

# 机场道面混凝土性能优化设计研究

杨全兵<sup>1</sup>, 陈 勇<sup>2</sup>

(1. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804;

2. 杭州修路人科技有限公司, 浙江 杭州 310023)

**摘要:** 研究了含气量和掺合料对机场道面混凝土抗弯拉强度、抗冻性和抗盐冻剥蚀性的影响。结果表明:通过引气,可显著提高其抗冻性和抗盐冻剥蚀性,且较明显地提高混凝土的抗弯拉强度;相同含气量下,干硬性混凝土抗冻性和抗盐冻剥蚀性明显低于常态混凝土;为了获得较高的后期强度增长,当采用硅酸盐水泥配制混凝土时,建议掺质量分数为15%的低钙粉煤灰或矿渣粉。气泡结构参数分析数据可很好地解释这些试验结果,并证明了干硬性混凝土的引气泡稳定性和气泡结构要显著比常态混凝土差。

**关键词:** 机场道面混凝土; 抗弯拉强度; 抗冻性; 抗盐冻剥蚀性; 气泡结构

**中图分类号:** TU 528.1

**文献标志码:** A

## Optimization Design of Properties of Concrete for Airport Pavement

YANG Quanbing<sup>1</sup>, CHEN Yong<sup>2</sup>

(1. Key Lab of Advanced Civil Engineering Materials of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Hangzhou Roadmender Technology Co. Ltd., Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** Effects of air content and mineral admixtures on the flexural strength, frost resistance and deicer-frost scaling resistance of airport concrete were investigated in this paper. The results show that the frost resistance and deicer-frost scaling resistance of concrete are significantly improved, and its flexural strength is enhanced by the addition of the air-entraining agent. The frost resistance and deicer-frost scaling resistance of dry concrete are much lower than those of normal concrete at a similar air content. 15% fly ash or slag is suggested to replace Portland cement in order to get a higher late strength growth. The data on the air-bubble structure parameters of the concrete can explain these results well, and prove that the air-bubble stability and air-bubble structure of the dry concrete are obviously worse than those of

the normal concrete.

**Key words:** airport pavement concrete; flexural strength; frost resistance; deicer-frost scaling resistance; air-bubble structure

当冬季出现冰雪天气时,根据我国民航安全运营要求,为了确保飞机起降的安全,必须先清除飞机和跑道上的冰雪后,飞机才能起降。目前,我国机场的冰雪清除方法,除了采用热风吹之外,最主要的是喷洒除冰或融雪液,最常用的产品有醋酸钙镁和乙二醇溶液<sup>[1]</sup>。尽管这些除冰液价格昂贵,但与传统的普通氯盐(NaCl 和 CaCl<sub>2</sub>)相比,它们对飞机和植物的危害更小<sup>[2-3]</sup>。不过,它们对水泥混凝土机场道面仍然会产生严重的表面盐冻剥蚀破坏,并且对水体仍然会产生一定的污染<sup>[4-6]</sup>。

根据《民用机场水泥混凝土道面设计规范(MHT 5004—2010)》和《民用机场飞行区水泥混凝土道面面层施工技术规范(MH 5006—2002)》,对受冻地区的机场道面混凝土有抗冻指标要求,但是没有抗盐冻剥蚀性要求。尽管混凝土盐冻剥蚀破坏的根本原因与普通冻融破坏一样,均是水溶液结冰产生膨胀破坏压力,但是,盐冻破坏主要是反映混凝土表面破坏,而普通水冻主要是反映混凝土内部破坏,且盐冻破坏速率和破坏程度远比普通水冻破坏大<sup>[7]</sup>。因此,混凝土抗冻性指标合格并不能代表抗盐冻剥蚀性也合格。

根据本课题组的现场调查,目前我国受冻地区特别是三北地区的机场道面混凝土经使用数个冬季之后,普遍存在表面严重剥蚀的现象,其使用寿命明显低于设计值。其主要原因是根据 MHT 5004—2010 和 MH 5006—2002 的机场道面混凝土的设计

与施工规范,道面混凝土为干硬性(坍落度小于 5 mm),其结果导致混凝土引气困难,且引气泡结构和稳定性差;另一方面,为了保证机场道面的平整度,必须对混凝土采取长时间的强力振捣,且多次抹面以产生足够的水泥浆,以便混凝土表面抹平,其结果使混凝土表层好不容易引入的气泡大幅度减少,即其含气量损失很大,明显大于混凝土内部的含气量损失。

