



中国工程建设标准化协会标准

水泥和混凝土用固碳钢渣粉技术规程

**Technical specifications for the application of carbon dioxide fixed
steel slag powder in cement and concrete**

(征求意见稿)

中国 XX 出版社

20xx xx

中国工程建设标准化协会标准

水泥和混凝土用固碳钢渣粉技术规程

Technical specifications for the application of carbon dioxide
fixed steel slag powder in cement and concrete

T/CECS ××× - 202×

主编单位：东南大学

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：202×年××月××日

中国 XX 出版社

202x 北京

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2024 年第一批协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字〔2024〕15 号）的要求，规程编制组经广泛调查和试验研究，认真总结实践经验，参考国内外相关标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程共分 6 章，主要内容包括：总则，术语，基本规定，固碳钢渣粉的检验和验收，固碳钢渣粉水泥基材料的设计，生产与施工，固碳钢渣粉水泥基材料的质量检验和验收。

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。

本规程由中国工程建设标准化协会防水防护与修复专业委员会归口管理，由东南大学负责具体技术内容的解释。执行过程中，如有意见或建议，请反馈给东南大学（地址：江苏省南京市江宁区东南大学路 2 号 邮政编码：211189；邮箱：zxjianguo@163.com）。

主 编 单 位：

参 编 单 位：

主要起草人员：

主要审查人员：

目 次

1 总 则.....	1
2 术 语.....	2
3 基本规定.....	3
4 固碳钢渣粉的检验和验收	5
5 固碳钢渣粉水泥基材料的设计、生产与施工	6
5.1 原材料要求	6
5.2 掺固碳钢渣粉的钢渣矿渣硅酸盐水泥	6
5.3 掺固碳钢渣粉的水泥净浆	8
5.4 掺固碳钢渣粉的砂浆和砂浆制品	14
5.5 掺固碳钢渣粉的混凝土和混凝土制品	15
6 固碳钢渣粉水泥基材料的质量检验和验收	18
本规程用词说明	19
引用标准名录.....	20

Contents

1	General provisions.....	1
2	Terms.....	2
3	Basic requirements.....	3
4	Quality inspection and acceptance of carbon dioxide fixed steel slag powder.....	5
5	Design, production and construction of cement-based materials with addition of carbon dioxide fixed steel slag powder.....	6
5.1	Raw material requirements	6
5.2	Steel slag and granulated furnace slag portland cement with addition of carbon dioxide fixed steel slag powder.....	6
5.3	Cement paste with addition of carbon dioxide fixed steel slag powder	11
5.4	Mortar and mortar products with addition of carbon dioxide mineralized steel slag powder	12
5.5	Concrete and concrete products with addition of carbon dioxide fixed steel slag powder	12
6	Quality inspection and acceptance of cement-based materials with addition of carbon dioxide fixed steel slag powder.....	14
	Explanation of wording in this code	15
	List of quoted standards	16

1 总 则

1.0.1 为规范固碳钢渣粉在水泥、水泥净浆、砂浆和混凝土等水泥基材料中的应用，做到技术先进，经济合理，安全适用，保证工程质量，制定本规程。

条文说明：钢渣是炼钢过程排出的工业废渣，其中又以转炉钢渣为主，占比超 70 %。钢渣排放量约为粗钢产量的 15% ~ 20%，现阶段的综合利用率不高于 30%，累积堆存量超 10 亿吨，占用了大量土地，污染了周围土壤资源和水资源，并且可能对人体造成危害，亟需高效利用。然而，钢渣粉存在安定性难题，且活性较低，是制约其安全高效利用的瓶颈。研究表明，钢渣碳酸化是较好的处理方法，不仅使其安定性问题得以解决，水化活性提高，还可吸收工业 CO₂，兼具碳封存效益。因此，钢渣粉固碳后获得的固碳钢渣粉，可以用水泥、水泥净浆、砂浆和混凝土等水泥基材料中，成为一种新的资源。为了促进钢渣在固碳领域的推广利用，以及后续建材化利用的水平，在总结已有成功经验和大量试验数据的基础上制定本规程。

1.0.2 本规程适用于掺固碳钢渣粉水泥基材料的原材料选择、配方设计、施工、质量检验与验收。

条文说明：本规程主要针对将固碳钢渣粉作为混合材之一的钢渣矿渣硅酸盐水泥的制备以及将固碳钢渣粉作为掺合料的水泥净浆/砂浆/混凝土的制备，固碳钢渣粉可以与其他矿物掺合料复掺使用。

1.0.3 固碳钢渣粉在水泥基材料中的应用，除应符合本规程外，尚应符合现行国家有关标准的规定。

条文说明：本条规定了本规程与其他标准、规范的关系。固碳钢渣粉在水泥基材料中应用时，应符合国家现行有关标准如《钢渣矿渣硅酸盐水泥》GB/T 13590、《用于水泥和混凝土中的钢渣粉》GB/T 20491 和《矿物掺合料应用技术规范》GB/T 51003 等。

2 术 语

2.0.1 钢渣粉 Steel slag powder

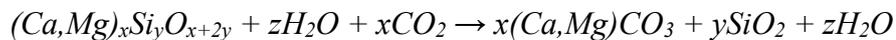
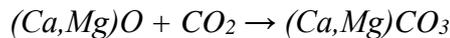
转炉或电炉炼钢所得的含硅酸盐、铁铝酸盐为主要矿物组成，经磁选除铁处理后粉磨达到一定细度的产品。

条文说明：钢渣是转炉或者电炉炼钢产生的废渣，其主要物相组成是 C_2S 、 C_3S 、 C_3A 、 C_4AF 、 RO 、 $f-CaO$ 、 $f-MgO$ 以及其他特征矿相，其中 $f-CaO$ 、 $f-MgO$ 由于遇水会形成不可控膨胀性产物，造成潜在的安定性问题；水化活性主要由硅酸盐矿相提供，但钢渣中硅酸盐矿相含量较低，不足 50%，且相比于硅酸盐水泥中的同类型矿相水化更慢，因此活性也较低，难以安全大掺量利用。

2.0.2 固碳钢渣粉 Carbon fixing steel slag powder

钢渣粉与固碳添加剂混合后，经与 CO_2 反应、烘干和粉磨制得具有一定细度的产品。

条文说明：固碳钢渣粉是钢渣粉固封 CO_2 后形成的新的资源，主要发生了 $f-CaO$ 、 $f-MgO$ 以及硅酸盐矿物的碳酸化反应，由下式所示。钢渣粉固碳后矿相发生了显著变化，首先是 $f-CaO$ 、 $f-MgO$ 含量的下降，使得安定性问题得以改善，其次是碳酸钙和硅胶的形成，具有成核作用和火山灰效应，水化活性提升。钢渣粉固碳后可能会生成部分团聚颗粒，需要进一步粉磨达到一定细度。实验表明，固碳得到的钢渣粉团聚颗粒较易粉磨。



