

# 基于宏观性能及细观结构的多尺度道路 混凝土抗盐冻性能研究

刘策

(中建路桥集团有限公司, 河北 石家庄 050000)

**摘要:**道路混凝土暴露于自然环境中受到冻融循环与除冰盐的共同作用,导致内部结构疏松、微裂纹扩展,最终造成道路混凝土宏观性能迅速衰减、耐久性劣化。为了从本质上研究道路混凝土盐冻劣化机理,对盐冻作用下的道路混凝土宏观性能衰减进行研究,采用压汞法及 SEM 对盐冻作用下的道路混凝土细观结构进行表征,从宏观性能及细观结构多尺度研究道路混凝土抗盐冻性能。试验结果表明:盐冻作用下道路混凝土相对动弹性模量不断减小、累积剥落量逐渐增加;与冻融单因素作用相比,盐冻作用下试件的劣化更严重,当冻融 150 次后盐冻下试件动弹性模量比冻融单因素时低 11.4%(含气量 4%)、6.3%(含气量 6%),累积剥落量比冻融单因素作用时增长 36.7%(含气量 4%)、47.1%(含气量 6%)。盐冻作用的结晶膨胀效应、渗透效应及温度梯度效应综合作用,造成道路混凝土临界孔径、最可几孔径及平均孔径减小,混凝土内部孔隙不断细化、孔隙连通性提高、渗透路径的曲折性降低;与冻融单因素作用相比,盐冻作用下的多害孔比例增加 1.5 倍(含气量 2%)、0.6 倍(含气量 4%)、1.1 倍(含气量 6%)。

**关键词:**道路混凝土;盐冻作用;宏观性能;细观结构

## 1 前言

水泥混凝土由于其强度高、耐久性好、使用寿命长等优点被广泛用于路面、桥梁等道路工程结构物中,然

而实际工作下的道路混凝土暴露于自然环境中,受到温度、腐蚀、应力等环境因素的综合作用。特别是中国北方地区冬季采用除冰盐清除路面、桥面积雪,道路混凝土受到盐冻腐蚀作用表面剥蚀、微裂纹扩展,导致水泥浆体剥落、宏观裂缝产生、内部结构疏松,最终造成

- \*\*\*\*\*
- [6] Becker Y, Mendez M, Rodriguez Y. VISION TECNOLÓGICA, 2001, 9(1): 39—50.
  - [7] Student S A M H, Woodhams R T. Asphalt—Polyolefin Emulsion Breakdown[J]. Colloid and Polymer Science, 1991, 269(8): 825—834.
  - [8] Munera J C, Ossa E A. Polymer Modified Bitumen: Optimization and Selection[J]. Materials & Design, 2014, 62: 91—97.
  - [9] Airey G D, Mohammed M H, Fichter C. Rheological Characteristics of Synthetic Road Binders[J]. Fuel, 2008, 87(10—11): 1 763—1 775.
  - [10] Yusoff N I M, Jakarni F M, Nguyen V H, et al. Modelling the Rheological Properties of Bituminous Binders U-

- sing Mathematical Equations[J]. Construction and Building Materials. 2013, 40: 174—188.
- [11] Yusoff N I M, Shaw M T, Airey G D. Modelling the Linear Viscoelastic Rheological Properties of Bituminous Binders[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(5): 2 171—2 189.
- [12] Airey G D. Fundamental Binder and Practical Mixture Evaluation of Polymer Modified Bituminous Materials[J]. International Journal of Pavement Engineering. 2004, 5(3): 137—151.
- [13] Airey G D. Use of Black Diagrams to Identify Inconsistencies in Rheological Data[J]. Road Materials and Pavement Design. 2002, 3(4): 403—424.

