

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.08.012

## 干冰清洗对混凝土表面损伤影响分析

任 松, 师燕滑, 姜德义, 陈 结

(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:**采用 KBQX-30DG 单管干冰清洗机进行混凝土干冰清洗试验, 结果表明清洗效果好, 但试块表面会产生孔隙。基于正交试验, 研究了清洗过程中的 4 个因素(干冰流量、清洗距离、清洗时间及喷射角度)对混凝土表面孔隙的影响。运用极差分析法对数据进行处理, 结果表明干冰流量对表面孔隙率增长量影响明显, 随着干冰流量的增加, 表面孔隙率增长量增加, 当干冰流量大于 1.54 kg/min 时, 表面孔隙率增长量剧增; 喷射角度对表面孔隙率增长量的影响较明显, 喷射角度在 55°~60°及 85°~90°范围内, 对表面孔隙率增长量多于喷射角度在 65°~70°及 75°~80°范围内; 清洗距离与清洗时间对表面孔隙率增长量影响不明显。运用线性回归分析及层次分析法得到各因素的权值, 通过权值计算得到的各因素对表面孔隙率增长量影响的主次顺序与极差分析相一致。各因素对表面孔隙率增长量的影响为隧道干冰清洗提供了一定的理论基础。

**关键词:**混凝土; 干冰清洗; 表面孔隙率增长量; 正交试验; 层次分析法

**中图分类号:** TU455

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2014)08-083-08

## Influence analysis of dry ice cleaning to the concrete surface pore

REN Song, SHI Yanhua, JIANG Deyi, CHEN Jie

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

**Abstract:** The result of concrete dry ice cleaning test with KBQX-30DG, which is a single tube dry ice cleaning machine, shows cleaning effect is good, but can make pore on the concrete surface. Based on the orthogonal experiment design method, study the four factors of dry ice flow, cleaning distance, cleaning time and injection angle in the process of dry ice cleaning how to affect the surface porosity growth. The range analysis results show that the most important factor to the surface porosity growth is dry ice flow. With the dry ice flow increase, the surface porosity growth increased, and the surface porosity growth will leap when the dry ice flow is greater than 1.54 kg/min; the injection angle has obvious influence on the surface porosity growth, when injection angle is in the scope of 55°~60° and 85°~90°, and the amount of pore is more than these in the scope of 65°~70° and 75°~80°; the influence on the surface porosity growth of cleaning distance and cleaning time is not obvious. By linear regression analysis and AHP we can obtain the weights on the surface porosity growth of four factors' through which we can get the primary and secondary order of each factor, and the result is consistent with the range analysis.

**Key words:** concrete; dry ice cleaning; surface porosity growth; orthogonal experiment; AHP

**收稿日期:** 2014-04-08

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2009CB724606; 2009CB724603); 国家自然科学基金资助项目(51074198); 中央高校基本科研业务费资助项目(CDJZR10240017); 重庆市科委自然科学基金计划资助项目(2010BB6044)

**作者简介:** 任松(1975-), 男, 重庆大学教授, 博士, 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.

将干冰应用于清洗行业始于 1945 年,美国海军利用干冰清除顽固的油脂及混合附着物。六七十年代,以美国为首的一批学者就以干冰等“可挥发性”颗粒作为介质的喷砂清洗技术进行了深入的研究和广泛的尝试,奠定了干冰清洗技术的基础<sup>[1]</sup>。而国内则是在 1999 年后才引入了干冰清洗技术。

