

# 多年冻土隧道施工工法

(TGJGF-03·04-29)

中铁二十局集团有限公司

## 一、前言

高原多年冻土隧道工程施工核心技术在于尽量减少气温升高对冻土的影响,避免冻土融化压缩下沉和冻胀力造成施工灾害和运营隐患。

青藏铁路风火山多年冻土隧道全长 1338m,轨面海拔 4905m,是目前世界上海拔最高的冻土隧道,多年冻土上限 1.2~1.8m,冻土层厚达 100~150m。洞身全部位于冻土之中。在施工过程中充分把握冻土的工程性质,采用多项技术,尽量缩小冻土融化圈,使冻土隧道重建新的热量平衡系统,满足了安全、优质、高效的建设要求。

风火山隧道 2001 年 10 月底开工,2002 年 10 月顺利贯通,被评为 2002 年中国公众关注的十大科技事件。该隧道现已竣工,《世界第一高隧——青藏铁路多年冻土带隧道施工技术》2003 年通过了省级鉴定,进一步对该技术进行总结形成本工法。

## 二、工法特点

1. 优选施工季节 洞口工程(含明洞)优选寒季施工,所有换填、保温、防护排水等设施均宜在暖季前完成,洞内施工在控温条件下尽量选暖季和寒暖交替季节开展。

2. 注重保温开挖 根据洞内外不同开挖施工工序对冻土的扰动情况,采取相应的保温开挖措施,阻隔洞内气温升高对冻土的影响。

3. 采取多重保温措施 包括换填粗颗粒土减少冻胀对明洞和洞口浅埋段衬砌结构的影响;寒季向洞内衬砌工作区段供热风,确保混凝土施工环境温度不低于  $-5^{\circ}\text{C}$ ;隧道全长全断面在初衬、二衬混凝土之间铺设“防水层+保温板+防水层”,阻隔洞内气温的变化对冻土的扰动,确保运营安全。

4. “以人为本” 为解决高原缺氧所造成的人工、机械效率大幅降低的难题,选配高原型隧道施工机械;开发研制高原制氧、供氧新技术,对隧道洞内实施弥漫式供氧,并设置可移动氧吧休息室。

## 三、适用范围

本工法适用于多年冻土地区铁路隧道、公路隧道、过水隧洞等工程。

## 四、工艺原理

### 1. 保温施工工艺原理

#### (1) 冻土的热融滑坍与冻胀成因

含水的松散岩石和土体,温度降低到  $0^{\circ}\text{C}$  时,伴随有冰体的产生,这是冻结状态的主要标志。水结成冰时,体积增加约 9%,使土体发生冻胀。土冻结时不仅原位置的水冻结成冰,而且在渗透力(抽吸力)作用下,水分将从未冻区向冻结锋面转移并在那里冻结成冰,使土的冻胀更加强烈。

冻胀改变了土的结构。融化时必然伴随着土颗粒的位移,充填冰融化排出的空间产生融化固结,从而引起局部地面的向下运移,即热融沉陷。冻胀和热融沉陷的交互作用常常会造成建筑物滑坍或失稳而难以修复。

#### (2) 冻土隧道保温施工工艺

保温施工就是采取各种技术措施减少施工时冻土的热扰动,控制热融沉陷对工程的影响。其施工工艺包括优选寒季施工明洞及洞口工程,开挖施工时增设遮阳保温棚,阻隔太阳辐射能量对冻土的影响;正

洞采用弱爆破及光面爆破技术来减少对冻土的扰动和超欠挖,开挖后清除拱(墙)夹层散碎冰块,迅速喷混凝土封闭岩面;采用有轨运输减少洞内废气污染,减少通风次数和风量;暖季采用夜间放炮通风和冷风机通风等措施将洞内掌子面温度控制在 $5^{\circ}\text{C}$ 以下,尽量缩小洞室开挖断面外的冻土融化圈。隧道全长全断面铺设“防水层+保温板+防水层”,阻隔隧道竣工后洞内温度的变化对冻土的扰动,确保运营安全。

## 2. 洞口工程换填施工工艺原理

为防止冻胀对明洞及洞口工程结构的影响,将明洞及洞口仰坡周边冻胀影响范围内的富冰冻土、饱冰冻土和含土冰层挖除,用粗颗粒土换填,严格控制粗颗粒土的含水量,换填后作好防排水设施。长期的试验研究证明:粗颗粒土冻胀小甚至不冻胀,土体含水量小冻胀也小,含水量小于某一值时,土的冻胀率为零。