收稿日期: 2019—08—04(修改稿)

作者简介: 刘策, 男, 大学本科, 高级工程师, E-mail: 496349807@qq.com

道路混凝土宏观性能迅速衰减、耐久性劣化。针对道路混凝土盐冻破坏,国内外学者开展了大量研究,盐冻作用并非冻融及除冰盐腐蚀作用简单线性叠加,除冰盐作用增加了混凝土的饱水度导致冻融破坏程度增强;Rosli 通过研究认为盐冻作用在混凝土内部产生渗透压、结晶膨胀压、温度梯度,混凝土内部各种应力作用造成破坏;Nilı 等研究了混凝土原材料对盐冻破坏的影响,结果表明:掺加掺合料可以明显改善混凝土的细观孔结构,提高混凝土抗盐冻剥蚀能力;Wang 通过试验研究认为水泥混凝土的气泡间距系数是影响混凝土抗盐冻性能的重要因素,盐冻剥蚀作用随着混凝土含气量的增加而降低;李文婷的研究结果表明混凝土内部含气量过大会造成内部孔隙连通,使得混凝土内部吸水性增大,造成更严重的破坏;杨全兵通过研究得到盐冻作用会造成混凝土严重剥蚀破坏,且低浓度的盐溶液比高浓度盐溶液产生的破坏严重,当盐溶液浓度为 2%~6% 时盐冻破坏最严重;曹瑞实通过室内试验得到除冰盐浓度为 3% 时混凝土的盐冻破坏比浓度为 20% 时严重。

关于道路混凝土盐冻破坏的研究目前已取得大量成果,但大部分研究主要集中在混凝土材料方面,通过研究混凝土配合比及外加剂提高混凝土抗盐冻性能,针对盐冻作用下的混凝土细观结构研究较少。混凝土细观结构损伤是其宏观性能衰减的本质,宏观耐久性

劣化是内部细观孔隙、裂隙发展的外在表现。该文从道路混凝土宏观性能与细观结构入手,多尺度研究道路混凝土抗盐冻性能,揭示在冻融与除冰盐共同作用工作环境中的道路混凝土损伤机理。

## 2 试验方法

### 2.1 原材料与配合比设计

水泥为 P.O.42.5 级普通硅酸盐水泥,比表面积  $370 \text{ m}^2/\text{kg}$ ;细集料采用长江中砂,细度模数 2.8,含泥量 0.8%,表观密度  $2\ 610 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;粗集料采用石灰岩碎石,最大粒径 19 mm,含泥量 0.5%,表观密度  $2\ 700 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;掺合料采用 I 级粉煤灰和 S95 矿粉,粉煤灰的比表面积与表观密度为  $454 \text{ m}^2/\text{kg}$ 、 $2\ 240 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,矿粉的比表面积和表观密度为  $416 \text{ m}^2/\text{kg}$ 、 $2\ 800 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;减水剂采用聚羧酸高性能减水剂,减水率 30%,含气量 3%,引气剂采用 GYQ-001;拌和水采用自来水。路面混凝土设计弯拉强度为 4.5 MPa,配合比设计按照 JTG/T F30—2014《公路水泥混凝土路面施工细则》中的方法进行。已有研究表明含气量对混凝土冻融影响较为显著,此次配合比设计将含气量作为配合比设计因素进行试配调整,最终确定最优的路面混凝土配合比如表 1 所示。

表 1 道路混凝土配合比

编号	水灰比	混凝土材料用量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )						减水剂/ %	引气剂/ %	含气量/ %
		水泥	水	砂	碎石	粉煤灰	矿粉			
N1	0.42	315	176.4	781.2	1 276.8	42	63	0.8	0	2.0
N2	0.39	315	163.8	697.2	1 239	42	63	0.8	0.19	4.0
N3	0.36	315	151.2	592.2	1 054.2	42	63	0.8	0.25	6.0

### 2.2 盐冻试验设计

此次盐冻试验除冰盐采用 NaCl,由于道路上的除冰盐随着时间的推移浓度在变化,参考已有研究成果此次除冰盐溶液浓度采用 4% 模拟道路混凝土真实盐冻环境条件。冻融循环采用快速冻融法,冻融温度  $-18 \sim 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,每个冻融循环作用 4 h。试验采用  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  的试件作为研究对象,每冻融 25 次测试试件的宏观性能及细观结构,当冻融次数超过 300 次或相对动弹性模量下降为 60% 时结束试验。

### 2.3 宏观性能测试

常用的混凝土盐冻损伤宏观表征参数采用质量损

失、相对动弹性模量等,由于盐冻作用会产生盐胀破坏导致盐溶液中的氯离子与水泥石发生反应生成水化产物,造成质量与模量的增加,不能够准确评价混凝土盐冻损伤。此次研究采用相对动弹性模量和累积剥落量表征宏观性能损失,测试采用规范 JTG E30—2005 中规定的方法测定,相对动弹性模量根据测试所得的结果按式(1)计算:

$$E_r = \frac{E_d}{E_0} = \frac{f_d^2}{f_0^2} \quad (1)$$

式中: $E_r$ 为经过疲劳荷载与硫酸盐耦合作用后试件的相对动弹性模量(%); $E_0$ 、 $E_r$ 分别为耦合作用前后试件的动弹性模量(MPa); $f_0$ 、 $f_r$ 分别为耦合作用前、后