此外,调查也发现,机场道面混凝土的抗折强度或抗弯拉强度的后期发展潜力小,一般 90 d 抗折强度比 28 d 的增长率远不到 10%。其主要原因是,我国机场道面混凝土常采用硅酸盐水泥,且很少使用矿物掺合料如矿渣粉和粉煤灰等。

本文拟通过适当提高坍落度,以及掺优质引气剂和低钙粉煤灰或矿渣粉来优化混凝土的性能,包括混凝土的施工性能、强度、抗冻性与抗盐冻剥蚀性。

## 1 试验方案

### 1.1 原材料

试验原材料均由空军三总队提供,具体参数如下:

(1)水泥 安徽宁国水泥厂生产的海螺牌 52.5 硅酸盐水泥(P II)。

(2)掺合料 上海石洞口电站 II 级低钙分选粉煤灰,比表面积为  $396 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ;宝钢磨细矿粉,比

表面积为  $438 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

(3)外加剂 引气剂为福建老知青集团有限公司生产的 TS-1 茶皂素引气剂;减水剂为上海卡耐尔化工有限公司生产的 MR 木质素磺酸盐普通减水剂。

(4)砂 河砂,属中砂,细度模数为 2.76。

(5)石子 碎石由 4.75~16.00 mm 小石子和 16.0~31.5 mm 大石子两级石子配成,最大颗粒尺寸为 31.5 mm。

(6)水 自来水。

### 1.2 配合比

根据《民用机场水泥混凝土道面设计规范(MHT 5004—2010)》,机场道面水泥混凝土的设计强度采用 28 d 龄期的抗弯拉强度。本文混凝土配合比设计时,要求其 28 d 抗弯拉强度大于 5.0 MPa。

根据《民用机场飞行区水泥混凝土道面面层施工技术规范(MH 5006—2002)》,混凝土的单位水泥用量不应小于  $300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。当其稠度采用坍落度测定时,坍落度应小于 0.5 cm;采用维勃稠度仪控制稠度时,应大于 20 s。

混凝土配合比共有 6 个,其中 A0 和 B0 为按 MHT 5004—2010 和 MH 5006—2002 要求设计的干硬性混凝土,其维勃稠度值分别为 23 s 和 27 s; B1, B2, C1~C3 为常态引气混凝土,其坍落度和含气量分别控制在  $40 \pm 10 \text{ mm}$  和  $4 \pm 1.0\%$ ,其中 C1~C3 掺质量分数为 15% 的矿物掺合料。详细配合比参数及其性能指标见表 1 和表 2。

表 1 混凝土配合比设计

Tab.1 Designing proportions of concrete

编号	$m_w/m_c$	配合比/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )								
		水泥	水	砂	小石	大石	FA	SL	TS-1	MR
A0	0.42	340	143	653	832	554	0	0	0	0
B0	0.42	340	143	650	790	528	0	0	0.130	0
B1	0.42	340	143	650	800	535	0	0	0.038	0.68
B2	0.42	340	143	650	790	528	0	0	0.061	0.68
C1	0.42	289	143	650	790	528	0	51	0.051	0.68
C2	0.42	289	143	650	790	528	51	0	0.068	0.68
C3	0.42	289	143	650	790	528	17	34	0.060	0.68

注:原材料均为干基; $m_w/m_c$  为水胶质量比;FA 为粉煤灰;SL 为矿渣粉。

表 2 机场道面混凝土性能试验结果

Tab.2 Test results on properties of concrete for airport pavements

编号	$m_w/m_c$	坍落度/ mm	含气量/%	抗弯拉强度/MPa			DF 值/%	剥落量 $M_s$ / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )
				7 d	28 d	90 d		
A0	0.42	<5	1.23	4.66	5.54	5.90	27	4.56
B0	0.42	<5	4.25	4.92	5.95	6.30	64	1.85
B1	0.42	35	3.26	5.36	6.42	6.87	78	0.81
B2	0.42	40	4.82	5.12	6.30	6.62	91	0.46
C1	0.42	45	4.35	5.05	6.44	7.28	90	0.48
C2	0.42	25	4.45	4.86	6.12	7.15	88	0.58
C3	0.42	30	4.16	4.98	6.32	7.54	93	0.50