2.0.3 水泥基材料 Cement-based materials

以水泥作为主要胶凝成分，并掺入其他辅助材料，经过特定工艺制备而成的材料，具备粘结、固化及硬化等特性，通常涵盖水泥、水泥净浆、砂浆、混凝土。

3 基本规定

3.0.1 用于水泥基材料的固碳钢渣粉，其固碳率和安定性应符合《用于水泥基材料的固碳钢渣粉》T/CECS xxx 的相关规定。

条文说明：钢渣中的膨胀组分 f-CaO、f-MgO 会造成水泥基材料安定性不良的问题，限制了钢渣的利用。对 f-CaO、f-MgO 含量和膨胀值的关系进行的分析结果如图 3.0.1-1 所示。可以看出随着 f-CaO、f-MgO 含量的增加，水泥浆体的膨胀值也随之增加，因此，为了实现钢渣粉的安全利用，需要通过固碳反应对膨胀组分 f-CaO、f-MgO 进行消纳。

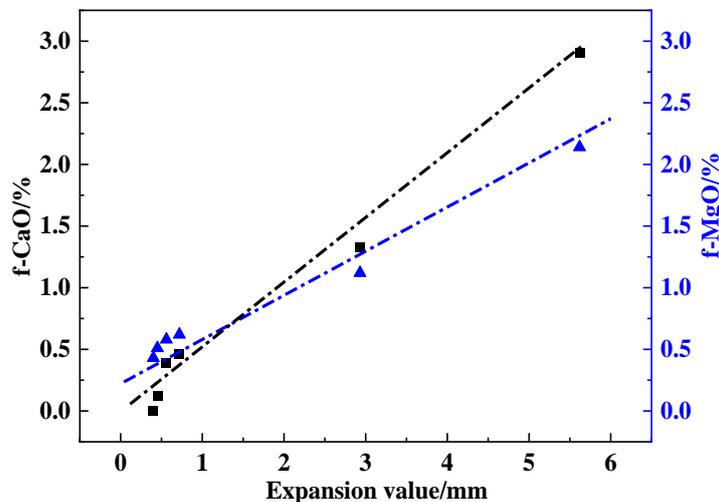


图 3.0.1-1 膨胀值和 f-CaO、f-MgO 含量的关系

测试了不同固碳率固碳钢渣粉的安定性如图 3.0.1-2 所示。图中为两种不同固碳方式获得的固碳钢渣粉，其中 CSS 为直接固碳获得的固碳钢渣粉，BSS 为利用东南大学研发的微生物矿化技术获得的固碳钢渣粉。可以看出，相同固碳率时，固碳方式对钢渣粉安定性基本没有影响，而固碳率对安定性的影响显著。随着固碳率的增加，掺固碳钢渣粉水泥基材料的膨胀值逐渐下降并趋于平缓，且其值皆小于现行国家标准《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》GB/T 1346 中规定的 5.0 mm。当固碳率约为 5.0 % 时，水泥基材料的膨胀值约为 3.25 mm，当固碳率大于 8.0 % 时，水泥基材料的膨胀值不高于 1.0 mm。因此，要实现钢渣粉的高效安全利用，需要达到一定的固碳率，当固碳率大于 8% 时能够获得更加安全的安定性。

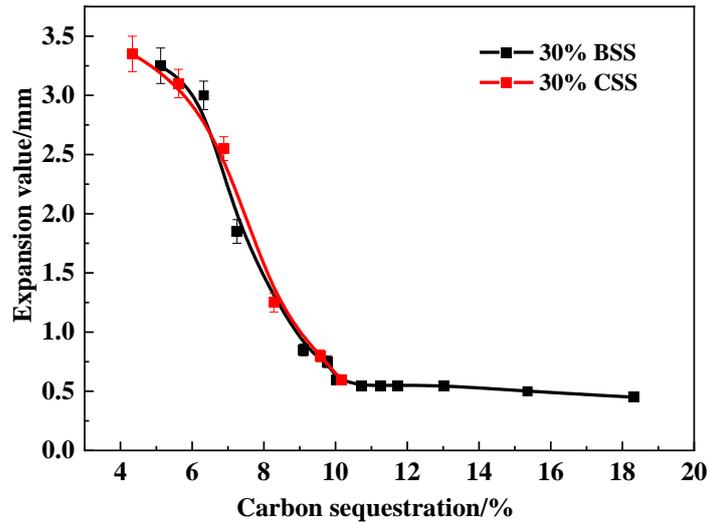


图 3.0.1-2 固碳率对掺固碳钢渣粉水泥基材料安定性的影响

3.0.2 用于水泥基材料的固碳钢渣粉，其活性指数应符合《用于水泥基材料的固碳钢渣粉》T/CECS xxx 的相关规定。

条文说明：强度是水泥基材料的关键性能指标之一，用于水泥基材料的固碳钢渣粉的活性指数必须达到相应的标准，以确保工程应用所需的性能表现及经济效益。

3.0.3 当固碳钢渣粉用于水泥基材料时，其掺量应通过试验确定。

条文说明：固碳钢渣粉性能受钢渣粉来源、固碳率、固碳方式、粒径分布的影响，使用前应通过试验确定固碳钢渣粉的合适掺量。当固碳钢渣粉和其他矿物掺合料复合使用时，可以发挥不同矿物掺合料的优势，获得协同效应，复合矿物掺合料的合理掺量也需通过试验确定。

3.0.4 掺固碳钢渣粉的钢渣矿渣硅酸盐水泥的性能应符合现行国家标准《钢渣矿渣硅酸盐水泥》GB/T 13950 的规定。

3.0.5 掺固碳钢渣粉的水泥净浆、砂浆和混凝土的性能应满足工程要求的质量控制指标。

条文说明：掺固碳钢渣粉的水泥基材料具有相关标准时，其性能应符合标准的规定，当无标准可循时，应根据工程需要，确保固碳钢渣粉水泥基材料的工作性、体积稳定性、强度、耐久性能等满足工程要求的控制指标。

