

# 隧道施工降尘净毒综合治理工法

YJGF09—94

作者：雷升祥 康秀红（铁道部第十八工程局）

**摘要：** 隧道钻爆开挖、出碴、喷锚作业，产生大量的粉尘及有害气体，尤其是采用无轨运输作业时，内燃机械排出的大量废气，对洞内造成长时间、沿程污染，这些尘毒对人体伤害很大。因而，搞好通风降尘净毒工作，意义十分重大。它直接关系到洞内作业人员的身心健康，关系着工程进度的快慢，关系着施工的经济效益和社会效益。在多座隧道施工中，开展了降尘净毒综合治理的研究，特别是在内径 9.0m 的四川太平驿引水隧洞施工中，进行了管遭通风、高压引射、水幕降尘、机械净化几方面实践，收到了显著成效。经铁道部劳动卫生研究所检测，各项指标符合国家卫生标准。该技术获 1993 年中国铁道建筑总公司科技进步二等奖。本工法是根据综合治理的工程实践编写而成的。

## 一、基本原理

### （一）管遭通风原理

管道通风按局部通风稀释理论考虑，即通风换气区是掌子面以后 200m 范围的有限空间  $w$ ，这个空间为一个理想模型，如图 9-1 所示。

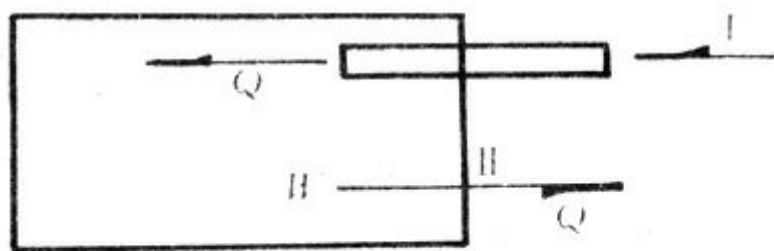


图 9-1 管道通风原理图

它需要满足下列条件：

- （1）有限空间  $w$  不变，它是一个理想模型。
- （2）空间内空气密度均匀，任何时间有害气体浓度在空间都均匀分布。

(3) 同一时间内流入和流出的空气量相等。

通过空气交换,使有限空间  $w$  内的废气浓度得到稀释,降到国家卫生指标限走的范围内。

## (二) 高压射流原理

高压流体由喷嘴高速喷出,在射流周围造成负压,把空气吸入。高速的流体与空气在混合管内混合,发生动量交换,被吸入的空气从而获得能量,沿风筒流动。参见图 9-2。

## (三) 水幕降尘原理

洞内采用水幕降尘,就是把水雾化成微细水滴喷射到空气中,使之与尘粒碰撞接触,则、尘粒附于水滴上或者被湿润的尘粒互相凝聚成大颗粒,从而加快其沉降速度,参见原理图 9-3。当直径为  $\mu$  的水滴以  $v$  的速度进入含尘空气,并占据一定的空间,含尘风流通过水雾滴时,风流围绕水滴而流动。但是尘粒比重较大,因惯性作用而保持其运动方向,因而与水滴碰撞并粘附于水滴之上,从而达到降尘目的。

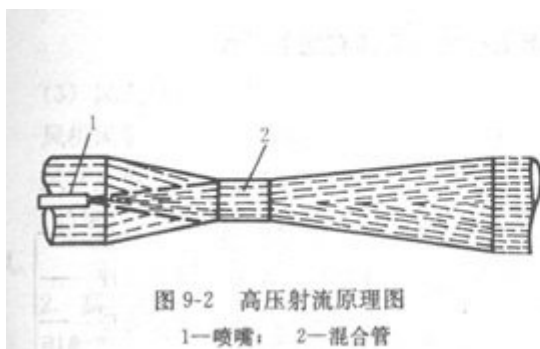


图 9-2 高压射流原理图

1—喷嘴; 2—混合管

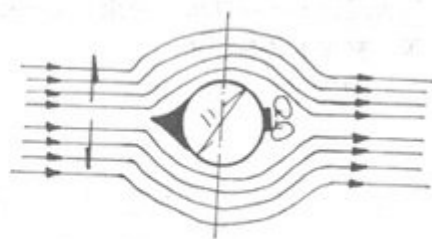
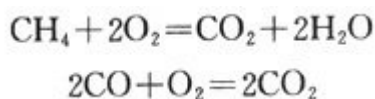