### 1.3 试件成型养护与试验测试

#### 1.3.1 试件成型与养护

混凝土试件为 15 cm×15 cm×55 cm 棱柱体和 10 cm 立方体,前者用于测定抗弯拉强度或抗折强度,后者用于测定盐冻剥落量。试件成型并在室内空气中放置 1 d 后脱模,放入标准养护室养护至测定龄期 7 d, 28 d 和 90 d。到养护龄期后,取出混凝土试块,并在室内空气中面干数小时后,测定抗弯拉强度。

根据 MH 5006—2002 施工规范,对 A0 和 B0 配合比,因属于干硬性混凝土,其工作性差,不易于整平,必须有足够长的振捣时间(45~60 s),以产生足够多的水泥浆,同时需要用较大力气多次抹面(类似现场施工);对 B1, B2, C1~C3 配合比,因属常态引气混凝土,其工作性良好,很容易出浆整平,其振捣时间短(约 15 s),抹面次数也少,且只需轻抹。

#### 1.3.2 普通冻融试验和盐冻剥蚀试验

混凝土普通冻融试验采用《水工混凝土试验规程(SL 352—2006)》中的快速水冻法进行,即当 300 次冻融循环后的抗冻指标 DF 值大于等于 60% 时,混凝土的抗冻性为合格;该值愈大,则其抗冻性愈高。

盐冻试验前,把 10 cm 立方体试块上成型面切割出 5 cm 厚度的混凝土试件。为模拟机场现场条件,采用混凝土的上成型面作为盐冻剥蚀试验的测试面。混凝土抗盐冻剥蚀性能的测定方法采用单面浸泡法<sup>[7]</sup>,详见图 1。其冻融试验制度为在 20℃ 下冻 3 h,接着在 15~20℃ 下融 3 h,构成 1 次冻融循环;冻融介质为 4% 的 NaCl 溶液。一定次数的冻融循环后,测定混凝土的剥蚀量。当 30 次冻融循环后的剥落量小于 1.0 kg·m<sup>-2</sup> 时,混凝土的抗盐冻剥蚀性为合格;该值愈小,则其抗盐冻剥蚀性愈高。混凝土剥落量按下式计算:

$$M_s = m/S \quad (1)$$

式中: $M_s$  为剥落量,kg·m<sup>-2</sup>;  $m$  为试件剥落物在 105℃ 下的烘干质量,kg;  $S$  为试件接触盐溶液的表面积,m<sup>2</sup>。

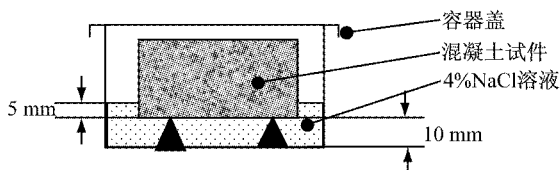


图1 混凝土盐冻试验方法

Fig.1 Salt-frost test method of concrete

#### 1.3.3 气泡结构参数测定

硬化混凝土的气泡结构参数(包括含气量、气泡比表面积和平均气泡间距)的测定和计算方法参照《水工混凝土耐久性技术规范(DL/T 5241—2010)》标准<sup>[8]</sup>和 Snyder 提出的方法<sup>[9]</sup>。

在分析测定硬化混凝土不同面层上的气泡结构前,需先制样,其方法如下:①混凝土上成型面因抹面的原因,其表层会形成一层砂浆层(厚度约几 mm 至 10 mm),且其表面上的很多气泡会被一层薄的水泥浆体覆盖,因此为了分析其表面砂浆层的气泡结构参数,需用抛光机把表面浆体磨掉约 1 mm,以使其中的引气泡显露出来;②其他层面的混凝土样,只需用切割机按不同深度切割出来,即可用于该层面混凝土气泡结构参数分析测定。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 抗弯拉强度

#### 2.1.1 含气量

引气对混凝土抗弯拉强度的影响见表 2 和图 2。结果清楚地表明,通过掺入优质的茶皂素引气剂,可以较明显地提高混凝土的抗弯拉强度,其中含气量为 3%~4% 时,混凝土的抗弯拉强度提高最大。例如,与未引气的混凝土相比(A0),含气量为 3.26% 的混凝土(B1)7, 28 和 90 d 的抗弯拉强度分别提高 15.0%, 15.9% 和 16.4%;含气量为 4.82% 的混凝土(B2)分别提高 10.1%, 14.6% 和 12.2%。其原因可能与混凝土气泡结构参数和引气泡可抑制裂纹扩展有关,详细原因有待深入分析研究。

