试结果为 CO 的“海拔高度修正系数”在 3600~3800m 的海拔范围内取值提供依据和参考。

2007 年 3 月,兰州交通大学对自然通风条件下列车通过隧道时的有害气体浓度进行监测,并得到结论:高原地区有害气体扩散速率比低海拔地区快,浓度衰减较快。

2008 年,曹正卯根据对国内外隧道污染物排放标准及控制标准的调研与分析,结合新关角隧道的实际情况,给出了有害气体排放限值建议值、粉尘容许浓度建议值和不同海拔高度下有害气体容许浓度建议值。

2014 年,李志厚等依据鹧鸪山隧道和雀儿山隧道的现场实测数据,计算得到了实测的海拔高度系数,并应用于白茫雪山隧道的通风计算,通过对比分析按规范[《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ 026.1—1999)]的海拔高度系数与按实测的海拔高度系数计算得到的需风量,得出结论:实测的烟雾海拔高度系数大于规范给出的延伸值。

因此,国内外关于运营期间隧道内的污染物浓度的限值虽有很多研究,同时也进行了有关隧道运营通风污染物浓度控制限值的规定。但目前在国内高海拔地区隧道的运营通风设计中,关于有害气体容许浓度并没有相应的规范可以参照。

国内现行的《铁路隧道施工通风技术与标准化管理指导手册》中根据国内文献中所得的现场测试分析,建议在设计中暂可取风管漏风率为 1.5%~2%。

尹玉鹏依托娘姆特煤矿工程,分析风管漏风对于风机的影响,得到了风管的漏风风阻会影响矿井风阻特性曲线,最终导致风机工况点随之变化。

杨立新针对目前通风管漏风理论进行了研究,并对其中存在的问题提出一种新的评判指标,通过分析计算得到了风管尾端百米漏风率的测定方法,并根据研究所得的百米漏风率得到了新的漏风量及风机供风量计算公式。

对于隧道通风风管漏风率的确定,我国所有通风系统设计文献只能提供给 800mm 以

下通风管道的技术性能数据。对于目前国内使用的新型大直径风管,目前还没有准确的测试数据。国内对风管漏风率的研究很少,对于风管在高海拔地区的性能研究更是寥寥无几,需要进行进一步研究。

风机在隧道通风中起着至关重要的作用,在对隧道施工通风进行风机选型设计时,需要选择适当的风机来进行供风,目前在施工通风中经常出现风机功率不足导致洞内供风量较小及洞内施工环境差。尤其是在高海拔特长隧道中,由于高海拔地区的低气压、低氧含量,导致风机效率相比平原地区更差,因此需对风机在高原地区的功率变化进行相关研究,并对高海拔风机进行优化,使其发挥出最优性能。国内很多学者对风机功率都进行了相关研究,也得到了很多成果。

甄敏钢采用数值模拟的方法对样机进行了计算,又通过改变叶片安装角度、风机的径向间隙和整流体形状,分析比较风机参数改变后的内部流场,最终找出安装角度、径向间隙和整流体形状对风机性能的影响。

高新新以某电厂机组的轴流引风机为研究对象,通过现场对风机的原型进行测绘,首先对其进行三维模型的构造,其次利用模型进行网格划分,确定计算的流域及边界条件,然后利用数值进行模拟计算,得出其内部流动的特性,并对在不同工况下风机运行的情况及低转速下风机的运行进行模拟,最后将数值模拟结果与风机实际运行情况进行对比分析,结果表明数值模拟可以较准确地反映出风机内部流体流动的真实情况,而且结果也基本符合了电厂风机的实际运行情况,这对下一步风机的节能改造提供了重要的理论依据。

苟红松根据海拔与空气性质的关系、不同海拔 CO 浓度的限值、对高原隧道施工通风需风量、高原地区通风阻力修正及风机选型进行了分析研究,并得出结论:对于同一风机,当转速一定时,风量与平原地区一样,风机风压与功率也较平原地区降低,所以通风设计与风机选型时应进行相应的修正。