图 9-3 水幕降尘原理图

## (四) 机械净化原理

机械净化包括机内净化和机外净化两种。机内净化是使内燃机械产生的废气量中有害气体浓度降低,主要是整修喷油嘴,调整喷油效果,同时掺加 XS30-30。高效柴油添加剂,提高燃油十六烷值,使柴油燃烧雾化效果更好、更充分、生成有害气体减少。机外净化采用催化氧化法和水洗法二级净化系统。催化作用是促进以下氧化反应:



水洗法是通过涤烟剂,清除碳烟及颗粒物,参见原理图 9-4。

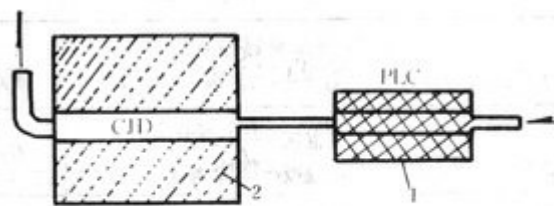


图 9-4 二级净化系统图  
1—催化； 2—水洗

## 二、工法特点

(1) 采用综合治理技术效果好。管遭通风 1.km 以内百米漏风率低于 1. 0 %，2.0km 以内百米漏风率低于 1. 5%；各工序、各作业时间洞内 CO、NO<sub>x</sub>、粉尘浓度均符合国家卫生标准要求；高压射流使元轨运输隧道沿程污染得到极大的改善，加速了洞内废气排放速度；采用水幕降尘，除尘效率达 75%以上，炮后 20min 掌子面清晰，确保炮后 30min 进洞施工；机械净化效果显著，减少了洞内污染。

(2) 工艺简单，操作方便，适用范围宽，容易推广。

(3) 造价低，实用性强。如制造水幕降尘器，高压引射器，掺 XS30-30 高效柴油添加剂等项目，投入少，收效大，适用于施工现场。

## 三、适用范围

独头隧道掘进≤2km, 采用无轨运输施工;也适应其它地下工程.

## 四、施作工艺与要点

### (一) 工艺流程

(参见图 9-5)

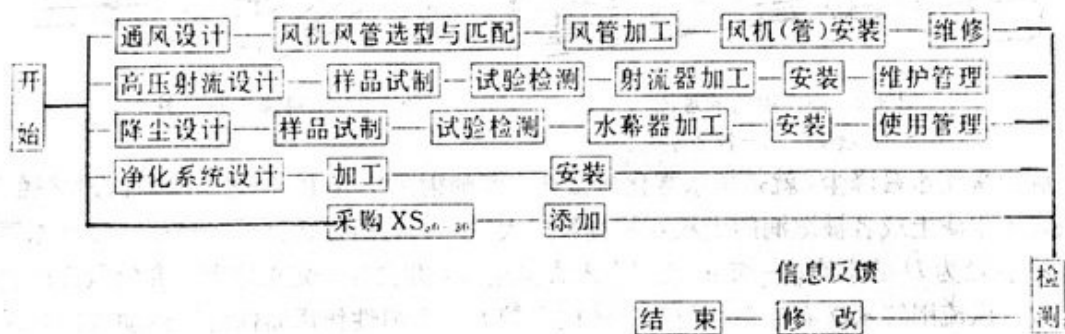


图 9-5 通风降尘净毒综合治理工艺流程

### (二) 工艺设计

#### 1. 通风设计

包括风量计算，设备选型与匹配，通风布局等。

(1) 风量计算：按稀释系数  $\mu = 3\text{m}^3/\text{min} \cdot \text{KW}$ 、百米漏风率  $\eta = 2\%$ 、最小风速  $V_{\min} = 0.15\text{m/s}$ ，从稀释炮烟冲淡内然机废气，工作面人员新鲜风，洞内最小风速四方面计算，计算公司参见表 9-1

表 9-1

序 号	项 目	公 式	备 注
1	稀释炮烟	$Q = V_1 - \left( \frac{CV_1^{t+1}}{V_2} \right)^{\frac{1}{t}}$	$V_1$ :一次炮烟体积. $V_2$ :一次爆破有害炮烟体积
	稀释炮烟	$Q_{\text{混压}} = \frac{7.8}{t} \sqrt[3]{GV_L^2}$ $Q_{\text{混吸}} = 1.3Q_{\text{混压}}$	$G$ :一次爆破药量
2	冲淡内燃机废气	$Q = \frac{V}{R}$	$R$ :允许浓度
	冲淡内燃机废气	$Q = \mu \sum_{i=1}^n N$	$\mu$ :稀释系数
3	工作人员新鲜风	$Q = nq$	$n$ :人数 $q$ :供风标准
4	满足最小风速	$Q = V_{\min} S$	$S$ :隧道断面积

