



对硬化混凝土气泡间距系数 测定方法的论述*

李俊毅^{1,2}

(1. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222; 2. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461)

摘要: 在混凝土中掺入引气剂配制引气混凝土的措施是提高及保证混凝土结构抗冻融耐久性的重要技术措施之一。T. C. Powers 提出气泡间距系数的概念, 硬化混凝土气泡系统参数中气泡间距系数最为关键, 我国已将直线导线法测定硬化混凝土气泡系统参数技术纳入一些行业标准。为合理准确开展相关试验检测工作, 计算气泡间距系数时, 以硬化混凝土中浆体含量与含气量体积百分比计的界限值 4.342 选择公式, 并对测定方法提出改进意见, 以进一步规范硬化混凝土气泡参数测定技术。

关键词: 硬化混凝土; 抗冻融耐久性; 气泡; 间距系数; 测定方法

中图分类号: U654; TU528

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)07-0058-10

Discussion on determination method for spacing factor of air-void system in hardened concrete

LI Junyi^{1,2}

(1. CCCC Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd., Tianjin 300222, China;

2. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

Abstract: The air entraining agent mixed with concrete to prepare the air-entrained concrete is one of the important technical measures to improve and ensure the durability of concrete structure against freezing and thawing. T. C. Powers proposed the concept of spacing factor, the spacing factor of air-void system in hardened concrete is the most crucial. In our country, the determination of air-voids system parameter in hardened concrete technology by linear traverse method has been incorporated into some industry standards. For carrying out relevant test and inspection work reasonably and accurately, this paper selects the formula on the basis of the boundary value of 4.342 between the paste content in hardened concrete, and the volume percentage of air content when calculating the spacing factor, and puts forward improvement suggestions for the determination method to further standardize the determination technology of air-void system parameters in hardened concrete.

Keywords: hardened concrete; durability of freeze-thaw resistance; air-void; spacing factor; determination method

在混凝土中掺入适量引气剂, 使其产生适当数量的微小气泡, 形成“抗冻融混凝土结构”, 时至今日仍是提高及保证混凝土抗冻融性的主要技术措施之一。在科学试验和生产中, 多以新拌混

凝土中的含气量作为技术控制指标, 并已反映在我国水运行业最早的 JTB 2003—1963《港工混凝土技术规范》^[1]中。但实践中, 虽然新拌混凝土含气量相同, 而由于水灰比、外加剂及其掺量、施工

收稿日期: 2024-09-29

*基金项目: 交通运输部办公厅关于下达 2023 年度新立项水运工程建设标准编制计划的通知(交办水函[2023]577 号)

作者简介: 李俊毅 (1965—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事建筑材料科研及试验检测管理。

工艺等因素影响,将导致硬化混凝土中气泡系统参数发生变化,从而影响混凝土的抗冻融性,得到优劣不同的效果。表征硬化混凝土气泡系统参数主要有硬化混凝土含气量、气泡比表面积及气泡间距系数等,其中以气泡间距系数最为重要^[2-5],例如废止的国家标准 GB/T 50476—2008《混凝土结构耐久性设计标准》^[6]及现行国家标准 GB/T 50476—2019《混凝土结构耐久性设计标准》^[7]都对引气混凝土提出气泡间距系数的技术要求,现行电力行业标准 DL/T 5241—2010《水工混凝土耐久性技术规范》^[8]及 DL/T 5144—2015《水工混凝土施工规范》^[9]对有抗冻融要求的混凝土提出了气泡间距系数的技术要求,现行铁路行业标准 TB 10005—2010《铁路混凝土结构耐久性设计规范》^[10]、TB 10424—2018《铁路混凝土工程施工质量验收标准》^[11]、TB/T 3275—2018《铁路混凝土》^[12]及废止的铁路行业标准 TB 10424—2010《铁路混凝土工程施工质量验收标准》^[13]、TB/T 3275—2011《铁路混凝土》^[14]也对冻融环境混凝土提出气泡间距系数的技术要求。

为规范硬化混凝土中气泡参数的测定方法,试行日期为1981年1月的《港口工程混凝土试验方法(试行)》^[15]编入了“6.3-80 硬化混凝土中气泡参数测定”,这在我国同类标准中编入硬化混凝土中气泡参数测定方法是较早的,甚至可谓最早的。该标准经历了 JTJ 225—1987《混凝土试验》^[16](含“第六章 第三节 硬化混凝土中气泡参数测定”)、JTJ 270—1998《水运工程混凝土试验规程》^[17](含“7.3 硬化混凝土中气泡参数测定”)及现行水运行业标准 JTS/T 236—2019《水运工程混凝土试验检测技术规范》^[18](含“13.3 硬化混凝土中气泡参数测定”)的版本替代发展,“硬化混凝土中气泡参数测定”方法延续至今。此外,现行水运行业标准 JTS 239—2015《水运工程混凝土结构实体检测技术规程》^[19]提出采用检测混凝土结构实体气泡间距系数定性评估混凝土抗冻融性的要求,列为“6.4 抗冻性检测”中的“6.4.4 气泡间距系数检测”。

