

UDC

中国土木工程学会标准

P

T/CCES X—20XX

混凝土制品固碳养护制备技术规程

Technical specification for carbonation curing of concrete products

(征求意见稿)

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

中国土木工程学会 发布

中国土木工程学会标准

混凝土制品固碳养护制备技术规程

Technical specification for carbonation curing of concrete products

T/CCES X-20XX

批准单位：中国土木工程学会

施行日期：20XX年X月X日

20XX 北 京

前 言

本规程是根据中国土木工程学会《关于发布<2022 年中国土木工程学会标准立项计划>的通知》（中土学标〔2022〕10 号）的要求，由湖南大学会同有关单位编制完成。

在本规程编制过程中，编制组广泛调查研究和总结了固碳养护混凝土制品生产、施工的工程实践经验，参考了国内外有关标准，并在广泛征求意见基础上，对具体内容进行了反复讨论、协调和修改，最后经审查定稿。

本规程的主要技术内容是：总则，术语、符号与参考标准，原材料特性要求，一般要求，混凝土制品制备过程要求，制品性能指标要求，产品质量合格证、堆放和运输及有关的附录。

请注意本规程的某些内容可能涉及专利。本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程由中国土木工程学会学术与标准工作委员会负责管理，由湖南大学负责具体技术内容的解释。执行过程中如有修改意见或建议，请寄送湖南大学（地址：湖南省长沙市岳麓区麓山南路湖南大学土木工程学院；邮政编码：410082；电子邮箱：xianghu@hnu.edu.cn）。

本 规 程 主 编 单 位： 湖南大学

本 规 程 参 编 单 位：

本规程主要起草人员：史才军

本规程主要审查人员：

目 次

1	总 则	28
2	术语、符号与参考标准	29
2.1	术 语	29
2.2	符 号	29
2.3	参考标准	30
3	原材料特性要求	5
3.1	水泥	5
3.2	矿物掺合料	5
3.3	骨料	5
3.4	混凝土外加剂	5
3.5	水	33
3.6	含二氧化碳气体	6
4	设施及排放要求	7
4.1	设施要求	7
4.2	排放要求	8
5	制品制备过程要求	9
5.1	配合比设计	9
5.2	预养护	9
5.3	固碳养护	10
6	制品性能指标要求	11
6.1	制品性能技术要求	11
6.2	制品固碳技术要求	12
7	产品质量合格证、堆放和运输	140
附录 A	剩余水灰比	41
附录 B	固碳性能增强系数	15
附录 C	混凝土制品固碳率	17
	本规程用词说明	19

Contents

1	General provisions	28
2	Terms, symbols and reference standards	29
2.1	Terms	29
2.2	Symbols	29
2.3	Reference standards	30
3	Raw materials	5
3.1	Cement	5
3.2	Mineral admixture	5
3.3	Aggregate	5
3.4	Concrete additive	5
3.5	Water	33
3.6	Gas containing carbon dioxide	6
4	Facility and emission requirements	7
4.1	Facility requirements	7
4.2	Emission requirements	8
5	Product manufacturing process requirements	9
5.1	Mixture design	9
5.2	Preconditioning	9
5.3	Carbonation curing	10
6	Product performance requirements	11
6.1	Product performance technical requirements	11
6.2	Carbon dioxide sequestration requirements	12
7	Product quality certificate, stacking, and transportation	140
Appendix A	Remaining water binder ratio	41
Appendix B	Performance enhancement coefficient of carbonation curing	15
Appendix C	Carbon dioxide sequestration of concrete products	17
	Explanation for wording in the specification	19

1 总 则

1.0.1 本规程规定了混凝土制品固碳养护制备过程中的原材料特性要求、设施和排放要求、制备过程技术要求、制品性能指标要求，以及堆放和运输相关规定。

1.0.2 本规程适用于现有混凝土制品企业的固碳养护制备技术应用管理，以及固碳养护制备混凝土制品建设项目的竣工验收及其投产后的生产管理。

1.0.3 本规程适用于以水泥、钢渣、电石渣、镁渣等可碳化固废为胶凝材料，以烧粘土质材料、粉煤灰、石灰石粉为辅助性胶凝材料，以砂石为骨料的混凝土制品，如混凝土实心砖、混凝土多孔砖、混凝土砌块、混凝土透水路面砖、混凝土墙板的生产过程。

2 术语、符号与参考标准

2.1 术语

2.1.1 固碳养护混凝土制品 Concrete products curing with carbon dioxide fixation

将满足或经过预处理后满足固碳养护要求的含二氧化碳气体接入养护釜，在进行混凝土砖、砌块或板材等混凝土制品养护生产的同时实现对二氧化碳的封存固化处置的过程。

2.1.2 含二氧化碳烟气 Carbon dioxide gas in manufacturing sector

钢铁、水泥、热电等企业生产中所产生的经烟气除尘、脱硫、脱硝净化处理后的含二氧化碳浓度不低于 10%（标准状态）的烟气。

2.1.3 标准状态 Standard state

指温度为 273K，压力为 1.01×10^5 Pa 时的状态。本规程规定的大气污染物排放浓度均指标准状态下氧气含量 10% 的干烟气中的数值。

2.1.4 不明性质气体 Unknown gas

指无法通过本身所附信息、产生源信息等常规渠道获得性质信息的气体。例如因长期堆放于厂房中信息牌已模糊的气罐所装气体。

2.1.5 预养护 Preconditioning curing

指为提升混凝土制品固碳养护效果，在固碳养护前对混凝土制品坯体进行真空干燥等预处理过程。

2.1.7 剩余水灰比 Remaining water to binder ratio

混凝土制品经过预养护后，剩余水的质量与胶凝材料质量的比值。用来表征混凝土制品在预养护过程中含水量的变化。

2.1.8 固碳性能增强系数 Performance enhancement index with carbonation curing

按规定的试验步骤养护到规定龄期的受检固碳试体，与对比试件的抗压强度比值和干燥收缩比值。

2.1.9 固碳率 Carbon dioxide fixation degree

混凝土制品在固碳养护过程中的实际固碳量与混凝土制品中胶凝材料理论最大固碳量的比值。

2.2 符号

f_0, f_1 ——蒸汽养护和固碳养护制品的抗压强度算术平均值；

I ——固碳强度增强系数；

K ——固碳干燥收缩增强系数；

$m_{500^{\circ}\text{C}}, m_{900^{\circ}\text{C}}$ ——固碳养护制品在 500°C 时剩余质量的

$m_{500^{\circ}\text{C}}^*, m_{900^{\circ}\text{C}}^*$ ——对比试样在 500°C 时剩余质量的算术平均值；我们这个标准不是测试标准，不存在什么对比试样测试试样啊