试件横向振动时的基振频率(Hz)。

## 2.4 细观结构测试

细观孔结构的定量表征通过压汞法实现,细观形貌定性表征通过扫描电镜 SEM 实现。采用 AutoPore IV 9510 型压汞仪,测定路面混凝土的孔径分布。压汞法及扫描电镜对应的样品为  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ ,取样后用无水乙醇浸泡终止水化,完成后对样品进行清洗并放入烘箱中烘干。

# 3 宏观性能试验结果分析

## 3.1 相对动弹性模量

按照设计的试验方案对试件进行盐冻及冻融试验,每组 3 个试件,完成后测试试件相对动弹性模量,测试结果的平均值作为试验结果,如图 1、2 所示。

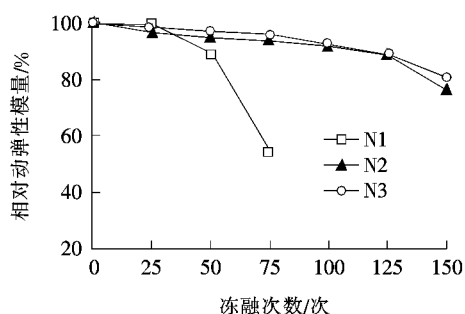


图 1 冻融作用下道路混凝土动弹性模量

从图 1 可以得到:在冻融作用下道路混凝土的相对动弹性模量不断衰减,随着混凝土含气量的增加,相对动弹性模量衰减速率逐渐减缓。当混凝土含气量为 2% 时,冻融循环 75 次后相对动弹性模量衰减为 54%,混凝土内部损伤严重发生破坏;当冻融循环 150 次后,含气量为 6% 的混凝土动弹性模量比含气量为 4% 的混凝土高 4.2%。可见,混凝土内部的含气量增加,内部孔隙随之增加,有利于抗冻性能的提升。

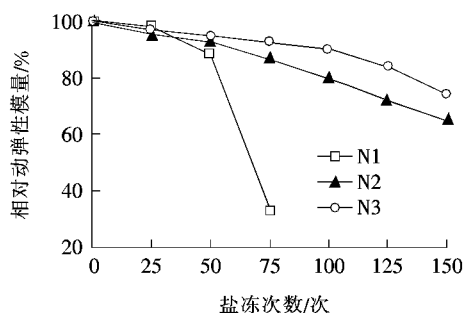


图 2 盐冻作用下道路混凝土动弹性模量

从图 2 可以得到:道路混凝土相对动弹性模量随

着盐冻作用次数的增加逐渐减小,当盐冻 50 次后动弹性模量衰减程度增大。当道路混凝土含气量增加时,动弹性模量的衰减程度减缓;盐冻 150 次时,与含气量为 6% 的试件相比,4% 含气量的试件在盐冻作用下的相对动弹性模量降低 9.3%。与冻融单因素相比,盐冻作用下试件的劣化更严重,当冻融 150 次后盐冻下试件动弹性模量比冻融单因素时低 11.4% (含气量 4%)、6.3% (含气量 6%)。由此可知,道路混凝土内部含气能够一定程度上抑制盐冻破坏,含气量越高这种抑制作用越显著。