## 3. 制氧、供氧工艺原理

风火山隧道实测氧分压为 $10.87\text{kPa}$ ,不足平原的50%,低于人类生命极限所需氧气含量之 $11\text{kPa}$ 。为解决这一难题,中铁二十局集团与北京科技大学联合研制了国内首台高海拔大型医用制氧站,每小时可生产纯氧 $24\text{m}^3$ ,向洞内进行弥漫式供氧,使掌子面氧气含量达 $12.9\sim 13.8\text{kPa}$ ,并在洞内设置可移动氧吧休息室,生活区实行氧气充罐。充分体现了“以人为本”的原则,提高了施工工效。

## 五、施工工艺

### (一) 工艺流程(见图1)

### (二) 施工要点

#### 1. 洞口段(含明洞)开挖与保温施工

##### (1) 明洞开挖

洞口段的开挖严重破坏多年冻土的天然状态,《铁路路基施工规范》(TB10202—2002)7.5.4要求:富冰冻土、饱冰冻土或含土冰层地段路堑,当按保护冻土原则设计时,宜在寒季施工;所有换填、保温、防护排水等设施均宜在春融前完成。

在洞顶设置截水天沟,边坡开挖线外低凹处设排水沟,天沟与排水沟相连。按环保要求将地表草皮进行移植养护,机械开挖表层季节融化层。

季节融化层下(冻土上限 $1.2\sim 1.8\text{m}$ 以下)均为多年冻土永久冻结层。采用台阶分层微差松动控制爆破开挖,使用KBW抗冻防水型乳化炸药,用非电毫秒雷管起爆。粉质黏土、含土冰层和纯冰层等IV级软石类冻土单位耗药量按 $0.35\sim 0.6\text{kg}/\text{m}^3$ 控制;局部石灰岩、砂页岩等V级次坚石类冻土单位耗药量按 $0.5\sim 0.8\text{kg}/\text{m}^3$ 控制。

##### (2) 边、仰坡防护

明洞两侧边坡和洞口位置处仰坡根据少超不欠的原则进行布孔,各层尽量做到一次成型,最大限度地缩短补欠挖时间,以减少热融影响。

边、仰坡刷坡后及时进行锚、喷、网支护,采用 $2.5\sim 3\text{m}$ 长的 $\phi 22$ 钢筋锚杆,按间距 $0.8\sim 1.0\text{m}$ 梅花形布设,上覆网格为 $15\text{cm}\times 15\text{cm}$   $\phi 8$ 钢筋网片,喷混凝土厚 $20\text{cm}$ 。边坡坡面防护分别向地表两侧各延伸 $0.5\text{m}$ 以上,仰坡坡面防护向山上延伸 $5\text{m}$ 以上。

##### (3) 保温防护措施

为了保持多年冻土隧道边、仰坡的稳定,必须根据热力相似原理,通过施工季节的调整、施工工艺的细化和临时措施的应用保证开挖断面的成形,通过换填保温层或设置支挡结构,合理布设排水措施,建立新的热量平衡系统。具体措施有:

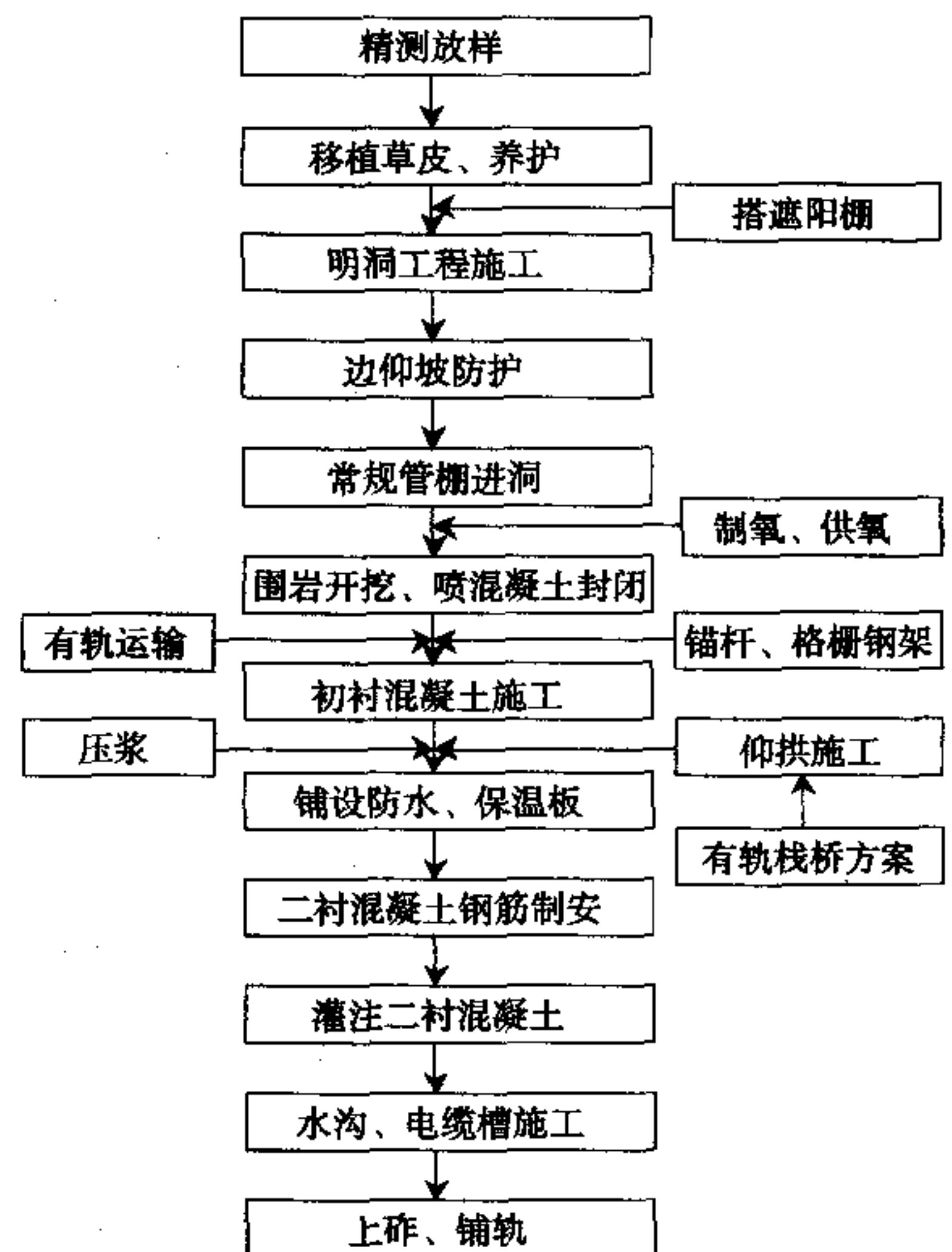


图1 工艺流程



①增设临时遮阳保温棚 保温棚采用桁架式结构,搭设高度满足机械作业要求,桁架立柱距开挖边坡不小于1.5m,以免边坡融坍损坏。

②细化施工工艺 堑区梯段分层爆破开挖;边坡开挖、刷坡、锚喷网支护流水作业,做到成型一段封闭一段。在明洞基底开挖到位后,清理虚渣迅速用粗颗粒土回填,防止基底冻土融化。

③铺设保温层 明洞衬砌拱部背后铺设甲种防水层,保温层铺设与正洞相同。为确保防水效果,明暗分界处暗洞防水层向明洞延伸。

④换填措施 为尽量减少冻胀对明洞衬砌结构的影响,将进出口明洞开挖边坡中富冰、饱冰冻土用粗颗粒土换填。待明洞顶部粗颗粒土回填完工后进行锚喷网支护。

采取保温、换填措施,经过一个循环寒冻、暖融过程检验和测温分析,明洞边、仰坡稳定,正逐步回冻形成新的热量平衡系统。

## 2. 冻土隧道洞内光面爆破与保温防护

### (1) 进洞方案与洞口浅埋段开挖

隧道进出口明暗洞交界处埋深均为3m左右,地表坡度平缓。暗洞洞口段冻土多为层状构造和网状构造,局部有纯冰层分布。进口40m、出口48m为Ⅵ级围岩。施工中采用常规 $\phi 80$ 注浆管棚进洞;上下台阶分步开挖,周边微震光爆,严格控制超欠挖。