交通运输部办公厅于2024年8月1日公开的

《关于做好公路水运工程质量检测机构资质评审有关工作的通知》(交办安监函〔2024〕1432号)^[20]提出更新优化部分检测参数事项。其中具备材料甲级及结构甲级资质的水运工程质量检测机构的质量检测能力基本要求都增加了可选质量检测参数:气泡间距系数,并规定相应配备,如硬化混凝土气泡间距系数分析仪、研磨抛光设备。这预示着材料甲级及结构甲级的水运工程质量检测机构可选开展硬化混凝土气泡间距系数的检测工作,因此迫切需要对硬化混凝土气泡间距系数检测技术进行进一步剖析,以利于正确开展硬化混凝土气泡间距系数检测及科学试验的工作,其目的就是促进、保证和提高混凝土结构抗冻融耐久性。

1 “气泡间距系数”概念的提出

覃维祖^[21]于1981年翻译了 ASTM C457-71 *Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete*(ASTM C457 最初批准于1960年),他将“linear traverse method”译为“直线横扫法”,将“spacing factor”译为“间隔系数”^[22],GB/T 50476—2008《混凝土结构耐久性设计标准》及 GB/T 50476—2019《混凝土结构耐久性设计标准》都称其为“间隔系数”,而我国行业标准现均称之为“直线导线法”“间距系数 $\bar{L}$ ”。ASTM C457-71 中计算 $\bar{L}$ 的公式是由 T. C. Powers 创建的^[23],并以浆气比 P/A (硬化混凝土中浆体含量 P 及含气量 A 均以体积百分比计)的界限值4.33选择公式。

GB/T 50476—2008《混凝土结构耐久性设计标准》将气泡间隔系数定义为硬化混凝土或水泥浆体中相邻气泡边缘之间的平均距离,GB/T 50476—2019《混凝土结构耐久性设计标准》将气泡间隔系数定义为表征硬化混凝土或水泥浆体中相邻气泡边缘之间距离的参数;TB 10005—2010《铁路混凝土结构耐久性设计规范》、TB/T 3275—2011《铁路混凝土》及 TB/T 3275—2018《铁路混凝土》都将 $\bar{L}$ 定义为硬化混凝土中相邻气泡边缘之间距离的平均值。文献[22]对间隔系数的译文为“间隔系

数是水泥浆任何一点到气泡周边的最大距离的标志,其计算是依据试件中所有气孔都是等径的球体,遍布水泥浆,排成相同的立方点阵,这个几何原理是由 T. C. Powers 发现的”。ASTM C457/C457M-16 *Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete*^[24]对间距系数的定义为:一个涉及水泥浆体与任一气泡边缘的最大距离有关的参数,其单位为长度单位。徐定华等^[25]指出,T. C. Powers 推导间距因数的本意是要从气孔体系实测的参数估算多于水必须移动达到最近气孔的最大距离,用以和水压力所制约的理论上许可的最大距离比较,这个距离才是真正令人感兴趣的。在推导中 T. C. Powers 假设气孔都是尺寸相同的球体,排列在立方格子中,求出的 $\bar{L}$ 等于单位立方体对角线隅角两个气孔间距离的一半,即气孔间壁平均距离的一半。Warren^[26]于 1953 年就指出, $\bar{L}$ 是混凝土中浆体内气泡表面间的平均最大距离的一半,是可能影响混凝土耐久性的最重要的气泡特性。

根据以上内容可知,其实 $\bar{L}$ 就是 T. C. Powers 假定条件下推导计算出的一个距离,建议中文术语可对应为气泡间距特征值/参考值,而不用间隔系数、间距系数及间距因数,解释可为硬化混凝土浆体中相邻两个气泡壁间距离的特征值/参考值。

ASTM C457/C457M-16 *Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete* 在计算 $\bar{L}$ 时,以 P/A 界限值 4.342 选择公式,而且附录中测定结果的说明指出,按照 ACI 201.2R-16 *Guide to Durable Concrete*^[27] 及 ACI 211.1-91 *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*^[28] 设计引气混凝土的 P/A 范围通常在 4~10、气泡比表面积 α 范围通常在 25~45 mm⁻¹ 及 $\bar{L}$ 范围通常在 0.1~0.2 mm。

此外,R. E. Philleo、R. Pleau 和 M. Pigeon、B. Lu 和 S. Torquato 及 E. K. Attiogbe 等还分别提出与气泡间距有关的计算公式^[29],我国也曾对

