

文章编号:1671-1637(2015)04-0018-08

不同除冰工艺对机场水泥混凝土道面的损伤特性

赵方冉,杜拾妹,刘新琛,安文波,徐小磊

(中国民航大学 机场学院,天津 300300)

摘要:进行了热风除冰、乙二醇化学除冰与尿素化学除冰的模拟试验,测试了混凝土试件质量损失和强度降低率,分析了除冰方式与除冰次数对水泥混凝土道面的损伤规律。分析结果表明:热风除冰对试件表层损伤反应较慢,在经过45次冻融循环后才表现出明显的质量损失,但其对试件内部结构损伤却较严重,50次热风除冰后的强度降低超过35%。虽然50次化学除冰后试件的强度降低小于20%,但试件表层的腐蚀性损伤造成的质量损失较显著,尿素的腐蚀所造成的质量损失高达8.5%,比热风除冰的质量损失高5倍以上。可见,为了保持机场道面结构强度,化学除冰要比热风除冰更为合理。为了降低机场跑道混凝土剥落对飞机发动机损害的隐患,宜优先采用热风除冰方式,但须关注其对道面结构强度的影响。

关键词:机场跑道;水泥混凝土道面;热风除冰;化学除冰;道面损伤

中图分类号:U416.216

文献标志码:A

Damage characteristics of cement concrete pavement for airfield resulted from different de-icing techniques

ZHAO Fang-ran, DU Shi-mei, LIU Xin-chen, AN Wen-bo, XU Xiao-lei

(School of Airport, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Hot air de-icing and chemical de-icing with ethylene glycol and carbamide were simulated for cement concrete pavement of airfield, the mass loss and strength decrease ratio of each concrete specimen were tested, and the the damage rules of de-icing methods and de-icing numbers on cement concrete pavement were analyzed. Analysis result shows that hot air de-icing slowly damages cement concrete specimen, the distinct mass loss only appears after 45 times hot de-icing, but hot air de-icing severely damages the inside structure, and the strength decrease ratio is more than 35% after 50 times hot air de-icing. Though the strength decrease ratio of cement concrete specimen is less than 20% after 50 times chemical de-icing, but the corrosive mass loss of specimen surface is remarkable, and is 8.5% after 50 times carbamide de-icing and is 5 times greater than the value after hot air de-icing. Therefore, chemical de-icing is more reasonable than hot air de-icing for protecting the structural strength of cement concrete pavement. On the other hand, hot air de-icing is preferred because of considering aeroengine damage induced by concrete spall on airfield runway, but its influence on pavement structural strength should be paid attention to. 1 tab, 13 figs, 18 refs.

Key words: airfield runway; cement concrete pavement; hot air de-icing; chemical de-icing; pavement damage

收稿日期:2015-02-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51408598);中国民航大学机场工程研究基地开放基金项目(JCJD1302)

作者简介:赵方冉(1960-),男,山东东平人,中国民航大学教授,从事机场工程研究。

Author resume: ZHAO Fang-ran(1960-), male, professor, +86-22-24092475, frzhao@cauc.edu.cn.

0 引言

冬季雨雪天气通常造成道面覆盖冰层,容易导致摩擦因数不能满足飞机起降的安全性要求,轮胎和道面间的摩擦力难以有效地实施飞机的制动,从而造成飞机打滑、冲出或偏离跑道的事故。为避免这些安全事故,在道面摩阻性不良的结冰情况下,必须停航等待处理,从而导致航班延误与旅客滞留,以致机场关闭的情况,因此,在冬季雨雪天气,一旦出现道面结冰,机场保障部门必须及时、快速地采取清除措施,尽快恢复道面的摩阻性能。

为尽快清除道面上的冰层,目前各机场较常采用撒布除冰剂、冷风强吹、热风强吹、机械铲除与清扫等除冰方法。尽管不同的除冰方法分别适合于不同的情况,并根据机场保障部门的自身条件来选择效率最高的除冰方法,但鲜有考虑对道面的损伤因素,从而造成许多机场因除冰过程造成道面状态急剧恶化的现象,不仅带来高昂的维护成本,而且也有着许多安全隐患。

混凝土结构的耐久性主要取决于所遭遇的使用环境,在较寒冷地区频繁的干湿循环与冻融循环尤其显著。对于机场道面,除了磨损外,除冰盐的侵蚀作用不可忽视,特别是道面混凝土孔隙饱水后的影响更为严重^[1],因此,为了保障机场道面良好的状态与延长道面使用寿命,有必要基于降低对道面损伤的目的研究与优化道面的除冰方式。

关于道面除冰对混凝土损伤的研究,以往多关注冻融过程的影响规律。Rosenqvist 等研究了混凝土不同饱水程度时的冻融损伤^[2],认为混凝土冻融损伤与其饱水度有关,当其表层混凝土吸水超过某一值时,其冻融损伤效应显著增大;并将冻融损伤效应分为2类:其一就是混凝土表面不断出现颗粒脱落,而其强度却变化较小,其二就是混凝土表面颗粒脱落很少,但其强度却显著降低。对于饱水度较大的浅表层道面混凝土来说,在一般冻融环境下只会造成表层颗粒的脱落,而不会显著降低其整体结构的强度;而当饱水厚度较大时,外层结冰容易造成内部孔隙水形成“封闭饱水空心球”的冻结膨胀应力而导致其深部开裂性损伤。为降低道面混凝土的冻融性损伤,Rosenqvist 等针对饱水后冻融环境中的水工混凝土结构物,分别探讨了饱水程度、冻融温度、测试方法和混凝土材料配比等因素对水工结

