

**T/CECS XXX-202X**

中国工程建设标准化协会标准

**冰壳结构技术规程**

Technical specification for ice shell structures

（征求意见稿）

中国××出版社

**中国工程建设标准化协会标准**

**冰壳结构技术规程**

Technical specification for ice shell structures

**CECS XXX：202X**

|  |  |
| --- | --- |
| 主编单位： | 哈尔滨工业大学 |
| 批准单位： | 中国工程建设标准化协会 |
| 施行日期： | 202X年XX月XX日 |

中国计划出版社

**202X 北京**

中国工程建设标准化协会公告

第XXX号

关于发布《冰壳结构技术规程》的公告

根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2020年第二批协会标准制订、修订计划>的通知》（建标协字〔2020〕23号）的要求，由哈尔滨工业大学等单位编制的《冰壳结构技术规程》，经本协会混凝土结构专业委员会组织审查，现批准发布，编号为CECS XXX：202X，自202X年XX月XX日起施行。

中国工程建设标准化协会

二〇二X年XX月XX日

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2020年第二批协会标准制订、修订计划>的通知》（建标协字〔2020〕23号）的要求，标准编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国内外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本标准。

本标准共分为9章和6个附录，主要技术内容包括：总则、术语和符号、基本规定、材料、建筑设计、结构设计、模板系统设计、冰壳施工、运维与拆除。

本标准由中国建设标准化协会轻型钢结构专业委员会归口管理，由哈尔滨工业大学（地址：黑龙江省哈尔滨市南岗区西大直街92号，邮政编码：150001）负责解释。在使用过程中如有建议或发现需要修改和补充之处，请将意见和相关资料寄至解释单位。

**主编单位：**哈尔滨工业大学

**参编单位：**北京工业大学

东南大学

哈尔滨工程大学

天津大学

东北电力大学

太原理工大学

中国建筑第八工程局有限公司

哈尔滨工业大学建筑设计研究院有限公司

黑龙江省琼冰建筑设计有限公司

深圳市博德维环境技术股份有限公司

宁波赛德膜结构工程有限公司

广东坚朗五金制品股份有限公司

**主要起草人：**武 岳 刘秀明 陈昭庆 冯若强 黄俊凯

康秀光 李东方 李清朋 李天娥 李雄彦

刘 京 娄晓楠 罗 鹏 平 立 曲 嘉

任俊超 孙健峰 王 秦 吴 浩 武 婷

杨佳奇 张清文 周光毅

**主要审查人：**

目 次

[**1** 总则 1](#_Toc148730280)

[**2** 术语和符号 2](#_Toc148730281)

[2.1 术语 2](#_Toc148730282)

[2.2 符号 3](#_Toc148730283)

[**3** 基本规定 5](#_Toc148730284)

[3.1 建筑设计 5](#_Toc148730285)

[3.2 结构设计 5](#_Toc148730286)

[3.3 其他 6](#_Toc148730287)

[**4** 材料 8](#_Toc148730288)

[4.1 冰材料制备 8](#_Toc148730289)

[4.2 冰材料物理性能 9](#_Toc148730290)

[4.3 冰材料力学性能 11](#_Toc148730291)

[**5** 建筑设计 17](#_Toc148730292)

[5.1 建筑选址与场地规划 17](#_Toc148730293)

[5.2 形体设计 19](#_Toc148730294)

[5.3 空间设计 20](#_Toc148730295)

[5.4 照明与亮化设计 22](#_Toc148730296)

[5.5 室内环境设计 23](#_Toc148730297)

[**6** 结构设计 28](#_Toc148730298)

[6.1 荷载与荷载组合 28](#_Toc148730299)

[6.2 结构分析 31](#_Toc148730300)

[6.3 构造设计 32](#_Toc148730301)

[6.4 基础设计 33](#_Toc148730302)

[**7** 模板系统设计 35](#_Toc148730303)

[7.1 柔性模板 35](#_Toc148730304)

[7.2 刚性模板 38](#_Toc148730305)

[**8** 冰壳施工 39](#_Toc148730306)

[8.1 施工组织与施工安全 39](#_Toc148730307)

[8.2 模板施工 39](#_Toc148730308)

[8.3 浇筑和喷射施工 40](#_Toc148730309)

[8.4 施工监测 42](#_Toc148730310)

[8.5 模板拆除 43](#_Toc148730311)

[8.6 工程质量验收 44](#_Toc148730312)

[**9** 维护与拆除 47](#_Toc148730313)

[9.1 维护 47](#_Toc148730314)

[9.2 运维监测 48](#_Toc148730315)

[9.3 拆除 50](#_Toc148730316)

[附录A 冰材料试验方法 53](#_Toc148730317)

[附录B 冰材料本构关系 56](#_Toc148730318)

[附录C 热力耦合分析方法 60](#_Toc148730319)

[附录D 回弹法检测冰材料抗压强度 61](#_Toc148730320)

[附录E 工程质量验收记录 69](#_Toc148730321)

[附录F 冰壳日常维护记录表 71](#_Toc148730322)

[本标准用词说明 72](#_Toc148730323)

[引用标准名录 73](#_Toc148730324)

[附：条文说明 74](#_Toc148730325)

Contents

[1 General Provisions](#_Toc30078) 1

[2 Terms and Sympols 2](#_Toc7540)

[2.1 Terms 2](#_Toc14491)

[2.2 Sympols 3](#_Toc12368)

[3 Basic Requirements 5](#_Toc14175)

[3.1 Architectural Design 5](#_Toc14491)

[3.2 Structural Design 5](#_Toc12368)

[3.3 Others 6](#_Toc12368)

[4 Materials 8](#_Toc8207)

[4.1 Preparation of Ice Materials 8](#_Toc14491)

[4.2 Physical properties of Ice Materials 9](#_Toc12368)

[4.3 Mechanical properties of Ice Materials 11](#_Toc14491)

[5 Architectural Design](#_Toc11458) 17

[5.1 Location and Planning of Site 17](#_Toc14491)

[5.2 Shape Design 19](#_Toc12368)

[5.3 Space Design 20](#_Toc14491)

[5.4 Illumination Design 22](#_Toc14491)

[5.5 Interior Environment Design 23](#_Toc12368)

[6 Structural Design](#_Toc11458) 28

[6.1 Loads and Combination of Loads 28](#_Toc12368)

[6.2 Structural Analysis 31](#_Toc14491)

[6.3 Detailing Design 32](#_Toc12368)

[6.4 Foundation Design 33](#_Toc12368)

[7 Design of Formwork System 35](#_Toc11458)

[7.1 Flexible Formwork 35](#_Toc12368)

[7.2 Rigid Formwork 38](#_Toc14491)

[8 Construction of Ice Shell 39](#_Toc11458)

[8.1 Construction Organization and Safety 39](#_Toc12368)

[8.2 Construction of Formwork 39](#_Toc12368)

[8.3 Pouring and Spraying Construction 40](#_Toc14491)

8.4 Construction Monitoring 42

[8.5 Demolition of Formwork 43](#_Toc14491)

[8.6 Acceptance Check 44](#_Toc12368)

[9 Maintenance and Demolition 47](#_Toc11458)

[9.1 Maintaining 47](#_Toc14491)

[9.2 Structural monitoring 48](#_Toc12368)

[9.3 Demolition 50](#_Toc14491)

[Appendix A Test Methods of Ice Materials](#_Toc15054) 53

[Appendix B Constitutive Relation of Ice Materials](#_Toc15054) 56

[Appendix C Method of Thermo-mechanical Coupling Analysis](#_Toc15054) 60

[Appendix D Rebound Method for Testing the Compressive Strength of Ice Materials](#_Toc15054) 61

[Appendix E Record of Engineering Quality Acceptance](#_Toc15054) 69

[Appendix F Daily Maintenance Record of Ice Shell](#_Toc15054) 71

[Explanation of Wording in This Standard](#_Toc15054) 72

List of the Quoted Standards......................................................... 73

Addition: Explanation of provisions......................................................... 74

# **1** 总则

**1.0.1** 为适应冰雪建筑结构的发展需要，做到技术先进、安全适用、经济合理、确保质量，制定本规程。

**1.0.2** 本规程适用于采用复合冰材料建造的冰壳结构的设计、施工、验收、维护及拆除。

**1.0.3** 冰壳结构的设计、施工、验收、维护及拆除，除应符合本规程的规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

# **2** 术语和符号

## 2.1 术语

**2.1.1** 纯冰 pure ice

淡水在自然环境或人工制冷条件下冻结而成的冰体。

**2.1.2** 复合冰 fiber reinforced ice

在水中掺入纤维或其他材料冻结成的冰材料，在本规程中特指纸浆纤维复合冰材料。

**2.1.3** 纤维配合比 fiber content

复合冰中纤维与水的质量比。

**2.1.4** 壳体结构 shell structure

厚度远小于结构跨度的连续型空间曲面结构。

**2.1.5** 复合冰壳 fiber reinforced ice shell

用复合冰材料通过浇筑冻结或其他方式建造的壳体结构。

**2.1.6** 冰壳建筑 ice shell buildings

以复合冰壳为主要承重体系的建筑。

**2.1.7** 厚径比 thickness – radius radio

冰壳截面上某点处的厚度与该点处最小曲率半径之比。

**2.1.8** 喷射施工 spraying construction

通过在临时性施工模板表面喷射水溶液，逐层冻结形成冰壳结构的施工方法。

**2.1.9** 柔性模板 flexible formwork

采用索网、织物、膜材等抗弯刚度较小的材料作为冰壳结构的临时性施工模板。

**2.1.10** 刚性模板 rigid formwork

采用木板、型钢等抗弯刚度较大的材料作为冰壳结构的临时性施工模板。

**2.1.11** 施工监测 construction monitoring

在施工阶段进行的针对模板系统及冰壳结构的监测。

**2.1.12** 运维监测 operation and maintenance monitoring

在运营维护阶段进行的针对冰壳结构的健康监测。

## 2.2 符号

**2.2.1** 材料性能

*f*cm*、f*ck*、f*c ——冰材料轴心抗压强度平均值、标准值、设计值；

*f*tm*、f*tk*、f*t .——冰材料轴心抗拉强度平均值、标准值、设计值；

*f*vm*、f*vk*、f*v ——冰材料抗剪强度平均值、标准值、设计值；

*E* ——冰材料弹性模量；

*ρ*p——纯冰密度；

*ρ*f——复合冰密度；

*ω*——复合纤维含量；

**2.2.2** 作用和作用效应

*S*——雪荷载标准值；

*G*——恒荷载标准值；

*W*——风荷载标准值；

*T*——冰壳结构的均匀温度作用；

*T*f——冰壳结构的非均匀温度作用；

*G*i ——冰环梁基础自重标准值；

*F*b ——气膜模板最大工作压力下引起的上浮力；

**2.2.3** 计算系数及其他

*α* —— 线膨胀系数；

*c* —— 比热容；

*λ* —— 导热系数；

*δ* —— 变异系数；

*a* —— 单轴受压应力-应变曲线拟合参数；

*b* —— 单轴受压应力-应变曲线拟合参数；

*k* —— 上浮力验算安全系数。

# **3** 基本规定

## 3.1 建筑设计

**3.1.1** 冰壳建筑设计应符合现行国家标准《冰雪景观建筑技术标准》GB51202的有关规定。

**3.1.2** 冰壳建筑周边应留有足够的空间，满足人员集散与观赏等使用要求，场地设计应综合考虑功能布局、交通组织，以及自然环境对冰壳的影响。

**3.1.3** 冰壳建筑形体设计应满足建筑空间和建筑功能的需要，且宜通过形体设计优化建筑与结构性能。

[条文说明] 3.1.3 冰壳建筑的材料抗压性能较好，抗拉抗弯性能较差，在进行形体设计时应考虑结构的主要受力形式，合理选择符合材料性能的结构形态。

**3.1.4** 冰壳建筑的结构选型应根据环境条件、建筑需要和建造方式等因素综合分析确定。

**3.1.5** 冰壳建筑的灯光配置应根据美学要求、使用功能、形体特征、材料质感等进行设计，且不应影响结构安全。

**3.1.6** 应在充分考虑冰壳建筑功能需求的前提下，实施必要的室内环境设计，满足使用者人体健康所需的热湿环境及空气品质要求。

## 3.2 结构设计

**3.2.1** 冰壳结构设计应符合现行国家标准《冰雪景观建筑技术标准》GB51202的相关规定，并应根据建筑物的性质、重要程度﹑使用功能和地区自然条件等进行设计。

**3.2.2** 冰壳结构及其构件的安全等级不应低于二级，结构重要性系数取1.0。

**3.2.3** 冰壳结构的可变作用应采用5年设计基准期。

[条文说明] 3.2.3 考虑到冰壳结构为季节性、临时性结构，因此规定冰壳结构的可变作用按5年确定。

**3.2.4** 冰壳结构的受力方式应以薄膜压力为主，减少受拉、受弯和受剪等受力方式，且应避免集中荷载、冲击荷载和高温作用。

**3.2.5** 冰壳结构的跨度不宜大于30m，高度不宜大于20m，否则应进行专项分析。

**3.2.6** 冰壳结构的矢跨比不宜小于1/8，也不宜大于4/5。

**3.2.7** 冰壳结构在荷载标准组合作用下，挠度不应大于结构跨度的1/400，最大水平侧移不应大于结构高度的1/250。

## 3.3 其他

**3.3.1** 冰壳结构可采用刚性模板支承系统或柔性模板支承系统。

**3.3.2** 柔性模板可选用气膜模板、索网模板或柔性织物组合模板形式。

**3.3.3** 模板荷载效应分析时可不考虑温度作用和地震作用的影响。

**3.3.4** 刚性模板和柔性模板为冰壳结构施工阶段的临时模板，冰壳结构的内力和变形计算可不考虑二者的影响。

**3.3.5**  当冰壳结构的跨度大于20m或高度大于15m时，宜进行施工期间和运维期间监测。

[条文说明] 3.3.5 施工期间监测应以施工安全或工程质量控制为基准，使用期间监测应以结构正常使用极限状态或结构安全性为基准。

# **4** 材料

## 4.1 冰材料制备

**4.1.1** 复合冰材料的制备应包括选材、浸泡、搅拌、冷却、冻结等过程。

**4.1.2** 复合冰材料的制备应选用吸水性好、可均匀分布于水中且不会对环境产生二次污染的纤维材料。

[条文说明] 4.1.2 复合冰材料制备时纤维材料可选用纸浆纤维、木屑、秸秆、羧甲基纤维素、竹纤维等材料，宜采用纸浆纤维材料。

**4.1.3** 冰壳结构中纤维材料配合比宜控制在2%~6%，不应小于1%或大于8%。

**4.1.4** 复合冰材料的制备用水应符合下列规定：

**1** pH值应控制在0.6~0.8；

**2** 氯离子含量不得超过1000mg/L；

**3** 地表水、地下水、再生水在首次使用时应检测放射性。

[条文说明] 4.1.4 复合冰材料的制备用水应控制pH和氯离子含量，减少对周边环境、设备用品及使用人员的危害。地表水、地下水、再生水的放射性应符合现行国家标准《生活饮用水卫生标准》GB 5749的规定。