$m_{900^{\circ}\text{C}}^*$ ——对比试样在 900°C 时剩余质量的算术平均值；

S_0 ——对比试件的干燥收缩算术平均值；

S_1 ——固碳养护试件的干燥收缩算术平均值；

W_0 ——试样预养护前质量的算术平均值；

W_1 ——试样预养护后质量的算术平均值；

$(w/c)_e$ ——试样在预养护后的剩余水灰比；

w/c ——配合比中试样的水灰比；

$x\%$ ——配合比中水占试样总质量的百分数；

α ——水泥熟料占混凝土制品固相质量的百分数；

β ——混凝土制品在预养护过程中的失水率；

ω ——混凝土制品固碳率，单位为百分数（%）；

θ ——固碳养护试样的实际二氧化碳吸收百分比，单位为百分数（%）；

θ^* ——对比试样的实际二氧化碳吸收百分比，单位为百分数（%）；

2.3 参考标准

1. 《建筑设计防火规范》 GB 50016
2. 《氧气站设计规范》 GB 50030
3. 《混凝土外加剂应用技术规范》 GB 50119
4. 《混凝土质量控制标准》 GB 50164

5. 《工业金属管道设计规范》 GB 50316
6. 《工业设备及管道防腐蚀工程技术标准》 GB/T 50726
7. 《压力容器》 GB 150
8. 《通用硅酸盐水泥》 GB 175
9. 《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》 GB/T 1596
10. 《混凝土砌块和砖》 GB/T 4111
11. 《设备及管道绝热技术通则》 GB 4272
12. 《工业液体二氧化碳》 GB/T 6052
13. 《建筑材料放射性核素限量》 GB 6566
14. 《混凝土外加剂》 GB 8076
15. 《普通混凝土小型砌块》 GB/T 8239
16. 《工业炉窑大气污染物排放标准》 GB 9078
17. 《高岭土及其试验方法》 GB/T 14563
18. 《建设用砂》 GB/T 14684
19. 《建设用卵石、碎石》 GB/T 14685
20. 《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》 GB/T 18046
21. 《混凝土实心砖》 GB/T 21144
22. 《高纯二氧化碳》 GB/T 23938
23. 《焊接绝热气瓶》 GB/T 24159
24. 《砖瓦工业大气污染物排放标准》 GB 29620
25. 《用于水泥、砂浆和混凝土中的石灰石粉》 GB/T 35164
26. 《水泥制品单位产品能源消耗限额》 GB 38263
27. 《钢制焊接常压容器》 JBT 4735
28. 《低温液体贮运设备 使用安全规则》 JB/T 6898
29. 《普通混凝土配合比设计规程》 JGJ 55
30. 《混凝土用水标准》 JGJ 63
31. 《移动式压力容器安全技术监察规程》 TSGR 0005
32. 《固定式压力容器安全技术监察规程》 TSG 21

3 原材料特性要求

3.1 水泥

3.1.1 水泥宜采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，也可采用矿渣水泥、粉煤灰水泥等。水泥性能应符合GB 175的规定。

3.2 矿物掺合料

3.2.1 固碳养护混凝土制品中可掺入低于20%水泥替代率的粉煤灰、矿渣粉、石灰石粉、偏高岭土等其他矿物掺合料，在降低水泥用量的同时改善混凝土制品的性能。

3.2.2 粉煤灰应符合GB/T 1596的规定。

3.2.3 矿渣粉应符合GB/T 18046的规定。

3.2.4 石灰石粉应符合GB/T 35164的规定，细度宜为200-800目，掺量宜为水泥质量的2-20%。

3.2.5 偏高岭土应符合GB/T 14563的规定。

3.2.6 其他矿物粉料或工业固体废弃物应符合相应国家标准的规定，无标准的材料应用前应做相关检验，符合要求方可使用。

3.2.7 固碳养护混凝土制品的最小水泥熟料含量不宜低于混凝土制品坯体总质量的10%。

3.3 骨料

3.3.1 粗骨料可采用碎石或卵石，其性能应符合GB/T 14685的规定，其中杂质含量不得超过5%。对于混凝土砖，骨料粒径不应大于10毫米，对于混凝土砌块，骨料粒径不应大于砌块最小壁厚的尺寸的1/3。

3.3.2 细骨料宜采用细度模数为3.3-2.3的硬质中粗砂，其性能应符合GB/T 14684的规定，其中杂质含量不得超过3%。

3.4 混凝土外加剂

3.4.1 根据生产需要可选用合适的混凝土外加剂，外加剂的分类及其性能、使用要求应符合GB 8076的规定。

3.4.2 混凝土外加剂使用前，应先进行混凝土试配，符合要求后方可使用，并根据试验结果调整工艺参数，外加剂的使用应符合GB 50119的规定。

3.5 水

3.5.1 混凝土配料拌合水应符合JGJ 63的规定。

3.6 含二氧化碳气体

3.6.1 标准状态下，用于混凝土制品固碳养护的含二氧化碳气体中的二氧化碳最低浓度不宜低于5%、除二氧化碳外气体的总含量不高于95%，二氧化硫浓度不宜高于50 mg/m³、氮氧化物浓度不宜高于100 mg/m³、粉尘含量不宜高于50 mg/m³，氟化物不宜高于3 mg/m³。

3.6.2 高浓度二氧化碳是含二氧化碳气体经纯化后，符合GB/T 6052或GB/T 23938的规定，二氧化碳纯度不应低于99.5%，游离水含量不应高于0.2%的气体。

