

高寒高海拔地区隧道施工供氧技术

孙兵

中铁十局集团第三建设有限公司

摘要: 针对高寒高海拔地区铁路隧道施工中存在的缺氧问题, 由于缺氧可能对施工人员生理、心理产生不利影响, 威胁施工人员生命安全, 有必要结合工程实际情况合理采用供氧措施, 改善隧道施工环境。本文结合某隧道1#斜井工程, 在研究缺氧对施工人员身心损害的基础上和施工难点的基础上, 通过合理确定供氧量、供氧方案和优化供氧技术, 有效降低了施工环境。

关键词: 高寒高海拔; 隧道施工; 隧道工程; 缺氧

【DOI】 10.12252/j.issn.2096-627X.2023.08.084

高寒、高海拔地区隧道工程施工中。由于施工期间存在严重的低温、低气压、缺氧等问题, 严重影响工程施工效率、施工进度。由于高寒高海拔地区大气含氧量仅为低海拔地区的50~60%, 在缺氧环境下, 部分施工人员因缺氧而出现不适情况, 加之隧道施工工程量大、施工难度大, 进一步加重了隧道施工人员缺氧反应^[1], 甚至存在丧失劳动能力进而生命安全风险。我国建设昆仑山隧道、风火山隧道、羊八井1#隧道时, 均面临高寒高海拔隧道施工供氧问题。这些隧道的成功建设, 为我国企业施工高寒高海拔施工提供了丰富实践经验和借鉴^[2]。

一、工程概况

1. 工程概况

某隧道工程施工地点海拔为4200~4600m, 隧道设计为双洞单线隧道, 标段范围内施工10.3公里。

2. 工程地质条件

隧道所处地区海拔高度为4450~4600m, 具有气压低、日照长、降水量少、蒸发量大、太阳辐射强、昼夜温差大、冰冻期长等特点, 年均气温为1.5℃, 极端最高气温22℃, 极端最低气温-25.7℃, 最热月气温10.6℃, 最冷月气温-8.9℃。大气压强为58.49kpa, 氧含量为172.41g/m³。

隧道穿越地层围岩以Ⅲ级、Ⅳ级为主。隧道进、出口浅埋段、断层破碎带等则以Ⅴ级围岩为主。

3. 有毒有害气体情况

根据工程勘测期间对隧道内气体检测结果, 隧道内有毒有害气体主要为二氧化碳、甲烷、硫化氢、二氧化硫和氮氧化物等^[3] (如表1所示)。

表1 隧道内有毒有害气体检测结果

起止里程	长度 (m)	有害气体类型	危险性等级
LKXX+XXX~LKXX+XXX	1805	其他成分	低度
LKXX+XXX~LKXX+XXX LKXX+XXX~LKXX+XXX	150	CO ₂	中度
		其他成分	低度
LKXX+XXX~LKXX+XXX	3830	其他成分	低度
LKXX+XXX~LKXX+XXX	1020	CO ₂	中度
		其他成分	低度
LKXX+XXX~LKXX+XXX	107.9	其他成分	低度

二、高寒高海拔地区环境下生理和心理反应及施工难点

1. 高寒高海拔缺氧对心理和生理的影响

高原高寒高海拔地区情况下, 海拔高度每升高100m, 大气压下降7.5mm汞柱, 氧分压随之下降1.2mm汞柱。海拔高度4450~4600m时, 地表大气含氧量仅为平原地区58%左右。由于高原气候环境下人体呼吸起主要作用的是空气中氧气分压, 当高原气压显著低于平原地区气压时, 由于吸入氧气含量不足, 会出现组织氧化障碍, 由此造成吸入空气中氧含量不足, 造成组织气压性缺氧, 典型特征为头昏、头疼、恶心、呕吐、心慌、气短、烦躁、食欲减退、乏力等症状, 严重时可能造成缺氧敏感性器官损害、损伤, 并容易引发心血管疾病和其他慢性疾病复发^[4], 甚至导致突发性死亡。

在高寒缺氧环境下, 人体劳动能力和生理机能都会出现显著变化, 人的工作能力主要取决于肌肉在氧化作用下所提供的能量, 氧气比如不断进入肌肉细胞内, 才能维持连续劳动。根据医学专业研究发现, 在3000~4000m高海拔地区情况下 (如表2所示), 人体劳

表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 (质量比%)	21	<18	16~14	14~10	10~6
等效气压 (atm)	1	0.86	0.76~0.67	0.67~0.48	<48
机体缺氧表现	正常	组织细胞处于缺氧环境, 有轻度表现。	呼吸急促, 心率加快, 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, 头昏脑胀, 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。

动力相较于平原地区严重下降，并会造成心理变化，精神上处于抑郁不安、心理负担加重等症，可能造成无法正常工作。造成该问题的主要原因为大气压降低导致空气氧分压下降，但肺泡内水蒸气压强和二氧化碳压强并不会随海拔变化而变化，因此，在海拔15000m高空时，大气压为87mmHg时，肺泡内水蒸气压强、二氧化碳压强与大气压相等^[5]，此时，即使供纯氧，人体也无法完成气体交换。因此，高原地区，氧分压和大气压变化是造成人体生理、心理负担和危害的重要因素。