4 固碳钢渣粉的检验和验收

4.0.1 固碳钢渣粉的技术指标应符合《用于水泥基材料的固碳钢渣粉》T/CECS xxx 的相关规定。

条文说明：《用于水泥基材料的固碳钢渣粉》T/CECS xxx 中对固碳钢渣粉的技术指标进行了详细的规定。

4.0.2 固碳钢渣粉的检验和验收方法按《用于水泥基材料的固碳钢渣粉》T/CECS xxx 的相关规定执行。

条文说明：《用于水泥基材料的固碳钢渣粉》T/CECS xxx 中对固碳钢渣粉的检验和验收方法进行了详细的说明。

5 固碳钢渣粉水泥基材料的设计、生产与施工

5.1 原材料要求

5.1.1 固碳钢渣粉应符合《用于水泥基材料的固碳钢渣粉》T/CECS xxx 的相关规定。

5.1.2 水泥应符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》GB 175 或《钢渣矿渣硅酸盐水泥》GB/T 13950 的规定。

5.1.3 细骨料的技术要求应符合现行国家标准《建设用砂》GB/T 14684 和现行行业标准《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52 的规定。

5.1.4 粗骨料的技术要求应符合现行国家标准《建设用卵石、碎石》GB/T 14685 或现行行业标准《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52 的规定。

5.1.5 水应符合现行行业标准《混凝土用水标准》JGJ 63 的规定。

5.1.6 化学外加剂应符合现行国家标准《混凝土外加剂》GB 8076 的规定。

5.1.7 其他辅助胶凝材料应符合现行国家标准的规定或通过试验确定。

条文说明：用于水泥、水泥净浆、砂浆、混凝土的原材料包括固碳钢渣粉、硅酸盐水泥或熟料、细骨料、粗骨料、水、外加剂以及其他矿物掺合料，例如矿渣、粉煤灰等，除固碳钢渣粉应符合本规程的规定外，其他原材料应符合相关现行国家标准的规定，当无标准可作为依据时，应通过试验确定。

5.2 掺固碳钢渣粉的钢渣矿渣硅酸盐水泥

5.2.1 当采用固碳钢渣粉替代钢渣粉制备钢渣矿渣硅酸盐水泥时，固碳钢渣粉的掺量宜取《钢渣矿渣硅酸盐水泥》GB/T 13950 中规定的钢渣粉掺量的上限值。

条文说明：固碳钢渣粉相比于钢渣粉的安定性和活性等性能更佳，因此可以在国标规定的范围内及满足水泥性能要求的前提下，尽可能提高其掺量，以降低水泥生产成本，提高碳减排效益。

5.2.2 掺固碳钢渣粉的钢渣矿渣硅酸盐水泥化学组成中，氧化铝和碳酸钙的质量

比宜为 1.5 ~ 4.5。

条文说明：固碳钢渣粉中含有碳酸钙，可参与水泥水化反应，与铝酸盐反应形成单碳铝酸钙，提高水泥基材料硬化浆体的密实度，进而提高力学性能。选取了高炉矿渣粉（BFS）与固碳钢渣粉（BSS）混合后以 30 wt.% 替代率制备复合水泥，以活性指数为指标获得了最佳二元组分质量比区间。

表 5.2.2-1 水泥、高炉矿渣和固碳钢渣粉的化学组成 / wt.%

Type	Loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	f-CaO	SO ₃	Cl ⁻	K ₂ O	Na ₂ O	Total
Cement	0.53	21.47	5.36	2.92	65.45	1.77	0.95	0.56	0.004	0.793	0.140	99.95
BFS	1.35	28.76	15.79	0.71	38.48	11.08	-	2.24	-	0.54	0.54	98.95
BSS	15.97	16.66	4.86	10.01	41.85	3.55	-	1.54	-	0.19	0.20	94.63

表 5.2.2-2 固碳钢渣粉/高炉矿渣按不同比例复合制备的复合水泥化学组成 / wt.%

Type \ Ratio	1/4	1/3	1/2	1/1	2/1	3/1	4/1
Al ₂ O ₃	11.15	10.78	10.16	8.92	7.2	7.07	6.7
SiO ₂	27.61	27.14	26.35	24.77	23.19	22.4	21.92
CaCO ₃	1.33	1.66	2.22	3.33	4.44	4.99	5.32
Al ₂ O ₃ /CaCO ₃	8.38	6.49	4.58	2.68	1.62	1.42	1.26

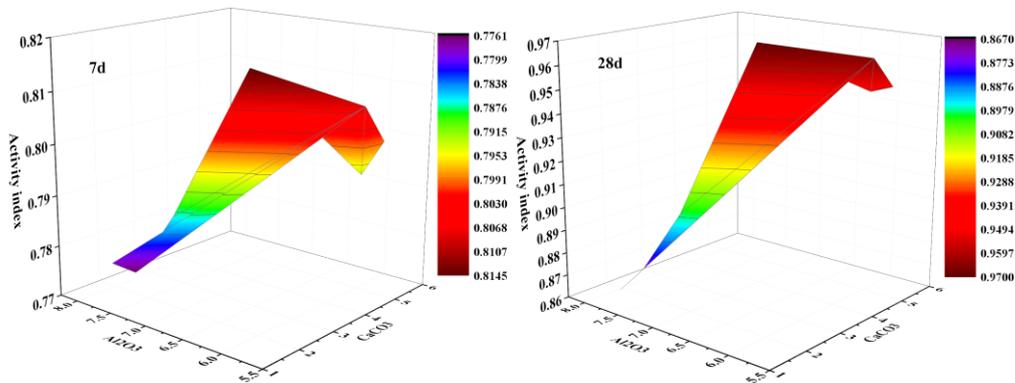


图 5.2.2-1 水泥基材料的组成与活性指数的关系

试验结果显示，碳酸钙和氧化铝含量变化时，复合辅助胶凝材料 7d 和 28d 水化活性先增后降，存在最优适宜比例。碳酸钙可成核并促水泥水化，氧化铝可以提高碳酸钙与水泥矿物的反应效率。适当降低碳酸钙增加氧化铝，保证成核同时促进碳酸钙更多水化，形成致密微结构。即复合水泥中氧化铝和碳酸钙的质量比约为 1.5 ~ 4.5 时，复合掺合料活性较高，优于单一组分。

5.3 掺固碳钢渣粉的水泥净浆

5.3.1 固碳钢渣粉水泥净浆的配合比设计应满足工程设计和施工要求，固碳钢渣粉与化学外加剂的适应性应通过试验确定，可通过适当提高外加剂掺量调整流动性。

条文说明：钢渣粉固碳后理化特征改变，掺入水泥基材料时会影响流动性、体积稳定性和氯离子抗渗性，与掺原状钢渣粉（SS）和纯水泥基材料不同。在制备掺固碳钢渣粉的水泥净浆、砂浆及混凝土时，外加剂调整性能需通过试验确定。下文详细介绍固碳钢渣粉掺入及固碳率对水泥基材料的影响：

(1) 工作性方面。如图 5.3.1-1 所示固碳钢渣粉（BSS）初凝和终凝时间相比于原状钢渣粉缩短，流动度降低。这是因为固碳过程侵蚀了钢渣粉颗粒表面，增大了颗粒粗糙度，与水接触吸附更多自由水，导致可用于浆体流动的水量降低。