3.6.3 未知特性和未经鉴定的不明性质气体禁止进入养护池或养护釜，应转移至安全区域交由相关安全部门进行管理和处理。

4 设施及排放要求

4.1 设施要求

满足混凝土制品固碳养护制备要求的设施是保证混凝土制品固碳养护制备过程正常运行和整个过程安全性的重要保障。

4.1.1 含二氧化碳气体接入设施宜满足以下条件：

- a) 含二氧化碳气体接入流量控制阀组的设计、施工和测量应符合GB 50030。
- b) 含二氧化碳气体的输送和接入管路应使用不锈钢材质，设计和施工应符合GB 50316。
- c) 含二氧化碳气体的输送和接入管路应进行保温，设计和施工应符合GB 4272。
- d) 当养护池或蒸压釜固碳养护处理设施因故障停止运转，或者当养护池或蒸压釜内温度、压力、烟气中氧含量和游离水含量等运行参数偏离设定值时，或者固碳出气排放超过标准设定值时，可自动停止含二氧化碳气体接入。

4.1.2 含二氧化碳气体贮存设施宜满足以下条件：

- a) 含二氧化碳气体应与常规原料、燃料和产品分开贮存，禁止共用同一贮存设施。
- b) 连续运行时，高浓度二氧化碳贮存设施设置不宜少于2座；其中采用管道输送时，不宜小于4小时；采用其他方式运输时，不应小于12小时。
- c) 高浓度二氧化碳贮存容器及其使用应符合GB/T 150、GB/T 24159、JB/T 6898、TSGR 0005的规定。

4.1.3 含二氧化碳气体预处理设施宜满足以下条件：

- a) 预处理设施所用材料宜选择不锈钢和塑料，材料需适应含二氧化碳气体特性以确保不被腐蚀，并不与含二氧化碳气体发生任何反应。
- b) 预处理设施应符合GB50016等相关消防规范的要求。
- c) 应根据含二氧化碳气体特性及固碳养护要求，确定预处理工艺流程和预处理设施：

4.1.4 含二氧化碳气体厂内输送设施宜满足以下条件：

- a) 含二氧化碳气体的物流出入口以及转运、输送路线应远离办公和生活服务设施。
- b) 管道输送设备应保持良好的密闭性能，防止含二氧化碳气体的滴漏和溢出。
- c) 输送设备所用材料应适应含二氧化碳气体特性，确保不被腐蚀和与含二氧化碳气体发生任何反应。

4.1.5 固碳养护设施宜满足以下条件：

a) 养护池或蒸压釜使用年限应符合JC/T720规定的要求，釜体、管道、电气、仪表、安全连锁装置等的安装应符合设计要求。

b) 固碳养护设施应具有进出口气体流量控制装置、进出口气体测试仪、安全控制装置。

c) 固碳养护设施的应选择符合防腐和耐压要求的原材料。

4.1.6 含二氧化碳气体循环利用设施宜满足以下条件：

a) 应具有进出口气体流量控制装置、进出口气体测试仪、安全控制装置。

b) 应按照实际烟气循环率范围选用循环风机，采用变频调速运行，设计时应充分考虑漏风、生产波动等因素条件，并且应满足烟气收集罩内微负压要求。

c) 罩体表面设保温材料，采用耐热材料；管道应保温并满足耐磨、耐高温、防腐等工况要求，设置人孔装置。

d) 设施应密封。

4.2 排放要求

4.2.1 废气排放控制宜满足以下要求：

a) 混凝土制品固碳养护的排放废气应满足GB 9078、GB 29620等标准的要求。

b) 按照GB 29620的要求对混凝土制品固碳养护过程设置废气排放装置和进行检测，并做好生产区域的通风。

c) 固碳排出废气中含有二氧化碳浓度不大于10%。

4.2.2 废水排放控制宜满足以下要求：

a) 贮存、预处理设施、固碳养护、含二氧化碳气体循环利用装置所产生的废水应经收集后按厂内原水处理设施进行处理，不得外排。

b) 在收集废水时,需要考虑污水的种类、来源、排放量等因素进行分类收集。对于有机废水、工业废水等有害废水,应该选择专业的运输公司进行收集。

c) 在收集废水时宜采用分散式废水收集系统。将废水通过管道或沟渠，输送到集中处理区域。

d) 收集后的废水宜选择专业的废水处理公司进行处理，使废水净化，减少污染，以至达到废水回收、复用，充分利用水资源。

5 制品制备过程要求

5.1 配合比设计

5.1.1 干硬性混凝土及塑性混凝土配合比设计均应采用JGJ 55的设计方法。

5.1.2 对于压制成型的混凝土制品,压制成型压力不宜低于10MPa,水固比不宜高于0.2,胶凝材料含量不宜低于混凝土制品坯体总质量的10%。

5.1.3 对于压制成型的混凝土制品,制品的尺寸应满足使用要求,制品的长度、宽度、厚度、直线度、平面度偏差值宜在正负5mm范围内。

5.1.4 对于浇筑成型的混凝土砌块、板材、预制构件等,经振捣后,密实系数不宜小于0.98。混凝土拌合物应具有良好的黏聚性、流动性和保水性,不得离析、泌水。坍落度和扩展度应符合GB 50164的规定。

5.1.5 混凝土拌合物的凝结时间应满足固碳养护技术要求。

5.2 预养护

5.2.1 对于压制成型的干硬性混凝土制品如混凝土砖、砌块等,将脱模后的坯体有序码放,最小间隔不宜小于10毫米。

5.2.2 对于浇筑成型的塑性混凝土制品如混凝土板材、预制构件等,在具备脱模条件后脱模摆放。在浇筑成型制品难以脱模或脱模会对制品完整性造成破坏的情况下可采用不脱模养护的方法。若采用不脱模养护的方法,宜在模板设置排气孔,气孔孔径不小于5mm,气孔上下间隔和左右间隔距离设置为50mm。

