

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.09.004

## 隧道干冰清洗试验研究

任松,何华勇,姜德义,陈结,白月明

(重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室,重庆400044)

**摘要:**隧道运行中汽车尾气、扬尘、油污不易降解,越积越多,导致隧道严重污染,影响行车安全,定期进行隧道清洗是隧道安全运行的重要保证。研究了一种利用干冰清洗隧道的方法,基于二氧化碳物化性质和干冰清洗特点建立了隧道干冰清洗理论模型,对干冰清洗时混凝土表面孔隙、表面温度、混凝土单轴抗压强度及清洗效果进行试验,分析了干冰清洗对混凝土表面损伤和抗压强度的影响。试验结果表明:干冰清洗能彻底清除混凝土表面污秽物;清洗过程中的温度变化、干冰微爆对混凝土表面及强度影响较小。干冰清洗技术可用于隧道清洗。

**关键词:**干冰清洗;隧道清洗;微爆炸效应;表面损伤;混凝土

中图分类号:TU455

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2013)09-021-07

## Experiments on cleaning tunnels with dry ice

REN Song, HE Huayong, JIANG Deyi, CHEN Jie, BAI Yueming

(State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control,  
Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Vehicle exhaust, dust and grease in tunnels are hard to be degraded, thus there will be more and more pollutants and the traffic safety will be influenced. Therefore, regularly cleaning tunnels is important for guaranteeing the traffic safety in tunnels. A tunnel cleaning method with dry ice is proposed, and a model of dry ice cleaning tunnel is developed based on the physical, chemical and cleaning properties of dry ice. Some experiments about the surface hole, surface temperature and the uniaxial compressive strength of the concrete are conducted. The surface damage and the compressive strength of the concrete is researched after the cleaning process. The test results show that: the dry ice cleaning method can thoroughly clean the surface of concrete; the surface damage and the compressive strength is little influence by the temperature and dry ice micro blasting. So dry ice cleaning method can be used for cleaning tunnel.

**Key words:** dry ice cleaning; tunnel cleaning; micro-explosion; surface damage; concrete

随着隧道在公路交通中的地位越来越重要,隧道污染带来的行车安全隐患也日益严重。在相对封闭的隧道空间内汽车尾气和扬尘很难得到有效的排出和降解,尾气中的炭黑、机油和扬尘混合后

沉积在隧道表面及机电设备上,日积月累形成难以清除的污秽物。这些污秽物会明显降低隧道内空气质量,减弱隧道的照明效果,从而危害隧道内的行车安全。因此,为了改善隧道运营环境,提高隧

收稿日期:2013-04-20

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2009CB724606);国家自然科学基金资助项目(51074198);国家创新研究群体基金资助项目(50621403),重庆市科委自然科学基金计划资助项目(2010BB6044);中央高校基本科研业务费资助项目(CDJZR10240017)

作者简介:任松(1978-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事岩土工程力学方面的教学和科研工作,(E-mail)rs\_rwx@cqu.edu.cn。

道行车安全,就必须对隧道进行定期的清洗维护<sup>[1]</sup>。

目前主要采用的隧道清洗方法有:人工清洗法、滚刷式化学药剂清洗法、高压水射流清洗法等。人工清洗法和滚刷式化学药剂清洗法分别由人工或机械用化学药剂对隧道进行清洗,这两种清洗方法不仅清洗质量差,效率低,环境污染大,而且人工清洗还会对清洗人员的身体健康造成较大危害。高压水射流清洗技术是将具有高能量、高速度的水射流正向或切向冲击物体表面,完成隧道的清洁工作。由于高压水射流具有较大的能量,清洗过程中易对清洗对象产生破坏;清洗以水为介质,隧道湿度增大,对机电设备造成安全隐患<sup>[2-3]</sup>。