构冻融效应的影响规律。研究结果表明,当水灰比为0.45和含气量为6.5%时,通常情况下的冻融损伤并不明显。此外,混凝土的冻融损伤会随着循环次数增加而不断加剧,张鹏等研究了冻融循环次数对混凝土的损伤效应^[3],经过10次冻融循环后,混凝土的水分渗透深度约增大30%,其吸水性可由未冻融时的24 mm吸水深度增大为冻融后的31 mm。显然,遭遇多次冻融后,由于表层水分与腐蚀性介质的渗入深度较大,混凝土的损伤程度呈急剧恶化的趋势。

在混凝土道面材料中,尽管其骨料属于耐久性材料,但是在反复冻融作用下,特别是在腐蚀介质等的叠加作用下也会产生逐渐破坏的现象。Park 等对作为混凝土骨料的岩石进行了冻融试验,结果表明当冻融循环超过75次时,岩石就开始出现表层脱落,在150次冻融损伤后出现崩溃现象^[4]。可见,无论如何优化混凝土配比,其原材料的冻融损伤效应总是不可避免。显然,不可忽视外界环境对道面混凝土作用效应的差异与不同维护方式对道面的损伤效应。

在除冰过程中,除了普通冻融损伤外,还包括盐类腐蚀介质的叠加作用与热冲击效应。近20年来,由于氯盐类的环境影响十分突出,因此,在许多工程环境中先后禁止使用^[5]。为满足道路除冰的需求,非氯盐类除冰剂应用越来越多,但是,已有研究结果表明非氯盐类除冰剂对道面伤害仍较显著^[6]。尽管人们已经认识到氯盐类除冰剂对环境的损伤,严格避免使用氯盐类,但是新型除冰剂对环境的影响尚需深入研究,以便合理使用除冰剂^[7]。美国混凝土学会在20世纪80年代就将冻融损伤和化学沉积物腐蚀作为影响混凝土耐久性的五大因素中的最重要2个因素^[8]。此外,还应考虑化学沉积物的腐蚀作用与因为物理开裂效应的叠加而产生交叉复合损伤效应。

近10年来,为了满足机场跑道快速通航的要求,出现了利用高温热风冲击快速除冰,利用接地温度近300℃的高温气体冲击道面上的结冰层,使其快速融化和蒸发。这种方式避开了化学除冰所带来的介质性腐蚀影响,但其对道面的伤害也在逐渐显现,而且热风冲击快速除冰对道面的物理性伤害具有与化学除冰完全不同的作用机理和规律^[9],表现出显著的损伤效应。Kim 等基于多

组不同配比混凝土的热胀系数(CTE)测试结果表明^[10],普通混凝土的热胀系数达到 $(8.1 \sim 9.3) \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$,而且,根据混凝土道面板块的有限元数值模拟分析结果,在板块竖向断面遭受温度梯度为 $0.33 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}^{-1}$ 的情况下,其板底温度应力可达 1 MPa 。显然,混凝土在遭受局部高温冲击时的局部温差可能更大,在温度梯度或温度应力超过混凝土材料可承受的能力时,很容易导致局部损伤,甚至出现崩溃式破坏。

有研究表明,混凝土在不同环境作用下的破坏程度有所差异,当多种不利环境因素同时作用时,可能产生更严重的破坏现象,例如在冻融损伤与干湿循环损伤分别单独作用与复合作用时,混凝土的损伤程度从大到小依次为:冻融-干湿循环损伤、冻融循环损伤与干湿循环损伤^[11]。此外,混凝土遭受冻融的速度越快,由表及里的温度梯度就越大,且当温度梯度超过 $1.5 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{mm}^{-1}$ 时,混凝土表层就容易产生脱落性破坏^[12]。显然,在热风除冰过程中,混凝土局部区域难免出现温度梯度,当其温度梯度较大时,也会产生较大的损伤效应。当冻融、温度梯度和干湿循环等多因素共同作用时,其综合损伤程度还会加大。

尽管不同除冰方式对道面混凝土的损伤机理有所差异,但人们在选择除冰方式时却很少考虑其伤害效应特点,多从便捷和经济方面来选择其除冰方式,从而容易造成对道面混凝土的累积性损伤效应而严重降低其使用寿命。

目前,随着民航机场航班量的不断增大,各机场针对跑道除冰迫切需要更为快捷的方式,而道面损伤容易被忽视。关于采用不同除冰方式对道面损伤影响规律的研究很少涉及,特别是针对热风除冰对道面伤害规律。为此,需要基于不同除冰方式对道面的损伤效应规律,根据不同情况选择道面伤害较小的除冰方式,才能在保障道面使用效果的前提下,最大程度地延长道面的使用寿命。

1 研究内容与方法

1.1 研究目的与内容

任何道面除冰方式都可能对道面产生伤害,但是,不同的除冰方式所造成的道面损伤特点与严重程度会有所差异。为探讨不同除冰方法和次数对道面损伤的关联性,需要基于不同除冰方式的试验结果,研究不同除冰方式对道面伤害的累积特点,以及除冰次数与道面损伤特点之间的关系,以便为合理