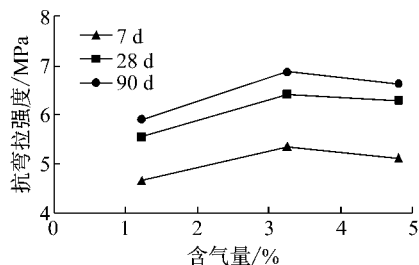


图2 含气量对混凝土抗弯拉强度的影响

Fig.2 Effects of air content on flexural strength of concrete

表 2 还表明,尽管干硬性混凝土通过引气(B0)也能提高抗弯拉强度,但不如含气量相近的常态混凝土(B2)提高明显,其中含气量为 4.25% 的干硬性混凝土(B0)7, 28 和 90 d 的抗弯拉强度比 A0 仅分别提高 5.6%, 7.6% 和 6.8%。

### 2.1.2 掺合料

在含气量约 4.5% 和掺合料掺量为 15% 的条件下,掺合料对混凝土抗弯拉强度的影响见表 2 和图 3。结果表明,掺粉煤灰和矿渣混凝土(C1~C3) 7 d 抗弯拉强度稍低于基准混凝土(B2); 28 d 抗弯拉强度除掺粉煤灰的混凝土 C2 比 B2 稍小外,掺矿粉和复掺的混凝土 C1 和 C3 均稍高;但是,掺粉煤灰和矿渣混凝土 90 d 抗弯拉强度及其增长速率均明显高于无掺合料的混凝土(B2),其中粉煤灰和矿粉复掺的强度增长效果最佳。例如,配合比 B2、C1、C2 和 C3 的 90 d 抗弯拉强度分别为 6.62、7.28、7.15 和 7.44 MPa,比 28 d 强度分别增长约 5.1%、13.0%、16.8% 和 17.7%。这主要是因为通过粉煤灰和矿粉中活性组分与水泥熟料水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生二次火山灰反应,形成  $\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$  摩尔比更低的水化硅酸钙凝胶,且养护龄期愈长,火山灰反应愈充分,强度增长愈显著。

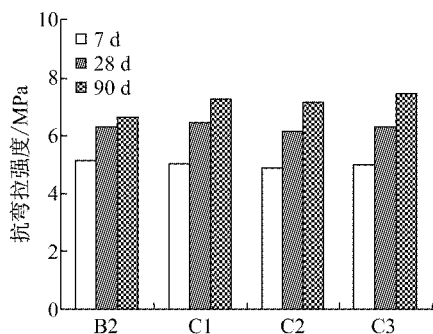


图3 掺合料对混凝土抗弯拉强度的影响

Fig.3 Effects of mineral admixtures on flexural strength of concrete

从上述结果可以清楚地得出,采用 52.5 硅酸盐水泥(PⅡ),其 90 d 抗折强度比 28 d 强度的增长远不到通常认为的 10%。其主要原因是这类水泥仅掺了不到 5% 的混合材或掺合料,其特点是早期强度发展快,后期强度增长小。因此,如果要获得较高的后期强度增长,当采用这类水泥配制混凝土时,建议掺 15% 的Ⅱ级或Ⅰ级低钙粉煤灰(最好为分选灰)和 15% 的矿渣粉(比表面积  $400 \sim 450 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ),两者复掺使用效果更佳。

## 2.2 抗冻性和抗盐冻剥蚀性

### 2.2.1 含气量

含气量对混凝土抗冻性和抗盐冻剥蚀性的影响见表 2 和图 4。结果清楚地表明,随着混凝土含气量增大,其 DF 值显著提高,且盐冻产生的剥落量显著降低,即混凝土抗冻性和抗盐冻剥蚀性显著提高;在