干冰清洗技术是一种高效、低耗、环保、无二次污染的清洗技术。段学明等<sup>[4-5]</sup>将干冰清洗应用于汽车,磨具行业的清洗并取得较好的效果;刘溟等<sup>[6]</sup>将干冰清洗技术应用于高压电绝缘子清洗,有效的解决了常规清洗中的污闪现象,齐童等<sup>[7]</sup>将干冰清洗技术应用于 ITO 玻璃表面清洗,并与其他清洗方法对比试验,取得较好清洗效果,并验证了干冰清洗对 ITO 玻璃表面无损伤,但目前尚未见干冰清洗技术在隧道清洗领域的研究报道。为研究干冰清洗技术应用于隧道清洗的可行性及清理机理,笔者根据二氧化碳物化性质、热力学原理以及干冰清洗特点研制出一种适用于隧道清洗试验的试验设备,运用该设备对隧道混凝土的清洗效果、表面损伤以及清洗后抗压强度进行试验,验证了干冰清洗应用于隧道清洗的可行性。

## 1 隧道干冰清洗试验仪器

### 1.1 干冰清洗原理

干冰清洗技术是将具有一定压力的压缩空气和干冰颗粒混合后喷射到被清洗物表面,利用干冰颗粒本身具有的低温和高速运动产生的冲量使得污秽物龟裂,干冰颗粒快速升华产生的体积膨胀使污秽物剥离被清洗物表面。干冰清洗隧道原理表现在以下 3 方面:1)温差龟裂效应。当干冰颗粒接触隧道表面(混凝土)时吸热升华,使得污秽物温度急剧降低,由于混凝土与污秽物的热膨胀系数不同,使得污秽物脆化、龟裂,同时降低其机械性能。2)能量转移。干冰颗粒高速运动到混凝土表面发生撞击,干冰瞬间升华,吸收大量热量,实现动能和热能的转换。3)干冰微爆。干冰碎粒进入污秽物裂隙,迅速升华体积瞬间发生膨胀至 800 倍左右,造成微型爆炸,污秽物被剥离混凝土表面。干冰清洗的热冲击

只发生在污秽物与基体结合的表面,对被清洗物无损伤<sup>[8-10]</sup>。

### 1.2 隧道干冰清洗试验设备研制

该试验机主要由 3 部分组成:1)干冰生成部。2)干冰导入部。3)清洗喷嘴部。试验机示意图见图 1。其中压缩空气由空气压缩机提供,液态二氧化碳由液体二氧化碳常温钢瓶或液体二氧化碳低温绝热钢瓶通过低温绝热管路提供。

#### 1.2.1 干冰生成部

1)干冰生成部(见图 2)利用节流膨胀原理<sup>[11-13]</sup>,使高压过冷的液态二氧化碳通过节流膨胀元件喷出,急速膨胀降压,一部分液态二氧化碳吸收热量气化,使得一部分液态二氧化碳快速冷凝为固体的干冰,在出口处形成气固两相流。

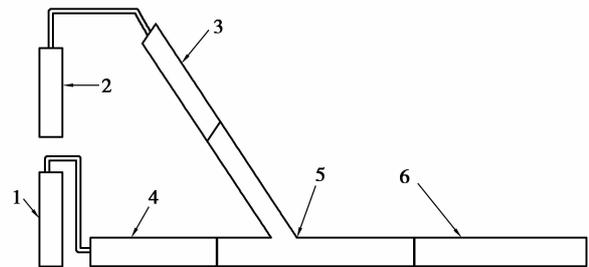


图 1 试验机示意图  
1. 压缩空气供给部;2. 液态二氧化碳供给部;3. 干冰生成部;  
4. 压缩空气导入部;5. 干冰导入部;6. 清洗喷嘴部

图 1 试验机示意图

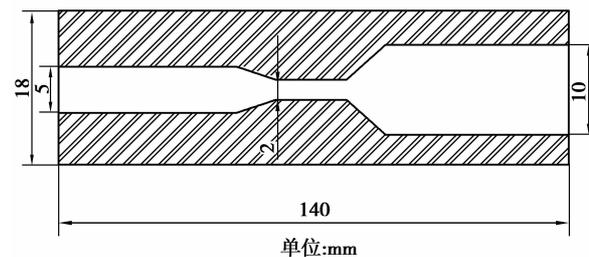


图 2 干冰生成部

当  $J_i > 0$  时,  $\partial T < 0$ , 即是节流膨胀后流体的温度降低。二氧化碳在  $1.0138 \times 10^5$  Pa、273.16 K 时,  $J_{CO_2} = 1.30 > 0$ , 故液态二氧化碳节流膨胀后温度降低, 节流前后二氧化碳的温度差值可由公式(1)、(2)求得。

$$J_i = \frac{\partial T}{\partial P} = \frac{T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p - V}{c_p}, \quad (1)$$

$$\Delta T = \int_{P_1}^{P_2} J_i dp_i = \int_{P_1}^{P_2} \frac{1}{c_p} \left[ T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p - V \right] dp, \quad (2)$$