## 3.2 累积剥落量

按照试验方案对试件进行冻融及盐冻试验,完成后测试道路混凝土剥落量,每组 3 个试件,取测试结果的平均值作为试验结果,如图 3、4 所示。

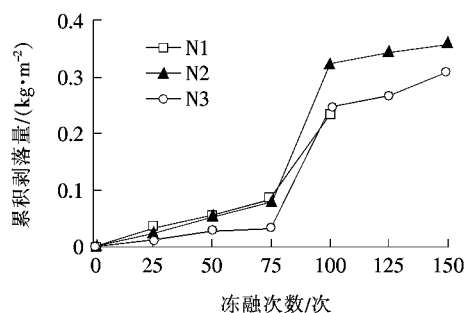


图 3 冻融作用下道路混凝土累积剥落量

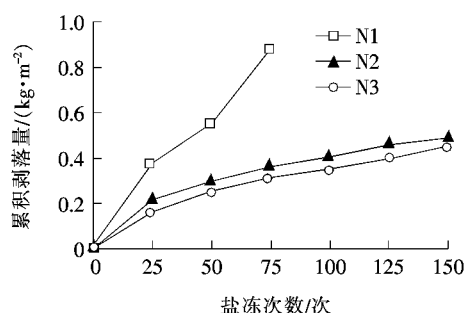


图 4 盐冻作用下道路混凝土累积剥落量

从图 3 可知:在冻融作用下道路混凝土累积剥落量随着冻融次数的增大逐渐增加,当冻融次数小于 75 次时试件累积剥落量增长缓慢,冻融次数超过 75 次后试件的剥落量迅速增大,冻融 100 次后试件剥落量趋于稳定。冻融次数一定时,冻融作用后期含气量低的试件剥落更严重;当冻融作用 150 次后,含气量为 4% 的试件累积剥落量为  $0.357\text{ g/m}^2$ ,与含气量为 6% 的试件相比增长 16.7%。适当提高道路混凝土含气量可以改善冻融的剥落破坏。

由图 4 可以得到:盐冻作用下道路混凝土剥落腐

蚀严重,当试件含气量为 2% 时,盐冻 75 次后累积剥落量高达  $0.884 \text{ kg/m}^2$ ,是冻融作用时的 10.65 倍,由此可知盐冻作用对混凝土的剥落腐蚀比冻融单因素作用时显著。试件含气量为 4% 与 6% 时,随着盐冻次数的增加剥落量在盐冻早期增长较快、后期增长速率有所减缓。随着试件含气量的增加累积剥蚀量减小,盐冻作用 150 次后含气量为 4% 的试件累积剥落量为  $0.488 \text{ kg/m}^2$ ,与含气量为 6% 的试件相比增长 8.4%。与冻融单因素作用相比,盐冻 150 次后试件的累积剥落量分别增长 36.7%、47.1%,总体而言,由于除冰盐