相同含气量的条件下,干硬性混凝土 B0 的抗冻性和抗盐冻剥蚀性明显低于坍落度为 20~50 mm 的常态混凝土 B2。

然而,必须引起重视的是,尽管引气也明显提高了干硬性混凝土的 DF 值和降低了剥落量,且干硬性混凝土的抗冻性指标也能合格(DF 值大于 60%),但是其剥落量为  $1.85 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,明显大于  $1.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,即其抗盐冻剥蚀性指标不合格,其原因在后面进行深入分析。

### 2.2.2 掺合料

在含气量约 4.5% 和掺合料掺量为 15% 的条件下,掺合料对混凝土抗冻性和抗盐冻剥蚀性的影响见表 2。结果表明,掺粉煤灰和矿渣混凝土(C1~C3)抗冻性和抗盐冻剥蚀性均稍小于无掺合料的混凝土(B2)。不过,它们的耐久性指标均合格,均属于高抗冻性和抗盐冻剥蚀性混凝土,即通过合理引气可以有效地解决掺粉煤灰和矿渣对混凝土抗冻性和抗盐冻剥蚀性的不利影响。

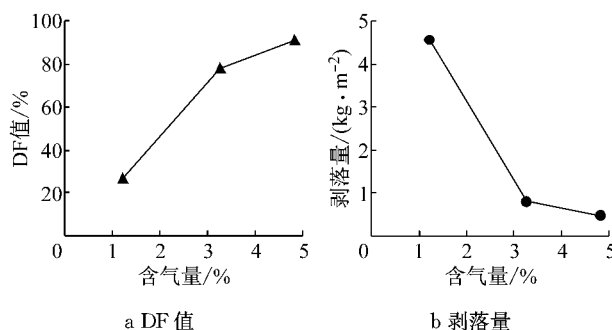


图4 含气量对混凝土抗冻性和抗盐冻剥蚀性的影响

Fig.4 Effects of air content on frost resistance and salt-frost resistance of concrete

## 2.3 气泡结构参数分析

### 2.3.1 含气量

含气量对硬化混凝土气泡结构参数的影响见表 3 和图 5。表 3 中, $D$  为离上成型面的深度; $A$  为硬化混凝土中的含气量; $P$  为硬化混凝土中的浆体含量; $\alpha$  为引气泡比表面积; $L$  为平均气泡间距。结果表明,通过添加优质引气剂后,混凝土的平均气泡间距显著降低,且含气量越高,降低越明显。同时,混凝土气泡的比表面积显著增大,即气泡的直径显著减小。这很好地解释了图 4 的试验结果,即引气为何可显著提高混凝土抗冻性和抗盐冻剥蚀性。

### 2.3.2 离表面深度

为了更好地理解干硬性混凝土和常态混凝土对引气混凝土气泡结构与抗盐冻剥蚀性的影响差异,专门对含气量相近的干硬性混凝土 B0 和常态混凝土

表 3 硬化混凝土的气泡结构参数分析结果

Tab. 3 Analysis results of air-bubble parameters of hardened concrete

编号	D/mm	A/%	P/A	$\alpha/\mu\text{m}^{-1}$	L/ $\mu\text{m}$
A0	50	0.95	26.6	10.4	932
B0	1	4.2	5.8(11.7)	11.2	442(607)
	5	3.7	6.9(13.9)*	13.5	397(543)
	10	3.0	8.4	16.2	362
	20	2.8	9.0	17.8	340
B1	50	2.9	8.7	17.6	338
	1	3.1	8.2	25.9	224
	5	6.2	4.1(8.3)	19.7	210(295)*
	5	5.0	5.0(10.2)*	21.8	212(293)
B2	10	4.5	5.6	23.5	208
	20	4.3	5.9	26.0	192
	50	4.2	6.0	25.7	204