5.2.3 混凝土坯体在固碳养护前应先进进行预养护,去除坯体中多余水分,降低坯体剩余水灰比。预养护技术可采用真空干燥、鼓风干燥、微波干燥。

5.2.4 对于真空干燥,将拆模或未拆模的坯体置于相对湿度35-70%、常温的环境中静置不小于30分钟,然后放入预养护室,关闭预养护室并抽真空,真空度不宜高于-0.03 MPa,预养护时间不宜少于30分钟。

5.2.5 对于鼓风干燥,将拆模或未拆模的坯体放入预养护室,控制相对湿度为50-70%、温度15-25℃,采用鼓风机或风扇保持预养护室内空气流通,预养护时间不宜少于1小时。

5.2.6 对于微波干燥,将拆模或未拆模的坯体放入微波设备中进行微波干燥快速预养护处理,采用微波的功率为30-60 kW,频率为20-5000 MHz,预养护时间不应大于1小时。

5.2.7 预养护室可单独设置,也可与固碳养护室合并设置。当采用真空养护时,养护室

应采用压力容器，其设计标准应符合GB 150的规定。

5.2.8 坯体经过预养护后，在固碳养护前应满足以下要求：

- a) 剩余水灰比应符合表1的规定。
- b) 剩余水灰比测试方法按附录A规定的方法执行。

表 1 剩余水灰比技术要求

成型方式	初始水灰比	剩余水灰比		
		真空干燥	鼓风干燥	微波干燥
压制成型	≤0.2	0.1-0.15	0.09-0.12	0.08-0.13
浇筑成型	≥0.25	0.22-0.4	0.14-0.28	0.1-0.3

5.3 固碳养护

5.3.1 将预养护后的混凝土坯体放入固碳养护室。固碳养护方法可采用加压养护、常压养护、循环养护。二氧化碳来源可分为高纯度二氧化碳、二氧化碳烟气。

5.3.2 对于加压养护，固碳养护室宜采用蒸压釜，其设计标准应符合GB 150的规定，其设计、制造、安装、验收、监察标准应符合TSG 21的规定。

5.3.3 对于常压养护和循环养护，固碳养护室可采用养护池或压力容器，保证其具有良好的密闭、保温、防锈、耐腐蚀功能，其设计制造宜符合GB/T 50726和JB/T 4735的规定。

5.3.4 固碳养护温度宜采用高温（85-95℃）、中温（55-65℃）、低温（25-35℃）三个温度梯度，固碳养护时养护室内温度偏差应控制在±10℃以内。

5.3.5 加压养护时，养护室内气体压力不宜小于0.2MPa（表压），不宜大于0.5MPa（表压）。

5.3.6 固碳养护时间一般不宜小于6小时，不宜大于48小时。

5.3.7 用于固碳养护的二氧化碳气体浓度不宜小于10%。

5.3.8 固碳养护室应配备二氧化碳浓度监测装置，当二氧化碳浓度异常时能够发出警报信息并自动停止二氧化碳接入。

5.3.9 固碳养护室应符合防火、防爆、防漏电等相关安全规定，以确保固碳养护室的安全运行。

6 制品性能指标要求

6.1 制品性能技术要求

6.1.1 固碳养护混凝土免烧砖的尺寸允许偏差、外观质量、密度等级、强度等级、吸水率、干燥收缩率和相对含水率、抗冻性、碳化系数、软化系数、放射性核素限量应符合GB/T 21144的规定。

6.1.2 固碳养护混凝土砌块的尺寸偏差、外观质量、空心率、外壁和肋厚、强度等级、吸水率、线性干燥收缩值、**抗冻性**、碳化系数、软化系数、放射性核素限量应符合GB/T 8239的规定。

6.1.3 混凝土制品的放射性核素限量试验方法按《建筑材料放射性核素限量》GB 6566进行外，其他性能依据《混凝土砌块和砖》GB/T 4111中规定的方法进行测试。

6.1.4 固碳养护后混凝土制品的抗压强度和干燥收缩性能显著增强，固碳性能增强系数包括固碳固碳强度增强系数和固碳干燥收缩增强系数。混凝土制品固碳养护后还应满足以下要求：

- a) 固碳固碳强度增强系数符合表2的规定；
- b) 固碳干燥收缩增强系数应符合表3的规定；
- c) 固碳性能增强系数计算方法按附录B规定的方法执行。

表 2 固碳强度增强系数技术要求

成型方式	固碳养护时间			
	6小时	12小时	24小时	48小时
压制成型	≥ 15	≥ 10	≥ 6	≥ 4
浇筑成型	≥ 8	≥ 4	≥ 2	≥ 1.5

表 3 固碳干燥收缩增强系数技术要求

成型方式	干燥收缩测试时间			
	3天	7天	28天	56天
压制成型	≤ 0.5	≤ 0.6	≤ 0.7	≤ 0.8
浇筑成型	≤ 0.3	≤ 0.5	≤ 0.7	≤ 0.6

6.2 制品固碳技术要求

6.2.1 混凝土制品固碳养护后还应满足以下要求：

- a) 混凝土制品固碳率应符合表4的规定；
- b) 混凝土制品固碳率计算方法按附录C规定的方法执行

表 4 混凝土制品固碳率技术要求

成型方式	固碳养护时间			
	6小时	12小时	24小时	48小时
压制成型	≥20%	≥30%	≥40%	≥50%
浇筑成型	≥10%	≥15%	≥20%	≥30%

7 产品质量合格证、堆放和运输

7.0.1 混凝土制品出厂时，宜适当包装，并提供产品质量合格证书，内容包括：

- a) 厂名、厂址和商标；
- b) 批量编号和制品数量；
- c) 产品标记和检验结果；
- d) 产品质量合格证书编号；
- e) 生产日期和出厂日期；
- f) 检验部门和检验人员签章；
- g) 产品的强度与固碳率或龄期。

7.0.2 混凝土制品固碳养护后，应按相应制品标准要求的养护条件继续养护。

7.0.3 混凝土制品应按规格、等级分批分别堆放、不得混堆。

7.0.4 混凝土制品在重叠码放时，每层构件间的垫块应上下对齐，码放层数应根据构件、垫块的承载力确定，并应根据需要采取防止码放倾覆的措施；混凝土制品的码放高度不宜高于2.5米。