式中: $J_1$ 为焦耳-汤姆孙效应系数; $P_1$ 、 $P_2$ 分别为节流前后压力,Pa; $T_1$ 、 $T_2$ 分别为节流前后温度,K; $c_p$ 为比定压热容,J/(kg·K)。

在已知节流膨胀阀进口温度和压力时,调节节流膨胀阀的孔径大小改变二氧化碳流量,以控制干冰的生成量。

2)干冰生成率。建立热力学模型,为便于计算,假定节流膨胀过程与外界完全绝热,则二氧化碳气化所吸收的热量完全来自于液态二氧化碳冷凝成固体放出的热量;同时节流充分,即节流后只有气固两相流。节流前后满足热量守恒、质量守恒。干冰生成部出口处温度保持恒定( $T=193.15$  K)。干冰生成部进口处液态二氧化碳参数保持一定: $P_1=2.13$  MPa, $T_1=253.15$  K。

质量守恒:

$$M_1 = M_g + M_s, \quad (3)$$

热量守恒:

$$M_g \cdot R_g = M_s \cdot R_s. \quad (4)$$

由二氧化碳气化热表查得 $R_g=397.48$  kJ/kg,由于在 $P_2=0.101$  MPa, $T_2=193.15$  K状态下,无液态二氧化碳存在,冷凝热可通过气化热和升华热的差值求得。在193.15 K时升华热( $R_{su}$ )可由公式(5)求得 $R_{su}=749.18$  kJ/kg。

$$R_{su} = 665.57 - 0.10086T + 0.0062496T^2 - 0.00001805T^3, \quad (5)$$

$$R_s = R_{su} - R_g = 351.70 \text{ kJ/kg}, \quad (6)$$

干冰生成率

$$\eta = \frac{M_s}{M_s + M_g} \times 100\% = 53.06\%, \quad (7)$$

式中: $M_1$ 为节流前液态二氧化碳质量,kg; $M_g$ 、 $M_s$ 分别为节流后气态和固态二氧化碳质量,kg; $R_g$ 、 $R_s$ 分别为气化热和冷凝热,kJ/kg。

查二氧化碳压焓图,液态二氧化碳从 $P_1=2.13$  MPa, $T_1=253.15$  K节流膨胀到 $P_2=0.101$  MPa, $T_2=193.15$  K的固化分率为0.52,考虑到计算过程中热力学模型理想化的影响,干冰生成率的计算结果与二氧化碳压焓图的固化率相符。则可以通过液态二氧化碳的流量、密度和生成率解得干冰质量。

### 1.2.2 干冰导入部

利用文丘里管负压原理,将干冰生成部产生的干冰导入压缩空气流路中,并充分混合,以利于清洗作业。压缩空气由空气连接管进入干冰导入部,高速流动的压缩空气在干冰导入部支路(图3)中产生负压,将干冰生成部产生的干冰吸入清洗流路中,充分混合后经过清洗喷嘴喷出。