国内外对于干冰清洗技术开展了一系列的理论及试验研究。Spur G 等<sup>[2-3]</sup>介绍了干冰清洗技术及其设备,并通过试验优化了设备参数。陈继辉等<sup>[4]</sup>研究了干冰在圆柱密闭容器中进行了绝热条件与有热交换、有空气排出与排除空气这 4 种过程中的升华特性,得出了干冰升华过程中温度与压力的关系以及空气对 T-P 关系的影响。干冰清洗的应用范围较广泛,干冰清洗在不同的领域中的运用也进行了研究,张毅平等<sup>[5]</sup>研究了干冰清洗油槽车的可行性,结果表明采用干冰清洗技术清洗油槽车,具有技术优势及应用的可行性。Sherman 等和 Yang 等<sup>[6-7]</sup>将干冰微粒喷射法用于清洁硅基片、金属、陶瓷、光学器件、聚合体表面、CMOS 图像传感器的清洗方面,取得了良好的清洗效果。段学明等<sup>[7-9]</sup>进行了干冰清洗在清除炉管表面的灰垢及汽车行业等方面的应用研究,结果表明清洗效果好,对被清洗物无损伤。Uhlmann 等<sup>[10]</sup>利用干冰清洗铝,发现干冰清洗可提高铝片的粘结性能。干冰微粒喷射法对硅单晶基片、真空设备零件和红外光学望远镜等物体的清洗都取得了良好的成果<sup>[11]</sup>。孙洪孟<sup>[12]</sup>通过干冰清洗不同的污染物的试验,得出了干冰清洗对油污、灰尘和积碳等污染物效果明显。刘溟等<sup>[13]</sup>进行了变电站绝缘子干冰清洗试验,得出了干冰清洗绝缘子的角度、距离及喷头移动速度等参数的最优值及干冰清洗优于现有清洗技术的结论。

隧道是加强各地区之间交流、促进社会发展所不可缺少的,而隧道清洁则是隧道安全运行的重要保证。选择合适的清洁技术来清洗隧道不仅可以提高清洗效率,还可以提高隧道的使用寿命,而高效、安全、环保的干冰清洗技术是对隧道进行有效清洁的不二选择。目前,国外已将干冰清洗应用于房屋、隧道等的清洗,如德国凯驰公司应用干冰清洗机清洗需除污的隧道,而国内对于混凝土干冰清洗方面的研究及应用都较少。

清洗后混凝土表面的损伤程度是干冰清洗是否适用于隧道的关键因素,对于橡胶、金属等致密性较高的材料,干冰清洗后未造成损伤,对于混凝土致密性较低的材料是否会造成的损伤程度需研究。因此,选取正交试验研究干冰清洗过程中各关键因素对混凝土表面污垢剥离后表面孔隙率增长量的影响。

根据国内外干冰清洗技术的研究及应用,基于正交试验,选择混凝土干冰清洗中的干冰流量、清洗时间、清洗过程中喷嘴与混凝土的距离、角度 4 个因素对混凝土表面孔隙率增长量的影响进行了试验分析,研究了各个因素与表面孔隙率增长量之间的关系。通过正交试验结果进行正交试验极差分析,得出各因素对表面孔隙率增长量影响的主次关系,并运用层次分析法确定各因素对表面孔隙率增长量影响的权值大小,为混凝土干冰清洗提供一定的理论基础。

## 1 干冰清洗试验

### 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体的表面,使其表面的污垢受到外力的作用而剥离脱落。污垢所受的外力主要包括干冰微爆力及混合物喷射到物体表面的冲击力。其中,干冰微爆是指在常温常压(20 ℃,0.101 MPa)下干冰迅速吸热升华体积膨胀至 800 倍<sup>[13]</sup>左右所造成的。清洗过程中,一方面干冰吸收物体表面污垢的热量,使污垢发生龟裂;另一方面,干冰的迅速膨胀及混合物的冲击力会使污垢剥离物体表面。

### 1.2 试验条件

1) 试验试件: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,尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm,试块表面的抗压强度为 24.6 MPa,表面光滑。

2) 试验设备:四川资阳四达低温机械有限公司生产的 KBQX-30DG 单管干冰清洗机,转轴转速与干冰用量成正比,可调节范围为 0~1 500 r/min,气源压力 0.3~1.0 MPa,耗气量 3~5 m<sup>3</sup>/min,可通过随意改变转轴转速而改变干冰流量。

### 1.3 试验方法

试验采用正交试验设计方法,研究干冰流量、清洗距离、清洗时间及喷射角度对混凝土表面孔隙产生量的影响,具体试验步骤如下:

1) 对未涂污的试件进行拍照,以备对比使用;

2)在泥土中加入少量的液压油充分混合作为污垢,取等量分别均匀涂抹于试件表面。等表面污垢完全干后进行清洗试验;