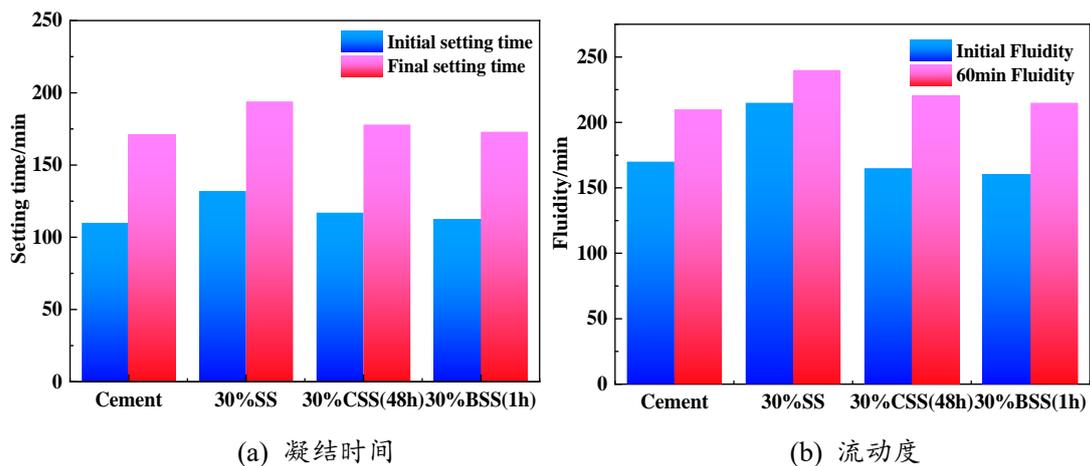


图 5.3.1-1 水泥基材料的凝结时间和流动度

试验分析了不同固碳率钢渣粉对水泥基材料凝结时间和流动度的影响规律如图 5.3.1-2 所示，结果表明固碳率提升导致初凝和终凝时间缩短，浆体初始流动度及经时流动度也呈下降趋势。固碳率越高表明钢渣粉颗粒的反应程度越高，表面受到的侵蚀更加严重，表层附着的碳酸钙产物越多，表面粗糙度越大。

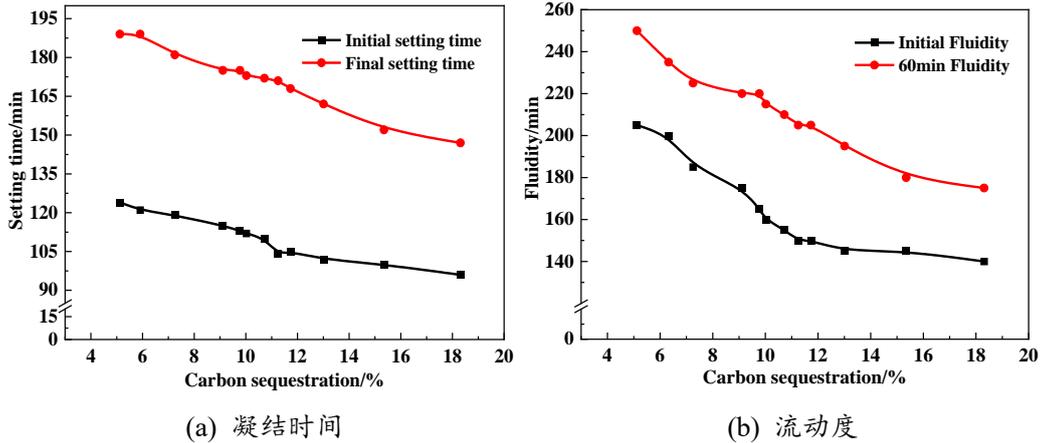


图 5.3.1-2 不同固碳率钢渣粉对水泥基材料凝结时间和流动度的影响

(2) 体积稳定性方面。图 5.3.1-3 表明掺入固碳钢渣粉后，相比于纯水泥基材料的自收缩率下降，这是因为钢渣粉掺入使水泥含量降低，因水泥水化不断消耗自由水引起的自收缩效应会减小。而固碳钢渣粉水泥基材料的自收缩略高于原状钢渣粉，这是由于钢渣粉固碳后活性有所提升，以及表面粗糙度增加，一方面会导致水化加快，即自由水保留量降低；另一方面比表面积增大吸附了更多的自由水。

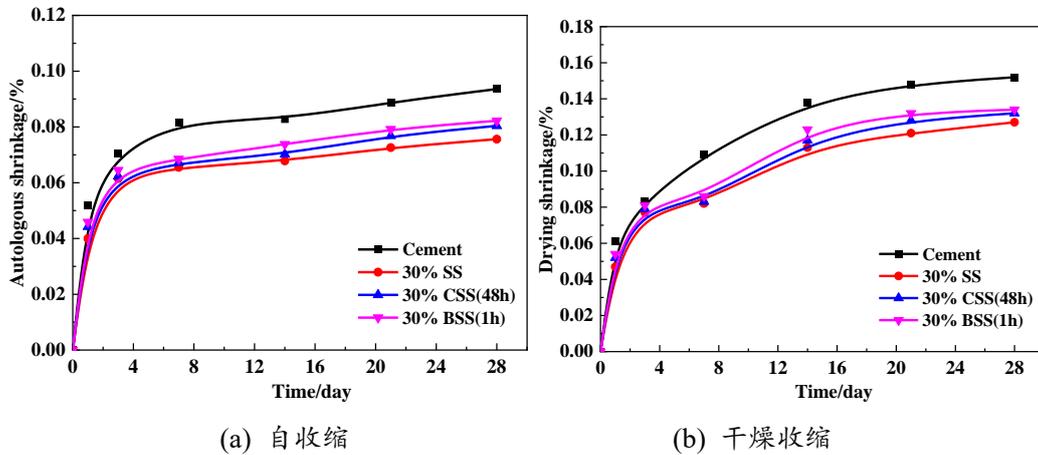


图 5.3.1-3 水泥基材料的体积稳定性

进一步测试不同固碳率钢渣粉对水泥基材料自收缩性的影响结果如图 5.3.1-4 所示，随着固碳率进一步提高，水泥基材料的自收缩率上升。因为固碳率越高，矿化钢渣粉的活性越高，且钢渣粉颗粒表面的侵蚀程度也较高，导致水泥基材料早期水化速率较快。