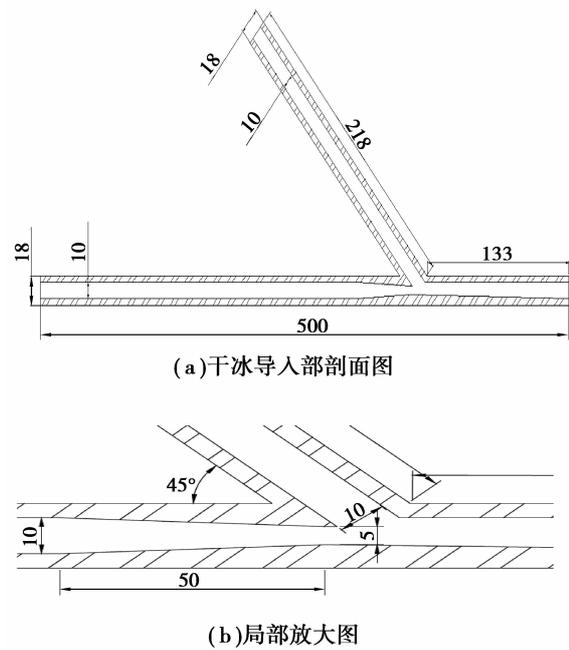


图3 干冰导入部

### 1.2.3 清洗喷嘴部

清洗喷嘴部采用拉伐尔喷管原理<sup>[15-17]</sup>,压缩空气与干冰的混合气固两相流在该部加速至超音速,并对混凝土表面进行清洗。喷管满足3个基本条件:喷管进出口处须有足够的压力比,流体速度随压力比的增大而增大;扩压段出口与喉部须有一定的面积比,面积比随着流体速度的变化而改变;为达到清洗要求还须满足一定的流量要求。

干冰清洗要求喷管出口处流体速度不低于1.5倍声速,则对应的压力比(喷管进出口压力比)不低于1.49倍。因喷管中流动过程是接近稳定的,即可假定流体的参数只沿喷管的轴向发生变化,满足稳定流动的基本方程式。

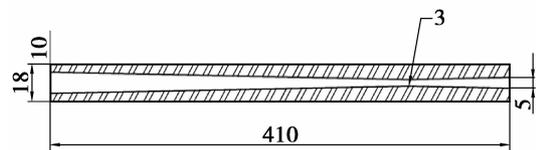


图4 清洗喷嘴部

1)连续性方程式:流体在喷管中单位时间流过各个截面的质量流量相等,即满足质量守恒定律。

$$q_m = \frac{Ac_f}{v} = \text{常数}, \quad (8)$$

微分得

$$\frac{dA}{A} + \frac{dc_f}{c_f} - \frac{dv}{v} = 0, \quad (9)$$

式中:  $q_m$  为质量流量, kg/s;  $v$  为比体积,  $m^3/kg$ ;  $c_f$  为流速, m/s;  $A$  为面积,  $m^2$ 。

2) 能量方程式: 流体通过喷管时时间短、流速高, 与外界近似无热交换, 可视为绝热稳定流动, 即  $Q=0$ 。同时流动过程中不对外界做功, 喷管中势能变化可忽略。则有稳定流动能量方程

$$\Delta h + \frac{1}{2} (\Delta c_f^2) = 0, \quad (10)$$

微分得

$$dh + c_f dc_f = 0, \quad (12)$$

式中  $\Delta h$  为比焓变量, J/kg。

喷管尺寸参数设计时, 根据进口参数(压力、温度、流速), 气体流量以及背压确定管型、尺寸; 还须考虑喷管内部摩擦因数的影响, 喷管的渐缩段渐进角度不大于  $14^\circ$ , 渐扩段的渐进角度不大于  $4^\circ$ 。根据以上方法求得喷管参数: 总长 410 mm, 喷管喉部直径 3 mm。

## 2 混凝土干冰清洗试验

### 2.1 试验目的与条件

#### 2.1.1 试验目的

通过隧道干冰清洗试验机对隧道二衬混凝土清洗试验, 测试干冰清洗混凝土试验机的清洗效果以及研究干冰清洗混凝土的可行性; 干冰清洗时混凝土表面温度变化, 干冰清洗对混凝土表面损伤分析; 干冰清洗对混凝土单轴抗压强度影响分析。

#### 2.1.2 试验条件

1) 混凝土试件取样于重庆市渝中区五一路地下停车库环道隧道二衬, 并在同等条件下养护 28 d 后取回试验。

2) 混凝土表面损伤分析采用 MATLAB 灰度二值图分析模块处理分析。

3) 混凝土单轴抗压强度试验采用 MTS815 岩石力学实验系统测试。

4) 混凝土清洗效果试验采用隧道现场污泥、汽油和少量黄油混合后涂于被清洗面上的方式模拟隧道污秽物, 自然条件下晾干。

5) 混凝土温度由 TM330 红外温度计在清洗时测得, 表面温度测试时间见表 3。试件侧面距被清洗面 2 mm 处留 30 mm 深, 直径 2 mm 小孔 3 个, 以便在试验 30 s 时测试此处小孔底部温度(温度试验时实验室室温 298.15 K)。