**4.1.5** 复合纤维水溶液制备应符合下列规定：

**1** 材料用量应按质量计，称重的精度应控制在±0.5%以内；

**2** 应选用电动搅拌装置对纤维材料进行充分粉碎，纤维浸泡时间和搅拌时间均不宜小于15分钟。

**4.1.6** 复合纤维水溶液搅拌完成后，宜置于室外冷却池中冷却到10℃以下待用。

**4.1.7** 复合纤维水溶液宜在-10℃以下通过喷射或浇筑方式冻结形成冰材料。

## 4.2 冰材料物理性能

**4.2.1** 冰材料的基本物理性能应按表4.2.1的规定取值。

表4.2.1 冰材料的基本物理性能

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 类型 | 平均密度*ρ*（kg/m3） | 摩擦系数*μ* | 泊松比*ν* |
| 纯冰 | 920 | 0.1 | 0.3 |
| 复合冰 | 900 | 0.1 | 0.3 |

[条文说明] 4.2.1 复合冰材料的摩擦系数和泊松比由于没有实测数据，暂时按照纯冰取值。当有可靠试验依据时，可根据实测数据确定。

**4.2.2** 冰材料的热力学性能应按表4.2.2的规定取值。

表4.2.2 冰材料的热力学性能

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 类型 | 线膨胀系数*α*i（/℃） | 导热系数*k*（W/(m×K)） | 比热容*c*（J/(kg·K) | 融化潜热*λ*（J/kg） | 太阳辐射吸收系数*α*s |
| 纯冰 | 52.7×10-6 | 2.30 | 2.10×103 | 334.3×103 | 0.25 |
| 复合冰 | 50.0×10-6 | 1.42 | 1.96×103 | 327.6×103 | 0.32 |

[条文说明] 4.2.1~4.2.2 表4.2.2中的试验数据为纤维含量为2%的复合冰材料在-15℃下的测试结果。对于其他复合冰材料，当有可靠试验依据时，可根据实测数据确定。

1 纤维含量为2%的复合冰的导热系数按下式计算：



式中：*k*——复合冰的导热系数（W/(m×K)）；

*T*——冰温度（℃）。

2 纤维含量为2%的复合冰的比热容按下式计算：



式中：*c*——复合冰的比热容（J/(kg·K)）；

*T*——冰温度（℃）。

**4.2.3** 纯冰的升华速率应按表4.2.3的规定取值。

表4.2.3 纯冰升华速率（mm/d）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 风速（m/s） | 温度分级（℃） | | | | | | | | | | | |
| -5 | | | -10 | | | -15 | | | -20 | | |
| 湿度（%） | | | | | | | | | | | |
| 30 | 50 | 70 | 30 | 50 | 70 | 30 | 50 | 70 | 30 | 50 | 70 |
| 0 | 0.18 | 0.13 | 0.08 | 0.12 | 0.09 | 0.05 | 0.08 | 0.06 | 0.03 | 0.05 | 0.03 | 0.02 |
| 2.5 | 1.82 | 1.30 | 0.78 | 1.19 | 0.85 | 0.51 | 0.76 | 0.54 | 0.33 | 0.48 | 0.34 | 0.21 |
| 4.5 | 3.12 | 2.23 | 1.34 | 2.04 | 1.46 | 0.87 | 1.31 | 0.93 | 0.56 | 0.83 | 0.59 | 0.35 |
| 6.5 | 4.43 | 3.16 | 1.90 | 2.89 | 2.06 | 1.24 | 1.86 | 1.33 | 0.80 | 1.17 | 0.84 | 0.50 |
| 8.5 | 5.73 | 4.09 | 2.46 | 3.74 | 2.67 | 1.60 | 2.40 | 1.72 | 1.03 | 1.52 | 1.08 | 0.65 |

[条文说明] 4.2.3 纯冰的升华速率按下式进行取值：



式中：*S*p——纯冰升华速率（mm/d）；

*T*b——表面温度（℃）；

*U*——表面相对湿度；

*v*——表面风速（m/s）。

**4.2.4** 纸浆纤维复合冰材料的升华速率应按表4.2.4的规定取值。

表4.2.4 2%纸浆纤维复合冰升华速率（mm/d）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 风速（m/s） | 温度分级（℃） | | | | | | | | | | | |
| -5 | | | -10 | | | -15 | | | -20 | | |
| 湿度（%） | | | | | | | | | | | |
| 30 | 50 | 70 | 30 | 50 | 70 | 30 | 50 | 70 | 30 | 50 | 70 |
| 0 | 0.24 | 0.17 | 0.10 | 0.16 | 0.11 | 0.07 | 0.10 | 0.07 | 0.04 | 0.06 | 0.05 | 0.03 |
| 2.5 | 1.21 | 0.86 | 0.52 | 0.79 | 0.56 | 0.34 | 0.51 | 0.36 | 0.22 | 0.32 | 0.23 | 0.14 |
| 4.5 | 1.98 | 1.41 | 0.85 | 1.29 | 0.92 | 0.55 | 0.83 | 0.59 | 0.36 | 0.52 | 0.37 | 0.22 |
| 6.5 | 2.75 | 1.97 | 1.18 | 1.80 | 1.28 | 0.77 | 1.15 | 0.82 | 0.49 | 0.73 | 0.52 | 0.31 |
| 8.5 | 3.53 | 2.52 | 1.51 | 2.30 | 1.65 | 0.99 | 1.48 | 1.06 | 0.63 | 0.93 | 0.67 | 0.40 |

[条文说明] 4.2.4 表4.2.4中复合冰升华速率的数据是以纤维含量为2%的纸浆纤维复合冰测试获得。对于其他纤维含量或其他材料增强的复合冰材料，当有可靠试验依据时，可根据实测数据确定；如没有可靠试验依据，可参考表4.2.4中数据。纤维含量为2%的纸浆纤维复合冰的升华速率按下式进行取值：



式中：*S*f——复合冰升华速率（mm/d）；

*T*b——表面温度（℃）；

*U*——表面相对湿度；

*v*——表面风速（m/s）。

## 4.3 冰材料力学性能

**4.3.1** 材料基本力学强度测试方法应符合附录A的规定。

**4.3.2** 采用纸浆纤维制备的复合冰材料的轴心抗压、轴心抗拉和抗剪强度的平均值，应按表4.3.2的规定取值。

表4.3.2 纸浆纤维复合冰抗压、抗拉和抗剪强度极限值（MPa）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 纤维配比（%） | 温度（℃） | | | | | | | | | | | |
| -5 | | | -10 | | | -15 | | | -20 | | |
| 抗压  强度 | 抗拉  强度 | 抗剪  强度 | 抗压  强度 | 抗拉  强度 | 抗剪  强度 | 抗压  强度 | 抗拉  强度 | 抗剪  强度 | 抗压  强度 | 抗拉  强度 | 抗剪  强度 |
| 1 | 2.47 | 0.60 | 0.62 | 3.86 | 0.74 | 0.87 | 4.60 | 0.82 | 1.14 | 5.76 | 0.90 | 1.21 |
| 2 | 3.80 | 0.74 | 0.94 | 5.28 | 0.86 | 1.16 | 6.13 | 1.00 | 1.64 | 7.21 | 1.08 | 1.84 |
| 4 | 4.86 | 0.90 | 1.35 | 6.35 | 1.00 | 1.64 | 7.49 | 1.12 | 1.98 | 8.50 | 1.15 | 2.42 |
| 6 | 5.54 | 1.00 | 1.82 | 7.21 | 1.10 | 2.18 | 8.01 | 1.21 | 2.44 | 9.02 | 1.27 | 2.95 |

注：其他温度和纤维配合比的强度值可依据表中数据采用线性插值法确定。

[条文说明] 4.3.2 复合冰材料的强度极限值的平均值。

1 轴心抗压强度极限值的平均值试验曲线如图1所示：

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a）温度的影响 | （b）纤维含量的影响 |
| 图1 复合冰的轴心抗压强度极限值平均值试验曲线 | |

复合冰的轴心抗压强度经验公式为：



式中：——复合冰在不同温度和纤维含量下的轴心抗压强度平均值（MPa）;

——复合冰的温度（℃）；

——复合冰的纤维含量（%）。

2 轴心抗拉强度极限值的平均值试验曲线如图2所示：

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a）温度的影响 | （b）纤维含量的影响 |
| 图2 复合冰的轴心抗拉强度极限值平均值试验曲线 | |

复合冰的轴心抗拉强度经验公式为：



式中：——复合冰在不同温度和纤维含量下的轴心抗拉强度平均值（MPa）；

——复合冰的温度（℃）；

——复合冰的纤维含量（%）。

3 抗剪强度极限值的平均值试验曲线如图3所示：

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a）温度的影响 | （b）纤维含量的影响 |
| 图3 复合冰的抗剪强度极限值的平均值试验曲线 | |

复合冰的抗剪强度经验公式为：



式中：——复合冰在不同温度和纤维含量下的抗剪强度平均值（MPa）；

——复合冰的温度（℃）；

——复合冰的纤维含量（%）。

4 对于纯冰材料，可采用劈裂抗拉试验测试其抗拉强度；对于纸浆纤维复合冰材料，宜采用直接拉伸方法测试其轴心抗拉强度，如无试验条件进行直接拉伸试验，可采用劈裂抗拉试验并进行强度修正。冰材料轴心抗拉强度与劈裂抗拉强度的比值*α*：对纸浆纤维复合冰材料可取1.28。

**4.3.3** 采用纸浆纤维制备的复合冰材料的轴心抗压、轴心抗拉和抗剪强度标准值，应按表4.3.3的规定取值。

表4.3.3 纸浆纤维复合冰的抗压、抗拉和抗剪强度标准值（MPa）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 纤维配比（%） | 温度（℃） | | | | | | | | | | | |
| -5 | | | -10 | | | -15 | | | -20 | | |
| 抗压  强度 | 抗拉  强度 | 抗剪  强度 | 抗压  强度 | 抗拉  强度 | 抗剪  强度 | 抗压  强度 | 抗拉  强度 | 抗剪  强度 | 抗压  强度 | 抗拉  强度 | 抗剪  强度 |
| 1 | 1.86 | 0.45 | 0.47 | 2.91 | 0.56 | 0.66 | 3.46 | 0.62 | 0.86 | 4.34 | 0.68 | 0.91 |
| 2 | 2.86 | 0.56 | 0.71 | 3.98 | 0.65 | 0.87 | 4.62 | 0.75 | 1.24 | 5.43 | 0.81 | 1.39 |
| 4 | 3.66 | 0.68 | 1.02 | 4.78 | 0.75 | 1.24 | 5.64 | 0.84 | 1.49 | 6.40 | 0.87 | 1.82 |
| 6 | 4.17 | 0.75 | 1.37 | 5.43 | 0.83 | 1.64 | 6.03 | 0.91 | 1.84 | 6.79 | 0.96 | 2.22 |

注：其他温度和纤维配合比的强度值可依据表中数据采用线性插值法确定。

[条文说明] 4.3.3 复合冰的轴心抗压、轴心抗拉、抗剪强度标准值：

复合冰强度标准值按下式计算：



式中：*f*k ——复合冰强度标准值（MPa）；

*δ* ——变异系数，取为0.15；

*f*m ——复合冰强度极限值的平均值（MPa）。

**4.3.4** 采用纸浆纤维制备的复合冰材料的抗压、抗拉和抗剪强度设计值，应按表4.3.4的规定取值。

表4.3.4 纸浆纤维复合冰的抗压、抗拉和抗剪强度设计值（MPa）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 纤维配比（%） | 温度（℃） | | | | | | | | | | | |
| -5 | | | -10 | | | -15 | | | -20 | | |
| 抗压  强度 | 抗拉  强度 | 抗剪  强度 | 抗压  强度 | 抗拉  强度 | 抗剪  强度 | 抗压  强度 | 抗拉  强度 | 抗剪  强度 | 抗压  强度 | 抗拉  强度 | 抗剪  强度 |
| 1 | 1.13 | 0.27 | 0.28 | 1.76 | 0.34 | 0.40 | 2.10 | 0.38 | 0.52 | 2.63 | 0.41 | 0.55 |
| 2 | 1.73 | 0.34 | 0.43 | 2.41 | 0.39 | 0.53 | 2.80 | 0.45 | 0.75 | 3.29 | 0.49 | 0.84 |
| 4 | 2.22 | 0.41 | 0.62 | 2.90 | 0.45 | 0.75 | 3.42 | 0.51 | 0.90 | 3.88 | 0.53 | 1.10 |
| 6 | 2.53 | 0.45 | 0.83 | 3.29 | 0.50 | 0.99 | 3.65 | 0.55 | 1.12 | 4.12 | 0.58 | 1.35 |

注：其他温度和纤维配合比的强度值可依据表中数据采用线性插值法确定。

[条文说明] 4.3.4 复合冰的轴心抗压、轴心抗拉和抗剪强度设计值，取自于强度标准值。强度标准值除以材料分项系数*γ*f即为强度设计值。对于材料分项系数的取值，以千余组复合冰材料的单轴压缩、直接拉伸和剪切试验数据为基础，进行统计分析和可靠度分析，可靠度分析中考虑冰壳结构具有一定的进人性和功能性需求，结构重要性系数为1.0，目标可靠指标为3.7，并以可变荷载与永久荷载的比值为1进行分析，同时结合数值模拟和试验分析考虑冰壳施工造成的气泡缺陷以及分层缺陷的影响，材料分项系数*γ*f取1.65。