上断面开挖后清除拱部夹层散碎冰块,初喷混凝土3~5cm封闭岩面,及时施作系统锚杆,安装型钢钢架支撑,复喷混凝土至设计厚度,拱墙分界处设锁脚锚杆。上断面开挖3~5m后进行下断面开挖,开挖、支护工序与上断面相同。

### (2) 洞内光面爆破

隧道除洞口浅埋段为Ⅵ级围岩外,其余均为Ⅳ、Ⅴ级围岩。分别采用短台阶分步开挖和全断面开挖。光面爆破和预裂爆破参数通过在明洞和浅埋段试验确定:Ⅴ级围岩周边眼间距30cm,最小抵抗线40cm;Ⅳ级围岩周边眼间距40cm,最小抵抗线50cm。周边眼采用 $\phi 32$ 乳化炸药间隔装药。为防止钻孔机械用水在孔内冻结,成孔后及时用 $\phi 20$ 钢管送高压风将炮眼内石屑、积水吹干净。

为减弱爆破对围岩的振动,减少围岩爆破松动圈的范围,采用多段位延时非电毫秒雷管。根据围岩含冰量情况优化光爆参数,严格控制周边眼角度和眼口位置误差,洞内光面爆破效果良好,光爆残眼率达70%以上。

### (3) 洞内衬砌与保温防护

隧道拱顶内缘至内轨顶面直线段设计净高为7.05m。衬砌断面均为曲墙有仰拱,其中Ⅵ级围岩衬砌断面为宽850cm、高999cm,洞身全部位于冻岩之中,含土冰层、饱冰、富冰冻土发育,为减少洞内气温与地层热交换的影响以及冻土热融造成混凝土渗水,在隧道初衬混凝土与二衬混凝土之间设置防水保温层。防水保温层按“防水板+保温板+防水板”的结构形式,沿隧道全长全断面铺设,将隧道二次衬砌以内的气温变化与永久冻土层隔离开。

#### ①模注混凝土支护

开挖后及时喷射厚5cm掺加WQDZ低温早强剂的混凝土,阻止洞内空气和冻岩之间热交换,防止冻岩风化及融化。

进入正洞后,为确保基面圆顺,采用模注混凝土支护。自制衬砌台车,泵送低温早强耐久混凝土入模,插入式震动器振捣密实。混凝土入模温度控制在5℃,以减弱对冻土的热融影响。

模注C25级混凝土支护强度达到设计强度的70%以后,即可利用预埋注浆管向其背后压注1:1水泥浆,以回填支护与围岩间的空隙,消除冻害隐患。注浆压力控制在0.6MPa。

#### ②防水及隔热保温层施工

采用PVC复合防水板,其拉伸强度 $\geq 15\text{MPa}$ ,断裂伸长率 $\geq 300\%$ ,具有低温柔性( $-35^\circ\text{C}$ 无裂纹),抗渗透,耐穿刺,耐水,耐低温,且无毒、无菌、耐腐蚀。由于要求盲沟在低温条件具有弹性,透水性好,能承受不小于0.5MPa的压力,并不易锈蚀,所以在基底及仰拱部位需铺设大于 $300\text{g/m}^2$ 的无纺布。

保温材料应选用导热系数低、抗压强度高、体积吸水率小的低毒性材料。根据上述要求我们采用厚

5cm 的聚胺脂板。

施工顺序为:仰拱及墙底防水板→保温板→防水板→无纺布;施作墙脚水沟纵向  $\phi 100$ PVC 盲沟;施作拱墙环向  $\phi 50$  盲沟→防水板→保温板→防水板。

### ③“三缝”防水施工

水平及环向施工缝在新浇混凝土前刷厚 2mm 的 WJ 接口粘结剂,在衬砌截面中间布置遇水膨胀止水条;在预设衬砌伸缩缝、沉降缝的断面中间铺设橡胶止水带;在靠近初支侧沿衬砌边缘设 10cm 遇水膨胀橡胶,其余采用 2cm 浸油木板填塞。

### ④模筑钢筋混凝土衬砌

采用 43kg/m 扣轨梁式栈桥方案开挖、衬砌仰拱,铺底混凝土与仰拱一同浇注并预置曲边墙钢筋。

拱墙衬砌采用自制长 6m 全液压整体钢模衬砌台车一次成型。混凝土采用自动计量拌和, TST-6 型轨行混凝土输送车运输, HBT60 混凝土输送泵泵送入模, 插入式震动器配合台车附着式震动器振实。