6) 试验相关参数: 进口空气压力(0.7 MPa)、空气温度(298.15 K)、排气量( $1 m^3/min$ ); 喷嘴出口温度(195.15 K)、出口压力(0.122 MPa), 流体出口速

度 1.6 倍声速。

### 2.2 试验过程

1) 将在现场同等条件下养护 28 d 后的试件取回, 试件为  $100 mm \times 100 mm \times 100 mm$  的正方体。试验中为保证实验数据的准确性, 以 3 块试件为一组, 同等试验条件下做多组, 最后取平均值进行分析计算。

2) 试验开始前选定清洗面, 并在被清洗面中心选定  $20 mm \times 20 mm$  的方形区域以便试验分析。为研究干冰微爆对混凝土表面损伤影响情况, 采用两组试件对比试验: 一组试件的被清洗面表面用隧道二衬同等标号水泥浆处理, 使表面致密、光滑, 无孔隙(如图 5(a)); 另一组试件不做处理, 被清洗面有明显细微孔隙(如图 5(b))。

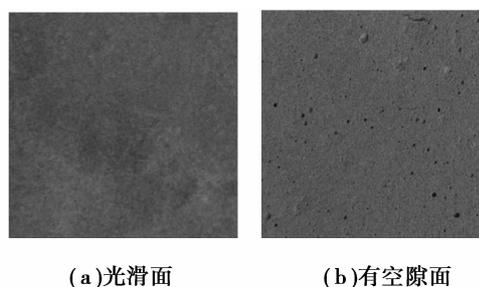


图 5 混凝土表面对比

#### 3) 混凝土清洗试验。

a. 确认清洗试验机各部连接完好, 打开空气压缩机并充分预热后关闭排气阀, 空压机内空气压力达到 0.7 MPa 后开启干冰清洗试验机空气进气阀门。

b. 待空气沿干冰清洗喷嘴喷出并稳定后打开液态二氧化碳气瓶阀门和干冰清洗试验机液态二氧化碳流路阀门。

c. 待空气沿干冰清洗喷嘴喷出并稳定后打开液态二氧化碳气瓶阀门和干冰清洗试验机液态二氧化碳流路阀门。

d. 干冰清洗喷嘴出口处明显看到干冰颗粒喷出后, 将喷嘴移到距离试件被清洗面约 15 mm 处, 保持角度在  $75^\circ$  至  $85^\circ$  之间。清洗过程中清洗喷嘴与被清洗面距离保持稳定; 喷嘴移动平稳、匀速; 被清洗面各点清洗时间均匀。

e. 干冰清洗混凝土效果试验: 对涂有污秽物的混凝土表面进行清洗, 待清洗完成后拍照对比。

f. 混凝土表面损伤试验: 干冰清洗时间一般在 10 s 内完成, 为了更加准确地分析干冰清洗是否会对混凝土表面造成损伤, 本次试验采用 0、10、20、

30 s 4个清洗时间梯度进行对比试验。清洗试验如表1所示,在清洗过程中用高清摄像机对清洗面拍照,拍照过程中须保持亮度一致。

表1 干冰清洗混凝土表面损伤试验

组号	不同时间混凝土表面的图像标号			
	0 s	10 s	20 s	30 s
A <sub>1</sub>	A <sub>100</sub>	A <sub>110</sub>	A <sub>120</sub>	A <sub>130</sub>
A <sub>2</sub>	A <sub>200</sub>	A <sub>210</sub>	A <sub>220</sub>	A <sub>230</sub>
A <sub>3</sub>	A <sub>300</sub>	A <sub>310</sub>	A <sub>320</sub>	A <sub>330</sub>

说明:A<sub>110</sub>表示标号A<sub>1</sub>的混凝土试件清洗10 s时拍摄的图像标号。

g. 混凝土单轴抗压强度试验:清洗时间为0、30、60 s时,分别进行单轴抗压强度试验,每组试验分别进行3次。清洗试验完成后,立即将试件放到MTS815岩石力学实验系统中进行单轴抗压强度试验测试,并记录数据。

h. 混凝土表面温度变化对比试验:混凝土表面须连续清洗,快速测量混凝土同一点温度,并记录;在试验30 s时测试距试件表面2 mm处温度,并记录,结果如表2所示。

表2 混凝土表面温度变化

t/s	T/K	t/s	T/K
0	298.15	12	253.85
2	284.95	14	252.45
4	274.55	16	252.05
6	263.95	20	251.15
8	258.35	24	249.95
10	255.55	30	249.05