选择道面除冰方法提供科学依据。

为取得不同除冰工艺对道面造成损伤的变化规律,在实验室进行了不同除冰工艺模拟测试,分别采用热风强吹法与撒布不同除冰剂法(包括尿素类与乙二醇类除冰剂等)模拟道面除冰过程,主要研究了不同除冰方式和次数对道面表面的损伤程度(包括表层开裂状况、强度降低与质量损失等),根据试验结果分析不同因素对道面损伤的规律性。

1.2 研究方法

1.2.1 试件制作

为尽可能真实地模拟水泥混凝土道面及其除冰损伤过程,根据目前机场道面多采用C40及以上强度等级混凝土的现状,利用C40混凝土立方体试件进行了模拟道面除冰损伤试验。试件制作中选用P.O42.5级普通硅酸盐水泥,粗骨料选用粒径为 $5 \sim 10 \text{ mm}$ (粒径1)、 $10 \sim 25 \text{ mm}$ (粒径2)的2种骨料,并对骨料冲洗晾干处理;细骨料为合格的建筑用中砂,配比砂率为30%。为改善水泥混凝土的综合性能,掺加了约占水泥量2.5%的高效减水剂,并使其水灰比控制在0.41以下。混凝土配比见表1。

表1 混凝土的配比组成

Tab. 1 Compositions of concrete

原料	水泥	中砂	碎石		水	减水剂
			粒径1	粒径2		
用量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	325	630	588	882	133	8.12

1.2.2 试验方法

利用表1配比制作了3批混凝土试件,每批11组试件,标准条件下养护的试件尺寸为 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 。先标准养护14 d后,再在室内自然养护14 d以上,分别测量各试件的干燥质量,然后再分组进行模拟除冰试验。

在模拟试验中,先将试件测试面浸入清水中约 5 mm ,并置入冷冻箱冰冻,在表面冰层完全冻结后取出,分别对其表面进行热风强吹、撒无机盐与乙二醇除冰剂,使表层冰融化。值得指出的是,以往对道面冻融损伤的试验评价多采用将整个试件全部浸水后整体冻融试验,试验效果与工程实际中的表面除冰过程有较大差异,因此,需要设计与道面表层除冰过程相近的试验方法,使其反映对混凝土试件进行表层饱水冻融的热冲击和除冰剂侵蚀效应^[13]。为尽可能模拟真实状况,本研究采用了表层冻融试验方法,其目的就是尽可能模拟道面混凝土冻融内外介质或温度非均匀变化的特点,充分体现这种不均匀的冻融交替过程^[14]。

试验时每进行5次表层结冰-除冰循环后抽取一组试件进行损伤参数测试,主要观测试件表层开裂与脱落状态的变化,并测试其质量损失与强度降低。在进行破损强度测试前测量试件的烘干质量,通过与其初期干质量对比计算质量损失。通过比较测试组试件的实测强度与同配比组未参与表层结冰-除冰试验的试件强度,可以得出强度降低值。针对每一种除冰方式分别进行10组不同循环次数的试验,从而获得循环次数分别为5、10、…、50次的试验数据。

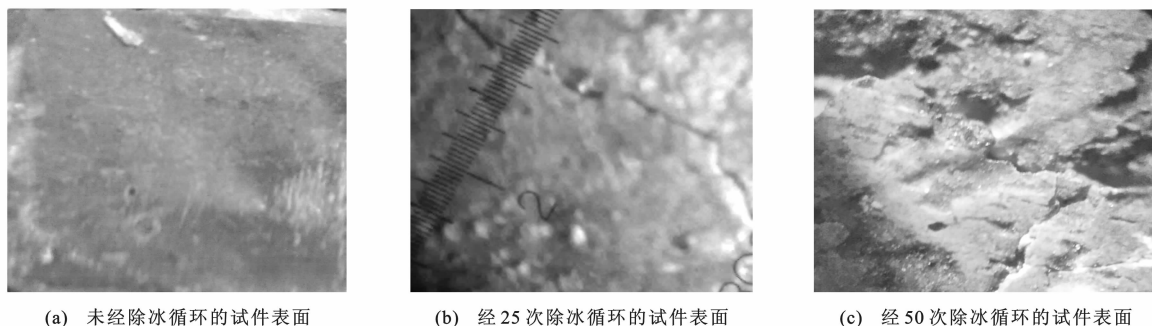
2 试验过程与结果

2.1 热风强吹法除冰模拟试验结果

鉴于机场道面除冰多利用改装的航空器发动机实施道面热风除冰的现状,在进行模拟热风除冰试验时,在取出表层结冰的试件后尽快用汽油喷灯火焰喷射试件表面,使其表面结冰层快速融化后,再浸

水冷冻继续试验,或烘干后测试质量与强度。该测试组试件为同批次同时成型和养护的混凝土,其初次结冰-除冰循环试验时的龄期为70 d,其未参与结冰-除冰循环试验试件的抗压强度为49.0 MPa。试验时,每间隔5次结冰-除冰循环后,随机抽取一组试件放入60℃干燥箱烘干处理,然后进行试件的表层观测、干质量与强度测试。