在《现代隧道施工通风技术》中提出:在高海拔隧道施工通风过程中,轴流风机风量不变,当风机的转速和安装角一致时,根据风压计算公式,风机产生的全压与密度成正比。

吴海英在 T35 轴流风机的基础上得到了新 T35 轴流风机的设计雏形,同时对已有气动设计程序中的输入输出格式和部分经验参数设置进行了改进。改进后的程序不仅具有高效灵活的特点,而且可以很好地与后续的数值模拟进行衔接。在此基础上通过对新 T35 轴流风机的三维数值模拟,研究了该风机的轮毂比、流型系数、叶片前倾和叶片前掠等设计要素对其性能的影响。

李嵩等结合轴流风机的气动设计阐述了轴流风机的数值、模拟地位和技巧,其中叙述了如何进行整机建模、如何进行网格设置、如何进行边界设置及如何进行 Fluent 后处理。

J. Vad 分析了轴流风机和无导叶压缩机转子的叶片非径向堆积技术,即叶片前倾和叶片前掠对风机气动性能的影响。分析结果显示叶片前掠和叶片前倾可以改善轴流风机和压缩机转子的性能,具体地说,就是可以改善其效率,扩展其非时速工况范围。而且指出 CFD 可以预估非径向堆积技术对风机气动性能的影响,同时还提出 CFD 是将前掠

和前倾并入叶片设计的必要工具。

因此,目前关于风机通风、风机效率的研究多集中于考虑风机自身结构上的影响因素,对于海拔升高所引起空气参数变化的影响研究较少,且并未给出明确的风机功率修正,需要进行进一步研究。

通常情况下,交通通风力比自然风阻力大得多,交通通风力与隧道的长度、车速、车流量密切相关。充分利用交通通风力,有利于节省投资和提高公路隧道运营管理经济效益。国内关于交通风的利用已经进行了很多。

张坚等通过对公路隧道通风计算中的风量平衡及风压平衡方程的分析,针对交通量及交通组成的不断变化,提出了交通量的可行性线性解的计算方法,可为公路隧道通风计算中风机的选型及风机的配置提供可靠的依据,同时也可为隧道建成后的风机控制提供参考。

王永东等认为《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ 026.1—1999)规定设计交通量为混合车高峰小时交通量,计算行车速度为洞内线形行车速度。在很多隧道的通风计算中,就直接按给出的交通量和行车速度取值,实际上这种做法是不科学的。根据交通工程学有关知识,车流密度、交通量和实际行车速度有对应关系:当车流密度与交通量较小时,车速可以达到最大值,即洞内线形行车速度;当车流密度、交通量逐渐增大时,车速就随之逐渐减小,直至达到一个合理速度,这时交通量最大;当车流密度继续增大时,交通量反而减小,车速也减小,直至形成阻塞。因此在通风计算中必须根据交通量科学地计算实际的行车车速。

胡金平等讨论了公路隧道通风网络中交通风的计算原理及处理方法,推导出交通通风力在通风网络理论中的计算公式,利用包括交通风压处理模块的隧道通风网络解算程序,对雪峰山隧道的通风方案进行计算分析,验证了通风网络程序中交通风计算理论与处理方法的正确性和适用性。

刘彤依托二郎山隧道,基于通风网络理论建立不同条件下一元流数学模型,模拟交通量变化、行车速度变化、自然风压变化和风机开启台数变化等隧道通风系统内风场分布特征,分析阻塞交通流增加及风机开启数量增加时通风系统应付车流阻塞的最大能力。

虽然国内对交通风的利用已经有很多研究,但都是针对平原地区的隧道,高原地区的隧道交通风利用相关研究较缺乏。因此需对高海拔地区的交通风利用进行研究,减少通风风机的配置,从而达到节约能源的目的。

在有效地利用车辆行驶所产生的交通风,并得到合适的通风设备效率后,就可以对通风系统进行优化布置,使通风系统能够更加高效、节能地运作,因此服务于隧道的运营且降低运营的成本。

1.2.3 高海拔隧道节能技术国内外研究现状

西方发达国家在公路隧道照明系统方面的研究起步较国内早,通过长期的实践和研究,技术已经日趋成熟。早在20世纪中叶,欧洲就已经出现了自动调光的隧道照明技术,并且已经制定了符合本国国情的标准,在隧道照明研究方面已经比较完善。