说明:距表面2 mm处清洗30 s时测得平均温度为282.55 K。

i. 清洗试验完成后先关闭液态二氧化碳气瓶阀门,再关闭干冰试验机液态二氧化碳进气阀门,约2 min后关闭空气压缩机电源,待空压机内气压恢复常压后关闭干冰清洗机进气阀门;打开空压机排水阀门排除水后关闭;试验结束。

### 2.3 试验结果与分析

1)清洗效果。混凝土涂污前、涂污后和干冰清洗后3种状态见图6。笔者采用拭擦法判别试件是否清洗干净。在试件涂污前、清洗后分别用白色湿巾擦拭混凝土表面,来回拭擦5次,若湿巾上无明显

污物且前后对比无差异则判定为清洗干净。干冰清洗过程中,污垢层由于温度急剧降低而脆化,污秽物中的油脂类物质也因低温固化,在干冰微爆和高速气流的冲击作用下随着污垢层一起剥落,由于污秽物在低温下的脆性,在剥落过程中不会再次附着在被清洗点相邻部位上,清洗完成后混凝土表面无残留物。清洗试验中无论被清洗面是光滑还是有孔隙,均可有效清除表面污秽物;孔隙内的污秽物低温脆化后,被干冰微爆产生的高速气流带出孔隙,达到清洗的目的。通过清洗试验证明干冰清洗能彻底去除混凝土表面污秽物,清洗效果明显。

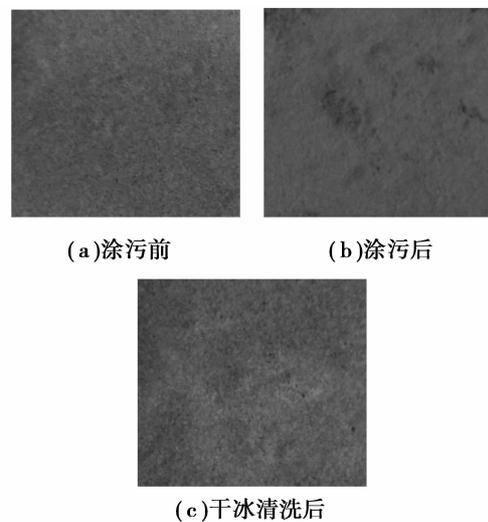


图6 清洗效果试验对比

2)混凝土干冰清洗后表面损伤分析。运用MATLAB灰度二值图分析模块对试验中拍摄的图像进行灰度化处理,处理过程中采用统一标准(RGB=0.205)。

处理后图片中只有反映图像亮度的黑白两色,白色表示混凝土被清洗面上的孔隙,白点越多表示表面越粗糙、孔隙越多,孔隙越大白点越大;同一白点变大表示孔隙发育。

被清洗面为光滑面时(如图5(a)),清洗后,混凝土表面没有明显变化,无新孔隙产生。

被清洗面有明显孔隙时(如图5(b)),进行清洗试验后,从图7可以看出在清洗10、20 s时,图中白点均无明显变化,混凝土表面孔隙无明显增多和发育;随着清洗时间的推移,特别是清洗30 s后,部分白点有细微的扩大,表明混凝土表面孔隙有细微发育,这是因为混凝土表面的孔隙边缘突出部分长时间受到低温影响,导致强度降低,同时受到干冰微爆和高速气流冲击的影响使得孔隙边缘突出部分脱