未经除冰循环、经25次、50次除冰循环后的试件表层损伤状况分别见图1(放大20倍)。从模拟热风除冰方式的试验结果来看,随着除冰循环次数的增加,试件表面状态逐渐恶化,起初主要表现为表面颜色的变浅,然后裂纹开始明显扩展;超过10次循环后开始产生表面细颗粒脱落;超过20次循环后开始出现脱皮现象;25次冻融循环后开始出现贯穿性开裂,但其表层颗粒脱落不显著;此后,表面脱皮开始增多;经过40次冻融循环后表面开始出现较严重的脱皮损伤。



(a) 未经除冰循环的试件表面

(b) 经25次除冰循环的试件表面

(c) 经50次除冰循环的试件表面

图1 热风除冰对试件表面的损坏状况

Fig.1 Surface deteriorating situations of concrete specimens after hot air de-icing

不同结冰-热风融冰循环次数后试件的质量损失见图2,强度与强度降低率分别见图3、4。从图2的试验结果可以反映混凝土表层的脱落情况,在遭受结冰-热风融冰循环次数在40次以内时,道面表层的质量损失并不显著。但从图3、4中热风除冰次数对强度的影响来看,随着循环次数的增加,试件表面质量损失呈波动加剧状态,其强度也处

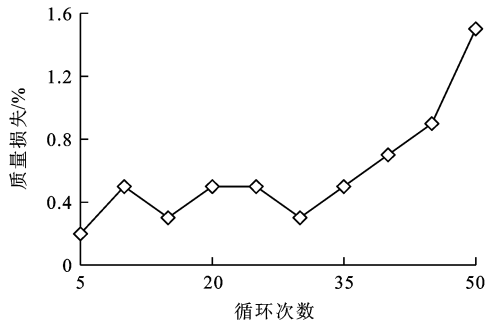


图2 热风除冰后的混凝土质量损失

Fig.2 Mass loss of concrete after hot air de-icing

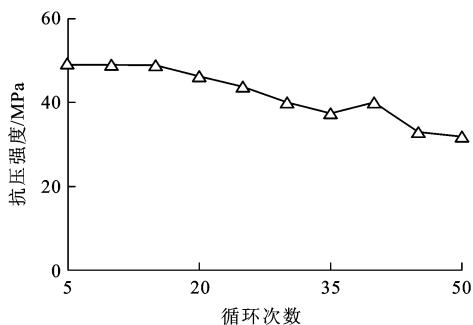


图3 热风除冰后混凝土强度变化

Fig.3 Strength change of concrete after hot air de-icing

于间断式下降;经过30次冻融循环后,其强度降低就高达18.4%。

从上述热风除冰对试件质量损失和强度降低所反映的规律来看,在结冰-热风融冰过程中,试件状态在某一阶段的若干次过程处于稳定状态,而在达到某一节点处会产生跳跃式变化。已有研究结果表明^[15],非力学因素作用导致的混凝土耐久性劣化是

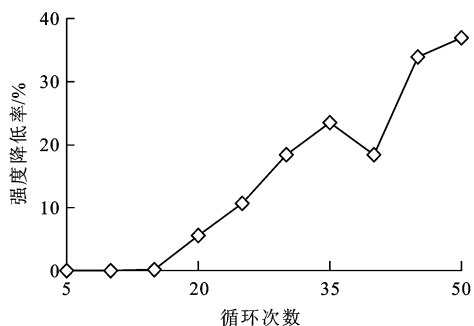


图4 热风强吹除冰后混凝土强度降低率

Fig. 4 Strength losses of concrete after hot air de-icing

一个渐进的过程,本质上是混凝土细观结构意义上的微裂纹与空隙等缺陷的萌生、扩展与连通过程,其劣化特征点损伤也可表征为陡劣点。显然,除冰过程中的混凝土的质量损失和强度降低的跳跃式恶化就是其在阶段性积累达到陡劣点时的不断重复过程。

试验结果中混凝土强度降低明显,而质量损失轻微,这种现象说明道面遭受温度冲击的损伤对其内部较深部位的损伤更为显著,但对其表层的破坏效应较为滞后。从其损伤后的表层外观特征来看,尽管有些部位已经产生明显的开裂,但由于内部损伤较轻而仍然与其他未损伤部位连接,使得表面严重损伤部位因被牵连而不会脱落,从而使得质量损失效应滞后于强度降低。显然,由于较深部位遭受损伤会直接影响到整体结构的强度,遭受多次高温冲击除冰后,道面混凝土的强度降低程度明显大于质量损失。从这些规律来看,仅凭外观变化或质量损失难以真实反映其损伤状况,其损伤的累积过程比较隐蔽,只有达到很严重程度后才会表现出严重剥落。

2.2 喷洒乙二醇除冰模拟试验结果

目前,许多除冰剂都以乙二醇为主要成分。尽管乙二醇为有机物质,但其仍然可能对水泥混凝土产生侵蚀效应,为此,在实验室条件下进行了对比试验。试验时,先将表层结冰试件上撒一层雪,然后上面均匀喷洒浓度约为25%的乙二醇溶液,在低温环境($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$)中使表层覆雪先融化,然后冰层松动和融化,整个过程大约持续40 min;待表面冰层融溶软化后将其融溶物用清水冲洗干净,再置于室温($15\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)下放置2 h。对于继续进行冻融试验的试件再进行浸水结冰试验。对于测试组试件,放入 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 干燥箱干燥8 h后进行测试。经50次循环处理前后试件的外观变化见图5。