3)先将干冰加入干冰清洗机中,然后开启空压机进行预热,直到其能提供稳定的压缩空气流;

4)将试件固定后,开启清洗机,按照正交试验表进行清洗试验,每组试验进行 3 次。清洗过程中喷嘴与被清洗面的距离保持稳定,喷嘴移动平稳、匀速,各点清洗时间均匀;

5)对清洗后的试件拍照,将图片导入 MATLAB 中进行灰度分析,运用 MATLAB 计算得出表面孔隙率。

#### 1.4 混凝土表面孔隙产生量影响因素正交试验设计

隧道病害的类型主要有水害、冻害、衬砌裂损及衬砌侵害等,对隧道衬砌的稳定性都有一定的影响<sup>[14-15]</sup>。隧道清洁是防止隧道灾害和病害最有效的手段之一,目前主要采用的隧道清洗方法有人工清洗法、滚刷式清洗法、高压水射流清洗法等,具有能耗高、造成二次污染、安全系数低等缺点,因此高效、安全、环保、无水的干冰清洗技术是隧道清洗技术的发展方向。为了给隧道干冰清洗提供一定的理论基础,拟用正交试验研究清洗参数对混凝土表面孔隙的影响。

选择干冰清洗过程中的干冰流量、清洗时间、清洗过程中喷嘴与混凝土的距离、角度 4 个因素对混凝土表面孔隙率增长量影响进行分析,按照正交试验法采用 4 因素 4 水平的试验  $L_{16}(4^5)$  方案,共需进行 16 次试验,各因素水平的取值如表 1 所示。

表 1 正交试验 4 因素 4 水平表

水平	参 数			
	1	2	3	4
A 干冰流量/( $\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$ )	0.62	1.08	1.54	2
B 清洗距离/cm	10	15	20	25
C 清洗时间/s	5	10	15	20
D 清洗角度/ $^{\circ}$	55~60	65~70	75~80	85~90

其中,干冰流量是依据混凝土的表面抗压强度,选择的流量范围较大有利于对比分析。清洗距离、清洗时间及喷射角度则是在其他学者研究的基础上进行赋值的。

## 2 清洗效果

由于干冰颗粒与污垢接触后气化为气体,使其能够进入混凝土表面的孔隙中,清洗孔隙中的污垢。并且由于干冰气化而与污垢发生的热交换使污垢的温度较低,低温下的污垢具有脆性,不会附着在临近的位置上<sup>[6]</sup>。而二氧化碳的密度大于空气的密度,气化后的干冰下沉会阻止污垢的乱飞。这样使干冰清洗能够达到彻底去除污垢的目的。

试件涂污前、涂污后及干冰清洗后的状态如图 1 所示。采用拭擦法判别试件是否清洗干净。干冰清洗后用白色湿巾擦拭混凝土表面,来回拭擦 3 次,对比擦拭前后的湿巾,无差异时判定为清洗干净。

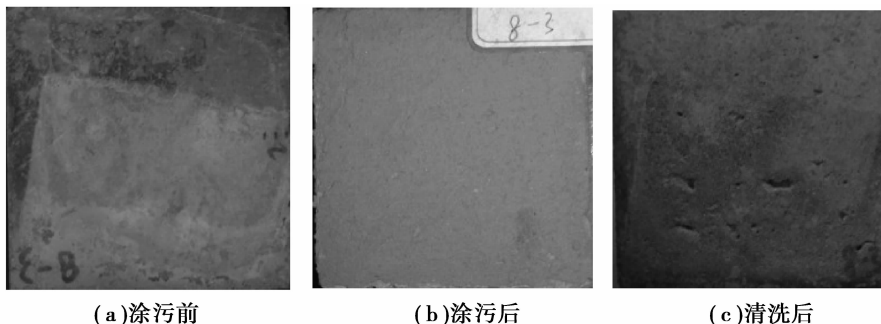


图 1 试件清洗效果对比

通过对比混凝土清洗前后的图片及表面的擦拭情况,可以得出:干冰清洗能有效地清洗混凝土表面的污垢;混凝土干冰清洗后,混凝土表面产生孔隙。

### 3 试验结果分析

#### 3.1 混凝土表面孔隙率的计算

对清洗前后试块进行拍照,通过 MATLAB 对图片进行分析得出清洗后表面孔隙率,用  $S$  表示。由于清洗前混凝土表面比较光滑,故不考虑试验前混凝土表面孔隙率。