7.0.5 混凝土制品宜贮存在相对湿度不小于60%的室内环境；若贮存在室外或相对湿度低于60%的环境中，应定期向制品表面喷洒水雾。

7.0.6 混凝土制品在运输前，应采取防止制品移动、倾倒等的固定措施；对边角部的混凝土制品，宜设置保护衬垫，以免运输过程中造成磨损。

7.0.7 混凝土制品运输工具应具备足够的承载能力和稳定性，以防混凝土制品在运输过程中发生安全事故。

7.0.8 装卸时，严禁碰撞、扔摔、应轻码轻放，禁止翻斗倾卸。必要时可选择卸砖机来进行混凝土制品的装卸。

7.0.9 产品养护、堆放龄期不足28天不得出厂。

附录 A 剩余水灰比

A.0.1 范围

本附录规定了剩余水灰比的计算方法。

A.0.2 原理

剩余水灰比即混凝土制品在预养护过程中含水量的表征。

A.0.3 试件

剩余水灰比试样数量为1组3个固碳养护混凝土制品，对比试件为按照原养护工艺，即?? 温度，?? 压力蒸汽养护制备的混凝土制品。这部分出现了对比试件吗？

A.0.4 试验步骤

A.0.4.1 测定待测样品预养护前的初始质量。

A.0.4.2 将样品放入预养护室内进行预养护，样品间距应不小于10mm，测定预养护后试样质量。

A.0.5 结果计算

混凝土制品的剩余水灰比按式（A.1-A.2）计算，精确至0.01。

$$\beta = (W_0 - W_1)/W_0 \times x\% \quad \text{式 (A.1)}$$

$$(w/c)_e = (1 - \beta) \times w/c \quad \text{式 (A.2)}$$

式中：

$(w/c)_e$ ——试样在预养护后的剩余水灰比；

w/c ——配合比中试样的水灰比；

β ——混凝土制品在预养护过程中的失水率；

$x\%$ ——配合比中水占试样总质量的百分数，单位为百分数（%）；

W_0 ——3个试样在预养护前质量的算术平均值，单位为克（g）；

W_1 ——3个试样在预养护后质量的算术平均值，单位为克（g）。

附录 B 固碳性能增强系数

B.0.1 范围

本附录规定了固碳性能增强系数计算方法，包括固碳强度增强系数和固碳干燥收缩增强系数。

B.0.2 仪器设备

抗压强度试验、干燥收缩试验设备同相对应产品型号标准所列的设备。

B.0.3 试件

B.0.3.1 对比试件采用相同原料配比和制备工艺生产的试件，采用常规养护工艺，即未采用固碳养护工艺的试件。

B.0.3.2 抗压强度试样数量为2组6个。一组3块为固碳养护试件，一组3块为对比试件。

B.0.3.3 干燥收缩试样数量为2组6个。一组3块为固碳养护试件，一组3块为对比试件。

B.0.4 试验步骤

B.0.4.1 将预养护后的样品放入固碳养护室内进行固碳养护，样品间距应不小于10mm；对比样品放置的环境条件为：相对湿度（70±5）%，温度（20±5）℃。

B.0.4.2 将固碳养护6小时、12小时、24小时、48小时的试样，与同龄期养护的对比样品同时进行抗压强度、干燥收缩试验，试验方法按GB/T 4111操作。

B.0.5 结果计算

B.0.5.1 固碳养护混凝土制品的固碳强度增强系数按式（B.1）计算，精确至0.01。

$$I = \frac{f_1}{f_0} \quad \text{式 (B.1)}$$

式中：

I ——固碳养护混凝土制品的固碳强度增强系数；

f_1 ——3个固碳养护试件的抗压强度算术平均值，单位为兆帕（MPa）；

f_0 ——3个对比试件的抗压强度算术平均值，单位为兆帕（MPa）。

B.0.5.2 固碳养护混凝土制品的固碳干燥收缩增强系数按式（B.2）计算，精确至0.01。

$$K = \frac{S_1}{S_0} \quad \text{式 (B.2)}$$

式中：

K ——固碳养护混凝土制品的固碳干燥收缩增强系数；

S_1 ——3个固碳养护试件的干燥收缩算术平均值，单位为毫米每米（mm/m）；

S_0 ——3个对比试件的干燥收缩算术平均值，单位为毫米每米（mm/m）。

附录 C 混凝土制品固碳率

C.0.1 范围

本附录规定了混凝土制品固碳率的计算方法。

C.0.2 原理

试件在温度范围500-900℃内损失的质量与固碳养护过程中吸收的二氧化碳质量相等。

C.0.3 试件

C.0.3.1 对比试件采用相同原料配比和制备工艺生产的试件，采用常规养护工艺，即未采用固碳养护工艺的试件。

C.0.3.2 固碳率试样数量为2组6个。一组3块为固碳养护试件，一组3块为对比试件。

C.0.3.3 进行马弗炉试验前，应将空坩埚在马弗炉中加热至待测最高温度，并保持1小时；待测样品需粉磨并过100目方孔筛，并在105℃下烘干至恒重，待样品冷却至常温后称取所需质量（单个样品质量为2 g左右）。