试件初次循环前的龄期为56 d,未参与结冰-除冰循环试件的抗压强度为45.8 MPa。试验时,每间隔5次循环,随机取出一组试件烘干后,测试其质量



(a) 未经除冰试件表面



(b) 经50次除冰循环的试件表面

图5 喷洒乙二醇除冰前后混凝土试件的损伤特征

Fig. 5 Surface deteriorating situations of concrete specimens before and after ethylene glycol de-icing

损失和强度变化。经过5~50次试验后各组试件的质量损失见图6,强度变化见图7。

从图7质量损失的波动曲线的上升曲率来看,由于冻融和乙二醇介质的综合作用,混凝土表面的质量损失具有逐渐加剧的趋势,在经过15次冻融循环后的质量损失就大于1%,且其质量损失要比热风除冰高出1倍以上。显然,乙二醇除冰过程对混凝土表面产生了较严重的表层物质侵蚀性损伤,且其质量损失具有随冻融循环次数增大的阶段性跳跃式加剧效应。

图7的试验结果表明,由于受其他因素的影响,第15次除冰循环后的混凝土测试强度降低过大而出现异常现象,因此,以20次除冰循环后的强度变

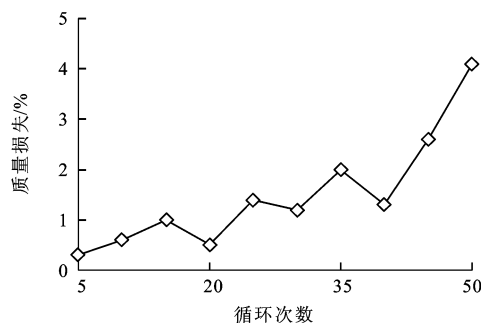


图6 喷洒乙二醇除冰后混凝土质量变化

Fig. 6 Mass loss of concrete after ethylene glycol de-icing

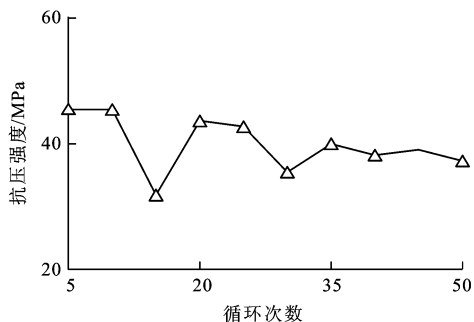


图7 喷洒乙二醇除冰后混凝土强度变化

Fig. 7 Strength change of concrete after ethylene glycol de-icing

化来分析其强度变化规律。从其变化规律来看,乙二醇除冰过程对道面混凝土强度的影响较为缓慢,经过40次冻融循环后的强度损失仅为17%,继续冻融后的强度损失几乎不再加剧。

2.3 喷洒尿素除冰模拟试验结果

目前,仍有些道面除冰剂中含有尿素成分,利用前述方法,对养护42 d后且初期抗压强度为45.0 MPa的混凝土试件进行了表层结冰-尿素除冰试验,除冰剂为浓度约为25%的尿素溶液。试验时,在混凝土表面冰层上均匀喷洒尿素溶液,持续约90 min后可使冰层松动和融化,然后用清水将融溶物冲净后置于室温下放置2 h。分别对每间隔5次循环的试件进行烘干后的质量损失、强度损失测试,经历50次喷洒尿素化学除冰循环前后试件的外观变化见图8,不同循环次数的试件质量损失变化见图9,强度变化见图10。

从图8中所表现出经过多次表层冻结-喷洒尿素化学除冰过程前后的试件表面状态可以看出,遭受尿素除冰剂与冻融的综合作用后,混凝土表面损伤比热风除冰与乙二醇除冰更为严重,主要表现为表面泛霜和疏松的损伤特征。

图9的试验结果表明,随着尿素除冰次数的增加,混凝土表面质量损失快速增加,且其质量损失的严重程度达到热风除冰的5倍与乙二醇除冰的2倍,且其损失随循环次数的增加还在不断加剧。

分别采用乙二醇类与尿素类化学除冰时,经过20~50次除冰循环后的混凝土强度降低率见图11。试验结果表明,采用化学除冰剂除冰时,随着冻融循环次数的增多,混凝土强度降低率在早期较为明显,但后期趋于稳定;经过40次化学除冰后的混凝土强度降低几乎不再增大,在经过50次冻融循环后的强度损失尚不足20%。这说明化学除冰过程中对混凝土表层结构的伤害多发生在前



(a) 未经除冰试件表面



(b) 经50次除冰循环的试件表面

图8 喷洒尿素除冰前后混凝土试件的损伤特征

Fig. 8 Surface deteriorating situations of concrete specimens after carbamide de-icing