#### 3.2 试验数据

通过混凝土干冰清洗试验,研究干冰与压缩空气混合物的冲击力及干冰与混凝土热交换对混凝土的影响,试验发现当清洗参数变化时,混凝土表面孔隙发育变化差异较大,结果如表 2 所示。

表 2 正交试验结果

试验	$A/(\text{kg} \cdot \text{min}^{-1})$	$B/\text{cm}$	$C/\text{s}$	$D/(\text{°})$	$S$
1	0.62	10	5	55~60	0.004 3
2	0.62	15	10	65~70	0.003 8
3	0.62	20	15	75~80	0.003 1
4	0.62	25	20	85~90	0.004 6
5	1.08	10	10	75~80	0.004 4
6	1.08	15	5	85~90	0.004 9
7	1.08	20	20	55~60	0.005 5
8	1.08	25	15	65~70	0.004 4
9	1.54	10	15	85~90	0.006 3
10	1.54	15	20	75~80	0.005 1
11	1.54	20	5	65~70	0.005 4
12	1.54	25	10	55~60	0.005 8
13	2.00	10	20	65~70	0.006 6
14	2.00	15	15	55~60	0.007 7
15	2.00	20	10	85~90	0.007 4
16	2.00	25	5	75~80	0.006 5

#### 3.3 极差分析

采用直观分析法对试验数据进行处理,通过计算极差确定各个因素对混凝土表面孔隙率增长量影响的主次顺序。极差公式<sup>[16]</sup>如式(1)所示。

$$R = \max\{k_1, k_2, k_3, k_4\} - \min\{k_1, k_2, k_3, k_4\}, \quad (1)$$

式中  $k_i$  表示任一列上水平号为  $i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 时所对应的试验结果之和。

根据表 2 及式(1)可得各因素对表面孔隙率增长量影响的极差值如表 3 所示。

表 3 各因素对表面孔隙率增长量影响的极差分析

参数	$A/(\text{kg} \cdot \text{min}^{-1})$	$B/\text{cm}$	$C/\text{s}$	$D/(\text{°})$
$k_1$	0.015 8	0.021 6	0.021 1	0.023 3
$k_2$	0.019 2	0.021 5	0.021 4	0.020 2
$k_3$	0.022 6	0.021 4	0.021 5	0.019 1
$k_4$	0.028 2	0.021 3	0.021 8	0.023 2
极差	0.012 4	0.000 3	0.000 7	0.004 2

从表 3 可得:各因素对表面孔隙率增长量的影响主次顺序为 $R_A > R_D > R_C > R_B$ ,即影响表面孔隙率增长量的最主要的因素是干冰流量;喷射角度对表面孔隙率增长量的影响较为明显;清洗距离与清洗时间对表面孔隙率增长量的影响较小。

### 3.4 干冰流量对表面孔隙率增长量的影响分析

干冰流量是影响表面孔隙率增长量的最主要因素,随着干冰流量的增加,混凝土表面孔隙率增长量增加,如图 2 所示。当干冰流量增加时,作用于混凝土表面单位面积上的干冰微爆力增加,其表面产生的孔隙增加。在 1.54 kg/min 与 2 kg/min 之间时,表面孔隙率的增长幅度增大,这是由于当干冰流量达到 2 kg/min 时,单位面积受到干冰微爆力及冲击力超过混凝土分子间的结合力,使其密实部分受到损伤,此时产生的孔隙内壁比较粗糙,如图 3 所示。