C.0.4 试验步骤

C.0.4.1 将待测样品放入马弗炉中，以10℃/min的升温速率升至500℃，测定试样剩余质量。

C.0.4.2 继续将样品放入马弗炉中，以10℃/min的升温速率升至900℃，测定试样剩余质量。

C.0.5 结果计算

混凝土制品固碳率按式（C.1-C.3）计算，精确至0.01。

$$\theta = \frac{m_{500^{\circ}\text{C}} - m_{900^{\circ}\text{C}}}{m_{900^{\circ}\text{C}}} \quad \text{式 (C.1)}$$

$$\theta^* = \frac{m_{500^{\circ}\text{C}}^* - m_{900^{\circ}\text{C}}^*}{m_{900^{\circ}\text{C}}^*} \quad \text{式 (C.2)}$$

$$\omega = \frac{\theta - \theta^*}{0.5 \times \alpha} \quad \text{式 (C.3)}$$

式中：

ω ——混凝土制品固碳率，单位为百分数（%）；

θ ——固碳养护试样的实际二氧化碳吸收百分比，单位为百分数（%）；

θ^* ——对比试样的实际二氧化碳吸收百分比，单位为百分数（%）；

α ——水泥熟料占混凝土制品固相质量的百分数，单位为百分数（%）；

$m_{500^{\circ}\text{C}}$ ——3个固碳养护试样在500°C时剩余质量的算术平均值，单位为克（g）；

$m_{900^{\circ}\text{C}}$ ——3个固碳养护试样在900°C时剩余质量的算术平均值，单位为克（g）；

$m_{500^{\circ}\text{C}}^*$ ——3个对比试样在500°C时剩余质量的算术平均值，单位为克（g）；

$m_{900^{\circ}\text{C}}^*$ ——3个对比试样在900°C时剩余质量的算术平均值，单位为克（g）。

本规程用词说明

1 为便于在执行本标准（规程……）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：

正面词采用“必须”；反面词采用“严禁”。

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”；反面词采用“不应”或“不得”。

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

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，采用“可”。

2 条文中指明应按其它有关标准执行时的写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”。

中国土木工程学会标准

混凝土制品固碳养护制备技术规程

T/CCES X—20XX

条文说明

制订说明

《混凝土制品固碳养护制备技术规程》T/CCES XXX-20XX，经中国土木工程学会 XXX 函文批准发布。

本规程制订过程中，编制组进行了混凝土制品固碳养护制备技术的调查研究，总结了我国混凝土制品固碳养护领域的实践经验，同时参考了相关先进技术法规、技术标准，通过试验取得了混凝土制品剩余水灰比、固碳性能增强系数、固碳率等重要技术参数。

为便于广大检测、设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本规程时能正确理解和执行条文规定，本规程编制组按章、节、条顺序编制了本规程的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。需要注意的是，本条文说明不具备与规程正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握规程规定的参考。

1 总 则

1.0.1、1.0.2 为响应国家双碳目标，实现建材行业绿色转型，各种节能减碳技术层出不穷。其中，利用固碳养护制备混凝土制品不仅能够吸收部分二氧化碳、降低碳排放，又能节约资源、减少能耗，是一种切实可行、具有显著生态及经济效益的 CCUS 技术。随着固碳养护建材制品技术迅猛发展，制品产量及种类逐步上升，应用前景广阔。然而，关于固碳养护的适用范围、核心步骤、产品评估、固碳量测定等方面，依然缺乏统一的标准与技术指引。因此，亟需出台相关标准，指导固碳养护制备混凝土制品的推广，实现产业化应用。

1.0.3 本规程以确保固碳养护制备混凝土制品的产品性能为目的，主要根据我国现有的标准规范、科研成果和实践经验，并参考国外先进标准制定而成。本规程规定的试验方法适用于砖、砌块、板材、预制件等混凝土制品的制备过程，但对于加筋混凝土制品，需综合评估固碳养护对混凝土保护层及钢筋锈蚀的影响。

2 术语、符号与参考标准

2.1 术 语

2.1.1 固碳养护与传统自然养护或压蒸养护最大的区别在于其养护机理，即利用二氧化碳与混凝土胶凝材料中钙/镁氧化物的化学反应，使制品快速、高效地获得机械性能及长期耐久性。

2.1.2 可用于混凝土制品固碳养护的二氧化碳来源既包括商用二氧化碳、捕集贮存二氧化碳，也包括工业烟气。若工业烟气中水蒸气含量过高，需采取必要措施降低含水量，以免影响固碳养护效果。

2.1.5 预养护的主要目的是调节混凝土制品中含水量，以达到更全面、更均匀的碳化养护效果。含水量过高会阻碍二氧化碳在混凝土制品内部的传输扩散过程，含水量过低会阻碍钙/镁元素的浸出及二氧化碳的溶解，均不利于固碳养护。预养护技术包括真空干燥、微波干燥、红外干燥、鼓风干燥、减压干燥等方法。

2.1.6 原养护工艺包括自然养护及压蒸养护等利用胶凝材料水化作用作为强度来源的养护方法。

2.1.9 为排除固碳养护过程中混凝土制品吸收的水分及二氧化碳对混凝土制品固碳量的影响，实际固碳量及理论最大固碳量均采用二氧化碳吸收量与混凝土制品干混料总质量的比值。

3 原材料特性要求

3.1 水泥

3.1.1 当采用水泥作为混凝土制品的胶凝组分时，宜准确测定其氧化物组成，以评估其固碳能力。

3.2 矿物掺合料

3.2.1 当采用钢渣、镁渣、电石渣等工业废渣作为混凝土制品的胶凝组分时，宜准确测定其氧化物组成及矿物相组成，综合评估其固碳能力，如固碳能力过低，宜添加部分水泥作为胶凝材料以确保固碳养护效果。

3.2.2 粒径大小矿物掺合料显著影响固碳养护效果，一般来说，粒径越小矿物掺合料固碳养护越彻底。因此，矿物掺合料比表面积不宜小于 $300 \text{ m}^2/\text{kg}$ ，以确保固碳养护制备混凝土制品的性能。

3.3 骨料

3.3.1 当采用钢渣、镁渣、电石渣等具有碳化活性的工业废渣作为骨料时，因其粒径大，二氧化碳难以向骨料内部渗透，一般碳化深度只有骨料表层几微米范围内，因此在计算混凝土制品理论固碳量时不考虑骨料与二氧化碳间的反应，认为骨料为惰性材料。

3.4 混凝土外加剂

3.4.1 除GB 8076规定的混凝土外加剂，如减水剂、早强剂、缓凝剂、引气剂等，混凝土制品固碳养护还可采用固碳增强外加剂，如醇胺类二氧化碳吸收剂，或氨基羧酸类、羟基羧酸类、羟氨基羧酸类金属螯合剂。