**4.3.5** 采用纸浆纤维制备的复合冰材料的弹性模量和剪切模量应按表4.3.5的规定取值。

表4.3.5 纸浆纤维复合冰的弹性模量和剪切模量（MPa）

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 纤维配比（%） | 温度（℃） | | | |
| -5 | -10 | -15 | -20 |
| 1 | 450/180 | 530/212 | 650/260 | 770/308 |
| 2 | 400/160 | 510/204 | 600/240 | 720/288 |
| 4 | 350/140 | 470/188 | 540/216 | 600/240 |
| 6 | 320/128 | 450/180 | 520/208 | 550/220 |

注：其他温度和纤维配合比的强度值可依据表中数据采用线性插值法确定。

[条文说明] 4.3.5 复合冰材料的弹性模量和剪切模量。

1 复合冰的弹性模量试验曲线如图4所示：

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a）温度的影响 | （b）纤维含量的影响 |
| 图4 复合冰的弹性模量试验曲线 | |

复合冰的弹性模量经验公式为：



式中：*E*——复合冰在不同温度和纤维含量下的弹性模量值（MPa）；

*T*——复合冰的温度（℃）；

*ω*——复合冰的纤维含量（%）。

2 纸浆纤维复合冰材料的剪切模量可按相应弹性模量的40%采用。

# **5** 建筑设计

## 5.1 建筑选址与场地规划

**5.1.1** 冰壳建筑选址应综合考虑地质条件、电力、交通、材料制备、施工要求等因素，并应保证人流疏散安全的条件。

[条文说明] 5.1.1 冰壳建筑的选址关乎后续一系列建设过程的开展。场地的地质条件与冰壳建筑的结构安全性密切相关，施工材料进场要求交通相对便利。在施工、运营和维护过程中电力、给排水等基础设施至关重要。冰壳建成投入使用后，完善的疏散条件是保证人群安全的必要因素。

**5.1.2** 冰壳建筑选址应对地基承载力进行评估，宜选择地基承载力较强的基地，并应保证地基安全稳定。

[条文说明] 5.1.2 冰壳建筑没有传统建筑中夯实地基等过程，所以对地基的原始承载力要求相对较高。应选择地基承载力较强的基地，并且对其进行地基承载力的评估。良好的地基是保证冰壳建筑结构安全的必要条件。

**5.1.3** 冰壳建筑选址宜选择平整度较高的基地，基地坡度应小于5%。基地内坡度较大时应进行找平处理，不宜选择地形过于复杂的基地。

[条文说明] 5.1.3 冰壳建筑的壳体形式决定了其适合选在平整度较高的基地，例如公园硬质铺地。在基地内坡度较大时，会影响冰壳建筑的结构性能。如果基地内坡度较大，应做找平处理，再进行下一步处理，保证冰壳结构安全。根据《民用建筑设计统一标准》GB50352中第5.6.1节第1条内容：当基地自然坡度小于 5%时，宜采用平坡式布置方式，当大于 8%时，宜采用台阶式布置方式，台地连接处应设挡墙或护坡。

**5.1.4** 冰壳建筑选址应选择距离热源较远的基地，并应保证基地内温度在冰壳结构安全温度范围内（-5℃以下），基地内不应存在热岛效应。

[条文说明] 5.1.4 冰壳建筑是由复合冰材料经过喷射施工而成。由于复合冰材料具有的热敏性特点，冰壳建筑应选择距离热源较远的基地，基地内不应存在热岛效应，并保证基地的气候温度在冰壳建筑结构安全范围之内，保证冰壳建筑结构安全。

**5.1.5** 冰壳建筑选址周边宜有完善的给水排水设施，并保证冰壳建筑给水便利和排水顺畅。

[条文说明] 5.1.5 冰壳建筑的施工建设过程中需要进行材料制备，其中需要大量的水与纸浆纤维进行加工搅拌。在喷射过程中，纸浆纤维与水的混合物不能立刻凝固，而会沿着充气膜表面向下流淌，所以基地中需要相对完善的给排水设施，在给排水设施不能满足的情况下，做冰围堰处理，从而保证冰壳建设施工。

**5.1.6** 冰壳建筑选址应符合环境保护法有关规定，避免冰壳建筑对植被等自然环境的破坏和对城市环境的污染。

[条文说明] 5.1.6 冰壳建筑本身由水与外掺纤维搅拌组成，属于可降解的环保材料。其选址也应符合环境保护法的有关规定，应在公园广场等硬化铺地的位置进行建设，避免冰壳建筑在绿色植被区域建设造成自然环境破坏和城市环境污染。

**5.1.7** 冰壳建筑布局应根据周边环境或冰雪园区总体规划要求，综合考虑周边建筑布局、交通组织、施工方法、艺术表达和功能实现等因素。

[条文说明] 5.1.7 在冰雪景观公园园区内规划建设的冰壳建筑应根据园区总体规划的要求，综合考虑周边建筑布局、通路、施工组织、艺术表达和功能实现等因素，进行综合性设计与建造。

**5.1.8** 冰壳建筑与基地周边既有建筑的距离应大于6m，不应影响其他建筑物的日照和采光，且不应妨碍既有建筑的消防和疏散。

[条文说明] 5.1.8 冰壳建筑作为临时性的建筑，其选址应当考虑冰壳建筑与周边建筑的距离，根据《民用建筑设计统一标准》GB50352中第4.2.3节第3、4条内容：当相邻基地的建筑物毗邻建造时，应符合现行国家标准《建筑设计防火规范》GB50016的有关规定；新建建筑物或构筑物应满足周边建筑物的日照标准。由此参考《建筑设计防火规范》：一二级与一二级民用建筑之间最小距离为6m，不应影响基地内其他建筑物的日照和采光。不应妨碍既有建筑的既有消防通道和消防扑救面等相关消防设施。

**5.1.9** 冰壳建筑布局应与自然环境条件相结合，组织好建筑与周边环境自然通风和采光的关系，防止对室外微气候环境产生不良影响。

## 5.2 形体设计

**5.2.1** 冰壳建筑形体设计应兼顾功能需求、结构安全、环境条件和艺术表达。

[条文说明] 5.2.1 冰壳建筑是一类在特殊环境和特殊使用需求下产生的具有独特建筑特征的建筑类型。其特殊性表现在与传统建筑相比材料力学性能差、对环境变化的敏感性强、同时存在强烈艺术表现力和使用功能的需求，因此在形体设计时应综合考虑以上因素的耦合作用。

**5.2.2** 冰壳建筑形体设计应兼顾建造工艺需求，不宜出现不易附着复合冰材料的形体。

[条文说明] 5.2.2 冰壳建筑目前主流的建造方式是以充气、张拉或组合等柔性模板为主，配合喷射复合纤维水溶液，在低温下冷冻成型。形体设计时应考虑建造的可行性。

**5.2.3** 冰壳建筑形体设计应考虑壳体服役期内外部气候环境的影响，应通过形态变化减少壳体表面直接受到太阳辐射的面积，易于清除表面积雪、降低表面风速。

[条文说明] 5.2.3 材料的性能不稳定，对气候变化的敏感性强是冰壳建筑的主要特征。主要影响气候因素包括：日照、风、降雪等。

**5.2.4** 冰壳建筑形体设计应与内外部环境有机结合，有利于室内外微气候环境的改善。

[条文说明] 5.2.4 冰壳建筑的形体应避免局部风环境的影响，有利于室内通风换气，合理利用自然光的同时通过自遮挡或转变朝向的方式防止日照辐射对壳体结构的破坏作用，在室内形成较为稳定的气候环境。

**5.2.5** 冰壳形体设计应满足不同建筑功能需求，并满足相应建筑类型的规范要求。

[条文说明] 5.2.5 室内使用功能是冰壳建筑的特征，形体设计应考虑具体活动的空间尺度、色彩等要素。

**5.2.6** 冰壳形体设计应考虑灯光布置效果，结合灯光布置突出建筑艺术特色。

[条文说明] 5.2.6 冰壳建筑的艺术表现是形体与灯光综合实现，形体设计时应综合考虑光源位置与表现形式。

**5.2.7** 复合冰材料与纯冰材料结合使用时，应综合考虑不同材料的力学性能与艺术特征，实现有机结合。

[条文说明] 5.2.7 复合冰材料与纯冰相比抗拉性能较好、稳定性较好，但艺术表现力较差。在组合使用时，应扬长避短，突出多种材料的优势特征，使其有机结合。

## 5.3 空间设计

**5.3.1** 冰壳建筑应根据低温条件与寒冷气候，综合考虑结构形式、空间高度、室内跨度等因素确定使用功能。

[条文说明] 5.3.1 冰壳建筑可依建筑选址与建造目的实现不同功能，如餐饮、特色活动体验、展览等。因其空间构成简单、最大跨度有限，不宜应对复杂功能。

**5.3.2** 冰壳建筑应根据使用功能和内部使用空间承载力合理确定使用人数。

**5.3.3** 冰壳建筑内部人流密度应控制在1人/m2以下，具体由建筑功能决定。冰壳建筑内部疏散通道和出入口宽度应根据使用人数计算，且建筑对外应急出口宽度不应小于1.2m，应急出口数量不宜少于2个。

[条文说明] 5.3.3 规范中无标定人数房间人员密度值如下（举例）：

表1 不同建筑的人员密度（人/m2）

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 建筑功能 | 展览建筑展厅 | 商场营业厅 | 放映厅 | 餐馆餐厅 |
| 人员密度 | 0.7 | 0.85 | 1.0 | 1.3 |

因冬季寒冷条件限制，冰壳建筑无标定人数房间人员密度计算宜在规范要求基础上，乘以一定修正系数，修正系数推荐为0.8。

**5.3.4** 对于人员密集的冰壳建筑，最远疏散距离不大于40m。冰壳建筑设计对于内部空间疏散距离的要求应符合现行国家标准《建筑设计防火规范》GB50016的有关规定

**5.3.5** 冰壳建筑内部空间主要人流疏散通道面应考虑防滑安全设计。

**5.3.6** 冰壳建筑内部空间界面设计应配合灯光效果，符合冰雪景观建筑美学要求。

**5.3.7** 冰壳建筑内灭火器配置的设计与计算应按计算单元进行并符合《建筑灭火器配置设计规范》GB50140的有关规定。灭火器最小需配灭火级别和最少需配数量的计算值应进位取整。

[条文说明] 5.3.7 根据《建筑灭火器配置设计规范》GB50140灭火器配置的设计与计算应按计算单元进行。冰壳建筑受结构影响，每栋建筑一般只有一个灭火器配置的计算区域。

## 5.4 照明与亮化设计

**5.4.1** 冰壳照明设计应以人为本，采用多种照明方式时，分清照明的主次，突出重点，兼顾一般，创造舒适和谐的光环境，形成整体艺术效果。

**5.4.2** 冰壳照明色彩、亮度、对比度和变化效果应符合冰壳建筑的设计主题和场景变化要求，并与周边环境相协调。

**5.4.3** 冰壳照明宜采用LED投光灯或泛光灯照明，可使用低饱和度的可变色投光灯。

**5.4.4** 冰壳外部照明的平均照度标准值宜为50lx，内部照明的平均照度标准值宜为100lx。对于采用激光投影仪或投影灯的照明场所，可适当降低对应照度。

**5.4.5** 选择照明方式时宜符合下列要求：

**1** 使用泛光照明时不宜采用大面积投光将被照面均匀照亮的方式；对冰壳内嵌冰材料或反射比低于0.2的其它材料，不应选用泛光照明；

**2** 冰壳外部照明宜以外投光为主，使用程序控制可变色投光灯，产生色彩变化效果；

**3** 冰壳内部照明宜采用间接照明方式，通过内部弧形立面投光反射光线照亮内部环境；

**4** 对内嵌冰门、窗等结构以及外立面透光面积较大的冰壳建筑，宜选用内透光照明；使用内透光照明应使内透光与环境光的亮度和光色保持协调，并应防止内透光产生光污染；

**5** 当采用激光投影仪、投影灯、水纹灯、火焰灯等有特殊表现功能的灯光时，应对照明的必要性、可行性进行论证。采用此类灯具时宜设置程序控制，并应使冰壳内部照明亮度降低或关闭；

**6** 有特殊使用要求的冰壳建筑，应按照其使用功能和相关规范进行单独的灯光设计。

**5.4.6** 照明灯具不宜直接安置在冰壳上，可通过支架隔离避免灯具外壳与冰壳直接接触。采用地面投光灯时，灯具应距其照射立面1米以上。

**5.4.7** 冰壳照明选用灯具及附件应符合相关安全规范，宜喷涂白色底漆。

**5.4.8** 置于冰壳附近的灯具及配件宜采用散热量较低的光源类型。

[条文说明] 5.4.8 可选用LED冷光源，避免灯具散热量较大引起冰材料融化，损坏冰壳结构。

**5.4.9** 灯具应具有防触电、防灼伤等安全结构，安装固定件应具有防脱落或倾倒的安全防护措施。

**5.4.10** 冰壳建筑应用于人员密度大的场所或夜间有人住宿的冰旅馆时，应设置应急照明和疏散指示标志。

## 5.5 室内环境设计

**5.5.1** 冰壳建筑室内环境控制指标包括室内温度、相对湿度、风速和冰壳内表面温度，不同场所室内人员活动区域内环境设计参数宜符合表5.5.1的规定要求。

表5.5.1 冰壳建筑不同场所室内环境指标

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 场所类型 | 室内温度（℃） | 室内相对湿度（%） | 室内风速（m/s） | 冰壳内表面温度（℃） |
| 酒店、旅馆 | -10~-5 | ≤85 | ≤0.2 | ＜-5 |
| 餐厅 | -15~-5 | ≤90 | ≤0.2 | ＜-5 |
| 酒吧 | -18~-5 | ≤85 | ≤0.2 | ＜-5 |
| 展览馆、博物馆 | -20~-5 | ≤85 | ≤0.2 | ＜-5 |

[条文说明] 5.5.1 冰壳建筑可依规划实现不同功能，如作为观赏类建筑或承担各类实际使用需求，应在充分考虑冰壳建筑功能性的前提下，对使用者可在内部停留并进行餐饮活动、休闲娱乐活动，住宿体验活动等的冰壳建筑实施必要的室内环境设计，满足使用者人体健康所需的热湿环境及空气品质要求。