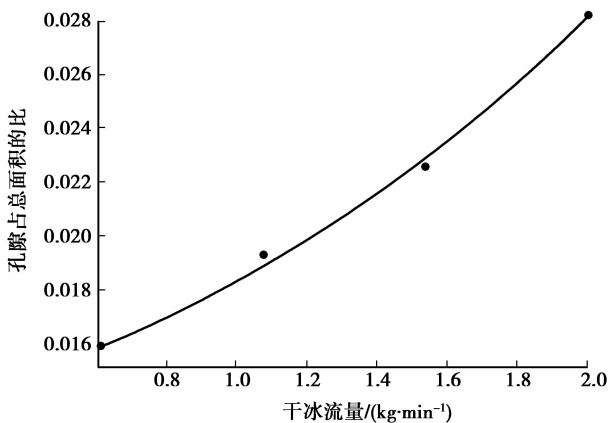


图 2 干冰流量与表面孔隙率增长量的关系

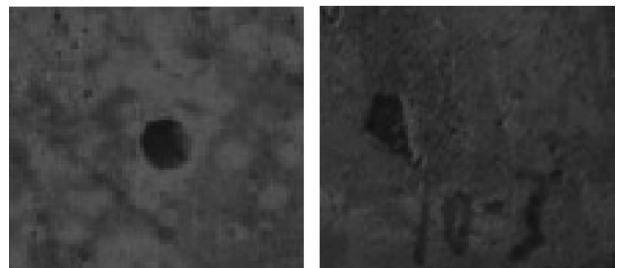


图 3 干冰流量小于与达到 2 kg/min 时孔隙的对比

### 3.5 清洗距离对表面孔隙率增长量的影响分析

清洗距离对表面孔隙率增长量的影响作用较小,随着清洗距离的增加,混凝土表面孔隙率增长量减少,如图 4 所示。当清洗距离增加时,喷嘴的喷射范围增大,即等量的干冰与压缩空气的混合物覆盖面积增大,从而使混凝土单位面积受到的冲击力降低。而孔隙主要是由于冲击力的作用使混凝土表层吹落而产生的,当力降低时,表面孔隙率增长量减少。

### 3.6 清洗时间对表面孔隙率增长量的影响分析

清洗时间对表面孔隙率增长量的影响作用较小,随着清洗时间的增加,混凝土表面孔隙率增长量增加,如图 5 所示。混凝土试块的制作过程主要有混凝土材料的选取、材料的配合比、拌合、捣实及养护等,试件内部分布着大小不均、形状各异的孔隙<sup>[17]</sup>。随着清洗时间的增加,混凝土单位面积上喷射到的干冰量增加使单位面积混凝土温度降低量增加,而由于组成混凝土材料的线性膨胀系数的不同,温度降低较多使混凝土变脆,从而使混凝土表面孔隙率增长量逐渐增多。

### 3.7 喷射角度对表面孔隙率增长量的影响分析

当喷射角度在 $50^\circ \sim 90^\circ$ 时,清洗角度较好,因此试验选择的喷射角度在此范围内选择。喷射角度对表面孔隙率增长量的影响较明显,喷射角度在 $55^\circ \sim 60^\circ$ 及 $85^\circ \sim 90^\circ$ 表面孔隙率增长量要多于喷射角度在 $65^\circ \sim 70^\circ$ 及 $75^\circ \sim 80^\circ$ 时,如图 6 所示。对比试块清洗前后的照片可知,清洗后混凝土表面产生孔隙。而与其他清洗角