3.4.2 使用固碳增强外加剂前应先进进行中试研究，并根据试验结果调整工艺参数。

4 设施及排放要求

4.1 设施要求

4.1.1 混凝土制品固碳养护时，对气体压力、浓度、温度等参数均有要求，因此对含二氧化碳气体的接入设施应作出如下规定：

a) 混凝土制品固碳养护过程中，二氧化碳气体的接入设施、输送管道、控制阀门等在真空预养护时需承受负压，在加压固碳养护时需承受正压。因此，需采用合适控制阀组，通过控制含二氧化碳气体的流量对养护釜压力进行调节。

b) 二氧化碳可与水结合生成碳酸，增加溶液酸性，进而增强环境腐蚀性。除二氧化碳外，工业烟气中另含有二氧化硫、氮氧化物、氟化物等腐蚀性气体。固碳养护过程中试件会排放大量水分，造成设备锈蚀。因此，相关接入设施、输送管道、控制阀门应采用耐腐蚀材料，并不与含二氧化碳气体发生任何反应，增强固碳养护设施的耐久性。

c) 混凝土制品固碳养护时，可通过提高养护温度而增强固碳养护效果。此外，工业烟气通常具有一定热量，能促进混凝土制品的固碳养护过程。因此，含二氧化碳气体的输送和接入管路应进行保温。

4.1.2 为保证混凝土制品固碳养护过程的连续性，需采用含二氧化碳气体贮存设施，应满足以下要求：

a) 二氧化碳在自然条件下能够与混凝土制品原材料自发反应，因此需将含二氧化碳气体应与常规原料、燃料和产品分开贮存。

b) 连续运行时，为保证二氧化碳供应充足不间断，防止意外泄漏导致的二氧化碳气体缺乏，采用不少于2座高浓度二氧化碳贮存设施。

4.1.5 混凝土制品固碳养护釜作为固碳养护的主要设施，可根据需求进行相应改造，丰富使用功能，但需满足以下基本安全要求：

a) 混凝土制品固碳养护釜在预养护过程中需承受负压，在加压碳化过程中需承受正压，属于压力容器。压力容器是指包含气体或液体并承载一定压力的封闭装置。

b) 普通压力容器必须注册，简单压力容器不需要注册。普通压力容器应由特种设备检验检测机构进行检验。简单压力容器应在推荐使用寿命内由用户定期维修和检查。只有在检测到异常情况时，才应邀请特种设备检查和测试机构进行检查；已达到建议使用寿命的简单压力容器必须报废。如果需要重复使用，应按照《压力容器定期检验规则》进行定期检查。

c) 在一定压力下，通过测量固碳养护釜进出口二氧化碳浓度变化，能够快速计算二氧化碳吸收量，实时监测固碳养护过程。因此，固碳养护设施应具有进出口气体流量控制装置、进出口气体测试仪、安全控制装置。

4.2 排放要求

4.2.1 混凝土制品固碳养护采用高浓度二氧化碳或工业废气，排放废气中含有大量的有害物质，如二氧化硫、氮氧化物、挥发性有机物等，它们对大气中的臭氧层和空气质量造成直接威胁。同时，废气中的颗粒物和毒性物质也对人们的呼吸系统和健康产生潜在危害。因此，应对排放废气定期监测，若废气不满足GB 9078、GB 29620等标准的要求，应对废气进行二次处理。

4.2.2 固碳养护混凝土制品的原材料通常包括工业固废与工业废气。其中，工业固废包含重金属元素，工业废气包含有害气体及挥发性有机物等。因此，混凝土制品固碳养护过程中所排放废水应当采取有效措施，收集和处理产生的全部废水，防止污染环境。含有毒有害水污染物的工业废水应当分类收集和处理，不得稀释排放。工业集聚区应当配套建设相应的污水集中处理设施，安装自动监测设备，与环境保护主管部门的监控设备联网，并保证监测设备正常运行。向污水集中处理设施排放工业废水的，应当按照国家有关规定进行预处理，达到集中处理设施处理工艺要求后方可排放。

5 制品制备过程要求

5.1 配合比设计

5.1.1 本条对固碳养护混凝土制品配合比设计的要求进行了规定。固碳养护混凝土制品应综合考虑制品类型、用途、固碳养护效果，进而选用干硬性混凝土或塑性混凝土。

5.1.2 对于干硬性混凝土，一般采用压制成型。成型压力、水固比、胶凝材料含量显著影响制品固碳养护效果及制品性能，当成型压力过小时，坯体微观结构疏松，影响性能发展；当成型压力过大时，坯体微观结构致密，阻碍气体在制品内部传输扩散，影响固碳养护效果。当水固比过小时，坯体难以成型，且水是碳化反应的必要组分；当水固比过大时，坯体内部孔结构被水分占据，阻碍气体在制品内部传输扩散，影响固碳养护效果。胶凝材料在固碳养护期间与二氧化碳反应，使坯体获得胶结性能，强度得到发展，当胶凝材料含量过低时，坯体缺失可碳化组分，降低固碳养护效果，影响制品性能发展。

5.1.4 对于浇筑成型的混凝土砌块、板材、预制构件等，混凝土拌合物除应具有好的黏聚性、流动性和保水性，不得离析、泌水外，为保证良好的固碳养护效果，试件需先进行预养护处理，通过真空干燥、鼓风干燥、微波干燥等手段蒸发试件内部多余水分，降低剩余水灰比以满足表1要求。

5.2 预养护

5.2.1 二氧化碳的传输扩散对混凝土制品固碳养护效果极为关键，如果坯体在固碳养护釜中摆放过于紧密，会使二氧化碳难以从坯体相邻面向内部渗透，导致混凝土制品固碳养护不均匀，对混凝土制品的性能发展不利。因而要求坯体最小间隔不宜小于10毫米，使二氧化碳从各个表面均匀渗透。

5.2.2 对于浇筑成型的塑性混凝土制品，如果初始强度满足运输及吊装要求，则先脱模并合理摆放，然后进行固碳养护；如果初始强度不满足运输及吊装要求，需采用不脱模养护的方法，并在模板设置排气孔，气孔孔径不小于5mm，气孔上下间隔和左右间隔距离设置为50mm，以保证二氧化碳气体的均匀渗透。