落。但清洗时间的进一步延长,孔隙发育程度趋于稳定,较 30 s 时无明显变化。

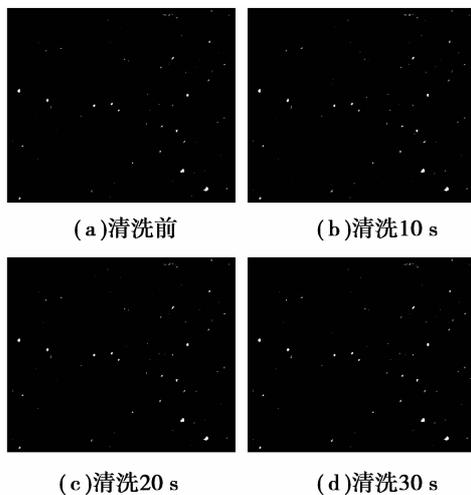


图 7 被清洗面灰度二值图对比

在实际隧道清洗中隧道二衬表面较试验用试件致密、光滑、孔隙较少;清洗时间均在 10 s 内,因此干冰清洗对混凝土表面的损伤较小,满足隧道清洗要求。

3) 混凝土干冰清洗后单轴抗压强度分析:由于试验所采用的试件是 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试件为非标准试件,在试验完成后强度值应乘以尺寸换算系数 0.95。干冰清洗混凝土单轴抗压曲线如图 8 所示。

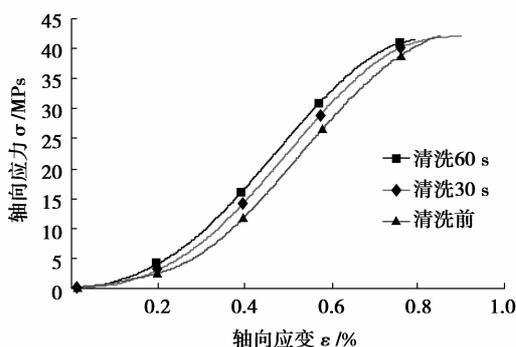


图 8 干冰清洗混凝土单轴抗压强度曲线

在 3 组单轴抗压强度对比试验中,清洗前、清洗 30 s 和清洗 60 s 时试件的单轴抗压强度峰值计算平均值分别达到 42.15、42.18 和 42.08 MPa。从应力-应变曲线图中可以得出 3 组试件在干冰清洗前后单轴抗压强度相近,无明显变化,表明干冰清洗对混凝土强度影响甚小。因为干冰清洗过程中在混凝土表面产生的低温很短时间内就恢复到环境温度,

且温度作用深度仅限于混凝土表面 2 mm 以内,对混凝土整体抗压强度无影响。

4) 混凝土表面温度变化分析:从表 3 可以得出随着清洗时间的延长,混凝土表面温度降低,降低速率逐渐减慢。在干冰清洗前 8 s 内温度降低了 39.8 K,30 s 时温度降低了 49.1 K,表明干冰清洗的温度影响主要是在清洗前 8 s 内,与干冰清洗正常作业时间相近。在 30 s 时测得距表面 2 mm 处小孔底部温度为 282.55 K,降低了 15.6 K,说明清洗时温度影响只发生在污秽物与混凝土结合面,对混凝土本身无损伤,满足隧道清洗要求。

### 3 结 论

1) 笔者根据二氧化碳物化性质及干冰清洗特点设计出一种适用于干冰清洗混凝土试验的试验仪器,经试验证明试验仪器能彻底清除混凝土表面污秽物,清洗效果理想。为隧道清洗提供了一种环保、高效、快速的清洗维护方法。

2) 干冰清洗混凝土表面损伤试验表明,干冰清洗时间在 20 s 内时,混凝土表面无新的孔隙产生,原有孔隙发育不明显,表明干冰清洗对混凝土表面无损伤。

3) 干冰清洗混凝土强度试验表明,干冰清洗对混凝土强度影响甚小,对混凝土整体结构强度无影响,满足隧道清洗不破坏隧道力学特性的要求。干冰清洗是一种适用于隧道清洗的有效清洗方法。

4) 混凝土表面温度试验表明,干冰清洗时温度影响主要集中于混凝土表面 2 mm 以内,即污秽物与混凝土表面结合部,对混凝土损伤较小。满足隧道清洗条件。

### 参考文献:

- [1] 王晓,刘斌. 现役高速公路隧道监控量测及其结构可靠性分析[J]. 东北大学学报:自然科学版,2007,28(2): 270-273.  
WANG Xiaoming, LIU Bin. Monitoring and measuring of expressway tunnel and its structural reliability analysis [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2007, 28(2): 270-273.
- [2] 吴军伟. 浅谈高速公路隧道清洗的效率安全问题[J]. 华东公路,2008(2):32-33.  
WU Junwei. The efficiency and security of the freeway tunnel cleaning [J]. East China Highway, 2008, 2: 32-33.
- [3] 朱跃钊,廖传华,王重庆,等. 二氧化碳的减排与资源化利用[M]. 北京:化学工业出版社,2011.