### ⑤混凝土拌合保温措施

工作面最低气温低于  $-3^{\circ}\text{C}$  时,衬砌混凝土按冬季施工措施办理;采用 DZLZ-10-A 型蒸汽锅炉蒸汽提高水温;搭设保温大棚接通暖气对砂、石料进行保温加热;混凝土生产、运输、浇注及质量检验均按《铁路混凝土与砌体工程施工及验收规范》(TB10210—2001)混凝土冬季施工相关规定执行,确保混凝土温度下降到  $0^{\circ}\text{C}$  以前获得抗冻所需要的临界强度。

## 3. 洞内其它保温措施

### (1)施工通风、供氧保温措施

风火山隧道地处高原,空气稀薄、含氧量低,施工通风、供氧至关重要。为满足尽量缩小冻土融化圈的低温要求并同时满足混凝土衬砌对温度的要求,洞内施工环境温度控制在  $-5\sim 5^{\circ}\text{C}$  之间。采用压入式通风,风机置于洞外距洞口 25m,选用  $\phi 1000$  软风管送风,暖季通风避开高温时段,利用早晚及夜间通风;寒季采用 STDK-100 型暖风机通风。

为保证洞内作业人员吸氧需求,中铁二十局集团与北京科技大学联合研制 ZO-30PSA 制氧站(制氧量  $24\text{m}^3/\text{h}$ ,氧气纯度达 96%),用管道向洞内掌子面和可移动氧吧车弥散式连续供氧,管道通至距掌子面 10m 左右,人员休息时可在氧吧车内吸氧。生活供氧采用氧气充罐方式。

### (2)洞内供水保温措施

隧道进口采用风压供水:在距掌子面 50~100m 处设置两台  $5\text{m}^3$  高压水罐,用  $\phi 100$  钢管向高压水罐送风,高压水罐上设安全阀、单向逆止阀,供风压力 1.0MPa,满足凿岩机、混凝土喷射机的高压用水需求。

隧道出口在距掌子面 50~100m 处放置水箱,利用 50m 扬程多级泵供水。

在洞口设置水箱,对洞内用水加温,水温保持在  $5\sim 10^{\circ}\text{C}$ 。

## 六、机具设备(机具设备进出口单洞配置)

根据冻土隧道的特点,遵循“弱爆破、快喷锚、早封闭”的原则,配置高原型隧道作业系列机械,并留足备用机械和配件,具体配备见表 1。

## 七、劳动组织

进出口同时施工的劳动组织见表 2。

## 八、质量要求

1. 洞口工程选择寒季施工,采用遮阳保温措施,阻隔太阳辐射能量对冻土的影响。
2. 明洞及洞口仰坡周边冻胀影响范围内的富冰冻土、饱冰冻土和含土冰层需挖除用粗颗粒土换填时,必须严格控制粗颗粒土的含水量,换填后在春融前作好防排水设施。
3. 正洞采用弱爆破和光爆技术以减少对冻土的扰动和超欠挖。
4. 正洞根据地质情况采用全断面或短台阶开挖,开挖后清除拱(墙)夹层散碎冰块,迅速喷混凝土封闭岩面。
5. 采用有轨运输,以减少洞内废气污染,进而减少通风次数和风量。



表1 机具设备

序号	机具名称	规格型号	厂 家	数量	备注
1	制氧站	研制 ZO-30PSA	中铁二十局、北京科大	1 座	制氧
2	氧吧车	自制	中铁二十局	1 台	供氧
3	电瓶机车	CDXT-1 42kW	六盘水煤矿机械厂	3 台	
4	梭式矿车	TDSF-1A14	江西矿山机械厂	3 台	
5	混凝土罐车	JST-6 6m <sup>3</sup>	隧道局机械厂	2 台	
6	挖掘机	PC220-6 1m <sup>3</sup>	济宁小松山推	1 台	装渣
7	空压机	750HH 21m <sup>3</sup>	深圳(美国)寿力	3 台	
8	发电机	HDV325 264kW	扬州华东	3 台	
9	注浆机	MA1400	成都迈式	2 台	
10	蒸汽锅炉	DZL2-1-A	西安锅炉厂	1 台	供暖
11	凿岩风枪	YZ28 3.5m <sup>3</sup> /min	天水风动机厂	30 台	
12	露天钻	ROCD7-11	瑞典	1 台	
13	混凝土输送泵	HBT60.7AC	中联重科	2 台	
14	装载机	ZLC40B	徐工集团	1 台	
15	自卸车	CQ3300 17t	重庆汽车厂	3 台	
16	自动计量拌合站	JS500/PLB1200	郑州华中	2 台	
17	空调通风机	研制 STDK-100	中铁二十局、天津通风机厂	1 台	
18	凿岩台车	自制	中铁二十局	1 台	
19	初衬台车	加工 9m	中铁五局	2 台	
20	二衬台车	加工 6m	中铁二十局	2 台	