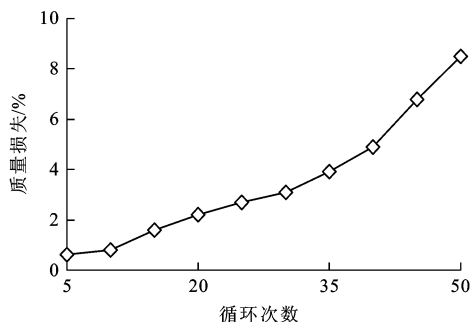


图9 喷洒尿素除冰后混凝土质量损失

Fig. 9 Mass loss of concrete after carbamide de-icing

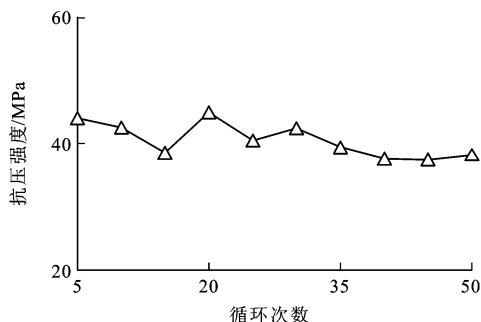


图10 喷洒尿素除冰后混凝土强度变化

Fig. 10 Strength change of concrete after carbamide de-icing

40次除冰过程以内,从而使其对混凝土道面强度的影响并不显著,且随着循环次数的增加,强度降低缓慢。

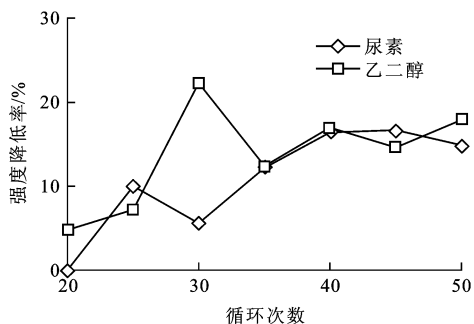


图 11 化学除冰后混凝土强度损失比较

Fig. 11 Strength loss comparison of concrete after chemical de-icing

3 试验结果分析

3.1 除冰方式对混凝土表层脱落的影响

从图 12 中不同除冰方式对混凝土表层颗粒的脱落性损伤影响规律来看,热风物理除冰方式对混凝土质量损失影响最小,50 次除冰循环后的质量损失仅为 1.5%;乙二醇类化学除冰方式对混凝土质量损失影响处于中等水平,50 次除冰循环后的质量损失为 4.1%,尚未达到混凝土冻融破坏的标准;尿素类化学除冰方式对混凝土质量损失影响最大,40 次除冰循环后的质量损失达到了 4.9%,已经接近混凝土冻融破坏的标准,而 50 次除冰循环后的质量损失达到了 8.5%,已经处于冻融严重损坏的状态。

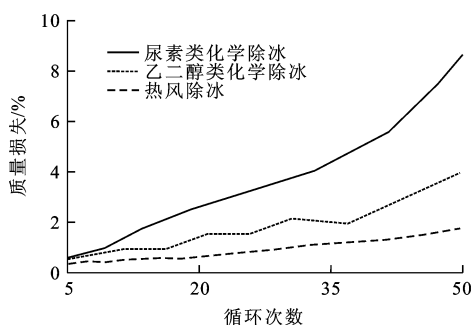


图 12 不同除冰方式对水泥混凝土路面质量损失的影响规律

Fig. 12 Influence rules of different de-icing methods on mass loss of cement concrete pavement

从上述结果所表现的损伤规律来看,化学除冰对表面物质的伤害较大,且不同除冰剂对混凝土的损伤程度差异较大,这可能与热风物理除冰不同,由于化学除冰剂对道面混凝土损伤叠加了混凝土表层的多种损伤效应,而且其沉淀物还容易形成渗透性累积效应。有研究结果表明^[16],撤除冰盐融化混凝土表面冰雪时,将引起额外的热冲击而产生破坏应力,这是因为除冰剂所造成的过冷溶液在后续降温过程中再次结冰时的膨胀应力将更大;混凝土表面

和内部的盐浓度差也会导致分层结冰而产生附加应力差,从而造成混凝土表面剥蚀。此外,过饱和盐溶液在孔中析出盐结晶而形成结晶压,随着干湿循环次数的增加,盐结晶产生的混凝土膨胀增大,且中等浓度盐溶液结冰产生的应力最大,这些介质对混凝土的腐蚀性与其化学特性有关。

从物理除冰与化学除冰的影响差异来看,热风物理除冰对混凝土表层的损伤效应主要表现在除冰过程中,其损伤效应具有短暂性特点,从而对表层物质的侵蚀性累积表现较轻微。

从不同除冰剂对道面混凝土损伤的差异情况来看,乙二醇类除冰剂对混凝土的腐蚀性损伤要低于尿素类除冰剂,后者更易使混凝土道面遭受较严重的表层腐蚀。这可能与尿素类具有更强的吸水性,使得混凝土表层的饱水度增大有关,因为混凝土表层饱水度的增大会加剧其冻融损伤的程度。

3.2 除冰方式对道面混凝土强度的影响

图 13 中化学除冰方式在 20 次循环之前的试验结果因其他因素影响而呈现过大的变异现象,从而难以体现在 20 次除冰之前的强度影响规律,但在 20 次以后的除冰循环累积对混凝土损伤具有较明显的规律。

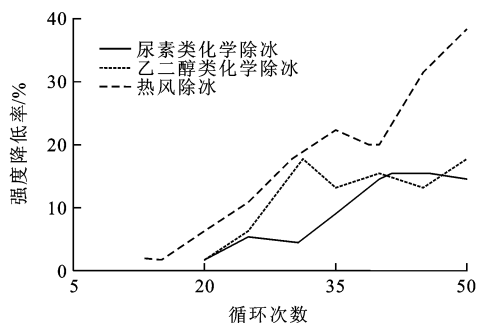


图 13 不同除冰方式对水泥混凝土路面强度降低率的影响规律

Fig. 13 Influence rules of different de-icing methods on strength loss of cement concrete pavement