2. 高寒高海拔施工难点问题

隧道所在地区海拔相较于平原地区大幅升高，氧分压显著下降，对施工人员生理、心理造成严重负担。结合工程施工内容和高原缺氧实际情况，分析该工程面临的难点问题包括：（1）影响施工进度。由于隧道海拔高度高、气温低、氧浓度较平原下降较多，施工人员长期处于严寒、缺氧状态，工作效率低，工程施工进度缓慢。同时，氧浓度下降导致施工人员能量消耗大，劳动能力下降，施工人员易疲劳，导致施工进度滞缓；（2）高原反应。由于高原高海拔地区氧分压下降较多，人体易出现高原反应，威胁施工人员生命安全，可能造成施工人员心理负担、心理恐慌问题；（3）环境污染影响人体健康。由于高海拔地区氧气浓度不足，

大型施工机械燃烧不充分，影响工程机械性能和施工效率，施工机械燃烧不充分排出更多污染物，将对施工人员身体健康产生不利影响。

针对高寒高海拔地区施工难点问题，有必要采取供氧措施改善施工环境，保障施工人员生命健康，提高现场施工效率和施工进度。

三、供氧量、供氧方案及供氧方法确定

为改善隧道施工环境，有必要结合隧道施工劳动强度确定供氧量，合理确定供氧方案，以此提高供氧方案的合理性、科学性。

1. 供氧量确定

根据《青藏铁路卫生保障措施》要求，测定隧道工程劳动工时最长为410min，最短为272min，平均工时为326min，标准工时480min，平均劳动率为67.7%，显著低于桥梁工程85.8%、线路路基76.8%和轨道铺设73.61%。同时，在隧道施工中，不同施工工序对应的能量代谢和劳动时间率也存在显著差异，根据《铁道行业体力劳动》（TB/T-2607-2006）分级标准，计算钻爆、出渣、喷射混凝土、铺设防水板、衬砌工序平均能量代谢值和劳动强度值均存在较大差异（如表3所示）。根据《铁道行业体力劳动强度分级》规范，确定隧道劳动强度等级为II~V级。

隧道不同工序的劳动强度

工序	净劳动时间 (min)	劳动时间率 (%)	平均能量代谢率 (kcal/min·m ²)	劳动强度数值 (I)	劳动强度值
钻爆	305	69.2	7.98	25.0	III
出渣	448	71	6.9	22.0	II
喷射混凝土	284	77.1	11.16	34.4	V
铺设防水板	311	86.3	7.9	25.3	IV
衬砌	315	91.7	5.3	18.0	II

为保证隧道供氧环境，供氧量确定时应按最不利条件确定供氧级别，即按隧道暗洞施工劳动强度集中考虑。根据《高原地区室内空间弥散供氧（氧调）要求》（GB/T 35414—2017）规范，高原地区供氧等级可分为A级、B级、C级，不同等级供氧浓度应符合氧气浓度值要求（如表3所示），急进高原的人员，高原弥散供氧空间氧调宜采用A级，短居高原人员供氧空间氧调A级或

B级，久居高原人员可下调氧调级别，休息区、办公室等低劳动强度环境采用B级，短时间、高劳动强度时可采用A级，难以实现时采用B级。同时，根据《高原地区室内空间弥散供氧（氧调）要求》（GB/T 35414—2017）要求，4500m海拔高度大气压力57.7kPa时，允许最大氧气浓度为27.5%。

根据隧道工程劳动强度等级和供氧弥散空间最大氧

海拔 m	大气压力		A级		B级		C级	
	mmHg	KPa	氧气浓度 (质量比%)	生理等效 高度m	氧气浓度(质 量比%)	生理等效 高度m	氧气浓度(质量 比%)	生理等效 高度m
4500	432.9	57.7	>25.3	<3000	23.8~25.3	3000~3500	22.4~23.8	3500~4000

气浓度要求，确定该工程供氧能力等级为B级，供氧浓度为23.8~25.3%，按3000m生理等效高度控制供氧浓度，1#斜井工区弥散供氧最大浓度为27.62%。

2. 供氧方案确定

根据同类工程施工经验，高寒高海拔地区隧道供氧

方式主要包括氧吧车供氧方式、便携式制氧设备方式、提高导风浓度方式、外表和管道运输方式四种。其中，氧吧车供氧方式即采用小型氧吧车紧跟施工队伍，距施工作业面距离为50m。氧吧车可乘坐5人，车载制氧机，制氧机取气口接自风机刀导风管道处，该方式具有