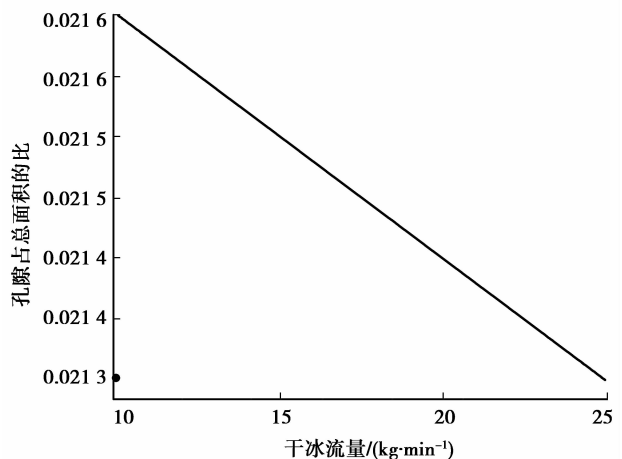


图 4 清洗距离与表面孔隙率增长量的关系

度相比,清洗角度为  $55^{\circ}\sim 60^{\circ}$  时,根据力的分解原理,水平方向分解得到的力较大,当混凝土表面由于受温度及力的作用而出现较小裂纹时,水平力与垂直力共同作用时,裂纹扩大形成孔隙,则表面孔隙率增长量较大。干冰清洗要求喷嘴速度超过  $1\ 837.627\ \text{km/h}$ ,当喷射角度为  $85^{\circ}\sim 90^{\circ}$  时,即接近于垂直喷射,混凝土因受到大的冲击力使表面孔隙率增长量增加,且此时出现的孔隙较深。当清洗角度在  $65^{\circ}\sim 80^{\circ}$  之间时,由于水平及垂直方向的所分力相对较小,从而表面孔隙率增长量较少,混凝土干冰清洗时,可在此范围内选择角度。

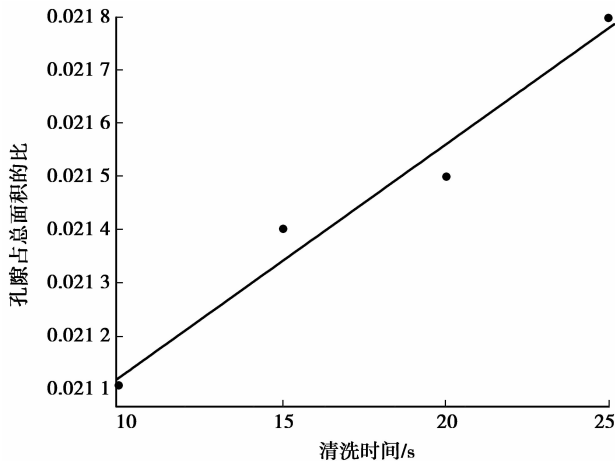


图 5 清洗时间与表面孔隙率增长量的关系

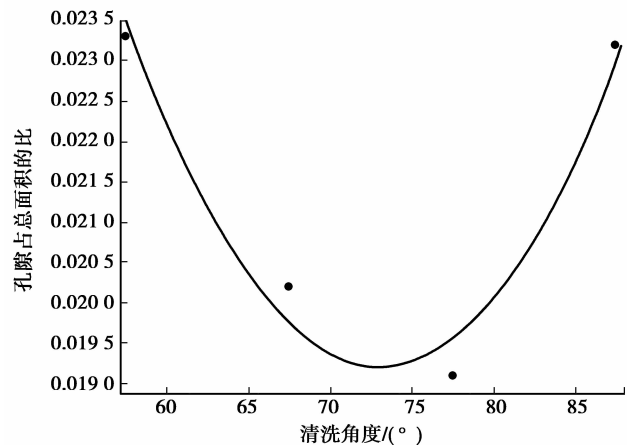


图 6 清洗角度与表面孔隙率增长量的关系

#### 4 层次分析法计算表面孔隙率增长量影响因素权值

层次分析法<sup>[18]</sup>是一种将定性和定量相结合的分析法,使问题归结为最低层相对于最高层的相对重要权值的确定。试验中的最高层为表面孔隙率增长量,中间层为各影响因素的权值,最低层为影响因素:干冰流量、喷射时间、清洗距离及喷射角度。

##### 4.1 构造判断矩阵

运用标准回归系数的相对重要性比值来构造判断矩阵:1)标准回归系数是消除了因变量和自变量所取单位的影响之后的回归系数,其绝对值的大小直接反映了某一自变量对因变量的影响程度;2)层次分析法中任意的判断矩阵为互反矩阵,具有下述性质: $a_{ij} > 0, a_{ji} = 1/a_{ij}, a_{ji} = 1$ ,其中, $a_{ij}$ 是各影响因素相对权重权的比值。

标准回归系数可由回归分析法得到:首先要对原始数据进行预处理<sup>[19]</sup>,使各影响因素与表面孔隙率增长量呈较好的线性关系,同时对影响因素进行相关系数检验;其次,对任意两个影响因素和表面孔隙率增长量的比进行二元线性回归分析,利用式(2)计算得到标准回归系数,如表 4 所示;最后,根据判断矩阵的性质,对任意两个影响因素的标准回归系数进行比较,得出两个影响因素对表面孔隙率增长量的相对重要性比值,利用相对重要性比值来构建判断矩阵。

$$b'_i = b_i \times (x_i/y), \quad (2)$$

式中, $b'_i$ 为  $i$  因素的标准回归系数, $b_i$ 为  $i$  因素的回归系数, $x_i$ 为  $i$  因素的标准差, $y$ 为孔隙占总面积比的标准差。