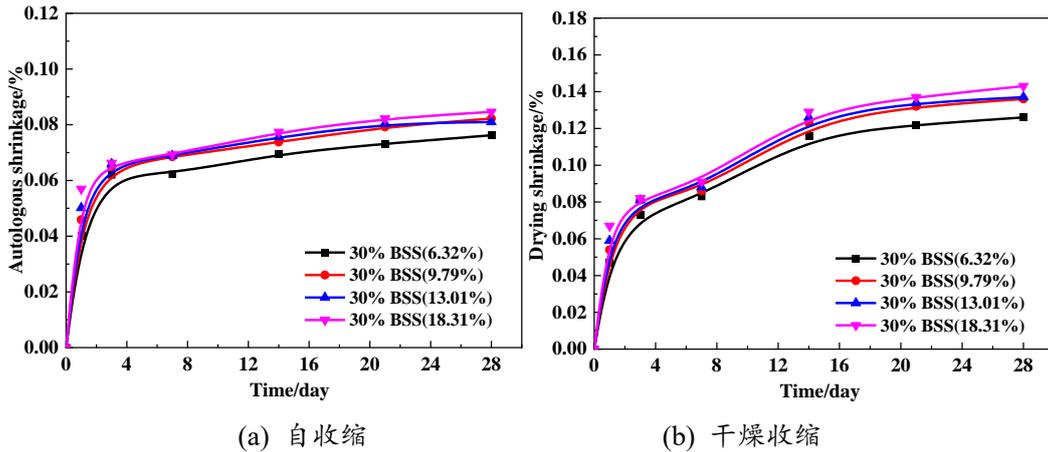


图 5.3.1-4 不同固碳率钢渣粉对水泥基材料体积稳定性的影响

(3) 氯离子渗透性。掺入矿化或碳化钢渣粉的水泥基材料氯离子传输系数上升,说明水泥基材料抗氯离子渗透性能下降,原因是孔隙率增加促进了氯离子的传输。如图 5.3.1-5 和 5.3.1-6 所示,固碳钢渣粉相比原状钢渣粉氯离子传输系数更低。并且钢渣粉固碳率越高,氯离子传输系数越低。这归因于高水化活性的矿化钢渣粉使硬化浆体更致密,减少了氯离子的传输通道。

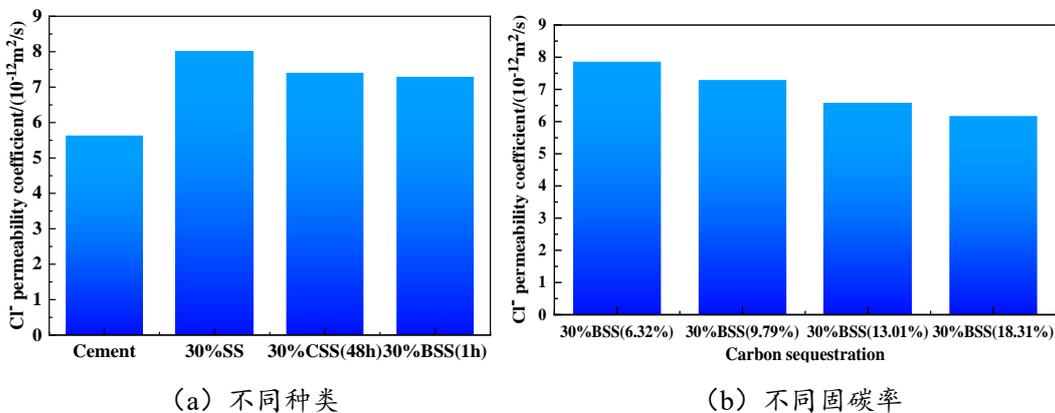


图 5.3.1-5 钢渣粉对水泥基材料的氯离子传输系数的影响

5.3.2 用于固井工程的固碳钢渣粉水泥净浆,其性能应符合《油井水泥》GB/T 10238、《页岩气 固井工程 第 2 部分:水泥浆技术要求和评价方法的规定》NB/T 14004.2 的规定。

5.3.3 用于灌浆工程的固碳钢渣粉水泥净浆,其性能应符合《水泥基灌浆材料》JC/T 986、《水泥-水玻璃灌浆材料》JC/T 2536 的规定。

5.3.4 掺固碳钢渣粉的水泥净浆用于固井工程时，其施工应符合《固井作业规程》SY/T 5374 的规定；

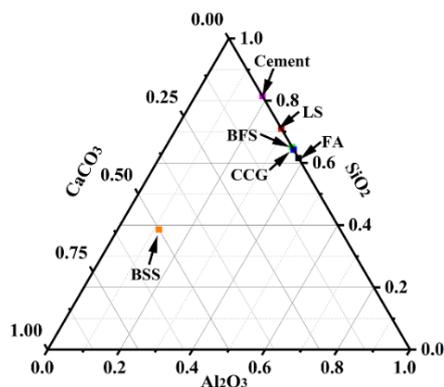
5.3.5 掺固碳钢渣粉的水泥净浆用于灌浆工程时，其施工应符合《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》DL/T 5148 的规定。

5.3.6 水泥净浆中单独掺固碳钢渣粉时，固碳钢渣粉的掺量应由试验确定。

5.3.7 当固碳钢渣粉与其他掺合料复合用于水泥净浆时，宜选取铝含量较高的掺合料与固碳钢渣粉配伍，且水泥净浆胶凝材料化学组成中，氧化铝和碳酸钙的质量比宜为 1.5~4.5。

条文说明：试验将固碳钢渣粉与四种高铝辅助胶凝材料，包括粉煤灰(FA)、锂渣粉(LS)、高炉矿渣粉(BFS)和煅烧煤矸石粉(CCG)分别复合，制备了不同的二元复合辅助胶凝材料，以活性指数为指标获得了最佳二元组分质量比区间，此时复合辅助胶凝材料的水化活性高于单一组分。分析发现掺二元组分的水泥基复合胶凝材料化学组成中，其氧化铝和碳酸钙的质量比皆在 1.5~4.5 时效果最佳。在成本和资源受限时，应调整比例以结晶最优区间。具体分析如下：

试验表明固碳钢渣粉与含铝矿物材料具有良好的化学协同效应。图 5.3.7-1 为水泥、含铝辅助胶凝材料、固碳钢渣粉的化学成分三元相图，由图可以看出，固碳钢渣粉含碳酸钙，其他材料基本不含。粉煤灰和煅烧煤矸石粉的氧化铝含量相近，高炉矿渣粉和锂渣粉的氧化铝含量相似。复合辅助胶凝材料中碳酸钙既可以发挥成核作用，又能与含铝矿物反应，生成增强强度的产物。



Composition/wt.%	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaCO ₃
FA	29.61	48.27	/
LS	22.20	53.70	/
BFS	15.79	28.76	/
CCG	29.81	54.40	/
BSS	4.86	16.66	22.18
Cement	5.36	21.47	/