E. K. Attiogbe 计算公式进行过探讨^[30],但都未被纳入标准。

2 我国标准编入测定方法的情况

水运行业编入“硬化混凝土中气泡参数测定”方法情况已在前文表述。除此之外,水利、电力、铁路及公路行业的情况如下。

1) 水利行业:废止的 SD 105—1982《水工混凝土试验规程》^[31](自 1983 年 1 月起实施)中列入“第 5.0.16 条[*514-80]硬化混凝土气泡参数测定(直线导线法)”,其中“*”表示仅作参考,之后的替代且已废止的 SL 352—2006《水工混凝土试验规程》^[32]去掉该方法的“*”,列为“4.25 硬化混凝土气泡参数试验(直线导线法)”,现行的 SL/T 352—2020《水工混凝土试验规程》^[33]则列为“5.26 混凝土气泡参数试验(直线导线法)”。

2) 电力行业:在 SD 105—82《水工混凝土试验规程》的基础上,曾发布的 DL/T 5150—2001《水工混凝土试验规程》^[34]列入“4.25 硬化混凝土气泡参数测定(直线导线法)”,之后即现行的 DL/T 5150—2017《水工混凝土试验规程》^[35]列为“4.28 混凝土气泡参数试验”。GB/T 50476—2008《混凝土结构耐久性设计标准》及 GB/T 50476—2019《混凝土结构耐久性设计标准》在推算三维气泡平均间隔的方法方面也引用 DL/T 5150《水工混凝土试验规程》。

3) 铁路行业:现行的 TB 10005—2010《铁路混凝土结构耐久性设计规范》列入“附录 C 硬化混凝土气泡间距系数检测方法(直线导线法)”,废止的 TB/T 3275—2011《铁路混凝土》列入“附录 D 硬化混凝土气泡间距系数检测方法(直线导线法)”,现行的 TB/T 3275—2018《铁路混凝土》列入“附录 C 硬化混凝土气泡间距系数试验方法(直线导线法)”,现行的 TB 10433—2023《铁路工程混凝土实体质量检测技术规程》^[36]也对冻融环境的混凝土提出气泡间距系数的检测方法,列为“7 混凝土耐久性检测”中的“7.3 气泡间距系数”。

4) 公路行业:废止的 JTG F30—2003《公路水

混凝土路面施工技术规范》^[37]“附录 F 混凝土抗冻性现场检测方法”列入“F.2 取芯法测定混凝土气泡参数”,现行的 JTG/T F30—2014《公路水泥混凝土路面施工技术细则》^[38]列入“附录 B 取芯测定混凝土抗冻性及气泡间距系数方法”,现行的 JTG 3420—2020《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》^[39]在其前版的基础上增列了“T 0584—2020 水泥混凝土气泡间距系数试验方法(导线法)”。

ASTM C457/C457M-16 列出 3 种测量方法,即方法 A 直线导线法(linear-traverse method)、方法 B 改进计点法(modified point-count method)及方法 C 对比增强法(contrast enhanced method),而我国上述标准均采用直线导线法。

3 修订气泡系统参数测定方法的建议

3.1 气泡分类

美国康奈尔大学的 Hover^[40]提出将气泡直径尺寸边界设为 1 mm,小于或等于 1 mm 的称为引入气泡(entrained void/bubble,主动的结果),而大于 1 mm 的称为截留气泡(entrapped void/bubble,非主动的结果),混凝土各组分尺寸的典型分布见图 1。ASTM C457/C457M-16 将气泡维度其中之一大于 1 mm 的气泡都归类为截留气泡。ACI 212.3R-16 *Report on Chemical Admixtures for Concrete*^[41]提出理想的气泡直径应在 0.010~0.100 mm。

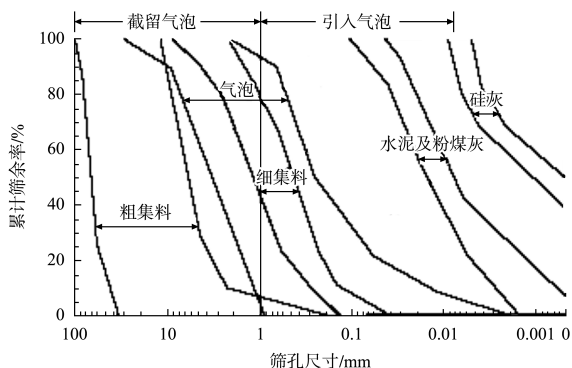


图 1 混凝土中各组分尺寸典型分布

Fig. 1 Typical dimension distributions of various components in concrete

3.2 测量截得气泡弦长的精度

BS EN 480-11:2005 *Admixtures for Concrete, Mortar and Grout-Test Methods-Part 11:Determination of Air Void Characteristics in Hardened Concrete*^[42]规定测量截得气泡弦长精确至 5 μm(即 0.005 mm)。如果制作试件时,气泡破裂位于导线上,那么完整的圆形截面应作为确定弦长的基础,测量相关弦长的方法见图 2,而自动成像系统将无法进行这种校正。