表 4 标准回归系数表

因素	干冰流量	清洗距离	清洗时间	喷射角度
干冰流量	—	0.885 31	0.885 31	0.885 31
清洗距离	-0.024 90	—	-0.024 90	-0.024 90
清洗时间	0.026 45	0.026 45	—	0.026 45
喷射角度	-0.056 64	-0.056 64	-0.056 64	—

则其判断矩阵为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1.000 & 0 & 35.554 & 6 & 33.471 & 1 & 15.630 & 5 \\ 0.028 & 1 & 1.000 & 0 & 0.941 & 4 & 0.439 & 6 \\ 0.029 & 9 & 1.062 & 2 & 1.000 & 0 & 0.467 & 0 \\ 0.064 & 0 & 2.274 & 7 & 2.141 & 4 & 1.000 & 0 \end{bmatrix}$$

经过计算得到矩阵  $\mathbf{A}$  的最大特征值为 4.000 1, 对应的特征向量  $(-0.997\ 1, -0.028\ 0, -0.029\ 8, -0.063\ 8)$ , 对特征向量归一化后得到各影响因素的权重向量  $\omega = (0.891, 0.025, 0.027, 0.057)$ 。

#### 4.2 一致性检验

根据一致性的比例 CR 的值来判定判断矩阵  $\mathbf{A}$  是否具有满意的一致性, 当  $CR < 0.1$  时, 判断矩阵  $\mathbf{A}$  具有可接受的一致性。其中, CR 的计算公式如式(3)所示。

$$CR = [(\lambda_{\max} - n) / (n - 1)] / RI, \quad (3)$$

式中:  $\lambda_{\max}$  为判断矩阵的最大特征值,  $n$  (取 3~8) 为判断矩阵的阶数, RI 为平均随机一致性指标。RI 取值如表 5 所示。

表 5 平均随机一致性指标 RI 的取值

$n$	3	4	5	6	7	8
RI	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41

根据式(3)求得判断矩阵  $\mathbf{A}$  的 CR 值为 0.000 037, 即判断矩阵  $\mathbf{A}$  的  $CR \ll 0.1$ , 因此判断矩阵  $\mathbf{A}$  具有满意的一致性。从而可知: 干冰流量、清洗时间、清洗距离及喷射角度四个影响因素对表面孔隙率增长量影响因素权值大小依次为 0.891、0.025、0.027、0.057, 即影响表面孔隙率增长量最主要的因素是干冰流量, 其次是喷射角度, 影响最小的是清洗时间及清洗距离, 其中干冰流量和喷射角度对表面孔隙率增长量的影响权重达到 95% 以上, 干冰流量的权重达到 80% 以上, 则清洗时间及清洗距离的影响较小, 该结论与极差分析相一致。

## 5 结 论

1) 干冰清洗能有效的清除混凝土表面的污垢, 但由于混凝土的致密性及表面光滑度相对金属及橡胶较低, 清洗后试块表面产生孔隙。

2) 在文中所选择的干冰清洗过程中各参数水平的条件下进行隧道清洗, 都能达到理想的清洗效果, 但清洗会使混凝土表面产生孔隙, 而各参数对表面孔隙率增长量影响的主次顺序为干冰流量、喷射角度、清洗距离、清洗时间, 其中干冰流量与喷射角度对表面孔隙率增长量的影响权重达到 95% 以上。那么在实际的工程应用中, 为减少孔隙产生量, 可选择 0.62 kg/min 的干冰流量、75°~80°的清洗角度、25 cm 的清洗距离及 5 s 的清洗时间。

3) 干冰流量对表面孔隙率增长量的权重达到 80% 以上, 当干冰流量小于 2 kg/min 时, 表面孔隙率增长量呈缓慢上升趋势; 当干冰流量达到 2 kg/min 时, 表面孔隙率增长量会由于混凝土密实部分受损而使其增长幅度增加。