设计风量取上表计算结果的最大值，根据漏风系数确定风机风量，一般主机风量取设计风量的 1.1 倍。

(2) 风压计算；管网阻力包括全部风道的磨擦阻力的局部阻力，局部阻力主要包括风道转弯，接头，变径等处阻力。

风压计算公式：

$$P_{\text{摩}} = P_v \cdot K \cdot L / D$$

$$P_{\text{局}} = n \cdot c \cdot g \cdot v^2$$

$$P = \sum (P_{\text{摩}} + P_{\text{局}})$$

### (3) 高压射流设计

引射器引射效果衡量指标采用引射系数 (R) 来表示：

$$R = (Q - q) / q$$

式中  $R$ ——引射系数，无因次；

$Q$ ——引射器风量， $\text{m}^3/\text{min}$ ；

$q$ ——高压流体消耗量， $\text{m}^3/\text{min}$ 。

高压流体采用高压风和高压水，引射器为风水混合型引射器，其中，高压水的压力 0.6Mpa。引射器结构参见图 9-6。

### 3.降尘设计

水幕降法主要解决 1—3 $\mu\text{m}$  的尘粒.水幕降法器设计为风水混合型,技术参数见表 9-2。

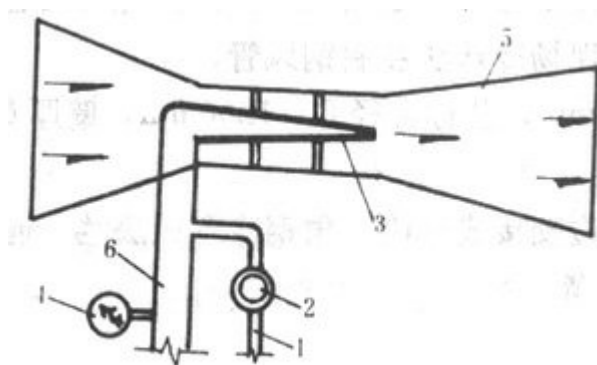


图 9-6 引射器结构示意图

1—进高压水管；2—水量表；3—喷嘴；4—气压表；5—混合管；6—进高压气管

水幕器技术参数

表 9-2

型 号	指 标 单 位	用 水 量	用 气 量	气 压	射 程	扩 散 角
		L/min	m <sup>3</sup> /min	MPa	m	
1 型		16	2.6	0.26~0.5	9~15	9°左右

水幕降尘器结构参见图 9-7

#### 4. 净化系统设计

采用二级净化系统,其结构示意图参见图 9-8

### (三)施作要点

#### 1. 管道通风系统

##### (1) 刚性通风管现场制造工艺

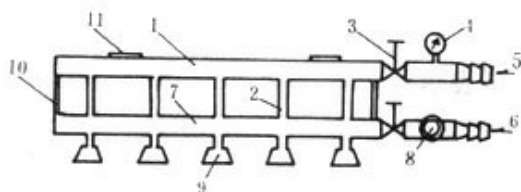


图 9-7 水幕降尘器结构示意图

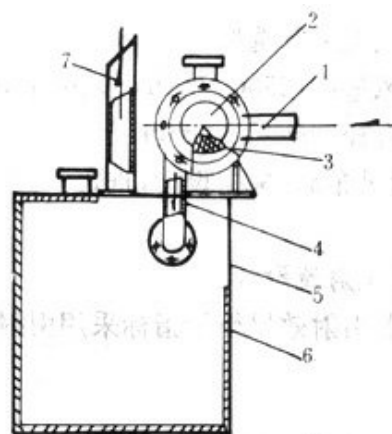


图 9-8 净化系统结构示意图

隧道施工中,大孔径刚性通风管的传统做法是:厂制焊接成型,长途运送至

工地。它存在两个主要缺点，一是运输困难，二是回收率低。为此，结合实际，在进行风管设计的基础上，研制了几套模具，现场冷弯法卷制钢风管，

风管参数：单节长 1956mm，公称直径  $D=1200\text{mm}$ ，壁厚  $\delta=0.8\text{mm}$ ；风管采用法兰连接，管材为镀锌铁皮。风管加工：铁皮采用扣边咬接成风筒，角钢冷弯成法兰，通过胎具将风筒、法兰制成风管。