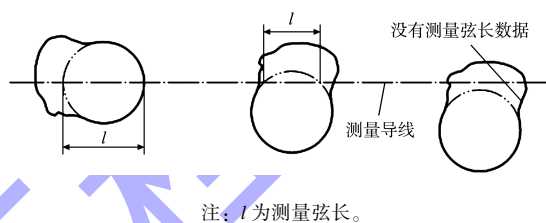


图 2 显微镜测量时破裂气泡的弦长估计

Fig. 2 Estimation of chord length for broken void during measuring by microscope

目前我国 JTS/T 236—2019《水运工程混凝土试验检测技术规范》、SL/T 352—2020《水工混凝土试验规程》、DL/T 5150—2017《水工混凝土试验规程》、TB/T 3275—2018《铁路混凝土》、TB 10433—2023《铁路工程混凝土实体质量检测技术规程》及 JTG 3420—2020《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》的相关方法所采用显微镜的目镜测微尺最小刻度均为 10 μm,可估读至 5 μm。

3.3 气泡系统参数计算公式

采用已知混凝土配合比计算 P ,其值等于单位体积混凝土中胶凝材料体积、水体积及外加剂体积之和与该混凝土单位体积之比,并以百分比计。根据直线导线法测量截得气泡弦长的数据,按以下公式计算气泡系统参数:

$$T_a = \sum_{i=1}^N l_i \quad (1)$$

$$A = \frac{100T_a}{T_t} \quad (2)$$

$$n = \frac{N}{T_t} \quad (3)$$

$$\bar{l} = \frac{T_a}{N} \quad (4)$$

$$\bar{r} = \frac{3}{4}\bar{l} \quad (5)$$

$$n_v = \frac{3A}{400\pi\bar{l}^3} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{4}{\bar{l}} \quad (7)$$

$$\bar{L} = \frac{3}{\alpha} \left[1.4 \left(1 + \frac{P}{A} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] \quad (P/A > 4.342) \quad (8)$$

$$\bar{L} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{P}{A} \quad (P/A \leq 4.342) \quad (9)$$

式中: T_a 为截得气泡的弦长总长度, mm; N 为截得气泡总数量, 个; l_i 为截得第 i 个气泡的弦长, mm; T_t 为测量导线总长度, mm; n 为平均 1 mm 截得气泡数量, 个; $\bar{l}$ 为气泡平均弦长, mm; $\bar{r}$ 为气泡平均半径, mm; n_v 为平均每 1 mm³ 混凝土中气泡数量, 个; α 为气泡比表面积, mm⁻¹; $\bar{L}$ 为气泡间距系数, mm。当 $P/A = 4.342$ 时, 按式(8)与(9)计算的结果相等。

ASTM C457/C457M-16、BS EN 480-11:2005、

SL/T 352—2020《水工混凝土试验规程》及 JTG 3420—2020《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》将 P/A 界限值定为 4.342, DL/T 5150—2017《水工混凝土试验规程》将 P/A 界限值定为 4.34。

此外, BS EN 480-11:2005 提出计算截得弦长小于或等于 0.300 mm 气泡的含气量为硬化混凝土微气泡含气量 (micro air content), 应按式(10)确定。

$$A_{300} = \frac{100T_{300}}{T_t} \quad (10)$$

式中: A_{300} 为微气泡含气量, 以体积百分比计; T_{300} 为截得弦长小于或等于 0.300 mm 气泡的弦长总长度, mm。

4 探索研究

4.1 60 年前的试验

原交通部第一航务工程局科学研究所(现为中交天津港湾工程研究院有限公司)^[43]在 20 世纪 60 年代就开展了硬化混凝土气泡性质的研究^[44], 例如 1964 年对掺 5 个不同来源的松香基引气剂混凝土采用直线导线法进行硬化混凝土气泡系统参数测定(新拌混凝土水灰比为 0.55、坍落度 (20±5) mm)^[45], 计算结果见表 1。

表 1 引气混凝土气泡系统参数测定计算结果

Tab. 1 Calculation results of parameters measurement of air-entraining concrete air-void system

引气剂 来源	引气剂 掺量/%	A_f ①/%	硬化混凝土气泡系统参数				
			A (以体积百分比计)	$\bar{l}$ /mm	α /mm ⁻¹	$\bar{L}$ /mm	P/A ②
—	0	1.2	1.53	0.463	8.62	0.900	15.800
I	0.075	4.2	4.27	0.186	21.60	0.218	5.183
II	0.035	3.1	4.08	0.268	14.90	0.318	5.254
III	0.035	4.4	3.22	0.248	16.10	0.330	6.754
IV	0.030	5.1	4.72	0.184	21.70	0.200	4.338 ^③ 4.340 ^④
V	0.030	4.8	3.97	0.210	19.10	0.251	5.391