从图 13 中不同除冰方式对混凝土强度影响的规律来看,热风除冰对混凝土强度降低十分显著,而乙二醇类和尿素类化学除冰过程对混凝土强度的降低影响较小,且超过 40 次除冰循环后,混凝土强度降低几乎不再增加。与化学除冰相比,热风物理除冰对混凝土表层颗粒脱落的损伤并不严重,但其除冰过程对道面结构强度的降低影响较大。

不同除冰方式对道面混凝土的损伤效应差异,不能排除反映除冰过程中时间的影响因素。例如,热风除冰过程比较剧烈,温度效应与湿度效应的共同作用,使混凝土内部材料与结构因来不及适应其

变化而遭受严重冲击效应。在实施除冰前,混凝土表层已经形成内部孔隙水分冻结时的“封闭饱水空心球”的膨胀应力与部分膨胀性损伤,当采用热风除冰方式时,快速的温度冲击容易使混凝土表层内部孔隙水快速融化或汽化,且由冰转化为水和快速汽化的时间太短,从而使得部分水汽的外逃逸通道不畅,也容易形成融解与汽化瞬间的“封闭饱水空心球”膨胀应力,加之固体材料的温度胀缩与干湿变形效应叠加,造成多种内部应力的组合,从而使道面混凝土在冻融循环过程中不断产生内部损伤效应。有研究表明^[9],采用300℃以下的热风冲击除冰时,尽管道面混凝土表层中的微观结构变化不大,而且其结晶水散失也不明显,但是,自由水挥发造成的体积变化和不同固体成分之间热胀性的差异仍会产生较大的内部应力。

对于混凝土表层浅层部分的孔隙充水来说,在热冲击作用下,由于水分在冻结和融化-汽化过程中都有较充足的外溢通道,使其浅层的颗粒脱落性损伤反而较小^[2]。而对于混凝土道面表层内部的结构损伤则会显著降低其结构强度,特别是对于较薄的道面,其强度降低对结构承载能力影响可能更加明显。

已有野外测试结果表明,对于厚度为20 cm的混凝土道面层,通常仅在顶部5 cm厚度范围内出现大幅度的干湿变化,而其余深度部分长期保持较稳定的水饱和度^[17]。显然,对于厚度通常较厚(25~45 cm)的机场水泥混凝土道面来说,尽管热风除冰附加有温度场作用,只要不出现在同一部位进行过度热吹,其干湿循环的冲击损伤通常影响深度小于5 cm,其表层强度降低对整体结构的影响程度也只能限定在一定范围内。化学除冰损伤的形成主要依赖其自表向内的溶液渗透作用,由于其表层渗透厚度通常较薄,从而容易产生道面表层的薄层剥落^[18]。但是,混凝土道面表层损伤性脱落不会严重降低整体结构的承载能力,通常会影响到面的使用功能,而且,若不能及时清除脱落碎屑,很容易被飞机发动机吸入而酿成严重事故,因此,针对机场快速除冰方式的选择,若道面结构具有足够的厚度和强度储备时,宜优先采用热风除冰,而采用化学除冰时,需要在除冰完成后应不断对其表层损伤进行全面检查,并及时清除易脱落碎屑。

4 结 语

由于热风除冰的热冲击物理效应会产生明显的

局部温度应力而造成混凝土道面表层较深部位的损伤;而化学除冰过程伴随着化学介质对混凝土表层渗透的腐蚀性作用,从而表现为对越接近表面越严重的浅层性损伤。这些损伤机理的差异,使得混凝土道面在采用不同除冰方式时表现出如下损伤规律,从而需要根据不同使用环境和结构条件选择不同除冰方式。

(1)尽管热风除冰具有快速高效的优点,且其外观损伤不显著,但其剧烈的冲击效应使得混凝土内部结构损伤较严重,经50次热风除冰过程后的强度降低超过35%,但其表面脱落性质量损失仅为1.5%。

(2)化学除冰对混凝土强度的影响较小(经50次化学除冰过程后的强度降低仍小于20%),但是对混凝土表层的腐蚀性损伤非常显著,特别是尿素类除冰剂,50次结冰-除冰循环所造成的混凝土质量损失超过8%,要比热风除冰方式高5倍以上。

(3)从维持道面混凝土结构强度的角度来看,化学除冰方式要比热风除冰更合理,从降低表面剥落等质量损失的角度来看,热风方式更为适用。

参 考 文 献 :

References :

- [1] FAY L, SHI Xian-ming. Environmental impacts of chemicals for snow and ice control: state of the knowledge[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2012, 223(5): 2751-2770.
- [2] ROSENQVIST M, OXFALL M, FRIDH K, et al. A test method to assess the frost resistance of concrete at the waterline of hydraulic structures[J]. Materials and Structures, 2014, 47(3): 1-13.
- [3] 张 鹏,张连水,赵铁军,等. 混凝土冻融损伤后的吸水特性[J]. 建筑材料学报,2011,14(2):155-159,195.
ZHANG Peng, ZHANG Lian-shui, ZHAO Tie-jun, et al. Water absorption properties of concrete after freeze-thaw damages[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(2): 155-159, 195. (in Chinese)
- [4] PARK J, HYUN C U, PARK H D. Changes in microstructure and physical properties of rocks caused by artificial freeze-thaw action[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015, 74(2): 555-565.
- [5] 吴裕锦,周治国. 融雪剂对华南高速公路基础设施使用寿命的危害[C]//中国科学技术协会. 2008中国科协防灾减灾论坛论文集. 北京:中国科学技术协会,2008:717-719.
WU Yu-jin, ZHOU Zhi-guo. The snow-melting agent effects on highway infrastructure at south of China[C]//China Association for Science and Technology. The 2008 Symposiums of Disaster Prevention and Mitigation Forum of China Association for Science and Technology. Beijing: China Association for Science and Technology, 2008: 717-719. (in Chinese)