4) 喷射角度对表面孔隙率增长量的影响较明显, 对于不同的喷射角度表面孔隙率增长量不同, 相对于 65°~70°及 75°~80°而言, 55°~60°及 85°~90°时孔隙产生较多。为减少清洗所造成的损伤, 清洗过程中可在 65°~80°范围内选择。

5) 清洗距离与清洗时间对表面孔隙率增长量影响不明显。

#### 参考文献:

[1] 凌志. 中国带电清洗领域技术进步及市场现状[J]. 洗净技术, 2003(1): 48-53.

LING Zhi. Progress and market status of Chinese charged cleaning technology[J]. Cleaning Technology, 2003(1): 48-53.

- [2] Spur G, Uhlmann E. Dry-ice blasting for cleaning: process, optimization and application[C] // International Conference on Erosive and Abrasive Wear (ICEAW). Atlanta, USA: ICEAW, 1999: 402-411.
- [3] 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, 2007, 139(1/2): 265-271.
- [4] 陈继辉, 童明伟, 严嘉. 干冰升华特性实验[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2005, 28(4): 50-52.  
CHEN Jihui, TONG Mingwei, YAN Jia. Dry ice sublimation characteristics of the experiment[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2005, 28(4): 50-52.
- [5] 张毅平, 王铁. 采用干冰喷射技术清洗油槽车的可行性研究[J]. 清洗世界, 2009, 25(3): 17-22.  
ZHANG Yi, WANG Tie. Feasibility study of dry ice jet technology for tank car cleaning[J]. Cleaning world, 2009, 25(3): 17-22.
- [6] Sherman R, Adams P. Carbon dioxide snow cleaning-The next generation of clean [C] // Precision Cleaning '95 Proceedings. Chicago, USA: Precision Cleaning '95 Proceedings Organizing Committee, 1995: 271-300.
- [7] 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.
- [8] 杨宝学. 干冰清洗技术在注汽锅炉的应用[J]. 特种油气藏, 2008, 15(Sup): 318-320.  
YANG Baoxue. Application of dry ice cleaning technology in steam injection boiler[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2008, 15(Sup): 318-320.
- [9] 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.
- [10] Uhlmann E, Mernissi A E. Pre-treatment by dry ice blasting for adhesive bonding[J]. Production Engineering, 2008, 2(2): 133-138.
- [11] 王晓辉. 干冰微粒喷射清洗技术的研究进展[C] // 第七届中国功能材料及其应用学术会议论文集. 重庆:《功能材料》期刊社, 2010: 259-261.
- [12] 孙洪孟. 干冰清洗特性及试验研究[C] // 第14届全国特种加工学术会议论文集. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2011: 662-665.
- [13] 刘溟, 王家礼, 马心良. 干冰清洗变电站绝缘子试验[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1649-1655.  
LIU Ming, WANG Jiali, MA Xinliang. Cleaning experiment of substation insulators by dry ice [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1649-1655.
- [14] 张宇旭. 隧道工程常见病害的危害及成因分析[J]. 国外建材科技, 2008, 29(1): 69-72.  
ZHANG Yuxu. Analysis on the hazards and causes of the common deteriorations in tunnel engineering[J]. 2008, 29(1): 69-72.
- [15] 王薇, 向延念. 隧道的检查、养护与无损检测[J]. 世界隧道, 2000(5): 64-67.  
WANG Wei, XIANG Yannian. The inspection, maintenance, and nondestructive testing of the tunnel[J]. Tunnelling and Underground Works, 2000(5): 64-67.
- [16] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 79-91.
- [17] 张文生, 张建波, 李建勇. 混凝土孔隙面分形特征与测试方法研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(3): 312-316.  
ZHANG Wensheng, ZHANG Jiangbo, LI Jianyong. Research of pore area fractal characteristic of concrete and its test method[J]. Journal of building materials, 2012, 15(3): 312-316.
- [18] 王莲芬, 许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1990.
- [19] 陈颖, 杨楠, 王黎明. 应用回归分析[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2008.