注: ① A_f 为新拌混凝土含气量 (以体积百分比计); ②根据表中比表面积和间距系数按式(8)推算的结果; ③当时计算 $\bar{L}$ 是以 P/A 界限值为 4.33 选择公式, 故此值是按式(8)反推算得到; ④现在计算 $\bar{L}$ 是以 P/A 界限值为 4.342 选择公式, 故此值是按式(9)反推算得到。

4.2 1978 年的专题试验研究

为制定《港口工程混凝土试验方法(试行)》，原交通部第一航务工程局科学研究所进行了“硬化混凝土气泡性质对抗冻性的影响”^[46]专题研究，当时使用的 JLC 型测量显微镜保存至今(图 3)，引气剂为松香基引气剂，控制新拌混凝土的坍落度为 (30 ± 5) mm、含气量为 $4.5\%\pm 0.5\%$ ，经勘误修正的试验测试数据见表 2，计算结果及抗冻融试验结果见表 3。



注：铭牌上文字为无锡 78195(数字为仪器出厂编号，78 代表 1978 年)。

图 3 测量显微镜

Fig. 3 Measuring microscope

表 2 混凝土气泡系统参数测试数据

Tab. 2 Concrete air-void system parameters test data

截得气泡弦长 分布区间 ^① /mm	气泡数量/个			
	配合比 1 ^②	配合比 2 ^②	配合比 3 ^②	配合比 4 ^②
0~0.010	50	3	6	8
0.015~0.020	102	18	12	7
0.025~0.030				
0.035~0.040	260 ^③	145 ^③	118 ^③	83 ^③
0.045~0.050				
0.055~0.060	133 ^③	94 ^③	85 ^③	51 ^③
0.065~0.080				
0.085~0.100	169	161	124	131
0.105~0.120	134	170	141	145
0.125~0.140				
0.145~0.160	89 ^③	108 ^③	80 ^③	88 ^③
0.165~0.180				
0.185~0.200				
0.205~0.220				
0.225~0.240	53 ^③	88 ^③	48 ^③	56 ^③
0.245~0.260				
0.265~0.280	49 ^③	43 ^③	47 ^③	48 ^③
0.285~0.300				
0.305~0.350	50 ^③	54 ^③	36 ^③	41 ^③
0.355~0.400				
0.405~0.450	29 ^③	28 ^③	31 ^③	39 ^③
0.455~0.500				
0.505~1.000	30	29	22	24
1.005~1.500	19	26	18	20
1.505~2.000				
2.005~2.500	8 ^③	6 ^③	5 ^③	3 ^③
2.505~3.000				
3.005~4.000				

注：①BS EN 480-11:2005 提出的截得气泡弦长分布 28 个规定区间，仅测量截得气泡弦长不超过 4.000 mm 的气泡；②引气混凝土，配合比 1~4 的水灰比分别为 0.40、0.50、0.55 及 0.60；③该气泡数量为对应截得气泡弦长几个分布区间数量的总和，建议现在试验检测时应给出每个截得气泡弦长区间的气泡数量。

表 3 混凝土气泡系统参数计算结果及抗冻融性测定结果

Tab. 3 Parameter calculation results of concrete air-void system and test results of freeze-thaw resistance

配合比	N/个	T_l / mm	T_a / mm	$\bar{l}$ /mm		$\bar{r}$ /mm		α /mm ⁻¹	
				计算值 (按式(4)计算)	结果修约至 0.005	计算值 (按式(5)计算)	结果修约至 0.005	计算值 (按式(7)计算)	结果修约至 1
1	1 175	4 800	159.365	0.136	0.135	0.102	0.100	29.4	29
2	973	4 800	166.080	0.171	0.170	0.128	0.130	23.4	23
3	773	4 800	130.080	0.168	0.170	0.126	0.125	23.8	24
4	744	4 800	135.840	0.183	0.185	0.137	0.135	21.9	22
5 ^①	—	—	—	—	—	—	—	—	—

配合比	n (按式(3) 计算)/个	A (按式(2) 计算,以体积 百分比计)	n_v (按式(6) 计算)/ 个	P ^② (以体积 百分比计)	P/A	$\bar{L}$ /mm		A_f (以体积 百分比计)	冻融试验时相对动弹 模量降至 75% ^③ 时的 冻融循环次数/次
						计算值 (按式(8)计算)	结果修约至 0.005		
1	0.245	3.32	7.469	30.0	9.036	0.206	0.205	4.8	500
2	0.203	3.46	3.939	25.5	7.370	0.236	0.235	4.8	400
3	0.161	2.71	3.234	24.2	8.930	0.253	0.255	4.7	300
4	0.155	2.83	2.627	23.4	8.269	0.266	0.265	4.2	200
5 ^①	—	—	—	—	—	—	—	1.2	— ^④