图 5.3.7-1 不同材料的三元相图（左）、部分成分含量（右）

图 5.3.7-2 为不同含铝辅助胶凝材料的活性指数，结果表明锂渣粉、高炉矿渣粉活性指数超 90%以上，煅烧煤矸石粉约 85%，粉煤灰约 80%。不同含铝辅助胶凝材料与硅酸盐水泥匹配度各异。

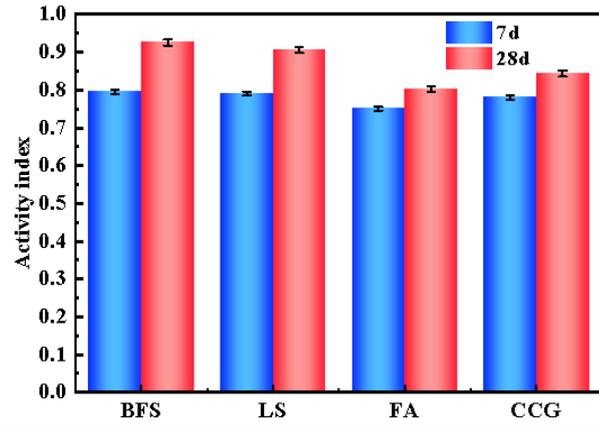


图 5.3.7-2 不同含铝辅助胶凝材料的活性指数

图 5.3.7-3 显示高炉矿渣粉无定形相多，锂渣粉矿物复杂含硫高，有二水石膏等矿相存在，二者虽矿物组成差异较大，但活性皆较高；粉煤灰与煅烧煤矸石粉同为煤基固废，XRD 曲线相近但粉煤灰衍射峰多，煅烧煤矸石粉无定形相多，故煅烧煤矸石粉活性更高。

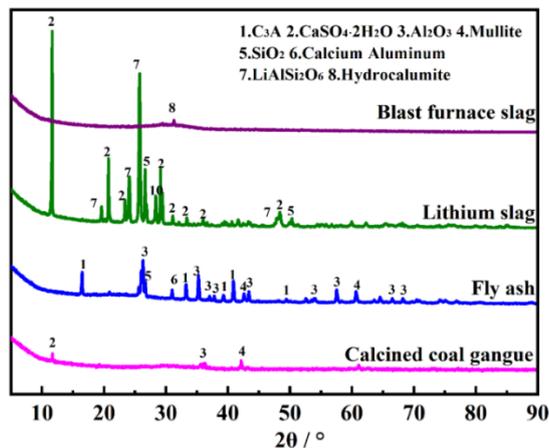


图 5.3.7-3 不同含铝辅助胶凝材料的 XRD 图谱

基于上述分析，不同辅助胶凝材料与固碳钢渣粉的协同机理差异源于其与水泥匹配度和化学匹配效应的不同，主要受物相和氧化铝含量影响。为探究辅助胶凝材料间的协同效应，在图 5.3.7-1 的基础上获得了复合辅助胶凝材料和掺入复合辅助胶凝材料后的复合胶凝材料化学组成，并绘制了三元相图，如表 5.3.7-1 和 5.3.7-2 及图 5.3.7-4 所示，其中，复合胶凝材料水泥中复合辅助胶凝材料的用量均为 30%。试验结果显示，不同辅助胶凝材料与固碳钢渣粉复合后，化学组成随比例变化显著。固碳钢渣粉用量减少导致碳酸钙含量下降，氧化铝含量上升，增加了氧化铝与碳酸钙的比例，这有助于促进水泥水化和形成了更多单碳铝酸钙。

表 5.3.7-1 复合辅助胶凝材料的 Al₂O₃ 和 SiO₂ 化学组成及 CaCO₃ 含量 / wt. %

Ratio	BSS & FA			BSS & LS			BSS & BFS			BSS & CCG		
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaCO ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaCO ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaCO ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaCO ₃
1/4	24.66	41.95	4.44	18.57	46.53	4.44	12.97	26.53	4.44	24.97	46.53	4.44
1/3	23.42	40.37	5.55	17.72	44.67	5.55	12.47	25.92	5.55	23.72	44.67	5.55
1/2	21.36	37.73	7.39	16.29	41.55	7.39	11.62	24.89	7.39	21.62	41.55	7.39
1/1	17.24	32.47	11.09	13.43	35.33	11.09	9.93	22.83	11.09	17.43	35.33	11.09
2/1	11.49	27.19	14.79	8.95	29.11	14.79	6.62	20.77	14.79	11.62	29.11	14.79
3/1	11.05	24.56	16.64	9.15	26.00	16.64	7.40	19.75	16.64	11.15	26.00	16.64
4/1	9.81	22.98	17.74	8.29	24.13	17.74	6.89	19.13	17.74	9.89	24.13	17.74

表 5.3.7-2 复合胶凝材料水泥的 Al₂O₃ 和 SiO₂ 化学组成及 CaCO₃ 含量 / wt. %

Ratio	30% (BSS & FA)			30% (BSS & LS)			30% (BSS & BFS)			30% (BSS & CCG)		
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaCO ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaCO ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaCO ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaCO ₃
1/4	11.15	27.61	1.33	9.32	28.99	1.33	7.64	22.75	1.33	11.24	28.99	1.33
1/3	10.78	27.14	1.66	9.07	28.43	1.66	7.49	22.58	1.66	10.87	28.43	1.66
1/2	10.16	26.35	2.22	8.64	27.50	2.22	7.24	22.30	2.22	10.24	27.50	2.22
1/1	8.92	24.77	3.33	7.78	25.63	3.33	6.73	21.73	3.33	8.98	25.63	3.33
2/1	7.20	23.19	4.44	6.44	23.76	4.44	5.74	21.16	4.44	7.24	23.76	4.44
3/1	7.07	22.40	4.99	6.50	22.83	4.99	5.97	20.88	4.99	7.10	22.83	4.99
4/1	6.70	21.92	5.32	6.24	22.27	5.32	5.82	20.71	5.32	6.72	22.27	5.32

图 5.3.7-4 显示不同复合辅助胶凝材料的化学组成差异较大, 将影响其应用于水泥材料时的活性。进一步分析了碳酸钙和氧化铝对复合辅助胶凝材料水化活性的影响, 结果如图 5.3.7-5 所示。碳酸钙和氧化铝含量变化时, 复合辅助胶凝材料 7d 和 28d 的水化活性先增后减小。固碳钢渣粉与含铝辅助胶凝材料与比例适宜时, 可在发挥成核作用同时, 促进碳酸钙参与反应形成单碳铝酸盐, 使微观结构更致密, 优于单一组分。即固碳钢渣粉与含铝辅助胶凝材料比例适宜时, 可在发挥成核作用同时, 促进碳酸钙参与反应形成单碳铝酸盐, 使微观结构更致密。