国内外文献调研结果表明，在-25℃环境中持续暴露120分钟后，人体的平均体温将下降至35℃，而相关研究表明当平均体温降至32℃~35℃时，人体将出现寒战、心跳加速，呼吸急促、思维迟缓和代偿性构音障碍等轻度失温症状。考虑到人群在博物馆、展览馆的游览时间不会很长，一般少于120分钟，同时为保证人员健康，本规程在-25℃的基础上提升5℃，即以-20℃作为该类型建筑的室温下限。此外，研究显示人体温度调节系统可以在极冷环境（-5℃、-10℃、-15℃）暴露不到30分钟的情况下，将核心温度维持在一个非常窄的范围内，而在不戴手套的情况下，在-5℃、-10℃、-15℃环境中分别暴露20、18、15分钟以上时，手指的灵活性将受到影响，在-15℃的环境下暴露30分钟后，规范化轻度作业的手指性能将下降到79.56%。在餐厅中穿戴手套不便于进食活动的进行，然而高温的食物及饮品将为手指提供一定的热量补给，因此将餐厅类冰壳建筑的室内温度下限设置为-15℃。酒吧中的活动便于穿戴手套，因此温度下限设置为-18℃。在旅馆及酒店类冰壳建筑中，人员活动时间最久，且大部分时间集中于夜间的睡眠状态。考虑冰壳结构安全以及人员的较长暴露时间，为防止出现冷冻伤，本规程将酒店及旅馆类冰壳建筑的室内温度下限设置为-10℃。由于冰壳结构的温度敏感性，为减少过高的室内环境温度对围护结构内表面及内部温度分布的影响，留有一定程度的冗余保障结构安全，本规程将冰壳建筑的室内温度上限设置为冰融点以下5℃，即-5℃。

已有的调查表明在建成的冰壳建筑中，由于室内长期的低温环境，大量存在的冰面及人员活动的散湿，室内空气相对湿度处于较高水平，基本在65%~84%范围内波动。由于冰壳建筑非永久性的特点，且较低的室内环境温度使得即使冰面温度达到露点温度，水蒸气也将以结霜的形式从空气析出，对结构安全几乎无影响。因此，综合考虑初投资及建筑实际环境低温特点，本规程以85%的相对湿度作为室内空气相对湿度的上限。特别的，在作为餐厅使用的冰壳建筑中，可能存在食物以及汤汁加热带来的额外散湿，因此，将室内空气相对湿度的上限确定为90%。

由于冰壳建筑室内环境的低温特点，较高的风速会加剧人员不舒适感并加速人体散热，造成平均体温下降较快的结果。相关研究显示，在风速为1.0m/s的情况下，人体暴露在-10℃环境中30分钟后面部会有疼痛感，在风速为0.2m/s的情况下，暴露在-20℃的环境中25分钟后面部温度会降低到18℃，暴露在-15℃环境中30分钟后面部温度仍能维持18℃以上，暴露在-5℃的环境中80分钟后面部温度会降低到22℃，多个研究表明面部温度降低到18℃左右时开始报告疼痛感。综合考虑几类冰壳建筑的室内温度设计范围及已有研究结果，本规程规定各类冰壳建筑室内风速均应小于0.2m/s。

由于冰材料不同于常规建筑材料，其性能与温度强烈相关，在温度达到融点时发生相变，严重影响局部及整体结构的受力状态和性能，因此，为了保证结构安全，避免局部区域出现微融现象，冰壳内表面温度应严格控制在熔点以下，并留有一定安全储备，本规程将安全储备规定为5℃，即应保证冰壳内表面温度始终低于-5℃。

**5.5.2** 冰壳建筑宜采用局部供暖方式，餐厅、酒吧及旅馆、酒店等宜在人员固定活动区域设置方便启停控制的局部供暖设备，展览馆、博物馆等人员活动地点不固定场所可考虑单独设置取暖室，预计游览时间少于45分钟时也可不设置。

[条文说明] 5.5.2 与常规建材相比，冰壳结构总体上强度不足且力学性能具有强烈的温度敏感性，从安全角度考虑，冰壳建筑应避免大规模供暖设备的安装和使用，宜在人员固定活动区域采用局部供暖设备提升区域温度，且设备应方便启停控制，便于依据现场温度变化及时调节设备从而节能降耗。对于博物馆以及展览馆等人员活动地点不固定的场所，可考虑单独设置取暖室，预计游览时间少于45分钟时也可不设置。

**5.5.3** 供暖设备宜优先选用加热足垫、加热手套、加热坐垫等个性化设备，且使用时应配置垫板。

[条文说明] 5.5.3 已有的对冰壳建筑中人员整体及局部热感觉调查显示，在冰壳建筑中，脚部、手部局部身体更容易感觉到冷，进而在一定程度上影响了人体整体热感觉及热舒适。因此，宜优先考虑使用加热足垫、加热手套、加热坐垫等局部个性化加热装置及设备，快速改善冷不耐受部位热感觉与热舒适。为避免加热足垫、加热坐垫使用时热流向下传输导致的冰面升温，应配置垫板。

**5.5.4** 冰壳建筑应优先考虑利用自然通风满足室内人员新风量要求，维持室内空间正压，消除建筑内部产生的余热余湿。无法保证自然通风进排风口的设计面积或自然通风能力不足时，应采用机械通风进行补充，同时应考虑降低内部冰层升华速率措施。各种类型冰壳建筑要求最小新风量宜参考表5.5.4确定。

表5.5.4 不同类型冰壳建筑最小新风量要求（m³/h·人）

|  |  |
| --- | --- |
| 建筑类型 | 最小新风量 |
| 酒店、旅馆 | 30（客房）；10（大堂） |
| 餐厅 | 30（PF≤0.4）；25（0.4＜PF≤1.0）；23（PF＞1.0） |
| 酒吧 | 30（PF≤0.4）；25（0.4＜PF≤1.0）；23（PF＞1.0） |
| 博物馆、展览馆 | 19（PF≤0.4）；16（0.4＜PF≤0.7） |

注：PF表示人员密度，单位为人/m2。

[条文说明] 5.5.4 冰壳建筑应优先考虑利用自然通风满足室内人员新风量要求，维持室内空间正压，消除建筑内部产生的余热余湿，保证结构安全，降低通风能耗。自然通风进排风口面积可参考《实用供热空调设计手册》9.1.5中的公式进行计算，可借助CFD数值模拟方法评估自然通风潜力，根据建设地气象数据及风口布置，预测热压及风压协同作用下的自然通风量。无法保证自然通风进排风口的设计面积或自然通风能力不足时，应采用机械通风进行补充。

酒店及旅馆类冰壳建筑的客房及大堂设计新风量按照《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB50736-2012条文3.0.6公共建筑主要房间设计最小新风量确定，餐厅、酒吧等其他高密人群冰壳建筑的新风量依据人群密度按照《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB50736-2012表3.0.6-4中的要求确定。

**5.5.5** 冰壳建筑应结合建筑结构及布局优化室内气流组织设计，确定设备位置，防止人体所在区域噪声过大或气流直吹面部现象。

[条文说明] 5.5.5 在冰壳建筑设计气流组织时，可借助CFD数值模拟方法，对建筑内部区域流场模型进行求解，预测空气流动状况，进而优化室内气流组织，确定设备位置，以免人体所在区域噪声过大或气流直吹面部造成人体不舒适。

# **6** 结构设计

## 6.1 荷载与荷载组合

**6.1.1** 冰壳结构设计荷载包括自重荷载、雪荷载、风荷载和温度作用。

[条文说明] 6.1.1 由于冰壳结构服役期较短，参考现行国家标准《冰雪景观建筑技术标准》GB51202的有关规定，结构设计中不考虑地震荷载作用。

**6.1.2** 冰壳结构的屋面雪荷载应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB50009的规定采用。

**6.1.3** 冰壳结构的风荷载应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB50009的规定采用。对跨度超过30m或高度大于20m的复杂造型冰壳结构，宜通过风洞试验或专门研究确定风荷载体型系数。

[条文说明] 6.1.2~6.1.3 基本雪压和基本风压应采用《建筑结构荷载规范》GB50009附录E中规定的方法确定。荷载重现期*R*取5年，可根据10年和100年的雪压、风压值按下式确定：

 (10)

对于单个旋转壳的风荷载体型系数可按《钢筋混凝土薄壳结构设计规程》JGJ22表3.2.6的规定采用。对于体型复杂的壳体结构，当跨度超过20m时，宜根据专门研究确定。

对于旋转壳和圆柱面壳的积雪分布系数可按《钢筋混凝土薄壳结构设计规程》JGJ22表3.2.7的规定采用。

**6.1.4** 冰壳结构的均匀温度效应计算应符合下列规定：

**1** 应符合现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB5009的规定。

**2** 计算结构或构件的温度效应时，应采用材料的线膨胀系数，可按表4.2.2采用。

**3** 冰壳结构的均匀温度变化*T*可按下式计算：

 （6.1.4）

式中：*T*s —— 冰壳结构的最高平均温度（℃），宜取-5℃；

*T*w —— 冰壳结构的最低平均温度（℃），可按《建筑结构荷载规范》GB5009表E.5采用，也可根据当地冰壳结构服役期内最低平均气温数据确定。

[条文说明] 6.1.4 温度作用主要由气温变化、日照辐射、使用热源等因素引起。温度作用是指结构或构件内部的温度变化。《建筑结构荷载规范》GB5009给出了结构均匀温度变化的规定。

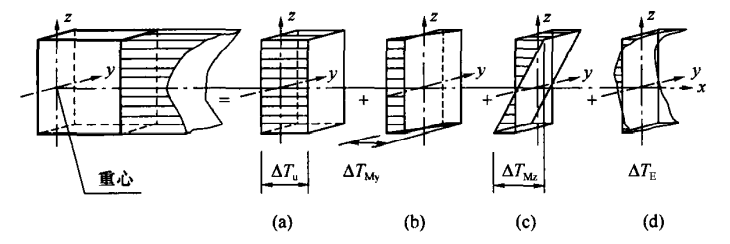


图5 结构构件任意界面上的温度分布

**6.1.5** 冰壳结构的非均匀温度效应计算应符合下列规定：

**1** 冰壳结构的内、外表面梯度温度变化*T*f,1可按下式计算：

 （6.1.5-1）

式中：*T*e —— 冰壳结构外表面的计算温度（℃），可取冰壳结构服役期内最低平均气温；

*T*i —— 冰壳结构内表面的计算温度（℃），可取-5℃或根据实测最高平均温度确定。

**2** 冰壳结构的阴、阳表面温度变化*T*f,2可按式（6.1.5-2）计算，冰壳结构的阴阳面应根据实际经纬度、结构朝向、分析时间综合确定，分析时间宜按中午12时的结构分布确定。

 （6.1.5-2）

式中：*T*p —— 冰壳结构朝阳面的计算温度（℃），可取冰壳结构服役期内中午12时的平均气温加3℃；

*T*n —— 冰壳结构背阴面的计算温度（℃），可取冰壳结构服役期内中午12时的平均气温减3℃。

**3** 对受有特殊温度场作用的冰壳结构应进行专门分析。

[条文说明] 6.1.5 温度是影响冰材料和冰结构的关键性因素，因此应在考虑结构均匀温度变化的基础上，进一步分析梯度温度变化（内外温差、阴阳面温差）和非线性温度作用的影响。特殊温度场主要为非日照、环境气温因素的热源作用。

**6.1.6** 冰壳结构的设计荷载组合应按照下列公式中的最不利组合进行计算：

强度验算荷载组合：

 (6.1.6-1)

 (6.1.6-2)

 (6.1.6-3)

变形验算荷载组合：

 (6.1.6-4)

 (6.1.6-5)

式中：*G* —— 恒荷载标准值；

*T* —— 均匀温度作用；

*T*f —— 非均匀温度作用；

*S* —— 雪荷载标准值；

*W* —— 风荷载标准值。

## 6.2 结构分析

**6.2.1** 对跨度小于30m或高度小于20m的冰壳结构，可按线弹性理论分析其内力和变形，否则应考虑几何非线性和材料非线性的影响。

[条文说明] 6.2.1 对于跨度大于30m或高度大于20m的冰壳结构，应进行考虑几何非线性和材料非线性的全过程分析，获得结构强度、刚度等性能随荷载的全过程曲线，进而确定冰壳结构的极限承载力。分析时，冰壳结构有限元模型的单元网格平均尺寸宜小于冰壳结构跨度和高度最大值的1/100。

**6.2.2** 冰壳结构线弹性分析时应符合下列规定：

**1** 材料参数应按-5℃复合冰的材料参数选取；

**2** 当冰壳结构的形体和边界约束复杂时，应采用有限单元法进行结构整体分析。

[条文说明] 6.2.2 当冰壳结构的形体规则且边界约束简单时，可采用解析法计算结构的内力与变形，计算方法可参考现行行业标准《钢筋混凝土薄壳结构设计规程》 JGJ22。当冰壳结构的形体不规则且边界约束复杂时，解析法不再适用，此时应采用有限单元法建立分析模型进行整体分析，有限元模型可采用实体单元或壳单元，当采用壳单元时宜选用三角形壳单元或四边形壳单元。

**6.2.3** 冰壳结构的初始几何缺陷的分布可采用理想结构的一阶屈曲模态，缺陷最大计算值可按结构跨度的1/300取值。

[条文说明] 6.2.3 初始几何缺陷对冰壳结构的承载力有较大的影响，应在计算中考虑。冰壳结构的初始几何缺陷包括气膜施工误差、浇筑或喷射误差等。当初始几何缺陷按一阶屈曲模态分布时，计算得到的极限承载力是可能的最不利值。缺陷最大计算值可按冰壳结构跨度的1/300取值。