的作用造成道路混凝土更严重的剥落腐蚀,增加混凝土内部含气量一定程度上可以改善盐冻剥落破坏。

## 4 细观结构试验结果分析

### 4.1 孔结构特征参数

对经历冻融及盐冻作用的试件取样进行孔结构测试,每个试件在不同位置取样 3 个,孔隙特征参数测试结果取平均值作为整体试件的孔隙结构测试结果,如图 5 所示。

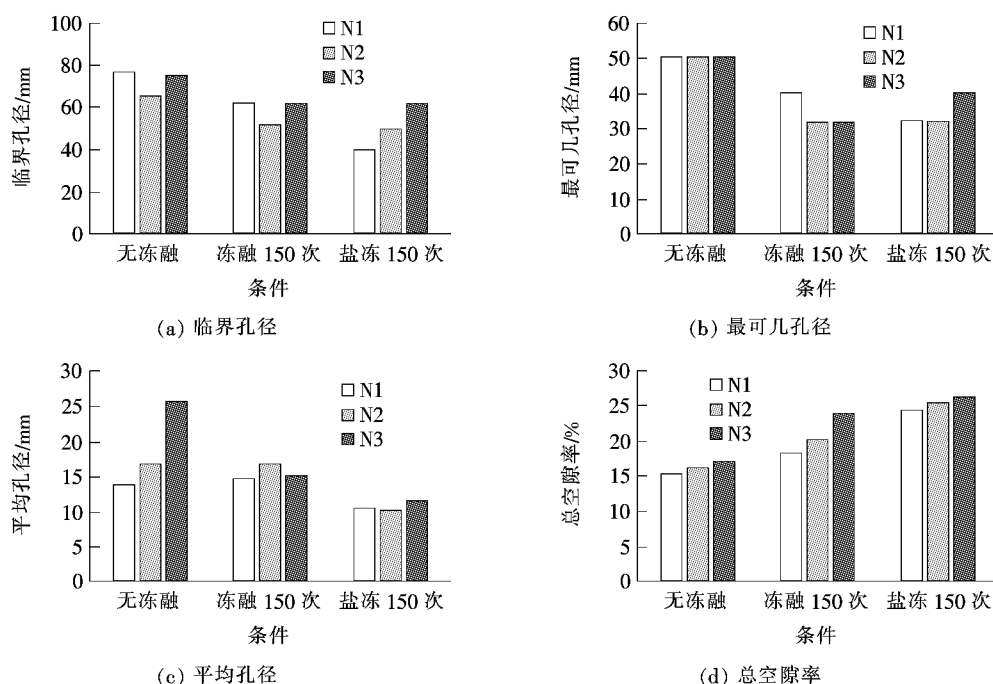


图 5 冻融、盐冻作用下道路混凝土细观孔结构特征参数

图 5(a) 为临界孔径的变化规律。从图 5(a) 可以看出:冻融作用会造成混凝土内部孔隙的临界孔径减小,意味着冻融及盐冻作用下混凝土内部连通较大孔隙的小孔孔径变小,表明孔隙连通性提高、渗透路径的曲折性降低。与试件初始临界孔径相比,冻融 150 次后临界孔径分别减小 19% (含气量 2%)、20% (含气量 4%)、17% (含气量 6%),盐冻 150 次后临界孔径分别减小 47% (含气量 2%)、23% (含气量 4%)、18% (含气量 6%);随着试件含气量的增加临界孔径的减小趋势变缓,意味着适当增加混凝土内部孔隙一定程度上可以提高抗盐冻破坏,其原因可能为部分孔隙在盐冻作用下缓解了膨胀压及渗透压产生的应力,抑制了内部细观结构的劣化。

图 5(b) 为最可几孔径的变化规律,最可几孔径为出现几率最大的孔径,孔径小于该值则不能形成连通

孔隙。从图中可知:最可几孔径的变化规律与临界孔径一致,在冻融和盐冻作用下不断减小。与试件初始临界孔径相比,冻融 150 次后最可几孔径分别减小 20% (含气量 2%)、36% (含气量 4%)、36% (含气量 6%),盐冻 150 次后临界孔径分别减小 35% (含气量 2%)、35% (含气量 4%)、20% (含气量 6%);随着试件含气量的增加最可几孔径的减小趋势变缓。

图 5(c) 为平均孔径的变化规律,从图 5(c) 可以看出:在冻融和盐冻作用下平均孔径不断减小,意味着混凝土内部孔隙细化。当冻融作用 150 次后,与初始平均孔径相比分别减小 5.7% (含气量 2%)、0.6% (含气量 4%)、4.1% (含气量 6%);当盐冻作用 150 次后,与初始平均孔径相比分别减小 24% (含气量 2%)、39% (含气量 4%)、55% (含气量 6%)。由此可知:盐冻作用对混凝土内部孔隙的平均孔径参数影响显著,盐冻

作用的膨胀、渗透效应会造成混凝土内部裂缝发展、大孔隙分裂为小孔隙,导致细观结构劣化。

图 5(d)为总空隙率的变化规律,从图 5(d)可知:冻融和盐冻作用造成混凝土内部空隙率增大、孔隙增多,内部密实度降低、细观结构变疏松。当冻融作用 150 次后,与初始平均孔径相比分别增加 19%(含气量 2%)、24%(含气量 4%)、40%(含气量 6%);当盐冻作用 150 次后,与初始平均孔径相比分别增加 59%(含气量 2%)、56%(含气量 4%)、53%(含气量 6%)。

#### 4.2 孔径分布

研究采用吴中伟提出的孔径划分原则,将水泥混凝土内部的孔分为无害孔(小于 20 nm)、少害孔(20~50 nm)、有害孔(50~200 nm)和多害孔(大于 200 nm)。按照试验方案对试件进行冻融和盐冻试验,完成后取样测试细观孔结构孔径分布,结果如图 6 所示。

通过分析图 6 冻融与盐冻作用下的道路混凝土内部细观孔隙孔径分布变化结果可知:冻融和盐冻作用会造成试件内部多害孔、有害孔的比例增加,少害孔、无害孔的比例减少。意味着冻融及盐冻作用导致道路

混凝土内部大于 50 nm 孔径的孔隙比例增多,孔径小于 50 nm 的孔隙比例减少。结合孔隙特征参数变化规律可知,冻融的结晶膨胀效应使得混凝土内部裂缝扩展,不等大孔扩展分裂为孔径大于 50 nm 的多害孔和有害孔,造成孔隙结构的平均孔径、最可几孔径和临界孔径变小,多害孔、有害孔比例增加。