## （2）风机风管安装

①主机安装在洞外，离洞口距离大于 20m，上部设防雨篷。

②风管安装采用两种型式，一种方式是吊在拱顶，每间隔 4.0m 设一根  $\Phi 22$  悬吊锚杆；另一种方式是支立在边墙一侧。两种型式视施工条件任选。

③风管转弯时应设过渡段，转弯角度大于  $110^\circ$ 。

④风管悬吊、支立时，做到平、直、稳、紧，在水平面上无起伏，垂直面上无弯曲。

⑤两节风管之间采用法兰连接，中间采用 4mm 厚直条橡胶带沿风管法兰环向拉压扣紧。

⑥风管悬吊时，要求砂浆锚杆单根抗拉力大于 15kN。

## （3）管理要求

①通风机使用前应换注黄油，以后每半月加注一次。

②风机应减少停机次数，采取定期停机保养，一般一周检修一次。

③设风管专门维修工班，发现破损、开裂、泄漏、螺栓松动等情况时，对症处理。

④悬吊风管时，应先清理危石，注意施工安全。

## 2. 射流器安装与操作

高压射流器一律安装在拱顶，一般 500m 设一个，特殊位置（如支洞喇叭口处）应增设。安装时，应检查悬吊锚杆的抗拔力，其值不应小于 50kN。出碴作业时，打开引射器。

## 3. 水幕降尘器安装与操作

在离隧道掌子面 100m 范围内设置 2~3 道水幕，分别离掌子面 30m、50m、80m。水幕器安在隧道起拱线外，每道水幕两侧边墙分别安一个水幕器。炮前 10min 打开各道开关，炮后半小时关闭。

#### 4. 净化系统安装使用

将净化箱连接到内燃机车辆尾气排气管上，走期更换水洗箱里的水及涤烟剂、催化剂。

XS30-30 高效柴油添加剂按万分之三～五的比例加入到柴油中，供洞内运输车辆使用。

### 五、质量控制标准与检测方法

#### （一）洞内卫生学指标

- （1）隧道内含有 10% 以上游离  $\text{SiO}_2$  粉尘的最高允许浓度为  $2\text{mg} / \text{m}^3$ ；
- （2） $\text{CO}$  最高容许浓度为  $30\text{mg} / \text{m}^3$ ；
- （3）氮氧化物（换算式  $\text{NO}_2$ ）最高容许浓度为  $5\text{mg} / \text{m}^3$ ；
- （4） $\text{CO}_2$  含量，按体积计不得大于 0.5%；
- （5）洞内  $\text{O}_2$  含量，按体积计不小于 20%；
- （6）洞内气温不得超过  $28^\circ\text{C}$ 。
- （7）洞内噪音不大于 90dB；
- （8）开挖断面风速不小于  $0.15\text{m} / \text{s}$ ，不应大于  $6\text{m} / \text{s}$ 。

#### （二）测试仪器与方法

##### 1. 卫生学测试

主要仪器仪表有：武安 84—1 型、FC—2 型粉尘采样器，电子分析天平，秒表， $\Phi 40\text{mm}$  过氯乙烯纤维滤膜，北京北苑检测分析仪器厂生产的  $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_x$  采样器、采样管等。

测试方法：按照 GB5748-85《作业场所空气中粉尘浓度测定方法》及常规毒害气体测定方法执行。

##### 2. 通风系统测试

主要仪器仪表有：标准毕托管，800mmU 型压力计，DJM-9 型补偿式微压计，DEM<sub>3</sub> 型空盒气压表，DEM6 型杯状风速表，干湿温度计等。

测试方法：按常规方法测定。对被测管道截面分三环进行测定，其计算结果取算术平均值，并进行标化。标化大气压为 760mm 水柱，温度  $20^\circ\text{C}$ 。

##### 3. 进洞车辆烟气排放测走

主要仪器有：FBY-2 型全自动烟度计，MEXA-324M 型汽车排气分析仪。

测定方法：按 GB3846-83 和 GB6456-86 执行。

### 六、机具设备

针对不同隧道，不同的工作面数配备相应的通风机具设备。以太平驿引水洞为例，主要机具设备可参见表 9-3。

通 风 机 具 设 备 一 览 表					表 9-3
序 号	项 目	型 号	单 位	数 量	备 注
1	通风机	MFAP <sub>2</sub> —SC <sub>3</sub>	台	2	日本产
2	通风机	津 88—1	台	4	天津产
3	通风机	津 90—1	台	1	天津产
4	通风管	φ1200	m	7600	自制
5	通风管	φ800	m	1000	自制
6	架子车		台	2	现场改装
7	风管加工模具		套	2	自行设计制作
8	水幕器		个	10	自行设计制作
9	引射器		个	5	用在 5# 洞下游、喇叭口处
10	净化器		个	6	装在 ZL50C. 966D 及红岩车上