**6.2.4** 冰壳结构的非线性材料本构模型可按附录B采用。

**6.2.5** 暴露在室外阳光照射下，跨度大于30m或高度大于20m的冰壳结构宜进行连续48h非均匀温度场与温度效应分析，热力耦合分析方法可按附录C采用。

[条文说明] 6.2.5 本条规定了受温度影响大且跨度大的冰壳结构应进行热力损伤的分析与评估。

**6.2.6** 冰壳结构分析时，应考虑下部支承结构的影响，必要时应进行冰壳结构与下部结构的协同作用分析。

[条文说明] 6.2.6 冰壳结构与其支承结构之间相互作用的影响往往较复杂，因此分析时应考虑两者的相互作用而进行协同分析。

## 6.3 构造设计

**6.3.1** 冰壳结构可采用等厚度或变厚度的截面形式，且应平滑过渡。

**6.3.2** 冰壳结构的截面厚度应根据冰壳结构承载力确定，截面厚径比不宜小于1/100且不应小于50mm。

[条文说明] 6.3.2 考虑到冰壳结构表面升华、融化会引起截面厚度折减，因此规定了冰壳结构的最小截面厚度要求。

**6.3.3** 冰壳结构的基础部位截面厚度应适当增加，可取中部区域厚度的2~3倍。

[条文说明] 6.3.3 冰壳结构在基础部位的区域易出现损伤和裂缝，是结构的薄弱区域，建议增加该区域的厚度至中部区域厚度的2~3倍。

**6.3.4** 冰壳结构底部采用纯冰支承构件时，应对纯冰结构进行承载力验算；当纯冰构件的承载力不足时，可在纯冰构件中设置构造钢柱与圈梁。

[条文说明] 6.3.4 纯冰砌体结构应符合现行国家标准《冰雪景观建筑技术标准》GB51202的有关规定。圈梁是沿水平方向布置的封闭纯冰梁，构造钢柱是与圈梁相连的纯冰-钢组合柱。

## 6.4 基础设计

**6.4.1** 冰壳结构应根据场地实际情况选择合适的基础形式，宜将壳体底部扩大或砌筑纯冰条形基础。

**6.4.2** 高度大于5m且跨度大于10m的冰壳结构应进行基础设计。

**6.4.3** 冰壳结构可选择当地地表天然冻胀性地基作为持力层，地基承载力应按当地冻土深度计算。地基不能满足设计要求时，应采取措施增强地基承载力。

[条文说明] 6.4.3 可采用强夯法增强冻土地基的承载力。

**6.4.4** 地基承载力和稳定性验算应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB50007的规定。

**6.4.5** 采用冰梁自重锚固气膜模板时，基础抗拔验算应满足式(6.4.5)。当不满足要求时，可在基础中设置锚杆承受部分上浮力。

 (6.4.5)

式中：*G*j —— 冰环梁基础的自重标准值；

*F*b —— 气膜模板最大工作压力下引起的上浮力；

*k* —— 安全系数，可取1.25。

# **7** 模板系统设计

## 7.1 柔性模板

**7.1.1** 气膜模板宜选用白色或浅色的P类膜材，膜材产品名称和理化性能应符合《膜结构涂层织物》GB/T 30161的规定，力学性能应符合《膜结构技术规程》CECS158的规定。

[条文说明] 7.1.1 浅色膜材在光照下吸热较少，有利于冰壳结构的快速冻结。P类膜材的设计参数应符合表2的规定。

表2 膜材设计参数

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 代号 | 经/纬向极限抗拉强度标准值（N/5cm） | 厚度（mm） | 重量（g/m2) |
| P2 | 2200/2000 | 0.45~0.65 | ≥500 |
| P3 | 3200/3000 | 0.55~0.85 | ≥750 |
| P4 | 4200/4000 | 0.65~0.95 | ≥900 |
| P5 | 5300/5000 | 0.75~1.05 | ≥1000 |
| P6 | 6400/6000 | 1.0~1.15 | ≥1100 |
| P7 | 7500/7000 | 1.05~1.25 | ≥1300 |

**7.1.2** 气膜模板设计应包含初始形态设计、荷载效应分析和裁剪设计。

[条文说明] 7.1.2 初始形态设计是指确定膜结构在一定工作内压下满足力学平衡条件和建筑形体设计要求的几何形状。荷载效应分析主要是计算结构在荷载作用下满足静力平衡条件的内力和位移。裁剪分析主要是将空间膜曲面适当剖分并展开为平面，计算确定预张力影响下膜材的裁剪下料图。

**7.1.3** 气膜模板应根据建筑形态进行初始形态设计。对于形状复杂的冰壳结构，可依据其几何特点分解为若干充气腔体的组合。

[条文说明] 7.1.3 不同于传统充气膜找形，冰壳结构的气膜施工模板设计属于典型的反问题，即以冰壳结构内表面为目标形状，寻找与目标形状整体误差最小的膜面，以此模板作为最终的冰壳施工模板。对于形状复杂的冰壳，仅用单一充气腔体拟合建筑曲面较为困难，故可将其分解为若干形状简单的充气腔体的组合。

**7.1.4** 气膜模板初始形态上任意点的几何偏差不宜大于该点处设计曲面最小曲率半径的5%，且不应大于0.2m。

**7.1.5** 气膜模板初始形态设计确定的底部边界线应为光滑曲线。

[条文说明] 7.1.5 要求底部边界线为光滑曲线是为了避免气膜模板与基础连接时出现局部应力集中。

**7.1.6** 气膜模板设计时应考虑气膜自重、气膜工作内压、覆冰荷载和风荷载等荷载作用。其中，覆冰荷载可按60mm厚冰层重量取值，风荷载作用按5年设计基准期取值。

[条文说明] 7.1.6 气膜模板作为施工时的临时支撑，在冰壳结构的喷射阶段需要承受部分覆冰荷载。如果气膜模板的设计不合理，则极易存在褶皱等零刚度区，导致无法正常覆冰，进而影响冰壳的施工质量及结构安全性。

内气压是充气膜结构所特有的参数。保持合适的工作内压可保证气膜结构具备合理的刚度和形态稳定性，避免膜面在施工过程中出现过大变形、振动、褶皱和局部低沉凹陷等问题。

研究表明，当冰层厚度超过60mm后，冰层已具备自承载能力，此时气膜模板所承受的荷载反而降低。

冰壳结构的施工应避免在强风天气下进行。本条规定的风荷载根据四级风确定，主要是为了避免结构在微风下产生较大的变形和振动。当不满足要求时，应增大气膜结构工作内压或增设临时支撑。

**7.1.7** 气膜模板的强度和变形计算应符合协会标准《充气膜结构技术规程》T/CECS 1323-2023的规定。

**7.1.8** 气膜模板的竖向最大位移不应超过结构跨度的1/100，水平最大位移不应超过结构高度的1/50。

**7.1.9** 气膜模板的裁剪分析应符合协会标准《充气膜结构技术规程》T/CECS 1323-2023的规定。

**7.1.10** 气膜模板的充气设备应配置备用电源，充气设备中风机功率应满足初始态成形时间不超过2h的要求，同时应满足正常工作内压稳压和最大工作内压的稳压要求。

[条文说明] 7.1.10 备用设备宜满足自动切换的功能要求。采用的风机应具有足够的送风量和风口压力。考虑到设备和管道的损失以及气膜的漏气等，根据风机功率计算的每小时进风量宜取气膜体积的1.5~2倍。

**7.1.11** 气膜模板宜设置内压监测和控制系统，其正常工作内压不宜小于400Pa，内压变化不宜超过±20Pa。

[条文说明] 7.1.11 控制系统宜设置报警系统，当膜内气压变化超过限定值时自动报警。

**7.1.12** 气膜模板的成形曲面应光滑连续，避免局部凸起。

[条文说明] 7.1.12 局部凸起有可能导致脱模过程中模板与冰壳分离困难。

**7.1.13** 当气膜模板采用索网加强时，膜材表面与索网不宜采用固定连接。

[条文说明] 7.1.13 采用气膜模板时，需采取措施避免膜面与冰壳脱模不易分离现象的发生。当采用索网加强时，可将索网布置在气膜模板喷射面的相反一侧。

**7.1.14** 气膜底部与基础或地面连接处应采用钢夹板连接（图7.1.14）等快速锚固及脱锚装置，并应进行节点强度验算。

[条文说明] 7.1.14 应采用必要措施以防止因底部冰层冻结而无法脱模现象的发生。

|  |
| --- |
|  |
| 图7.1.14 膜单元与支承面的连接 |
| 1——气膜；2——边绳；3——锚筋；4——钢夹板；5——垫片；6——基础或地面；7——热合宽度 |

## 7.2 刚性模板

**7.2.1** 刚性模板可选用钢框胶合板或加边框的钢板、胶合板拼装。

**7.2.2** 刚性模板的设计应符合现行国家标准[《组合钢模板技术规范》GB50214](https://www.soujianzhu.cn/NormAndRules/NormContent.aspx?id=1080)和行业标准《钢框胶合板模板技术规程》JGJ 96有关规定。

**7.2.3** 对于需要拆卸的刚性模板，模板构造需考虑便于拆卸。

**7.2.4** 对于需要拆卸的刚性模板，设计时应考虑模板自重、覆冰荷载和风荷载等荷载作用。覆冰荷载可按60mm厚冰层重量取值，风荷载作用按5年设计基准期取值。

**7.2.5** 对于不需要拆卸的刚性模板，设计时应考虑模板自重、覆冰荷载荷载和风荷载等荷载作用。覆冰荷载可按冰壳结构设计厚度重量取值，风荷载作用按5年设计基准期取值。

# **8** 冰壳施工

## 8.1 施工组织与施工安全

**8.1.1** 建筑高度超过20m或跨度超过30m的冰壳结构应编制专项安全施工方案。

**8.1.2** 施工组织设计应根据项目的工期、规模、设计要求进行编制：

**1** 编制施工进度计划应倒排工期，制定施工技术措施；

**2** 应绘制施工现场平面布置图，合理布置施工现场以及道路交通运输；

**3** 应制定水泵、吊车、手持切割工具等机械设备安全防护保障措施；

**4** 应制定充气膜充气、使用、拆除以及自然冰施工交叉作业安全防护保障措施。

**8.1.3** 冰壳施工的基本流程应包括：基础锚固、模板搭建、材料制备、材料浇筑或喷射、模板拆除、切割定型。

[条文说明] 8.1.3 施工组织应根据施工工艺和环保要求合理布置作业区，确定施工流程。

**8.1.4** 冰壳施工应符合现行国家标准《冰雪景观建筑技术标准》GB 51202的有关规定。

## 8.2 模板施工

**8.2.1** 模板施工应满足结构稳定、表面平整、便于搭建和拆除的要求。

**8.2.2** 模板施工质量验收应符合下列规定：

**1** 接缝应严密，且模板内不应有杂物、积雪和积水；

**2** 直接安装在土层上时，土层应坚实、平整，应采取防冻融措施；

**3** 喷射施工前应对锚固区域及气膜内压进行验收；

**4** 安装尺寸轴线及标高的误差不大于10mm，以及冰壳跨度和高度的1/1000。

[条文说明] 8.2.2 刚性模板的安装尺寸宜采用尺子测量，柔性模板的安装尺寸宜采用全站仪测量。

**8.2.3** 冰壳施工应采取防止模板晃动的措施。

**8.2.4** 气膜模板施工出现切口、撕裂、磨损时，宜采用热合方式进行修补。热合接缝集中区域和手工热合区域的膜面应进行加强处理。

**8.2.5** 刚性模板施工时，应采取防止冰材料漏浆措施。

## 8.3 浇筑和喷射施工

**8.3.1** 冰壳施工可采用分层浇筑或喷射冻结方式。

**8.3.2** 冰壳施工时应符合下列规定**：**

**1** 复合纤维水溶液的拌合物温度宜为0~10℃，施工作业区的环境温度应低于-10℃。

**2** 施工作业应避开中午、下午气温较高时段，宜选择夜间施工。施工作业面应采取挡风措施。

**3** 施工前宜用清水冲洗模板外表面。

[条文说明] 8.3.2 模板安装过程中易在模板表面堆砌垃圾、灰尘等，特别是大体积的气膜模板，进而导致冰壳成型后内表面有污渍。因此建议在进行冰壳连续喷射施工前，使用清水冲洗施工模板。

**8.3.3** 复合冰喷射施工作业应符合下列规定：

**1** 宜采用自下而上的“8”字环绕喷射顺序，分层多次进行喷射；

**2** 喷射作业时，喷嘴不宜垂直指向受喷面，喷嘴与喷射面的距离宜控制在1.5m~3.0m范围内；

**3** 合理控制喷射流量和间隔时间，第二次喷射应在第一次喷射后至少5分钟后进行；

**4** 喷射作业中可用钻芯法监测冰壳厚度，冰壳厚度未达到设计要求时应及时补喷；

**5** 施工泵送系统应采取必要的防冻保护措施。

**6** 对跨度超过30m或高度大于20m的复杂造型冰壳结构，宜进行喷射施工仿真分析确定施工用时和材料用量。

[条文说明] 8.3.3 喷射流量和间隔时间可根据实际工程的规模和水溶液的冻结速率等综合确定。当无实测数据时，自然条件下水溶液的冻结速率可按照表3的规定取值。

表3 水溶液的冻结速率（mm/h）

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 平均温度（℃） | -5.0 | -10.0 | -15.0 | -20.0 | -25.0 | -30.0 |
| 冻结速率 | 1.95 | 3.25 | 4.55 | 5.83 | 7.09 | 8.35 |

注：其他环境温度下的冻结速率可依据表中数据采用线性插值法确定。

在喷射施工间歇期，可及时将喷射水头置于纤维水溶液缓冲池中形成回流，并调小水管流量，保持管道内水溶液的持续流动，有效防止室外水管冻结。

**8.3.4** 施工泵送系统由搅拌池、缓冲池、管道、泵送设备、浇筑或喷射装备组成。

[条文说明] 8.3.4 泵送设备可选取离心泵、潜水泵等。

**8.3.5** 施工完成后，冰壳表面应无明显气泡、裂缝和断层。

**8.3.6** 喷射施工过程中宜采取佩戴防护面罩、手套等防水御寒措施。

**8.3.7** 冰壳周围应采取围堰等措施引流、收集和处理废弃的纤维水溶液。

**8.3.8** 冰壳结构达到设计厚度且验收合格后，宜采用清水在冰壳表面复喷，形成不少于2cm厚的纯冰保护层。

[条文说明] 8.3.8 冰壳结构在长期环境影响下，表面会发生升华现象，导致纸浆纤维裸露表面，影响冰壳建筑观感质量，因此在冰壳达到设计厚度后，在外表面喷射冻结形成纯冰保护层。