- [4] 段学明. 干冰清洗技术在汽车行业的应用[J]. 清洗世界, 2006, 22(11): 5-7.  
DUAN Xueming. Application of dry ice cleaning technology in automotive industry [J]. Cleaning World, 2006, 22(11): 5-7.
- [5] 段学明, 刘云峰. 轮胎模具的干冰清洗优势及效益分析[J]. 清洗世界, 2005, 21(7): 44-46.  
DUAN Xueming, LIU Yunfeng. Analyses of the advantages and profits of dry ice cleaning for tyre mould [J]. Cleaning World, 2005, 21(7): 44-46.
- [6] 刘溟, 王家礼, 马心良, 等. 干冰清洗变电站绝缘子试验[J]. 高压电技术, 2011, 37(7): 1649-1655.  
LIU Ming, WANG Jiali, MA Xinliang, et al. Cleaning experiment of substation insulators by dry ice [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1649-1655.
- [7] 齐童, 李军建, 李树林. 干冰微粒喷射法清洗 ITO 玻璃的研究[J]. 半导体光电, 2008, 29(2): 231-234.  
QI Tong, LI Junjian, LI Shulin. Carbon dioxide snow jet treatment on surface cleaning of indium tin oxide glass [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2008, 29(2): 231-234.
- [8] 陈继辉, 童明伟, 严嘉. 干冰升华特性的实验[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2005, 28(4): 50-52.  
CHEN Jihui, TONG Mingwei, YAN Jia. Experiments on sublimation behavior of dry ice [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2005, 28(4): 50-52.
- [9] Spur G, Uhlmann E, Elbing F. Dry-ice blasting for cleaning: process, optimization and application [J]. Wear, 1999, 233/234/235: 402-411.
- [10] Yang S C, Huang K S, Lin Y C. Optimization of a pulsed carbon dioxide snow jet for cleaning CMOS image sensors by using the Taguchi method [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 139 (1/2): 265-271.
- [11] 刘杰, 李杨, 裴念强, 等. 二氧化碳两相冷却系统的特性[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(1): 133-137.  
LIU Jie, LI Yang, PEI Nianqiang, et al. Theoretical and experimental investigation on characteristics of CO<sub>2</sub> mechanically pumped two phase cooling system [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 42(1): 133-137.
- [12] 薛卫东, 朱正和, 邹乐西, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 热力学性质的理论计算[J]. 原子与分子物理学报, 2004, 21(2): 295-300.  
XUE Weidong, ZHU Zhenghe, ZOU Lexi, et al. Theoretic calculation on thermodynamic character for SCF CO<sub>2</sub> [J]. Journal of Atomic and Molecular physics, 2004, 21(2): 295-300.
- [13] 黄冬平, 丁国良, QUACK Hans. 基于拉格朗日模型的 CO<sub>2</sub> 气固两相圆管内突扩流动沉积特性分析[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(3): 419-423.  
HUANG Dongping, DING Guoliang, DUACK Hans. A lagrangian simulation of the deposition of CO<sub>2</sub> gas-solid sudden expansion flow [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(3): 419-423.
- [14] 黄冬平, 丁国良, DUACK Hans. 高压二氧化碳节流排放堵塞实验[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(8): 1417-1421.  
HUANG Dongping, DING Guoliang, DUACK Hans. Experimental study of blockage during throttling release of CO<sub>2</sub> under high pressure [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(8): 1417-1421.
- [15] 席德科, 张胜利. 喷射清洗设备中喷管的设计与研究[J]. 机械设计与制造, 2007(7): 27-29.  
XI Deke, ZHANG Shengli. Design and research of spray pipe in jet cleaning equipment [J]. Machinery Design & Manufacture, 2007(7): 27-29.
- [16] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [17] 郑丹星. 流体与过程热力学[M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2010.

(编辑 张 莘)