注：①非引气混凝土，配合比 5 的水灰比为 0.47；②已知配合比的计算结果；③冻融试验时相对动弹模量降至 75%是判定混凝土抗冻融等级的技术指标之一^[47]；④50 次时相对动弹模量已经降至 75%以下。

4.3 对现行《水运工程混凝土试验检测技术规范》中“硬化混凝土中气泡参数测定”修订的建议

1) 方法名称明确为“硬化混凝土中气泡参数测定(直线导线法)”。

2) 直接记录测量截得每个气泡弦长值精确值至 0.005 mm(即 5 μm)。

3) 平均每 1 000 mm^3 混凝土中气泡个数修改为平均每 1 mm^3 混凝土中气泡个数^[48], 按式(6)计算。

4) 平均 10 mm 导线切割的气泡个数修改为平均 1 mm 导线切割的气泡个数, 按式(3)计算。

5) 明确按已知混凝土配合比计算硬化混凝土浆体含量 P , 其值等于单位体积混凝土中胶凝材料体积、水体积及外加剂体积之和与该混凝土单位体积之比, 并以体积百分比计。

6) 计算 $\bar{L}$ 选择公式时, P/A 界限值 4.33 修改为 4.342。

7) 当 $P/A > 4.342$ 时, $\bar{L}$ 计算公式可按式(8)表达; 当 $P/A \leq 4.342$ 时, $\bar{L}$ 计算公式可按式(9)表达。

8) α 结果修约至整数位; $\bar{L}$ 、 $\bar{l}$ 及 $\bar{r}$ 结果修约至 0.005 mm, 其结果也可以用 μm 表示。

9) 方法中可只给出计算 A 的式(2)、计算 $\bar{l}$ 的式(4)、计算 α 的式(7)及计算 $\bar{L}$ 的式(8)、(9), 按照相应顺序进行计算。

10) 试验检测报告中给出总含气量状况下 P/A 、 A 、 α 及 $\bar{L}$ 的结果。

5 结语

1) 目前, 我国标准中实际上均采用直线导线法检测硬化混凝土气泡系统参数, 最基础的仪器设备是测量显微镜, 并进行人工测量, 虽然自动观测分析技术有了长足发展, 但采用硬化混凝土气泡间距系数分析仪的方法还未编入水运行业标准, 目前我国仅 SL/T 352—2020《水工混凝土试验规程》提出可采用混凝土气泡分析仪, 并按照说明

书操作测量, 应引起试验检测人员的注意。

2) 若仅对 A_{300} 进行统计与分析, 将简化测量, 可逐步建立 A_{300} 控制指标。

3) 除进行冻融试验评定混凝土抗冻融性外, 要不断积累 $\bar{L}$ 与抗冻等级的关系, 测定硬化混凝土气泡系统参数结果必将是一种相对冻融试验而言快速评估混凝土抗冻融性的重要手段, 尤其对混凝土结构实体破损程度较小, 也必将是普查工程实体混凝土抗冻融性质量的手段, 要准确采用 JTS/T 236—2019《水运工程混凝土试验检测技术规范》及 JTS 239—2015《水运工程混凝土结构实体检测技术规程》中相关方法进行试验检测, 现正逐步得以推广应用。

参考文献:

- [1] 港工混凝土技术规范: JTB 2003—1963[S]. 北京: 人民交通出版社, 1963.
Technical specification for harbor concrete: JTB 2003-1963[S]. Beijing: China Communications Press, 1963.
- [2] 李俊毅. 硬化混凝土气泡间距系数的临界值[J]. 港口工程, 1997(3): 27-29.
LI J Y. Critical values of air bubble spacing coefficients of hardened concrete [J]. Harbour engineering, 1997 (3): 27-29.
- [3] 陈蔚凡. 关于保证混凝土耐久性若干问题的建议[C]//中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土分会混凝土耐久性专业委员会. 第五届全国混凝土耐久性学术交流会议论文集. 北京: 中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土分会混凝土耐久性专业委员会, 2000: 24-27.
CHEN W F. Some suggestions on ensuring durability of concrete[C]//Concrete and Prestressed Concrete Branch Concrete Durability Professional Committee for China Civil Engineering Society. Proceedings of the 5th National Concrete Durability Academic Exchange Conference. Beijing: Concrete and Prestressed Concrete Branch Concrete Durability Professional Committee for China Civil Engineering Society, 2000: 24-27.
- [4] 李金玉, 杜小春. 气泡性质对混凝土抗冻性影响的