表2 劳动组织

序号	工种	人数	工作内容	序号	工种	人数	工作内容
1	总指挥	1	负责隧道全面工作	11	机械司机	30	各种机械使用、维修
2	技术负责人	1	协调各工序,解决技术难题	12	模板工	36	台车、模板的立、拆
3	技术人员	8	现场技术指导及施工监控	13	混凝土工	50	搅拌、运输、振捣
4	质检员	2	监督开挖、衬砌及支护等工序质量	14	爆破工	10	装药及起爆
5	安全员	2	监督开挖、衬砌及支护等工序安全	15	电工	4	工地安全用电
6	测量人员	3	隧道施工放样及控制测量	16	防水、保温板工	35	粘接防水板、保温层及预埋件
7	试验员	5	试验	17	环卫工	2	隧道冻土环境监测
8	风枪手	32	钻孔	18	医务人员	8	保证施工人员的身体健康
9	钢筋工	40	衬砌的钢筋绑扎	19	普工	24	整理现场及维修便道等其他
10	混凝土喷射手	16	操作喷射机		合计	309	

6. 暖季采取夜间放炮通风和冷风机通风等措施将洞内掌子面温度控制在 5℃ 以下,尽量缩小洞室开挖断面外的冻土融化圈。

7. 确保冬季混凝土施工质量,要求强化冬季混凝土洞外拌制施工保温措施,应用低温早强耐久混凝土新技术配制混凝土。采用加挂保温帘、供热风等措施将衬砌工作区段气温控制在 -5℃ 以上。

8. 为做到既确保混凝土衬砌质量,又能够减少混凝土温度对冻土融化圈的影响,要求将初衬混凝土入模温度控制在 5℃ 左右;二衬混凝土入模温度可控制在 8℃。

9. 采用“无钉法”铺设防水板、保温板,以避免渗、漏水引起冻害。

10. 严格按设计要求施工保温水沟,确保排水畅通,避免水沟渗、漏水和积水冻胀。

## 九、安全措施

1. 全体参建员工均必须通过体检,并在格尔木(海拔 2800m 左右)适应一周通过复检合格后方可进驻施工现场(海拔 5000m)。施工队设卫生所,现场指挥部设工地医院,并在格尔木设定点医院。通过建立健全三级医疗体系,备足氧气和抗缺氧、抗低压药物,采取定期体检、巡珍,发现不适及时后送等专项措施,确保员工生命安全。

2. 尽量采用机械作业,减轻体力劳动强度。高原机械作业功效降低、故障率高;司机缺氧反应慢,应特别警惕。通过采取勤换班、设置双司机等特殊措施严防安全事故。

3. 做好工前安全教育,特种作业人员持证上岗。火工品设专人看管,爆破作业严格按安全操作规程实施。

4. 洞外保温棚桁架立柱距开挖边坡不得小于1.5m,以免边坡融塌造成安全事故。

5. 洞内开挖掌子面气温必须控制在5℃以下,严防冻土融化塌方。

6. 含土冰层地段,短开挖、弱爆破,及时喷射混凝土封闭。

7. 采用有轨运输出碴、进料,减少洞内废气污染和通风时段,有利于提高掌子面弥漫式供氧功效。

8. 加大高原交通运输安全管理力度,保持良好车况,车内携带氧气瓶,确保司乘人员安全。

#### 十、效益分析

##### 1. 社会效益

修建青藏铁路举世瞩目。风火山多年冻土隧道顺利贯通,标志着青藏铁路建设取得了阶段性胜利,铁道部和青藏铁路公司领导亲临施工现场祝贺。该隧道的成功修建,向世人证明在生命禁区建设铁路是可行的,充分展示了我国隧道建设施工的新水平。