### 七、劳动组织

#### （一）总体安排

现场成立一个通风管理组，包括施工技术、环卫、安全部门。通风管理组的职责：负责通风降尘净毒系统的设计并组织实施，负责尘毒的监测、系统调整，安全生产等工作。

#### （二）具体安排

参见表 9-4

### 八、经济社会效益分析

采用通风降尘净毒综合治理其社会、经济效益均十分显著，以太平驿引水隧洞为例。

#### （一）现场自制风管效益巨大

现场自制风管，改变了大直径刚性风管厂制的历史，避免了长途运输不便。现场自制的拼装式风管具有可拆装，多次倒用的特点。同厂制 δ=2mm 厚黑铁皮风管相比，以 1000m 风管计算，可节约材料费 10. 4 万元，节约加工费 10. 64 万元，节约运费 0. 26 万元，合计节约 21. 64 万元，（按 1992 年同期价格计）。自制白铁皮风管同软风管相比，每 m 价格约高出 24 元，但刚性风管比软风管回



收率大，残余价值高。不仅如此，关键是采用刚性风管更加有利于管道通风。

通风降尘净毒施工组织安排 表 9-4

序 号	工 作 项 目	岗 位 、 工 种	人 数	工 作 内 容
1	通风领导小组	组长	1	负责总体方案设计与实施
		技术员	2	负责方案设计,参与组织实施
		卫生监督员	1	负责尘毒测试
		安全员	1	负责安全生产
2	加工车间	主任	1	负责各项加工生产任务实施
		技术员	1	负责加工技术指导
		风管加工	40	含电焊工、电工
		射流器加工	10	负责加工射流器,后期加工风管
		水幕器加工	5	负责加工水幕器,后期加工风管
		净化器加工	10	负责加工净化器,后期加工风管
		材料员	3	负责采供、保管
3	安 装 队	队长	1	负责组织各类安装工作
		安装工班	30	二个班,分片负责
		架子车司机	2	
		通风机司机	8	二班倒
		维修班	20	负责维修、管理引射器、水幕器
		电工	2	
		油料员	1	负责 XS30-30 柴油添加剂使用管理

(二) 降尘净毒综合治理社会效益显著

(1) 降低了粉尘浓度和毒害气体浓度，减少了对职工身心健康的伤害，对预防职业矽肺病具有十分重要的意义。

(2) 净化了洞内空气，有利于环境保护。特别是对柴油机的二级净化及掺 XS30-30 高效柴油添加剂，降低了机械比排放指标，作用重大。

(3) 采用综合治理，为施工生产创造了良好的条件，缩短了作业循环时间，加快了工程进度。

九、工程实例

四川华能太平驿电站引水隧洞位于岷江上游左岸四川省汶川县境内，全长 10500m，由铁道部十八局担负 5+000~10+500 段施工任务。隧道洞内径 9.0m，开挖直径 9.6m~10m，采用钻爆法施工，元轨运输，最大独头通风距离 2.0km。

该隧洞施工采用了通风降尘净毒综合治理技术，管遭遇风采用 1250m<sup>3</sup> / min、1000m<sup>3</sup> / min 风机配拟 Φ1.2m 风管单机压入式供风，同时采取了水幕降尘、