与冻融作用下的孔径分布相比,盐冻作用下的多害孔比例增加 1.5(含气量 2%)、0.6(含气量 4%)、1.1 倍(含气量 6%),有害孔比例增加 1.2(含气量 2%)、1.4(含气量 4%)、0.6 倍(含气量 6%)。分析其原因主要为盐冻作用的结晶膨胀效应、渗透效应及温度梯度效应综合作用,使得试件内部的裂隙结构、孔隙结构发育并扩展,更多的大孔分裂为多害孔及有害孔。

#### 4.3 细观形貌

为了研究盐冻作用下道路混凝土内部细观形貌的演化,采用扫描电镜 SEM 对盐冻前和盐冻后的试件细观形貌进行定性表征,观测对象采用含气量为 4% 的混凝土试件,测试结果如图 7 所示。

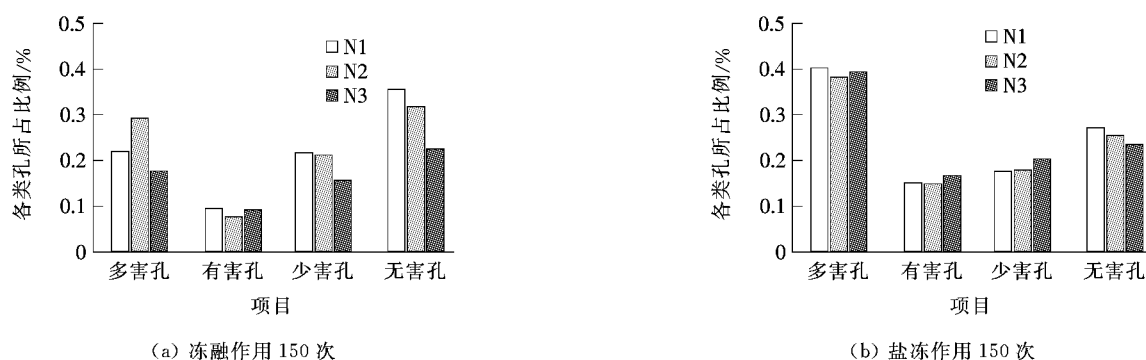


图 6 冻融、盐冻作用 150 次道路混凝土孔径分布

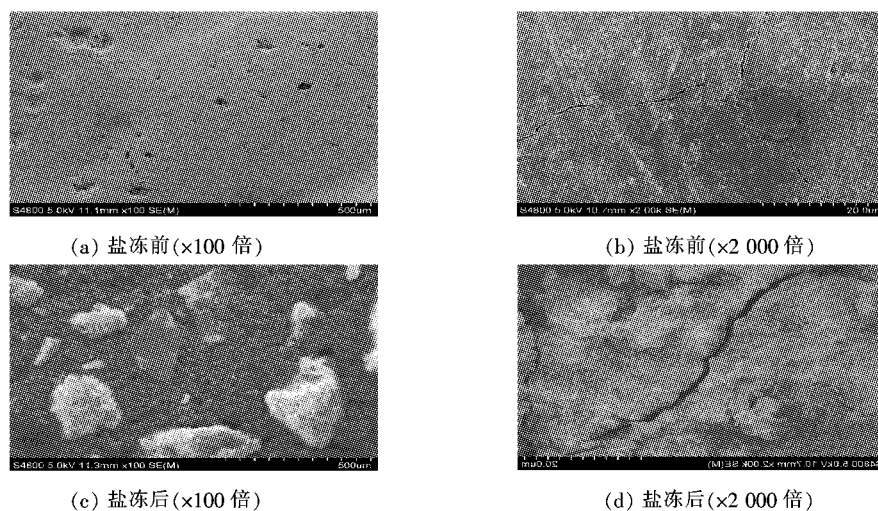


图 7 盐冻前、后道路混凝土细观形貌

从图 7(a)可以看出:在受到盐冻作用之前试件内部密实,孔隙较少,大部分孔隙为孔径小于 50 nm 的无害孔及少害孔。从图 7(b)可以看到:在孔隙周边薄弱部位存在微裂缝,微裂缝宽度小于 5 nm。总体而言受到盐冻作用之前混凝土内部结构密实,细观裂缝及细观孔隙较少。从受到盐冻作用的细观形貌图 7(c)、(d)可以看出:盐冻作用将原来密实的细观结构逐渐劣化为松散结构,伴随着大量细观孔隙、裂缝产生。从图 7(c)中可以看到盐冻产生的孔隙大多属于孔径大于 50 nm 的有害孔及多害孔,在孔隙周边及水泥石与骨料的界面过渡薄弱区产生大量裂缝。从图 7(d)中可以明显看到有裂缝贯穿,裂缝宽度达到 5~10 nm。在裂缝周边存在大量棒状水化产物,凝胶含量较少,导致混凝土内部结构劣化、耐久性衰减。