注:括号内的数据为用砂浆配合比计算(剔除石子)。

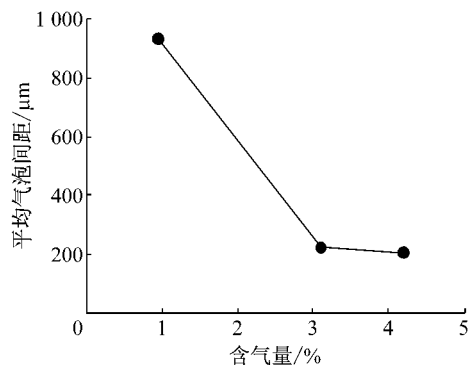


图 5 含气量对硬化混凝土气泡结构参数的影响

Fig. 5 Effects of air content on air-bubble parameters of hardened concrete

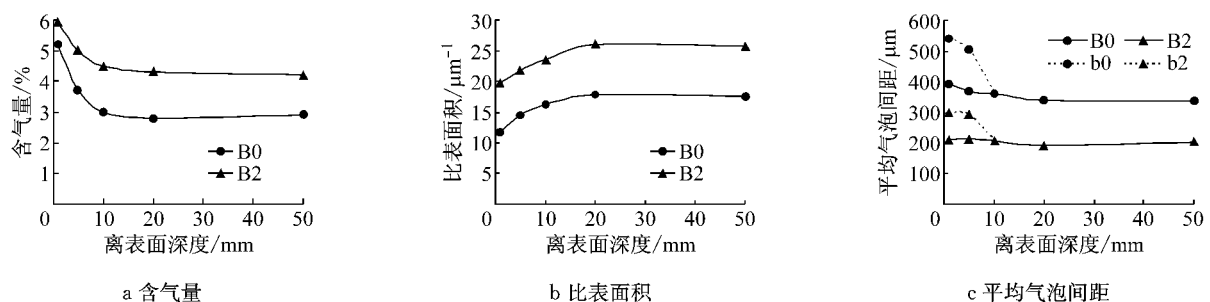


图 6 离表面深度对硬化混凝土气泡结构参数的影响(b0 和 b2 为以砂浆计算的数据)

Fig. 6 Effects of depth from the surface on air-bubble parameters of hardened concrete (data for b0 and b2 are calculated according to mortar proportions)

性混凝土(B0)和常态混凝土(B2)1 mm 处的平均气泡间距分别增加约 37.3%和 40.5%。事实上,为了获得同样的抗冻性和抗盐冻剥蚀性,同样水胶比下,砂浆需要的含气量要明显高于混凝土。

表 3 和图 6 的数据还得出一个重要结果,那就是干硬性混凝土(B0)的引气泡稳定性和气泡结构比常态混凝土(B2)显著差,即其引气泡和平均气泡间

距更大,比表面积更小。此外,为了密实和表面整平,干硬性混凝土需要更强力和高频的振捣与多次抹面,而 20~50 mm 的常态混凝土很容易实现密实和表面整平,因此干硬性混凝土的含气量损失和气泡结构劣化更明显,尤其是表面层。例如干硬性混凝土硬化后(B0)1 mm 和 50 mm 处的含气量分别为 2.1%(折算为混凝土的含气量)和 2.9%,分别比新

土 B2 不同位置的气泡结构参数进行了比较分析。离表面深度对混凝土气泡结构参数的影响见表 3 和图 6。从这些结果可以清楚地看出,不同层面混凝土气泡结构参数的变化情况。不论是干硬性混凝土还是常态混凝土,表层混凝土的气泡结构参数与内部有很大差异,均有较明显劣化作用。图 6 清楚地表明,越靠近上表面的混凝土,其含气量和气泡直径越大(即气泡比表面积越小),使平均气泡间距有变大的趋势。不过,深度大于 10 mm 后,硬化混凝土的气泡结构参数就趋于稳定。例如干硬性混凝土(B0)和常态混凝土(B2)1 mm 处的气泡比表面积分别比 50 mm 处降低约 36%和 23%,平均气泡间距分别增加约 80%和 45%。这主要是因为振捣过程中,粗骨料(石子)将往下沉,水泥浆体或砂浆将往上升,使表层混凝土骨料含量更少,1~5 mm 表面甚至只存在砂浆层;同时,细小引气泡将容易合并成大泡,且会有部分逸出和破裂。

至于表层混凝土的含气量比内部混凝土高,是因引气泡只存在于水泥浆体中,尽管总含气量更高,但是在水泥浆体中的相对含气量还是降低了。例如,混凝土 B0 和 B2 在 1 mm 处的含气量分别为 4.4%和 6.2%,实际上相当于对应砂浆中的含气量,若折算为相应混凝土的含气量,分别只有约 2.1%和 3.2%。因此,在计算表层 5 mm 内的平均气泡间距时,若以砂浆进行计算修正后,就发现其平均气泡间距显著增大。例如,经以砂浆进行计算修正后,干硬