高压射流、柴抽机车辆净化，掺 XS30-30。柴油添加剂等综合治理措施，收到了显著成效。参见图 9-9。

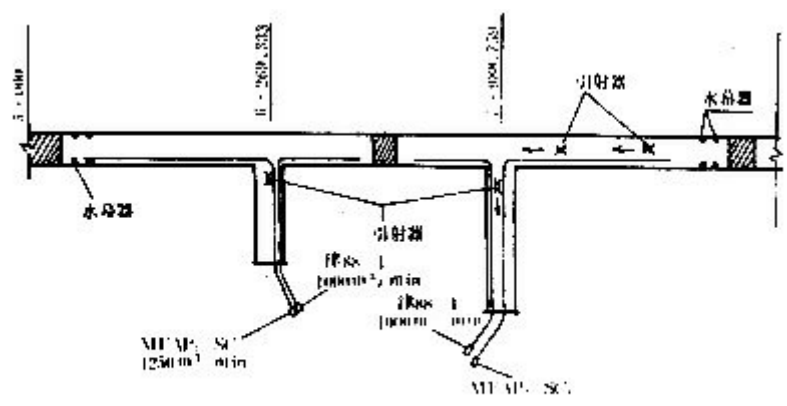


图 9-9 太平驿隧道通风降尘净毒系统布置

1993 年 3 月,铁道部劳动卫生研究所对 5#支洞下游单机独头供风 1.9km 后,洞内卫生学指标,通风系统进行了测试,温室结果见表 9-5、表 9-6、表 9-7。

各工序粉尘浓度测定结果 表 9-5

工 序	凿 岩	装 药	炮后 20min	出 碴	出 碴	出 碴	国 标
距掌子面 (m)	15	6	50	50	100	500	
粉尘浓度 (mg/m³)	0.6	0.3	0.6	2.2 1.7 *	4.0 1.9 *	1.2	2

\*为剔除炭颗粒后的粉尘浓度

各工序有害气体浓度测定结果 表 9-6

工 序	凿 岩	装 药	炮后 20min	出 碴	出 碴	出 碴	国 标
距掌子面 (m)	15	5	50	50	100	500	
CO 浓度 (mg/m³)	未检出	未检出	1.0	2.4	1.7	1.7	30
NOx 浓度 (mg/m³)	未检出	未检出	未检出	2.3	1.4	1.5	5

通风系统测定结果 表 9-7

测点位置	风量 (m³/min)	风压 (Pa)	管内风速(m/s)	百米漏风率	平均百米漏风率
距风机 31m	1242	3938	18.3		1.2%
距风机 1000m	1160	1434	17.1	0.7%	
距风机 1890m	998	171	14.1	2.0%	

我局劳卫部门对机械净化和洞庭湖内微小气候进行了监测，结果见表 9-8、表 9-9。

进洞机械尾气排放测定结果 表 9-8

参 数  车 辆	工 况	纯 柴 油		加入 0.035%XS <sub>30-30</sub>			
		烟度(Rb)	CO(PPm)	烟度(Rb)	降低率	CO(PPm)	降低率
966D 装载机	怠速	2.5	263	1.9	24%	215	18.2%
	加速	6.7	427	5.1	24.1%	316	26%

续表

参 数  车 辆	工 况	纯 柴 油		加入 0.035%XS <sub>30-30</sub>			
		烟度(Rb)	CO(PPm)	烟度(Rb)	降低率	CO(PPm)	降低率
奔驰车	怠速	2.1	216	1.7	19.1%	190	12.1%
	加速	4.8	401	3.9	18.2%	298	25.7%
红岩车	怠速	2.7	286	1.9	29.7%	214	25.2%
	加速	6.9	504	5.8	26%	368	27%
综合效果		25.7	2097	20.3	21%	1601	23.7%

洞内微小气候测定结果 表 9-9

参 数  场 所	温度(℃)	湿度(%)	气压(kPa)	风速(m/s)	含氧量(%)
距掌子面 15m	15	82	90	0.41	20.8
距掌子面 50m	15	82	90	0.52	21.0
距掌子面 100m	16	80	90	0.50	21.4

二级净化系统测定结果 表 9-10

工 况	负 荷	档 位	排 气 温	CO			HC			NO <sub>x</sub>		
				净化前 (ppm)	净化后 (ppm)	%	净化前 (ppm)	净化后 (ppm)	%	净化前 (ppm)	净化后 (ppm)	%
怠速	0	空档	150	261.6	142.3	45.6	86.5	46.1	46.7	248	229	7.7
平地	满载	2	140	741	181	75.6	50.6	19.2	62	968	754.3	22
爬坡	满载	3	300	924	173.4	81.2	64.8	8.5	86.9	794	563	29.1
爬坡	空载	2	250	681.4	98.6	85.5	68.3	8.9	87	458.5	310	32.4

对红岩车实施二级净化后测试结果参见表 9-10。

从上述测定结果不难看出，隧道施工中采用通风，水幕降尘，高压射流，机械净化等技术措施，进行综合治理，其效果是十分显著的。

目前，技术已推广应用到其它一些隧道工程中。

（执笔：雷升祥 康秀红）