5.2.3 混凝土为多孔材料，在固碳养护过程中，二氧化碳可通过混凝土内部孔隙通道由表面向内部传输，但如果混凝土含水量过高，多余的水份会阻塞混凝土内部孔隙，使得二氧化碳难以向混凝土内部渗透，导致固碳养护只能发生在制品表

面，内外碳化不均匀，影响制品性能。因而混凝土坯体在固碳养护前应先进行预养护，去除坯体中多余水分，降低坯体剩余水灰比。

5.2.4 混凝土含水量与环境相对湿度相关，降低相对湿度能够促进混凝土内部毛细孔中水份的蒸发，降低混凝土含水量。通过抽真空的方法降低环境气压，进一步促进混凝土内部水份的脱除。但真空预养护不宜过久，以免水份蒸发过多，影响固碳养护效果。因而真空干燥预养护的环境相对湿度采用35-70%、常温环境中静置不小于30分钟，真空度不宜高于-0.03 MPa，预养护时间不宜少于30分钟，在混凝土剩余水灰比达到要求时结束预养护。

5.2.5 增加环境空气流动能够促进混凝土内部水份的蒸发，进而降低混凝土含水量。通过鼓风机或风扇保持预养护室内空气流通，控制相对湿度为50-70%、温度15-25°C，预养护时间不宜少于1小时，在混凝土剩余水灰比达到要求时结束预养护。

5.2.6 无论真空干燥或是鼓风干燥，混凝土的水分蒸发均以由表及里、先外后内的顺序进行，容易造成混凝土水份分布不均匀，进而导致固碳养护不均匀。因而可采用微波干燥，它是一种内部加热的方法，混凝土制品置于振荡周期极短的微波高频电场中，其内部水分子会发生极化并沿着微波电场的方向整齐排列，而后迅速随高频交变电场方向的交互变化而转动，并产生剧烈的碰撞和摩擦，结果部分微波能转化为分子运动能，并以热量的形式表现出来，使水的温度升高而离开混凝土，从而使混凝土制品得到干燥。但需对微波干燥的功率、频率、时间等做出严格限制，以防过快的水份蒸发所导致的混凝土干裂。因而微波干燥一般功率为30-60 kW，频率为20-5000 MHz，预养护时间不应大于1小时。

5.2.8 表1对不同成型方式、初始水灰比、不同预养护方法的混凝土制品的剩余水灰比分别做了规定，对于其他成型方式或预养护方法的混凝土制品，应根据最终固碳养护效果对剩余水灰比要求进行适当调整。

5.3 固碳养护

5.3.1 固碳养护方法可采用加压养护、常压养护、循环养护。其中加压养护指固碳养护釜内气体压力大于0.1MPa的密封养护方法；常压养护指固碳养护釜内气体压力等于0.1MPa的开放养护方法；循环养护指固碳养护釜内气体压力等于0.1MPa的开放养护，但将气体出口与进口连接，循环利用二氧化碳的养护方法。

5.3.4 固碳养护温度能够显著影响固碳养护效果，一般来说，温度越高，碳化反应速率越快，固碳养护时间越短，混凝土制品早期性能越好。但如果温度过高，混凝土制品开裂的风险升高，长期性能变差，且高温会增加养护能耗，提高养护成本。因此，需根据制品性能要求，综合考虑养护时间、场地及设备、能耗及成

本等，合理选用固碳养护温度梯度。若采用工业尾气作为二氧化碳气体来源，因工业尾气通常具有部分热量，可直接被固碳养护过程利用，减少固碳养护能耗。

5.3.5 气体压力能够显著影响固碳养护效果，一般来说，气体压力越大，二氧化碳更容易向混凝土内部渗透，碳化反应程度越高。但如果气体压力过大，快速生成的碳化产物会包裹胶凝材料颗粒，阻碍其进一步碳化，反而不利于提升固碳养护效果，且高压会增加养护能耗，也对固碳养护设施提出更高的安全要求。

6 制品性能指标要求

6.1 制品性能技术要求

6.1.4 固碳养护混凝土制品主要包括砌块、砖、板等预制构件，因而抗压强度及干燥收缩是最重要的性能指标。抗压强度是指材料在受到外部压力时能够承受的最大压力，直接反映了混凝土的胶凝性能，是预制构件发挥使用功能的基础。干燥收缩是指水泥浆体硬化后，浆体中的水分因蒸发引起的体积收缩，是导致混凝土结构非荷载裂缝的主要原因之一。固碳养护相较于传统养护方法，混凝土制品的抗压强度及干燥收缩都得到了改善，因而采用固碳养护试体与对比试体的抗压强度和干燥收缩的比值来评价固碳养护的增强效果。

6.2 制品固碳技术要求

6.2.1 固碳率是固碳养护混凝土制品特有的性能指标，固碳率是指混凝土制品中胶凝材料实际二氧化碳固存量，与理论最大二氧化碳固存量的比值。固碳率越高，混凝土制品在固碳养护过程中吸收的二氧化碳越多，混凝土制品的性能通常也更优异。

附录 A 剩余水灰比

A.0.5 为排除试样表面自由水对结果的干扰，试样在测试前均应擦干，去除表面明水。

附录 B 固碳性能增强系数

B.0.1 如果混凝土制品需要考虑其他性能指标，也可参考固碳强度增强系数和固碳干燥收缩增强系数的计算方法，计算其他固碳性能增强系数。

附录 C 混凝土制品固碳率

C.0.5 为排除含水量及二氧化碳含量对结果的影响，试样的二氧化碳吸收百分比均为二氧化碳含量与样品 900 度残余质量的比值。式 C.3 中系数 0.5 是根据普通波特兰水泥熟料的氧化物组成计算得出的理论最大二氧化碳吸收百分比，如果混凝土制品采用的是其他胶凝材料，需根据其氧化物组成重新确定理论最大二氧化碳吸收百分比系数。