##### 2. 经济效益

采用本工法,风火山隧道按合同工期提前达到铺轨条件,工程质量优良,满足了优质高效的建设要求,经济效益显著,该隧道比合同工期提前八个月贯通,使大部分施工人员、机械设备提前撤离生命禁区,节省人工费400万元,节省机械使用费400万元。

采用本工法,成功缩小了冻土融化圈,减少了热融滑坍造成的超挖工程量,避免了塌方事故,节约成本将在千万元以上;采用多重防水保温设施预防冻土冻胀隐患,使高原冻土隧道重建新的热量平衡系统,近三年观察未发生冻胀现象,避免返工浪费损失将难以计算。

该隧道研制使用的制氧供氧设施在全线广泛应用,社会效益、经济效益显著。

#### 十一、工程实例

青藏铁路风火山多年冻土隧道全长1338m,海拔4905m,地处青藏高原腹地可可西里无人区,是目前世界上海拔最高的隧道,多年冻土上限1.2~1.8m。洞身全部位于冻岩之中,穿越含冰冻土、厚层地下冰、少冰及多冰冻土、饱冰及富冰冻土等不良地质,地表上层为坡积粉质黏土,厚约1~3m,下伏第三系砂岩、泥岩,泥岩成分较多。风化层厚约20m,多破碎,呈土状、碎石土状,基岩裂隙冰发育,局部含冰量达50%,围岩分为IV、V、VI级3种。其主要工程特点为:

##### (1) 高寒、低压、缺氧,自然环境极为恶劣

该地区属于典型的青藏高原冰雪型气候,极端最低气温-41℃,寒季为每年9月至次年4月。当地气压约为内地的55%;最低氧分压10.87kPa,冬季冰天雪地,沙尘暴频繁;暖季紫外线强烈,雷暴期较长。恶劣自然环境挑战人类的生命极限,人工、机械效率大幅降低,施工异常艰难。

(2) 高原冻土隧道施工可借鉴的经验较少,因此铁道部安排了大量的现场试验、研究项目。在此之前,中铁西北科学研究院等科研单位从上世纪五十年代开始,对青藏高原冻土的成因、冻土的工程性质、力学特征等方面进行了长期、系统的试验研究。

为验证多年冻土地区隧道结构设计、开挖支护技术及隔热保温技术的合理性,建立一套寒区隧道工程冻融范围的计算理论,获得相应的实验成果和温度场的计算结果,在风火山隧道安排了许多项目的测试及试验研究,如隧道施工通风技术、洞内外气温变化对围岩冻融圈影响等,为风火山冻土隧道施工提供了相关理论依据。

在施工过程中充分把握冻土的工程性质,采取适宜措施,如:洞口工程采用台阶分层微差松动控制爆破,常规管棚进洞,通过优选寒季施工,细化施工工艺;增设遮阳保温棚等临时措施保证开挖断面的成形;开挖边坡中富冰、饱冰冻土和纯冰层用粗颗粒土进行换填;设置多重保温层,合理布设排水措施使冻土重建新的热量平衡系统。洞内作业配备以电力为主的大容量、低能耗、能适应高原特点的隧道机械设备。采用弱爆破、光面爆破等项开挖技术减少对冻土的扰动;综合运用合理选择通风时段;采用有轨运输减少洞内废气污染,减少通风次数和风量;全长、全断面设置多重保温层;以及供水、通风(供氧)、混凝土保温等多项保温技术,有效地控制了洞内环境温度。

冬季 11 月至次年 5 月对低温的控制十分有效,洞顶、拱墙分界处、边墙墙角处气温均在  $-5 \sim 5^{\circ}\text{C}$  之间,能够确保低温早强耐久混凝土衬砌的温度要求。夏季 6 ~ 10 月对高于  $5^{\circ}\text{C}$  的正温控制不理想,爆破后约 1h 拱墙开挖面即有未冻水外渗,为此,采用快速喷射厚 5cm 掺加 WQDZ 低温早强剂的混凝土封闭开挖面和掌子面,后续工序及时跟进,尽量减小围岩融化圈。

青藏铁路风火山多年冻土隧道采用本工法,减少了对冻土的扰动,缩小了冻土融化圈,使冻土隧道重建新的热量平衡系统,从而避免了冻土的热融滑坍、冻胀对施工和衬砌结构的影响,满足了安全、优质、高效的建设要求。

执笔:任少强 况成明 张永鸿 郭朋超