防护性良好,设备用量低,功率小,但设备占地面积大,需新鲜送风制氧、氮气直接排放在隧道内和需机械设备拖行等问题;便携式制氧设备可通过由施工人员携带进入作业面,可随时生成氧气供施工人员吸入,适用于短时间供氧或紧急情况下供氧,但存在储氧量有限、需经常更换设备影响施工连续性、影响施工作业方便性、鼻吸方式不便等问题;提高通风氧气浓度方法即在隧道外部制成氧气,并借助压入风机和通风管道形式输送氧气。该方法可在隧道外安装制氧设备,安装维修方便,但也存在通风风量与制氧数量差大、制氧量占通风量低、改善环境效果不理想等问题;管道供氧方式即在隧道外制氧,采用单独管道输氧、多释放口功释放氧气的方式。

3. 供氧方法

根据隧道施工特征和施工组织安排,该工程供氧系统施工由洞口制氧设备及控制系统、洞内衬砌施工段管道布置、掌子面作业集中区域供氧部分组成。

1) 洞口制氧设备及控制系统

当前,成熟的制氧方法包括深冷法、膜分离法、变压吸附法,3种方法原料均为空气。相较于深冷法、膜分离法,变压吸附法设备较小,成本低,尾气杂质解析较为彻底,洞口设备安装和使用适用性强。故洞口制氧方式采用变压吸附法。

变压吸附制氧设备由空气压缩机、高效除油器、冷冻式干燥机等设备组成,原料空气经空气压缩近压缩至0.7~1.0MPa后经高效除油器、精密过滤器和高效活性炭吸附器净化后,残含油量 $\leq 0.003\text{ppm}$ 。净化空气进入空气缓冲罐、氧氨分离系统连续产出氧气,经减压释放、可输送混合氧气浓度为30%。

考虑到洞内采用管道弥散供氧方式,为满足供氧浓度要求。掌子面10m范围内采用帘幕形成密闭空间,按西藏地区富氧空间需氧量计算公式,计算1#斜井弥散供氧流量为 $40.38\text{m}^3/\text{h}$ 。

$$Q_1 = \frac{V_F \times a\%}{R_0} \times K_1$$

式中, Q_1 为弥散空间氧含量每小时提升a%需氧气流; V_F 为全断面开挖面积,按 836m^3 取值; a%为富氧空间每小时氧含量提升体积百分比,取值2.69%; R_0 为供氧管道出氧口氧气浓度,制氧机浓度为93%; K_1 为空间密封性修正系数,取值1.67。

根据施工工序劳动强度和施工人员集中情况,计算隧道内单人耗氧量为 $12.39\text{m}^3/\text{h}$ 。

$$Q_2 = \frac{Q_R \times n_R}{R_0}$$

式中, Q_2 为隧道内人员耗氧流量; Q_R 为隧道内单人每小时耗氧量,取值 $0.24\text{m}^3/\text{h}$; n_R 为隧道内最大人员数量,取值48人; R_0 为供氧管道出口氧气浓度。

根据富氧空间供氧流量值和施工人员氧气消耗值,合计计算制氧机制氧量为 $52.77\text{m}^3/\text{h}$ 。按1.2系数取值,则工作面制氧设备制氧量选型 $70\text{m}^3/\text{h}$ 制氧设备。

氧气输送管道选型时,按氧气体积流量、流速计算,采用外径 $D57\text{mm}$ 无缝钢管可满足氧气输送要求,供氧压力为1.0MPa。

2) 衬砌施工段管道布置

衬砌施工段管道布置时,采用 $D57\text{mm}$ 钢管作为主输送管道,管道螺纹连接,缠绕生胶带确保接头部位气密性良好。

管道安装时,施工期间4个工作面,各工作面单独设置供氧管道,确保各工作面供氧正常。管道固定在已完成衬砌混凝土面上,间隔50m悬挂标牌标识,便于现场施工时辨识和检查。

二衬施工间隔500m,利用综合洞室设置临时休息室,室内配备10个面罩式吸氧口。综合洞室采用三通管道自供氧管道接入,三通管道处设置阀门,室内无人休息时随手关闭阀门,需室内供氧时人工开启阀门,兼顾作业面供氧流量和综合洞室供氧需求。

三、结语

高寒高海拔隧道工程中,针对缺氧环境对施工人员生理、心理存在的影响,施工单位应根据供氧量需求,合理确定供氧方案,兼顾现场大面积集中施工供氧充足和分散区域灵活供氧要求,改善隧道内供氧环境,提高现场施工效率。

参考文献

- [1] 邓超. 高海拔隧道施工通风及供氧系统研究[D]. 重庆大学, 2022.
- [2] 王科. 高海拔隧道施工供氧技术研究[J]. 国防交通工程与技术, 2021, 19(05): 25-28.
- [3] 于丽. 高海拔隧道施工通风及供氧关键技术研究. 四川省, 西南交通大学, 2020-11-09.
- [4] 杨勇. 高海拔高地温特长隧道长距离施工通风及供氧技术研究[D]. 石家庄铁道大学, 2021.
- [5] 张博, 高菊茹, 王耀. 雀儿山隧道施工供氧技术试验研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(S1): 172-178.