拌混凝土含气量损失了约 51% 和 32%, 常态混凝土 (B2) 1 mm 和 50 mm 处的含气量分别为 3.2% 和 4.2%, 仅分别损失了约 34% 和 13%; 干硬性混凝土 (B0) 1 mm 和 50 mm 处的气泡比表面积分别比常态混凝土 (B2) 约低 43% 和 32%, 平均气泡间距分别约高 106% 和 66%。

上述硬化混凝土气泡结构参数的分析结果很好地解释了在相近的含气量下, 为什么干硬性混凝土的抗冻性和抗盐冻剥蚀性要明显比常态混凝土差, 以及抗冻性合格的干硬性混凝土, 其抗盐冻剥蚀性也可能不合格的原因。另外, 这些结果和目测也表明, 干硬性混凝土的匀质性要比常态混凝土差很多, 且引气泡也更大, 因此, 在相同含气量和水胶比的条件下, 干硬性混凝土的抗弯拉强度比常态混凝土更低些。

### 3 结论

通过掺入优质的茶皂素引气剂, 可以较明显地提高混凝土的抗弯拉强度, 其中含气量为 3%~4% 时, 混凝土的抗弯拉强度提高最多; 当水胶比和含气量相同的条件下, 通过引气干硬性混凝土提高抗弯拉强度不如坍落度为 20~50 mm 的常态混凝土明显; 为了获得较高的后期强度增长, 当采用硅酸盐水泥配制混凝土时, 建议掺 15% 的 II 级或 I 级低钙粉煤灰和 15% 的矿渣粉, 两者复掺使用效果更佳。

随着混凝土含气量增大, 混凝土抗冻性和抗盐冻剥蚀性显著提高; 在相近含气量下, 干硬性混凝土的抗冻性和抗盐冻剥蚀性明显低于常态混凝土; 抗冻性合格的干硬性混凝土, 并不能保证其抗盐冻剥蚀性也合格; 通过合理引气可以有效地解决掺粉煤灰和矿渣对混凝土抗冻性和抗盐冻剥蚀性的不利影响。

越靠近上表面的混凝土, 其含气量和气泡直径越大, 使平均气泡间距有变大的趋势, 深度大于 10 mm 后, 硬化混凝土的气泡结构参数就趋于稳定; 干硬性混凝土的引气泡稳定性和气泡结构要明显比常态混凝土差。这些气泡结构参数的分析结果可很好

地解释上述试验结果。

### 参考文献:

- [1] 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 Haoxia. Corrosion resistance of concretes subjected to airport deicer[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [2] 程川海, 路新瀛. 新型融雪剂对钢筋的腐蚀性研究[J]. 建筑技术, 2005, 36(9): 22.  
CHENG Chuanhai, LU Xinying. Study on corrosion of new deicing salt to steel bar[J]. Architecture Technology, 2005, 36(9): 22.
- [3] 许英梅, 刘倩, 仇春华, 等. CMA 类环保型融雪剂的应用研究进展[J]. 化学世界, 2010, 51(7): 435.  
XU Yingmei, LIU Qian, ZHANG Chunhua, et al. Research progress on application of CMA environmentally friendly deicer[J]. Chemical World, 2010, 51(7): 435.
- [4] 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.  
ZHAO Hongduo, YAO Zukang, 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] 胡雄星, 韩中豪. 机场使用除冰液的应急监测[J]. 中国环境监测, 2012, 28(1): 110.  
HU Xiongxing, HAN Zhonghao. Airport de-icing fluid emergency monitoring[J]. Environmental Monitoring in China, 2012, 28(1): 110.
- [6] Staples C A, Williams J B, Craig G R, et al. Fate, effects and potential environmental risks of ethylene glycol: A review[J]. Chemosphere, 2001, 43(3): 377.
- [7] 杨全兵. 混凝土盐冻破坏——机理、材料设计与防治措施[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
YANG Quanbing. Deicer-frost deterioration of concrete: Mechanisms, materials design and preventive measures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [8] 南京水利科学研究院, 中国水利水电科学研究院. DL/T 5241—2010 水工混凝土耐久性技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
Nanjing Hydraulic Research Institute, China Institute of Water Resources and Hydropower Research. DL/T 5241—2010 Technical specifications for durability of hydraulic concrete[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [9] Snyder K A. A numerical test of air void spacing equations[J]. Advance Cement Based Materials, 1998, 8(1): 28.