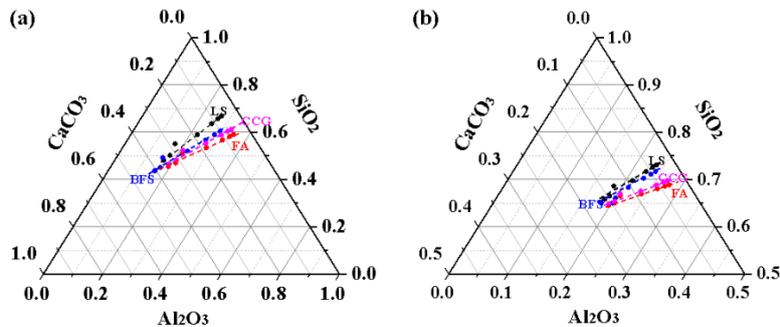


图 5.2.2-4 三元相图。(a) 含 BSS 的复合辅助胶材; (b) 含 30% 复合辅助胶凝材料的复合水泥

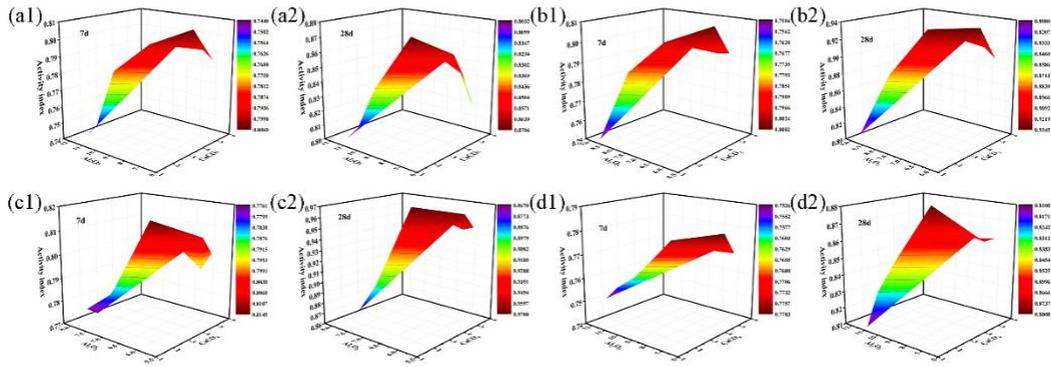


图 5.2.2-5 胶凝材料的组成与活性指数的关系。(a1) BSS+FA, 7d; (a2) BSS+FA, 28d; (b1) BSS+LS, 7d; (b2) BSS+LS, 28d; (c1) BSS+BFS, 7d; (c2) BSS+BFS, 28d; (d1) BSS+CCG, 7d; (d2) BSS+CCG, 28d

综上，复合辅助胶凝材料的协同作用包含两部分，一是与硅酸盐水泥的匹配度，二是不同辅助胶凝材料间的化学匹配。当复合辅助胶凝材料掺量为 30%时，碳酸钙含量在 2.0%~4.5%范围内，氧化铝含量在 6.0%~9.0%范围内变化时，体现出较好的匹配效果。此时，氧化铝和碳酸钙质量比的波动范围为 1.5~4.5。

5.4 掺固碳钢渣粉的砂浆和砂浆制品

5.4.1 固碳钢渣粉与化学外加剂的适应性应通过试验确定。

条文说明：由于固碳钢渣粉成分复杂，钢渣粉固碳后，颗粒表面粗糙度和孔隙增加，实际使用时，为了避免流动性损失等不利于施工和成型的问题，应检验固碳钢渣粉与化学外加剂的适应性。

5.4.2 掺固碳钢渣粉的砂浆及砂浆制品配合比设计应按现行行业标准《砌筑砂浆配合比设计规程》JGJ/T 98、《抹灰砂浆技术规程》JGJ/T 220、《玻璃纤维增强水泥外墙板》JCT 1057 的规定执行。

条文说明：固碳钢渣粉砂浆设计的基本思路和步骤与普通砂浆相似。固碳钢渣粉不仅限于用于 5.4.2 述及的砂浆、防水砂浆、保温砂浆、装饰砂浆等均可使用。采用微生物类固碳添加剂生产的固碳钢渣粉，对砂浆还具有自修复功能。

5.4.3 用于建设工程的、掺固碳钢渣粉的砌筑、抹灰、地面、防水等工程及其他用途的预拌砂浆，其他性能应符合现行国家标准《预拌砂浆》GB/T 25181 的规

定。

5.4.4 掺固碳钢渣粉的墙体饰面砂浆的其他性能尚应符合《墙体饰面砂浆》JC/T 1024 的有关规定；掺固碳钢渣粉的防水饰面砂浆的其他性能尚应符合《地下工程防水饰面砂浆应用技术规程》T/CECS 484 的有关规定。

5.4.5 掺固碳钢渣粉的预拌砂浆施工应符合现行行业标准《预拌砂浆应用技术规程》JGJ/T 223 的规定；掺固碳钢渣粉的抹灰砂浆施工应符合现行行业标准《抹灰砂浆技术规程》JGJ/T 220 的规定。

5.4.6 掺固碳钢渣粉的砂浆墙板制品的其他性能应符合《玻璃纤维增强水泥外墙板》JC/T 1057 的规定。

条文说明：5.4.4~5.4.6 规定了固碳钢渣粉砂浆的性能和施工要求，以及砂浆制品的性能要求。

5.4.7 砂浆中使用固碳钢渣粉作掺合料时，固碳钢渣粉的掺量应由试验确定。

5.4.8 当固碳钢渣粉与其他掺合料复合用于砂浆时，宜选取铝含量较高的掺合料与固碳钢渣粉配伍，且胶凝材料化学组成中，氧化铝和碳酸钙的质量比宜为 1.5~4.5。

条文说明：同 5.3.7 条文说明。

5.5 掺固碳钢渣粉的混凝土和混凝土制品

5.5.1 掺固碳钢渣粉的混凝土配合比设计应按照现行行业标准《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55 的规定执行。

5.5.2 掺固碳钢渣粉混凝土的拌合物性能应符合现行国家标准《混凝土质量控制标准》GB 50164 的规定，性能试验按现行国家标准《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080 的规定执行。

5.5.3 掺固碳钢渣粉的混凝土力学性能、长期性能和耐久性能应符合现行国家标准《混凝土质量控制标准》GB 50164 的规定。力学性能试验方法应按现行国家标准《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081 的规定执行，长期性能和耐久性能试验应按现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》