- 研究[J]. 水力发电, 1990(1): 35-38.
- LI J Y, DU X C. Study on effect of bubble properties on frost resistance of concrete [J]. Water power, 1990 (1): 35-38.
- [5] 李俊毅. 60年来港工混凝土施工规范发展状况及几点建议[J]. 水运工程, 2023(9): 188-197.
- LI J Y. Development status and some recommendations for code of port concrete construction in 60 years[J]. Port & waterway engineering, 2023(9): 188-197.
- [6] 混凝土结构耐久性设计标准: GB/T 50476—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- Code for durability design of concrete structures: GB/T 50476-2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [7] 混凝土结构耐久性设计标准: GB/T 50476—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- Standard for design of concrete structuredurability: GB/T 50476-2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [8] 水工混凝土耐久性技术规范: DL/T 5241—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- Technical specifications for durability of hydraulic concrete: DL/T 5241-2010 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [9] 水工混凝土施工规范: DL/T 5144—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- Specifications for hydraulic concrete construction: DL/T 5144-2015[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [10] 铁路混凝土结构耐久性设计规范: TB 10005—2010[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
- Code for durability design on concrete structure of railway: TB 10005-2010 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2010.
- [11] 铁路混凝土工程施工质量验收标准: TB 10424—2018[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
- Standard for acceptance of concrete works in railway: TB 10424-2018 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018.
- [12] 铁路混凝土: TB/T 3275—2018[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
- Concrete for railway construction: TB/T 3275-2018 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018.
- [13] 铁路混凝土工程施工质量验收标准: TB 10424—2010[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
- Standard for constructional quality acceptance of railway concrete engineering: TB 10424-2010[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2010.
- [14] 铁路混凝土: TB/T 3275—2011[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.
- Concrete for railwayconstruction: TB/T 3275-2011 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2011.
- [15] 港口工程混凝土试验方法(试行)[S]. 北京: 人民交通出版社, 1981.
- Test method for concrete for port engineering (trial) [S]. Beijing: China Communications Press, 1981.
- [16] 港口工程技术规范 混凝土试验: JTJ 225—1987[S]. 北京: 人民交通出版社, 1987.
- Technical specifications for port engineeringconcrete test: JTJ 225-1987 [S]. Beijing: China Communications Press, 1987.
- [17] 水运工程混凝土试验规程: JTJ 270—1998[S]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- Testing code of concrete for port and waterway engineering: JTJ 270-1998[S]. Beijing: China Communications Press, 1998.
- [18] 水运工程混凝土试验检测技术规范: JTS/T 236—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
- Technical specifications for concrete testing of port and waterwayengineering: JTS/T 236-2019 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.
- [19] 水运工程混凝土结构实体检测技术规程: JTS 239—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- Technical specification for solid inspection of concrete structure in port and waterwayengineering: JTS 239-2015 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.
- [20] 交通运输部办公厅. 交通运输部办公厅关于做好公路水运工程质量检测机构资质评审有关工作的通知(交办安监函〔2024〕1432号)[A/OL]. (2024-08-01)

- [2024-08-02]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/aqyzjlglj/202408/t20240801_4145718.html.
- General Office of the Ministry of Transport. Notice of the General Office of the Ministry of Transport on the qualification evaluation of highway and water transport engineering quality inspection institutions (submit a safety supervision letter[2024]1432)[A/OL]. (2024-08-01)[2024-08-02]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/aqyzjlglj/202408/t20240801_4145718.html.
- [21] Standard test method for microscopical determination of parameters of the air-void system in hardened concrete: ASTM C457-71[S]. West Conshohocken: ASTM, 1971.
- [22] 覃维祖. ASTM C457-71 硬化混凝土含气量和气孔参数显微镜测定标准方法[R]. 北京: 交通部公路科学研究所, 1981.
- QIN W Z. ASTM C457-71 standard recommended practice for microscopical determination of air-void content and parameters of the air-void system in hardened concrete [R]. Beijing: Research Institute on Highway for Ministry of Communications, 1981.
- [23] POWERS T C. Air requirement of frost-resistant concrete [J]. Highway research board proceedings, 1949, 29: 184-211.
- [24] Standard test method for microscopical determination of parameters of the air-void system in hardened concrete: ASTM C457/C457M-16 [S]. West Conshohocken: ASTM, 2017.
- [25] 徐定华, 徐敏. 混凝土材料学概论[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 224-227.
- XU D H, XU M. Introduction to concrete material science[M]. Beijing: Standards Press of China, 2002: 224-227.
- [26] WARREN C. Determination of properties of air voids in concrete[J]. Highway research board bulletin, 1953, 70: 1-10.
- [27] ACI. Guide to durable concrete: ACI 201. 2R-16[R]. Farmington Hills: ACI, 2016.
- [28] ACI. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete: ACI 211.1-91[R]. Farmington Hills: ACI, 1991.
- [29] SNYDER K A. Estimating the 95th percentile of the paste-void spacing distribution in hardened cement paste containing air entrainment[C]//RILEM. Proceedings of International RILEM Workshop on Frost Damage in Concrete (PRO 25). Paris: RILEM, 1999: 75-85.
- [30] 曹建国, 李金玉, 林莉, 等. 高抗冻和超抗冻混凝土的开发与应用[C]//中国硅酸盐学会. 水泥基复合材料科学与技术: 吴中伟院士从事科教工作六十年学术讨论会论文集. 北京: 中国建材工业出版社, 1999: 184-187.
- CAO J G, LI J Y, LIN L, et al. Development and application of high freeze-thaw resistant and super freeze-thaw resistant concrete [C]//The Chinese Ceramic Society. Science and Technology of Cement-based Composite Materials: Proceedings of the Symposium of Academician Wu Zhongwei Engaged in Science and Education for 60 Years. Beijing: China Building Material Industry Publishing House, 1999: 184-187.
- [31] 水工混凝土试验规程: SD 105—1982[S]. 北京: 水利水电出版社, 1982.
- Test code for hydraulic concrete: SD 105-1982 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 1982.
- [32] 水工混凝土试验规程: SL 352—2006[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- Test code for hydraulic concrete: SL 352-2006 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2006.
- [33] 水工混凝土试验规程: SL/T 352—2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- Test code for hydraulic concrete: SL/T 352-2020 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2020.
- [34] 水工混凝土试验规程: DL/T 5150—2001[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- Test code for hydraulic concrete: DL/T 5150-2001 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [35] 水工混凝土试验规程: DL/T 5150—2017[S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- Test code for hydraulic concrete: DL/T 5150-2017 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2017.