## 8.4 施工监测

**8.4.1** 冰壳结构施工期间监测项目应根据监测要求及结构分析综合确定，应按表8.4.1采用。

表8.4.1 冰壳结构施工期间监测项目

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 监测  项目 | 基础沉降监测 | 模板监测 | 结构形态监测 | | 环境监测 | |
| 柔性模板气压 | 结构几何形状 | 截面厚度 | 温度 | 湿度 |
| 施工  监测 | ▲ | ★ | ★ | ★ | ★ | ▲ |

注：★必选项目，▲可选项目

**8.4.2** 冰壳结构施工期间监测的测点布置、采集模式及监测频率应根据监测要求确定：

**1** 当采用柔性模板时，模板气压测点布置应结合具体模板形式确定，宜采用全天候连续采集模式；

**2** 基础沉降测点的布置应均匀对称分布，宜采用定时采集模式，施工期间每日不少于4次；

**3** 结构几何形状监测的测点布置应结合具体结构形式确定，宜在变形特征点和极值点处，宜采用定时采集模式，施工期间每日不少于2次；

**4** 冰壳截面厚度测点的布置应能反应施工期间的厚度变化，宜对称均匀布置，宜采用触发采集模式，喷射后进行采集；

**5** 冰壳温度测点的布置应能反应施工期间的温、湿度变化的实际情况，宜采用全天候连续采集模式。

**8.4.3** 冰壳结构的监测设备应根据监测要求、工程特点及场地条件综合确定，应满足对冰壳施工期间进行监测、预警的要求。

[条文说明] 8.4.3 监测设备应包括传感器、数据采集传输模块等，传感器类型及测量方式可按表4采用。

表4 冰壳监测项目

|  |  |
| --- | --- |
| 监测项目 | 测量方式 |
| 模板气压监测 | 气压计等 |
| 变形监测 | 百分表、静力水准仪、全站仪、激光测距仪等 |
| 截面厚度监测 | 预埋测针、钻孔测量等 |
| 湿度监测 | 湿度传感器等 |
| 温度监测 | 热电偶、热电阻、光纤温度传感器等 |

## 8.5 模板拆除

**8.5.1** 当冰壳结构同时满足下列条件时，可拆除模板：

**1** 冰壳厚度达到设计厚度；

**2** 停止喷射施工24h后；

**3** 冰壳外侧无明显的裂缝、断层和融化；

**4** 环境温度低于-5℃。

**8.5.2** 拆除模板后，冰壳应静置0.5h，在无明显变形及裂缝后，施工人员可进入。

[条文说明] 8.5.2 现有工程实践表明，模板拆除后冰壳在一段时间内仍然面临一定的危险性。因此，模板拆除后，冰壳应在荷载作用下充分受力变形。

## 8.6 工程质量验收

**8.6.1** 冰壳结构工程施工质量应按下列要求进行验收：**1** 工程质量验收均应在施工单位自检合格的基础上进行；

**2** 应对涉及结构安全和使用功能的材料、工程，按规定进行抽样检验，并做好过程记录；**3** 工程的观感质量应由验收人员现场检查，并应共同确认。

**8.6.2** 冰壳结构的工程质量验收应包括：观感质量、结构尺寸、材料性能、截面厚度、下部结构，且应符合表8.6.2指标要求。

表8.6.2 冰壳结构质量验收控制指标

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 监测内容 | | 控制指标 |
| 观感质量 | 裂缝 | 复合冰壳内外侧均无明显的裂缝、断层和融化 |
| 结构尺寸 | 结构跨度 | 与设计模型偏差应小于5%且不大于10cm； |
| 结构高度 |
| 材料性能 | 纤维配合比 | *α*×(1±10%)，*α*为设计纤维配合比 |
| 抗压强度 | 单轴抗压强度不低于-5℃强度设计值； |
| 抗拉强度 | 单轴抗拉强度不低于-5℃强度设计值； |
| 截面厚度 | 冰壳厚度 | 结构不同高度处厚度应满足施工图纸要求； |
| 下部结构 | 强度、尺寸 | 应符合相应材料质量验收的相关要求 |

[条文说明] 8.6.2 冰壳结构质量验收说明：

1 冰壳结构尺寸测量可采用激光测距仪、3D激光扫描仪，测量精度应控制在±1 cm内；

2 应避免材料样品在运输途中融化，抗压强度及抗拉强度测试方法应参照本规程附录A的规定；

3 截面厚度宜使用探针、打孔等方法测量，测量精度应控制在±5 mm内；

4 下部结构通常为冰砌体基础，测试方法应符合《冰雪景观建筑技术标准》GB51202的规定。

**8.6.3** 冰壳材料取样、测试应符合以下规定：

**1** 同条件养护，每工作日取样不少于1次，每制备1批次取样不少于1次。试件的制备和测试应符合附录A的规定；

**2** 宜采用钻芯法取样，取样过程应保证结构安全；

**3** 取样间隔不应小于5m，每个冰壳的取样数量不应少于5个；取样试件尺寸应按附录A的规定；

**4** 试件应在-5℃环境静置至少24h后方可加载，测试温度应为-5℃；若施工条件有限或浇筑中的复合冰试件尺寸不满足附录A条的规定，可采取回弹法对结构构件中的复合冰强度进行推定；

**5** 材料配合比取样，每个冰壳的取样数量应不少于5个，宜与材料强度验收中取样或回弹位置保持一致。

[条文说明] 8.6.3 有关条款的说明：

1 冰壳施工中，每一批的复合冰溶液在制备过程中可能因为纤维大小、配合比有细微误差，因此每批都需制备同条件试件；

2 冰壳施工模具拆除后一般需要切割定型，钻芯法取样宜与冰壳切割定型同时进行，可在切割掉的构件中制备试件。

**8.6.4** 冰壳厚度验收点应均匀、对称分布，每10m2不少于1个且总数不少于5个。

[条文说明] 8.6.4 冰壳厚度验收一般需要根据具体结构形态确定测点位置，对结构底部及施工难度较大部位应适当增加测点，尽量反应冰壳截面厚度变化。

**8.6.5** 当验收指标不满足设计要求时，应结合实测数据修正冰壳结构有限元模型，对实际结构的安全性进行再评估。

# **9** 维护与拆除

## 9.1 维护

**9.1.1** 冰壳结构应根据结构类型、安全性等级及使用环境，建立全寿命周期内的结构使用、维护管理制度。

[条文说明] 9.1.1 冰壳结构维护应遵守预防为主、防治结合的原则，应进行日常维护、定期检测与鉴定。

**9.1.2** 冰壳结构的日常检查应包括冰壳外观、荷载变化情况及设备运行状况。

[条文说明] 9.1.2 冰壳结构外观应重点检查裂缝、挠度、不均匀沉降以及人为破损等；荷载变化应重点检查积雪、内部是否变更用途等；设备运行应重点检查用电、灯具、监测设备及其他设备运行情况。

**9.1.3** 每5d宜向冰壳外表面均匀喷射一次清水，清水温度不应高于10℃，喷射时环境温度应低于-5℃，每次喷水厚度不应小于1cm。

[条文说明] 9.1.3 喷水维护前应清理表面积雪及杂物；由于冰壳结构性能与温度有直接关系，因此对水温提出要求，实际操作中应避免喷嘴直接喷射冰壳；喷水厚度应根据截面厚度实际变化确定。

**9.1.4** 当积雪荷载超过设计标准值时，应对冰壳表面积雪及时进行清理。

**9.1.5** 冰壳使用期间出现下列情况之一，应禁止人员进入，经专业人员评估后确定是否可以继续使用：

**1** 日最高气温连续5d高于-5℃；

**2**  结构出现明显开裂。

## 9.2 运维监测

**9.2.1** 当冰壳结构满足本规程3.3.5条规定，且内部空间有人员长时间活动时，应进行运维期间监测。

[条文说明] 9.2.1 在旅馆、酒吧等具有使用功能的冰壳结构内部，人员停留时间超过1h时，宜进行冰壳的运维期间监测。

**9.2.2**  冰壳运维期间监测项目应根据监测要求及结构分析综合确定，应按表9.2.2采用。

表9.2.2 冰壳运维期间监测项目

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 监测  项目 | 基础沉降监测 | 材料强度 | 结构形态监测 | | | 内力监测 | 环境及作用监测 | | |
| 结构变形 | 截面厚度 | 裂缝宽度 | 应力应变 | 温度 | 湿度 | 雪荷载 |
| 运维  监测 | ▲ | ▲ | ★ | ★ | ▲ | ★ | ★ | ▲ | ▲ |

注：★必选项目，▲可选项目

**9.2.4** 冰壳在运维期间的测点布置、采集模式及监测频率应根据监测要求及结构分析综合确定，且应符合下列规定：

1 结构变形测点布置应结合具体结构形式确定，宜布置在变形特征点和极值点处，宜采用定时采集模式，运维期间每日不少于4次；

2 基础沉降测点的布置应均匀对称分布，宜采用定时采集模式，运维期间时间间隔不大于5d；

3 应力应变测点宜布置在复合冰壳的关键部位及冰砌基础，宜采取对称布置措施消除环境与次要因素干扰的影响，宜采用定时采集模式，运维期间每日不少于4次；

4 冰壳截面厚度测点的布置应能反应结构外侧的厚度变化的实际情况，宜对称均匀布置，朝阳面应布置截面厚度测点，宜采用定时采集模式，间隔不大于5d，宜于喷射养护后2h测量；

5 冰壳温、湿度测点的布置应能反应结构内外侧的温湿度变化的实际情况，内部应布置温湿度测点，宜进行全天候采集；

6 朝阳面和冰壳外部重要部位应布置温度测点，宜对称均匀布置，东西向温度测点加密，测点宜与应力应变监测协同布置。

**9.2.5** 冰壳的监测设备应根据监测要求、工程特点及场地条件综合确定，应满足对冰壳运维期间进行监测、预警及评估的要求。

[条文说明] 9.2.5 监测设备应包括传感器、数据采集传输模块等，传感器类型及测量方式可按表5采用。

表5 冰壳监测项目

|  |  |
| --- | --- |
| 监测项目 | 测量方式 |
| 变形监测 | 百分表、静力水准仪、全站仪、激光测距仪等 |
| 截面厚度监测 | 预埋测针、钻孔测量等 |
| 应变监测 | 振弦式应变传感器、光纤类应变传感器等 |
| 应力监测 | 土应力传感器等 |
| 湿度监测 | 湿度传感器等 |
| 温度监测 | 热电偶、热电阻、光纤温度传感器等 |
| 积雪厚度监测 | 厚度测量传感器、尺子等 |

**9.2.6** 监测设备应确保-40℃以下低温工作的稳定性及准确性，应采取防风等保护措施，并宜对监测设备进行定期维护。

[条文说明] 9.2.6 冰壳通常服役于较高纬度的地区，因此监测设备的低温运行稳定性及准确性至关重要。保护措施指根据现场情况采取的相应防风、防雨雪、防尘、防晒等措施；维护措施指对监测设备及保护措施进行定期检查，对监测系统进行维护，以确保监测系统的正常运行。

**9.2.7** 应根据结构分析对监测项目各参数设定预警阈值，当监测值超过预警阈值时应及时报警。

[条文说明] 9.2.7 监测预警值是监测工作的实施前提，是监测期间对结构正常、异常和危险不同状态进行判断的重要依据。

**9.2.8** 监测单位应根据冰壳的监测结果，对被监测冰壳进行定期的安全评估，给出维护和拆除意见。

## 9.3 拆除

**9.3.1** 具备以下情况时，冰壳应及时拆除：

1 日最高气温连续5d高于-5℃；

2 冰壳结构出现明显位移或倾斜，存在安全隐患；

3 冰壳结构表面或局部融化，失去观赏价值。**9.3.2** 冰壳结构拆除前，项目人员应掌握有关的图纸和资料，应进行现场勘查，了解地上、地下建筑物及设施和毗邻建筑物、构筑物等分布情况；并对施工人员进行安全技术交底。

[条文说明] 9.3.1 有关图纸和资料是拆除工程设计、施工的必要依据，包括拟拆除冰壳、施工现场及毗邻区域内供水、排水、供电、供气、供热、通信、广播电视等管线图纸及资料，气象和水文观测资料，毗邻建筑物、构筑物和地下工程的有关资料。拆除工程施工前，应依据图纸和资料进行全面复核，掌握实际状况。

技术交底的主要内容应包括拆除技术要求、作业危险点与安全措施；每次技术交底应有书面记录，并由交底人和被交底人双方签字确认。

**9.3.2** 跨度大于30m或高度大于20m的冰壳结构拆除前应制定专项拆除方案，并对拆除过程可能发生的意外情况制定应急预案。

[条文说明] 9.3.2 当跨度超过30m或高度超过20m时，拆除使结构的完整性被破坏，易使结构发生失稳倒塌破坏，故在拆除前应制定详细的拆除方案和应急预案，保证拆除工程的安全。

**9.3.3** 冰壳拆除施工应符合下列规定：

**1** 应先拆除非承重构件，再拆除承重构件，不应进行交叉作业；

**2** 应从上往下分区域进行拆除；

**3** 应对周边建筑物、构筑物及地下设施采取保护、防护措施；

**4** 应先切断水源、气源及电源并清除内部危险品后，再进行拆除作业。

[条文说明] 9.3.3 为保证冰壳拆除工程的安全，规定了拆除工程应遵循的基本原则，即先拆除非承重构件，再拆除承重构件，并不应进行交叉作业。冰壳拆除时应遵循成型的逆顺序，自上而下、逐层、逐个构件地分区域拆除。危险品是指易燃易爆物品、危险化学品、放射性物品等能够危及人身安全和财产安全的物品。