(下转第42页)

- in ground fissures area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese)
- [19] 黄强兵, 彭建兵, 石玉玲, 等. 地裂缝活动对地铁区间隧道地层应力与位移影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1525-1532.
- HUANG Qiang-bing, PENG Jian-bing, SHI Yu-ling, et al. Experimental study on effect of active ground fissures on stress and displacement change laws of strata near metro tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1525-1532. (in Chinese)
- [20] 杨林德, 季倩倩, 杨超, 等. 地铁车站结构振动台试验中传感器位置的优选[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 619-623.
- YANG Lin-de, JI Qian-qian, YANG Chao, et al. Optimization of positions of sensors in shaking table test for subway station structure in soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(4): 619-623. (in Chinese)
- [21] 史晓军, 陈隽, 李杰. 非一致地震激励下地下综合管廊振动台模型试验研究(I)——试验方法[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(1): 147-154.
- SHI Xiao-jun, CHEN Jun, LI Jie. Shaking table test on utility tunnel under non-uniform seismic examinations (I): experimental setup[J]. Journal of Earthquake Engineering and Vibration, 2010, 30(1): 147-154. (in Chinese)
- [22] 何川, 李林, 张景, 等. 隧道穿越断层破碎带震害机理研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 427-434.
- HE Chuan, LI Lin, ZHANG Jing, et al. Seismic damage mechanism of tunnels through fault zones[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3): 427-434. (in Chinese)
-
- (上接第 25 页)
- [6] 赵鸿铎, 姚祖康, 张长安, 等. 飞机除冰液对停机坪水泥混凝土的影响[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(2): 1-5.
- ZHAO Hong-duo, YAO Zu-kang, ZHANG Chang-an, et al. Influence of aircraft deicer on apron cement concrete[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(2): 1-5. (in Chinese)
- [7] MIRZA J, ABESQUE C, BÉRUBÉ M A. Evaluation of surface sealers for concrete hydraulic structures exposed to low temperatures[J]. Materials and Structures, 2011, 44(1): 5-12.
- [8] LAUER K R. Classification of concrete damage caused by chemical attack[J]. Materials and Structures, 1990, 23(3): 223-229.
- [9] 李晔明. 机场道面的表面温度冲击效应研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2014.
- LI Ye-ming. The research of the temperature shock effect on the airport roads' surface[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China. (in Chinese)
- [10] KIM S H, PARK J Y, JEONG J H. Effect of temperature-induced load on airport concrete pavement behavior[J]. Journal of Civil Engineering, 2014, 18(1): 182-187.
- [11] 李立辉. 盐碱环境下混凝土冻融-干湿循环复合作用的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- LI Li-hui. Study on alkaline environment under freeze-thaw and dry-wet cycling of concrete[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [12] FABBRI A, COUSSY O, FEN-CHONG T, et al. Are deicing salts necessary to promote scaling in concrete? [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2008, 134(7): 589-598. (in Chinese)
- [13] 敦晓, 岑国平, 黄灿华, 等. 机场道面混凝土冻融破坏评价指标[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(1): 13-18.
- DUN Xiao, CEN Guo-ping, HUANG Can-hua, et al. Evaluation indices of freezing-thawing destruction for airfield runway concrete[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(1): 13-18. (in Chinese)
- [14] SETZER M J, AUBERG R, KASPAREK S, et al. CIF-test-capillary suction, internal damage and freeze thaw test[J]. Materials and Structures, 2001, 34(9): 515-525.
- [15] 罗昕, 卫军. 冻融条件下混凝土劣化陡变点的探讨[J]. 混凝土, 2005(11): 14-16, 42.
- LUO Xin, WEI Jun. Sharp degradation point of concrete under freezing-thawing cycles[J]. Concrete, 2005(11): 14-16, 42. (in Chinese)
- [16] 任旭晨, 万小梅, 赵铁军. 混凝土冻融及盐冻劣化机理研究进展及模型综述[J]. 混凝土, 2012(9): 15-18.
- REN Xu-chen, WAN Xiao-mei, ZHAO Tie-jun. Review of mechanism and mathematical model for salt scaling and freezing-thawing damage of concrete[J]. Concrete, 2012(9): 15-18. (in Chinese)
- [17] 马好霞. 混凝土在机场除冰液作用下的抗腐蚀性[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- MA Hao-xia. Corrosion resistance of concretes subjected to airport deicer[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [18] 李晔, 姚祖康, 孙旭毅, 等. 铺面水泥混凝土冻融环境量化研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(10): 1408-1412.
- LI Ye, YAO Zu-kang, SUN Xu-yi, et al. Quantification research on the frost environment of pavement cement concrete[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(10): 1408-1412. (in Chinese)