- [36] 铁路工程混凝土实体质量检测技术规程: TB 10433—2023[S]. 北京: 中国铁道出版社有限公司, 2023.
- Technical specification for quality inspection of in-situ concrete in railway engineering: TB 10433-2023 [S]. Beijing: China Railway Publishing House Co., Ltd., 2023.
- [37] 公路水泥混凝土路面施工技术规范: JTG F30—2003[S]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- Technical specification for construction of highway cement concrete pavements: JTG F30-2003 [S]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [38] 公路水泥混凝土路面施工技术细则: JTG/T F30—2014[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- Technical guidelines for construction of highway cement concrete pavements: JTG/T F30-2014[S]. Beijing: China Communications Press, 2014.
- [39] 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程: JTG 3420—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
- Testing methods of cement and concrete for highway engineering: JTG 3420-2020 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2021.
- [40] HOVER K. Why is there air in concrete? [J]. Concrete construction, 1993, 38(1): 11, 13, 15.
- [41] Report on chemical admixtures for concrete: ACI 212. 3R-16[S]. Farmington Hills: ACI, 2016.
- [42] Admixtures for concrete, mortar and grout-test methods-part 11: determination of air void characteristics in hardened concrete: BS EN 480-11: 2005 [S]. London: BSI, 2005.
- [43] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 筑港科研五十年: 中交天津港湾工程研究院有限公司发展史 1959—2009[R]. 天津: 中交天津港湾工程研究院有限公司, 2009.
- CCCC Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd. Fifty years of scientific research in port construction: history of CCCC Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd. from 1959 to 2009 [R]. Tianjin: CCCC Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd., 2009.
- [44] 范沈抚. 硬化混凝土气泡结构性质的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 1993(2): 24-26.
- FAN S F. Experimental study on air-void properties of hardened concrete [J]. China concrete and cement products, 1993(2): 24-26.
- [45] 港口工程混凝土试验方法编制组. 港口工程混凝土试验方法: 编制说明[R]. 天津: 港口工程混凝土试验方法编制组, 1979.
- Drafting group of test method for concrete for port engineering. Test method for concrete for port engineering: compilation illustration [R]. Tianjin: Drafting group of test method for concrete for port engineering, 1979.
- [46] 交通部第一航务工程局科学研究所. 港口工程混凝土试验方法专题研究报告: 硬化混凝土气泡性质对抗冻性的影响[R]. 天津: 交通部第一航务工程局科学研究所, 1978.
- Scientific Research Institute of the First Harbor Engineering Bureau for Ministry of Transport. Special research report on test method for concrete for port engineering: Effect of air-void properties on frost resistance of hardened concrete [R]. Tianjin: Scientific Research Institute of the First Harbor Engineering Bureau for Ministry of Transport, 1978.
- [47] 海岸工程混凝土结构耐久性技术标准: GB/T 51464—2024[S]. 北京: 中国计划出版社, 2024.
- Technical standard for concrete structure durability of coastal engineering: GB/T 51464-2024[S]. Beijing: China Planning Press, 2024.
- [48] 陈歆, 李立辉, 刘旭, 等. 我国现行规范中混凝土气泡参数计算方法的问题与建议[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(4): 1220-1227.
- CHEN X, LI L H, LIU X, et al. Problems and suggestions on computing methods of air-void characteristics of concrete in current domestic codes [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(4): 1220-1227.

(本文编辑 王璁)