## 5 结 论

(1) 盐冻作用下道路混凝土相对动弹性模量不断减小,累积剥落量逐渐增加;当道路混凝土含气量增加时,动弹性模量的衰减程度及累积剥落量增长程度减缓,适当提高道路混凝土引气量可以改善盐冻的剥落破坏。

(2) 与冻融单因素相比,盐冻作用下试件的劣化更严重,当冻融 150 次后盐冻下试件动弹性模量比冻融单因素时低 11.4%(含气量 4%)、6.3%(含气量 6%),累积剥落量比冻融单因素作用时增长 36.7%(含气量 4%)、47.1%(含气量 6%)。

(3) 盐冻作用造成道路混凝土临界孔径、最可几孔径及平均孔径减小,混凝土内部孔隙不断细化、孔隙连通性提高、渗透路径的曲折性降低;总空隙率随着盐冻的作用次数不断增大,多害孔、有害孔的比例增加,少害孔、无害孔的比例减少。与冻融作用相比,盐冻作用下的多害孔比例增加 1.5(含气量 2%)、0.6(含气量 4%)、1.1 倍(含气量 6%)。

(4) 盐冻作用的结晶膨胀效应、渗透效应及温度梯度效应综合作用,使得道路混凝土内部密实的细观

结构逐渐劣化为松散结构,伴随着大量细观孔隙产生,在孔隙周边及水泥石与骨料的界面过渡薄弱区产生大量裂缝,裂缝宽度达到 5~10 nm。在裂缝周边存在大量棒状水化产物,凝胶含量较少,导致混凝土内部结构劣化、耐久性衰减。

(5) 实际工程中通过在道路混凝土中掺加适量引气剂、粉煤灰等措施,改善混凝土内部孔隙含量及孔径分布可在一定程度上改善其抗盐冻性能。

## 参考文献:

- [1] 宋爱苹,张亚飞.冻融条件下水泥土及掺粉煤灰水泥土的强度特性[J].中外公路,2017(3).
- [2] 方鹏,李北星,方晴.大掺量矿物掺合料混凝土抗盐冻性能研究[J].硅酸盐通报,2018(2).
- [3] 欧阳男.不同盐类环境下混凝土的抗冻性研究[J].公路交通技术,2018(3).
- [4] Nili M,Zaheri M.Deicer Salt-Scaling Resistance of Non-Air-Entrained Roller-Compacted Concrete Pavements[J].Construction & Building Materials, 2011, 25(4):1 671-1 676.
- [5] Fazhou W,Zixin Z,Ming L I,et al.Influence of Chloride Solution Concentration Difference on Salt Frost Scaling of Concrete[J].Journal of Building Materials, 2014, 17(1): 138-142.
- [6] 李文婷.氯盐融雪剂对混凝土结构中钢筋锈蚀的影响及机理研究[D].南京航空航天大学硕士学位论文,2011.
- [7] 杨全兵.混凝土盐冻破坏机理(II):冻融饱水度和结冰压[J].建筑材料学报,2012(6).
- [8] 杨全兵,朱蓓蓉.混凝土盐结晶破坏的研究[J].建筑材料学报,2007(4).
- [9] 曹瑞实.道路混凝土在不同除冰盐盐冻环境下的耐久性研究[D].内蒙古科技大学硕士学位论文,2014.
- [10] 刘金亮,贾艳敏,王佳伟,等.季冻区盐冻作用下结构氯离子侵蚀耐久寿命预测[J].哈尔滨工程大学学报,2018(10).
- [11] 张璐军,薛予生,王雨楠.除冰盐对沥青混合料性能影响及用量确定[J].中外公路,2017(1).
- [12] 吴中伟,廉慧珍.高性能混凝土[M].北京:中国铁道出版社,1999.