**9.3.4** 冰壳结构拆除宜采用人工拆除或机械拆除：

**1** 人工拆除时严禁施工人员进入冰壳内部，并应做好防护措施；

**2** 当采用掏掘或推倒的方法拆除时，宜采用机械拆除，并应检查周边环境和人员清场情况；

**3** 采用人工拆除时，施工人员应在稳定的结构或脚手架上操作；

**4**  当同时采用人工拆除和机械拆除时，施工人员与机械不应在同一作业面上同时作业。

[条文说明] 9.3.4 由于拆除作业破坏了结构的完整，容易造成冰壳结构坍塌，故人工拆除时施工人员禁止进入冰壳内部。

采用陶掘或推倒方式拆除时，冰壳结构易发生无规律地倒塌，进而造成安全事故，故应避免人工进行拆除作业。

人员聚集或集中堆放材料易造成结构过载坍塌。为保证安全，施工人员应在稳定结构、脚手架或作业平台上操作。

采用机械拆除并局部需要人工配合时，为保证人员安全，防止机械伤害的发生，应严格控制人、机作业的距离和位置，应遵循人员安全为原则，不应与机械在同一作业面上作业。

**9.3.5** 拆除工程应采取减少噪声、污水和振动等环境污染的措施。

**9.3.6** 冰壳拆除的各类废弃物应及时清运出场，可回收、分类后再利用。

[条文说明] 9.3.6 冰壳拆除的废弃物包括纤维材料、冰砌块、钢材等。

# 附录A 冰材料试验方法

**A.0.1** 用于单轴压缩、劈裂抗拉、直接拉伸和剪切试验的试件尺寸应符合下列规定：

**1** 用于单轴压缩试验的标准试件尺寸宜取直径70mm，高度140mm的圆柱体；当试件尺寸为*φ*85mm×170mm和*φ*100mm×200mm时，应分别乘以尺寸换算系数1.05和1.09；

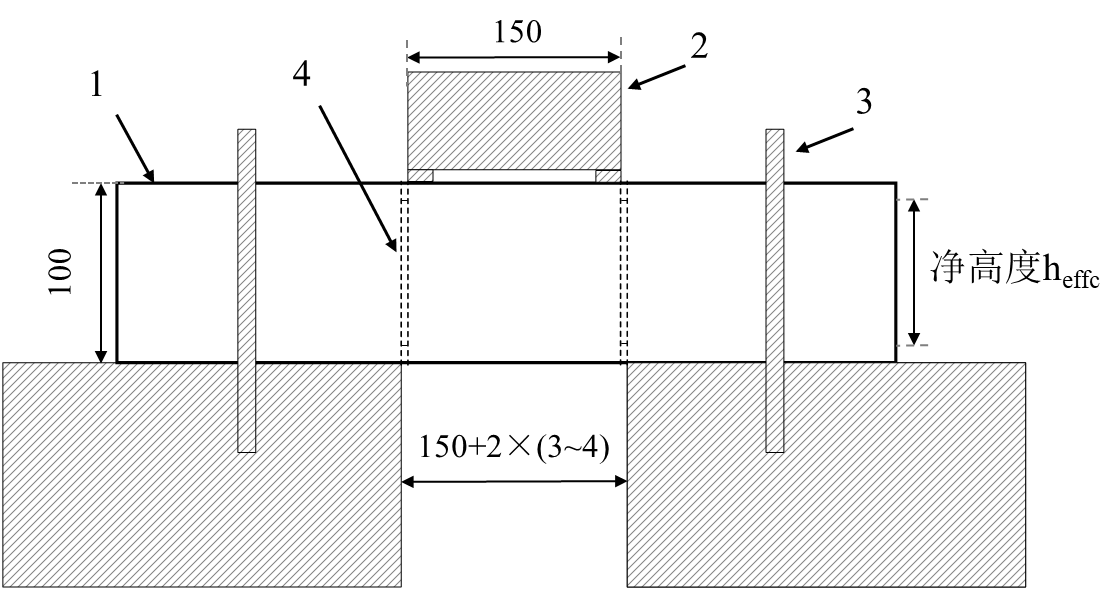
**2** 用于劈裂抗拉试验的标准试件尺寸宜取直径70mm，厚度35mm的圆柱体；当试件尺寸为*φ*85mm×42.5mm和*φ*100mm×50mm时，应分别乘以尺寸换算系数1.05和1.09；

**3** 用于直接拉伸试验的标准试件尺寸的中心区域的尺寸为70mm×70mm。当中心区域尺寸为85mm×85mm和100mm×100mm时，应分别乘以尺寸换算系数1.05和1.09。直接拉伸试验方法如图A.0.1-1所示；



图A.0.1-1 直接拉伸试验方法示意图

**4** 用于剪切试验的标准试件尺寸宜取100mm×100mm×350mm的棱柱体。当采用改进的双面剪切方法时，剪切净截面应为70 mm×70 mm。当净截面为80 mm×80 mm和90 mm×90 mm时，应分别乘以尺寸换算系数1.04和1.08。改进的双面剪切方法如图A.0.1-2所示。



图A.0.1-2 改进的双面剪切方法示意图

1——试件；2——加载块；3——可调节支架；4——深槽。

**A.0.2** 制冰模具宜采用刚度较小的模具，不宜采用刚度较大的钢制模具。模具组装后不应有变形和漏水现象。

[条文说明] A.0.2 由于冰密度较小，冰在冻结过程中产生冻胀现象，刚度较大的模具会产生较大的约束应力导致冰试件内部应力较大而产生裂缝等损伤，因此推荐选用刚度较小的PVC管、硅胶或木质模具。

**A.0.3** 冰试件冻结过程中，冷冻箱内温度误差应控制在±0.5℃。

**A.0.4** 冰试件脱模与养护应符合下列规定：

**1** 应对模具表面微加热以便于脱模，不应直接加热冰材料；

**2** 试件脱模成型后应进行尺寸误差测量，并将合格的试件立即用塑料薄膜包裹养护，防止试件升华；

**3** 冰试件脱模后应在相应冻结温度下养护不少于24h，温度误差应控制在±0.5℃。

**A.0.5** 试件尺寸宜采用游标卡尺进行测量，测量精度应不大于0.1mm，试件尺寸公差应不大于1mm。

**A.0.6** 冰试件在加载过程中，加载温度误差应控制在±0.5℃。

**A.0.7** 试件加载速率宜控制在10-5s-1~10-4s-1。

# 附录B 冰材料本构关系

B.1 总则

**B.1.1** 冰材料的本构关系可采用下列方法确定：

**1** 制作试件并通过试验测定；

**2** 选择合理形式的数学模型，由试验标定其中所需的参数值；

**3** 采用经过试验验证或工程经验证明可行的数学模型。

**B.1.2** 本附录中所给出的各种数学模型适用于以下条件：

**1** 纸浆纤维含量在0%~6%以内；

**2** 正常加载速率；

**3** 正常温度和湿度条件。

**B.1.3** 本附录中，冰材料的应力-应变曲线均按相对值、、、等给出。其中，分母为冰的单轴强度（或）和相应的峰值应变（或）。为纤维含量（%），*T*为温度（℃）。根据结构分析方法和极限状态验算的需要，单轴强度可分别取为标准值（*f*ck或*f*tk）、设计值（*f*c或*f*t）或平均值（*f*cm或*f*tm）。

B.2 单轴应力应变关系

**B.2.1** 纯冰和复合冰单轴受压的应力-应变曲线方程可按下列公式确定（图B.2.1）：



图B.2.1 单轴受压的应力应变关系

 (B.2.1-1)

 (B.2.1-2)

 (B.2.1-3)

式中：*a*、*b*——单轴受压应力-应变曲线上升段、下降段参数值，按表

B.2.1采用；

——冰的单轴抗压强度（*f*ck、*f*c或*f*cm）；

——与对应的冰峰值压应变，按式(B.2.1-4)采用。

 (B.2.1-4)

式中：——复合冰的温度（℃）；

——复合冰的纤维含量（%）。

表B.2.1 冰材料单轴受压应力-应变曲线的参数取值

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 参数 | *T*（℃） | *ω*（%） | | | |
| 1 | 2 | 4 | 6 |
| *a* | -20 | 2.41 | 1.99 | 1.55 | 1.45 |
| -15 | 2.34 | 1.76 | 1.48 | 1.46 |
| -10 | 2.09 | 1.58 | 1.37 | 1.26 |
| -5 | 2.52 | 1.60 | 1.26 | 1.08 |
| *b* | -20 | 0.70 | 0.50 | 0.42 | 0.41 |
| -15 | 0.32 | 0.25 | 0.21 | 0.16 |
| -10 | 0.20 | 0.21 | 0.16 | 0.14 |
| -5 | 0.14 | 0.13 | 0.13 | 0.12 |

**B.2.2**  冰单轴受拉的应力-应变曲线方程（图B.2.2）可按下列公式确定：



图B.2.2 单轴受拉的应力-应变曲线

 (B.2.2-1)

 (B.2.2-2)

式中：**——轴受拉应力-应变曲线下降段的参数值，按表B.2.2采用；

**——复合冰的单轴抗拉强度（*f*tk、*f*t或*f*tm）；

——与**相应的复合冰峰值拉应变，按式(B.2.2-3)采用。

 (B.2.2-3)

式中：*E*——冰材料弹性模量，可按表4.3.4取值。

表B.2.2 冰材料单轴受拉应力-应变曲线的参数取值

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| *T*（℃） | *ω*（%） | | | |
| 1 | 2 | 4 | 6 |
| -20 | 1.15 | 1.25 | 1.30 | 1.35 |
| -15 | 1.08 | 1.16 | 1.11 | 1.31 |
| -10 | 1.01 | 1.20 | 1.15 | 1.22 |
| -5 | 0.95 | 1.05 | 1.17 | 1.20 |

# 附录C 热力耦合分析方法

**C.0.1** 结构分析应重点考虑环境温度变化和日照非均匀温度场对结构强度和刚度的不利影响。

**C.0.2** 冰壳结构外部热源应包括日照辐射、空气对流换热以及结构与环境的长波辐射换热。

**C.0.3** 结构表面日照辐射量可基于当地实测热流量数据，也可选用建筑工程领域常用的日照辐射模型。结构表面吸收的热辐射量应考虑物体间的动态阴影遮挡效应。

**C.0.4** 空气对流换热的环境气温日变化过程可采用当地实测气象数据，也可选用常用的数值模型。环境平均气温可取-25~-5℃，每日温差可取5~15℃。

**C.0.5** 结构的长波辐射可基于当地实测辐射数据，也可选用常用的净长波辐射物理模型。

**C.0.6** 冰壳结构的内部热源可考虑供暖空调、供电照明、餐饮服务等使用热源的影响。

# 附录D 回弹法检测冰材料抗压强度

D.1 总则

**D.1.1** 可使用里氏硬度计测量纯冰的抗压强度，使用回弹仪测量复合冰材料的抗压强度。

**D.1.2** 里氏硬度计应符合现行国家标准《里氏硬度计》JJG747-1999的规定，应使用D型里氏硬度计。

**D.1.3** 回弹仪应符合现行国家标准《回弹仪》GB/T 9138的规定。

[条文说明] D.1.3 由于回弹仪的测试性能直接影响复合冰强度推定结果的准确性，根据研究，提出下列各项指标：水平弹击时，回弹仪在弹击锤脱钩瞬间，回弹仪的标称能量应为0.335J，弹簧工作长度*l*=0.0075m，弹簧刚度*k*=120N/m，击锤重量*m*=0.100kg，弹击杆直径*D*=0.015mm，弹击杆球面半径*R*=25mm。

**D.1.4** 纯冰及复合冰强度可按照单个构件或按批量进行检测，并应符合下列规定：

**1** 单个构件的检测应符合本规程第D.1.5条的规定；

**2** 对于纯冰产地相同，运输条件、加工条件、龄期相近的同一批次冰砌体可以采用批量检测。按批量进行检测时，应随机抽取冰砌体，抽检数量不宜少于同批总数的30％且不宜少于10件。当检验批冰砌体数量大于30个时，抽样构件数量可适当调整。

[条文说明] D.1.4 由于回弹法测试具有快速、简便的特点，能在短期内进行较多数量的检测，以取得代表性较高的总体复合冰强度数据，故有此规定。当检验批构件数量过多时，抽检构件数量可按照《建筑结构检测技术标准》GB/T50344 进行适当调整。此外，抽样试样应严格遵守“随机”的原则，宜由建设单位、监理单位、施工单位会同检测单位共同商定抽样的范围、数量和方法。

**D.1.5** 单个构件的检测应符合下列规定：

**1** 对于一般构件，测区数不宜少于5个。相邻两测区的间距不应大于5m，测区离构件端部不宜小于0.5m；

**2** 测区宜选在能使回弹仪处于水平方向的纯冰砌筑或复合冰浇筑侧面；

**3** 测区宜布置在构件的两个对称的可测面上。在构件的重要部位及薄弱部位应布置测区，并应避开预埋件；

**4** 测区表面应为纯冰及复合冰原浆面，并应清洁、平整，不应有疏松层、蜂窝及麻面；

**5** 对于弹击时产生颤动的薄壁、小型构件，应首先进行固定。

[条文说明] D.1.5 检测构件布置测区时，相邻两测区的间距及测区离构件端部或施工缝的距离应遵守本条规定。布置测区时，宜选在构件两个对称的可测面上。当可测面的对称面无法检测时，也可在一个检测面上布置测区。

检测面应为复合冰原浆面，喷水养护产生清水层及升华产生纸浆毛面应清除干净。对于薄壁小型构件，如果约束力不够，回弹时产生颤动，会造成回弹能量损失,使检测结果偏低。因此应添加可靠支撑，使之有足够的约束力时方可检测。

**D.1.6** 纯冰及复合冰构件应每个测区设置16个测点。

**D.1.7** 测量回弹值时，里氏硬度计及回弹仪的轴线应始终垂直于检测面，并应缓慢施压、准确读数、快速复位。

[条文说明] D.1.7 检测应使仪器的轴线应始终垂直于检测面，并且缓慢施压，否则回弹值读数不准确 。

**D.1.8** 当里氏硬度计为非水平方向，应使用仪器自带程序进行角度修正。当回弹仪为非水平方向时，应对回弹值进行角度修正。

[条文说明] D.1.8 回弹角度不同，弹击锤的重力势能不同，会对回弹值产生影响，因此需要统一为水平方向检测的回弹值。

**D.1.9** 纯冰及复合冰强度值可采用测强曲线计算，有条件的地区及部门，应制定本地区的测强曲线或专用测强曲线。检测单位应按照专用测强曲线、地区测强曲线、统一测强曲线的顺序选用。

[条文说明] D.1.9 我国地域辽阔，气候差距巨大，纯冰和复合冰在生产条件、冻结温度、施工和管理水平层次不齐。各地区使用统一测强曲线之外，还可以因地制宜的制定和采用专用测强曲线和地区测强曲线。

**D.1.10** 构件的强度平均值应根据各测区的强度换算值计算。当测区数为10个及以上时，还应计算强度标准差。平均值及标准差应按下列公式计算：

 (D.1.10-1)

 (D.1.10-2)

式中：*f*c,*i*——构件测区同种材料强度换算值的平均值（MPa），精确至0.1Mpa；

*n*——对于单个检测的构件，取该构件的测区数；对批量检测的构件，取所有被抽检构件测区数之和；

*S*fc——结构或构件测区冰强度换算值的标准差（MPa），精确至0.01MPa。

D.2 纯冰

**D.2.1** 测点宜在测区范围内均匀分布，相邻两个测点的净距离不应小于里氏硬度计探头的距离。同一个测点只弹击一次。

[条文说明] D.2.1 本条规定的现场回弹测试方法和建立测强曲线的测试方法一致，因此不会引进新的误差。每一个测点的里氏硬度值应精确到1。

**D.2.2** 计算纯冰构件测区平均里氏硬度值时，应从该测区的16个里氏硬度值中剔除3个最大值和3个最小值，其余的10个里氏硬度值按下式计算：

 (D.2.2)

式中：*HL*m——测区平均里氏硬度值，精确到1；

*iiiiHLi*——第*i*个测点的里氏硬度值。

[条文说明] D.2.2 本条规定的测区平均回弹值计算方法和建立测强曲线时的取舍方法一致，因此不会引进新的误差。

**D.2.3** 纯冰的测区强度应按下式进行强度换算：

 (D.2.3)

式中：*f*c*,i*——测区纯冰强度换算值，精确到0.1MPa。

**D.2.4** 纯冰构件第*i*个测区强度换算值，可按式D.2.2求得的平均里氏硬度值代入式D.2.3得出。

D.3 复合冰

**D.3.1** 复合冰构件测点宜在测区范围内均匀分布，相邻两个测点的净距离不应小于回弹仪弹击探头的直径。同一个测点弹击五次。

[条文说明] D.3.1 由于复合冰可能会存在空洞或者纤维体，因此重复弹击之后，回弹值会变大但是数据的误差变小。因为弹击后局部位置密实，回弹时吸收的能量较少，使得回弹值提高但是变稳定。本条规定的现场回弹测试方法和建立测强曲线的测试方法一致，因此不会引进新的误差。一个测点的回弹值应精确到1。

**D.3.2** 计算复合冰构件测区平均回弹值时，该测区内的每个测点的5个回弹值剔除最大值和最小值作为该测点的代表值，应从该测区的16测点的回弹值中剔除3个最大值和3个最小值，其余的10个回弹值按下式计算：

 (C.3.2)

式中：*R*m——测区平均回弹值，精确到0.1；

*iiRi*——第*i*个测点的回弹代表值。

[条文说明] C.3.2 本条规定的测区平均回弹值计算方法和建立测强曲线时的取舍方法一致，因此不会引进新的误差。

**D.3.3** 非水平方向检测复合冰浇筑侧面时，测区的平均回弹值应按下式修正：

 (D.3.3)

式中：*R*m*α*——回弹仪非水平方向检测时测区平均回弹值，精确到0.1；

a*αR*a*α*——回弹仪非水平方向检测时回弹值修正值，按表D.3.3取值。

表D.3.3 复合冰非水平方向检测时的回弹值修正值

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *R*m*α* | 检测角度 | | | | | | | |
| 向上 | | | | 向下 | | | |
| 90° | 60° | 45° | 30° | -30° | -45° | -60° | -90° |
| 20 | / | / | / | -14.9 | +5.6 | +7.2 | +8.2 | +9.0 |
| 21 | / | / | / | -13.7 | +5.6 | +7.1 | +8.2 | +9.0 |
| 22 | / | / | / | -12.9 | +5.5 | +7.1 | +8.1 | +8.9 |
| 23 | / | / | / | -12.3 | +5.5 | +7.1 | +8.1 | +8.9 |
| 24 | / | / | / | -11.8 | +5.4 | +7.0 | +8.0 | +8.8 |
| 25 | / | / | / | -11.3 | +5.4 | +7.0 | +8.0 | +8.8 |
| 26 | / | / | / | -11.0 | +5.3 | +6.9 | +7.9 | +8.7 |
| 27 | / | / | -24.3 | -10.6 | +5.3 | +6.8 | +7.9 | +8.6 |
| 28 | / | / | -21.2 | -10.3 | +5.2 | +6.8 | +7.8 | +8.6 |
| 29 | / | / | -19.7 | -10.0 | +5.2 | +6.7 | +7.7 | +8.5 |
| 30 | / | / | -18.6 | -9.8 | +5.1 | +6.7 | +7.7 | +8.4 |
| 31 | / | / | -17.7 | -9.5 | +5.1 | +6.6 | +7.6 | +8.4 |
| 32 | / | / | -16.9 | -9.3 | +5.0 | +6.5 | +7.5 | +8.3 |
| 33 | / | -30.1 | -16.3 | -9.1 | +5.0 | +6.5 | +7.4 | +8.2 |
| 34 | / | -26.3 | -15.7 | -8.9 | +4.9 | +6.4 | +7.4 | +8.1 |
| 35 | / | -24.4 | -15.2 | -8.7 | +4.8 | +6.3 | +7.3 | +8.0 |
| 36 | / | -23.0 | -14.7 | -8.5 | +4.8 | +6.2 | +7.2 | +7.9 |
| 37 | / | -21.8 | -14.3 | -8.3 | +4.7 | +6.1 | +7.1 | +7.8 |
| 38 | -35.7 | -20.9 | -13.9 | -8.1 | +4.7 | +6.1 | +7.0 | +7.7 |
| 39 | -30.7 | -20.1 | -13.5 | -7.9 | +4.6 | +6.0 | +6.9 | +7.6 |
| 40 | -28.4 | -19.3 | -13.1 | -7.8 | +4.5 | +5.9 | +6.8 | +7.5 |
| 41 | -26.7 | -18.7 | -12.8 | -7.6 | +4.5 | +5.8 | +6.7 | +7.4 |
| 42 | -25.4 | -18.1 | -12.5 | -7.4 | +4.4 | +5.7 | +6.6 | +7.3 |
| 43 | -24.2 | -17.5 | -12.2 | -7.3 | +4.3 | +5.7 | +6.5 | +7.2 |
| 44 | -23.2 | -17.0 | -11.9 | -7.1 | +4.3 | +5.6 | +6.4 | +7.1 |
| 45 | -22.3 | -16.4 | -11.6 | -7.0 | +4.2 | +5.5 | +6.3 | +7.0 |
| 46 | -21.5 | -16.0 | -11.3 | -6.8 | +4.1 | +5.4 | +6.2 | +6.9 |
| 47 | -20.8 | -15.5 | -11.0 | -6.7 | +4.0 | +5.3 | +6.1 | +6.8 |
| 48 | -20.1 | -15.1 | -10.7 | -6.5 | +4.0 | +5.2 | +6.0 | +6.7 |
| 49 | -19.4 | -14.7 | -10.5 | -6.4 | +3.9 | +5.1 | +5.9 | +6.6 |
| 50 | -18.8 | -14.3 | -10.2 | -6.2 | +3.8 | +5.0 | +5.8 | +6.5 |

注：表中未列入的对应于*Rmα*的修正值*Rmα*，可用内插法求得，精确至0.1。

[条文说明] D.3.3 角度或者回弹值超出本表范围的可按照以下公式进行修正：

 (1)

式中*α*为角度，其余参数可以参照条文说明D.1.3。

**D.3.4** 符合下列条件的复合冰，测区强度应按照公式进行强度换算：

**1** 复合冰采用原生纸浆纤维、自来水搅拌制备；

**2** 采用喷射冻结成型的工艺；

**3** 采用符合本规程规定的模板；

**4** 自然养护且龄期大于等于3d；

**5** 抗压强度为（1~10）MPa。

 (D.3.4)

式中：*f*c*,i*——测区复合冰强度换算值，精确到0.1Mpa。

**D.3.5** 当检测条件与本规程适用**D.3.4**条件有较大差异时，可采用在构件上钻取的复合冰芯样或同条件试块对测区复合冰强度换算值进行修正。芯样数量不应少于6个。芯样应在测区内钻取，每个芯样应只加工一个试件。

[条文说明] D.3.5 当检测条件与测强曲线的适用条件有较大差异时，可以采用钻取芯样进行修正，修正时试件数量应不少于6个。芯样数量太少代表性不够，且离散较大。如果数量过大，则钻取芯工作量太大，有些构件又不宜取过多芯样，否则影响其结构安全性，因此，规定芯样数量不少于6个。不可以将较长芯样沿长度方向截取为几个芯样试件来计算修正值。本规程参考了相关的规范，推荐采用修正量方法对复合冰强度进行修正。

**D.3.6** 复合冰构件第*i*个测区强度换算值，可按式D.3.2和式D.3.3求得的平均回弹值代入式D.3.4得出。

# 附录E 工程质量验收记录

**E. 0. 1** 冰壳质量验收应由总监理工程师（或建设单位项目负责人）组织项目专业质量检查员等进行验收，并应按表E.0.1记录。

表E.0.1 冰壳工程质量验收记录

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 工程名称 |  | | | | | | | | | | | | | | | |
| 结构类型 |  | | | | | 建筑面积 | | |  | | | | | | | |
| 建设单位 |  | | | | | 建设负责人 | | |  | | | | | | | |
| 施工单位 |  | | | | | 施工负责人 | | |  | | | | | | | |
| 监理单位 |  | | | | | 监理负责人 | | |  | | | | | | | |
| 设计单位 |  | | | | | 设计单位 | | |  | | | | | | | |
| 开工日期 |  | | | | | 完工日期 | | |  | | | | | | | |
| 施工依据 |  | | | | | 验收依据 | | |  | | | | | | | |
| 验收项目 | | | | 设计/规范要求 | | 抽样数量 | | | 检查  方法 | | | 检查  记录 | | | 检查  结果 | |
| 冰壳 | 1 | 结构跨度 | | |  | |  | | |  | | |  | | |  |
| 2 | 结构高度 | | |  | |  | | |  | | |  | | |  |
| 3 | 冰壳厚度 | | |  | |  | | |  | | |  | | |  |
| 4 | 材料配合比 | | |  | |  | | |  | | |  | | |  |
| 5 | 材料单轴抗压强度 | | |  | |  | | |  | | |  | | |  |
| 6 | 材料单轴抗拉强度 | | |  | |  | | |  | | |  | | |  |
| 7 | 裂缝 | | |  | |  | | |  | | |  | | |  |
| 基础 | 1 | 地基承载力 | | |  | |  | | |  | | |  | | |  |
| 2 | 材料单轴抗压强度 | | |  | |  | | |  | | |  | | |  |
| 3 | 基础垂直度 | | |  | |  | | |  | | |  | | |  |
| 4 | 基础尺寸 | | |  | |  | | |  | | |  | | |  |
| 观感质量验收 |  | | | | | | | | | | | | | | | |
| 综合验收记录 |  | | | | | | | | | | | | | | | |
| 参与验收单位 | 建设单位 | | 监理单位 | | | | | 施工单位 | | | 设计单位 | | | 勘察单位 | | |
| （公章）  项目负责人：  年 月 日 | | （公章）  项目负责人：  年 月 日 | | | | | （公章）  项目负责人：  年 月 日 | | | （公章）  项目负责人：  年 月 日 | | | （公章）  项目负责人：  年 月 日 | | |

# 附录F 冰壳日常维护记录表

**F.0.1** 日常维护记录应由施工单位检察员填写，建设单位项目专业负责人组织进行验收，并应按表F.0.1记录。

表F.0.1 冰壳日常维护记录表 \_\_\_\_\_\_年\_\_月\_\_日

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 工程名称 |  | | | |
| 施工单位 |  | 维护负责人 |  | |
| 建设单位 |  | 项目负责人 |  | |
| 维护项目 | | 设计要求 | 维护记录 | 检查结果 |
| 基础 | 融化 |  |  |  |
| 沉降 |  |  |  |
| 冰壳结构外观 | 竖向变形 |  |  |  |
| 水平变形 |  |  |  |
| 裂缝开展 |  |  |  |
| 人为破损 |  |  |  |
| 荷载变化 | 积雪 |  |  |  |
| 设备运营状况 | 灯具 |  |  |  |
| 其他设备 |  |  |  |
| 施工单位维护结果 |  | | | |
| 建设单位维护结果 |  | | | |

# 本标准用词说明

**1** 为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

**1）**表示很严格，非这样做不可的用词：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

**2）**表示严格，在正常情况均应这样做的用词：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

**3）**表面允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

**4）**表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

**2** 标准中指明按其他有关标准执行的写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”。

# 引用标准名录

本规程引用下列标准。其中，注日期的，仅对该日期对应的版本适用本规程；不注日期的，其最新版适用于本规程。

《工程结构通用规范》GB55001

《建筑结构荷载规范》GB50009

《建筑结构可靠度设计统一标准》GB50068

《冰雪景观建筑技术标准》GB51202

《建筑设计防火规范》GB50016

《建筑内部装修设计防火规范》GB50222

《建筑设计照明标准》GB50034

《民用建筑设计统一标准》GB50352

《建筑地基基础设计规范》GB50007

《建筑工程施工质量验收统一标准》GB50300

《钢筋混凝土薄壳结构设计规程》JGJ22

《建筑工程模板施工安全规范》JGJ162

《建筑拆除工程安全技术规范》JGJ147

《膜结构技术规程》CECS158

《膜结构涂层织物》GB/T 30161

中国工程建设标准化协会标准

冰壳结构技术规程

**CECS XXX：202X**

# 附：条文说明

**制 订 说 明**

《冰壳结构技术规程》CECS XXX：202X，经中国工程建设标准化协会202X年XX月XX日以第XX号公告批准发布。

本标准制订过程中，编制组进行了广泛的调查研究，总结了我国冰壳建筑工程的实践经验，同时参考了国内外先进技术标准，通过冰雪材料和冰壳结构试验，取得了冰壳结构设计与施工重要技术参数。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本标准时能正确理解和执行条文规定，《冰壳结构技术规程》编制组按章、节、条顺序编制了本标准的条文说明，供使用者参考。但是，本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。