GB/T50082 的规定执行。

条文说明：将原状钢渣粉和固碳钢渣粉分别替代 30% 水泥制备混凝土试样，并浇筑两段墙体结构 wall A 和 wall B，如图 5.5.3-1 所示。测试混凝土性能及监测墙体体积稳定性，图 5.5.3-2 结果表明固碳钢渣粉混凝土强度高于原状钢渣粉混凝土，通过长期监测固碳钢渣粉混凝土墙体在长期服役过程中均无开裂现象，体积稳定性良好。由此表明掺固碳钢渣粉的混凝土在实际工程应用中具有良好的力学性能和体积稳定性。



图 5.5.3-1 混凝土墙体 A 和 B

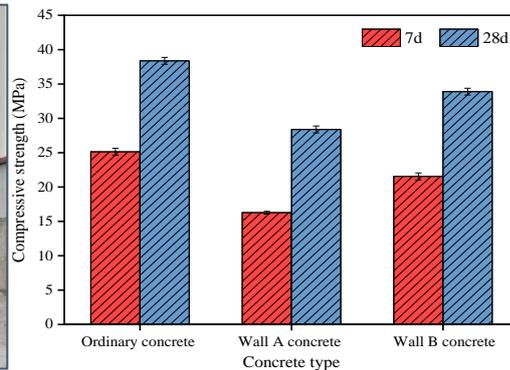


图 5.5.3-2 混凝土强度测试

5.5.4 掺固碳钢渣粉的混凝土的生产应按照现行国家标准《预拌混凝土》GB/T 14902 的规定执行，施工应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666 的规定，泵送还应符合现行行业标准《混凝土泵送施工技术规程》JGJ/T 10 的规定。

5.5.5 掺固碳钢渣粉的混凝土制品的性能应符合相应制品的现行相关标准规定，如《混凝土实心砖》GB/T 21144、《混凝土和钢筋混凝土排水管》GB/T 11836、《装配式混凝土建筑用预制部品通用技术条件》GB/T 40399、《纤维混凝土盾构管片》GB/T 38901 等标准。

条文说明：不仅限于 5.5.5 中提及的制品类型。

5.5.6 混凝土或混凝土制品中单掺固碳钢渣粉作掺合料时，固碳钢渣粉的掺量应由试验确定。

5.5.7 当固碳钢渣粉与其他掺合料复合用于混凝土或混凝土制品时，宜选取铝含

量较高的掺合料与固碳钢渣粉配伍，且胶凝材料化学组成中，氧化铝和碳酸钙的质量比宜为 1.5 ~ 4.5。

5.5.8 当固碳钢渣粉与氧化铝含量较高的掺合料复合使用时，由此制备的混凝土具有优异的重金属固封性能，尤其适用于重金属固封领域。

条文说明：固碳钢渣粉中的碳酸钙可以与铝质辅助胶凝材料反应生成碳铝酸盐，在水泥中形成 CO_3^{2-} -AFt 层状结构，实现对重金属的有效固封。

6 固碳钢渣粉水泥基材料的质量检验和验收

6.0.1 固碳钢渣粉的检验应符合《固碳钢渣粉》T/CECS xxx 以及本规程中的相关规定。

6.0.2 水泥、细骨料、粗骨料、水、外加剂及其他辅助胶凝材料的检验应符合相关标准中规定。

6.0.3 钢渣矿渣硅酸盐水泥的检验应符合现行国家标准《钢渣矿渣硅酸盐水泥》GB/T 13950 的规定。

6.0.4 水泥净浆的质量检验与验收应符合现行国家标准《油井水泥》GB/T 10238、现行行业标准《水泥基灌浆材料》JC/T 986 的规定。

6.0.5 砂浆质量检验与验收应符合现行国家标准《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300、《建筑装饰装修工程质量验收标准》GB 50210、现行行业标准《建筑装饰工程施工及验收规范》JGJ 73 的规定。

6.0.6 砂浆制品的质量检验与验收应符合现行行业标准《玻璃纤维增强水泥（GRC）装饰制品》JC/T 940 和《玻璃纤维增强水泥外墙板》JC/T 1057 的规定执行。

6.0.7 混凝土的质量检验与验收应符合现行国家标准《混凝土质量控制》GB 50164、《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 和《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300 的规定。

6.0.8 混凝土制品的检验和验收应符合相应制品的现行相关标准的规定，如按《混凝土实心砖》GB/T 21144、《混凝土和钢筋混凝土排水管》GB/T 11836、《装配式混凝土建筑用预制部品通用技术条件》GB/T 40399、《纤维混凝土盾构管片》GB/T 38901 等标准的规定执行。

本规程用词说明

- 1 为便于在执行本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

1. 《通用硅酸盐水泥》 GB 175
2. 《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》 GB/T 1346
3. 《混凝土外加剂》 GB 8076
4. 《固井水泥》 GB/T 10238
5. 《混凝土和钢筋混凝土排水管》 GB/T 11836
6. 《钢渣矿渣硅酸盐水泥》 GB/T 13950
7. 《建设用砂》 GB/T 14684
8. 《建设用卵石、碎石》 GB/T 14685
9. 《预拌混凝土》 GB/T 14902
10. 《混凝土实心砖》 GB/T 21144
11. 《预拌砂浆》 GB/T 25181
12. 《纤维混凝土盾构管片》 GB/T 38901
13. 《装配式混凝土建筑用预制部品通用技术条件》 GB/T 40399
14. 《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》 GB/T 50080
15. 《混凝土物理力学性能试验方法标准》 GB/T 50081
16. 《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》 GB/T50082
17. 《混凝土质量控制标准》 GB 50164
18. 《混凝土结构工程施工质量验收规范》 GB 50204
19. 《建筑装饰装修工程质量验收标准》 GB 50210
20. 《建筑工程施工质量验收统一标准》 GB 50300
21. 《混凝土结构工程施工规范》 GB 50666
22. 《混凝土泵送施工技术规程》 JGJ/T 10
23. 《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》 JGJ 52
24. 《普通混凝土配合比设计规程》 JGJ 55
25. 《混凝土用水标准》 JGJ 63
26. 《建筑装饰工程施工及验收规范》 JGJ 73
27. 《砌筑砂浆配合比设计规程》 JGJ/T 98
28. 《抹灰砂浆技术规程》 JGJ/T 220

29. 《预拌砂浆应用技术规程》 JGJ/T 223
30. 《玻璃纤维增强水泥（GRC）装饰制品》 JC/T 940
31. 《水泥基灌浆材料》 JC/T 986
32. 《墙体饰面砂浆》 JC/T 1024
33. 《玻璃纤维增强水泥外墙板》 JCT 1057
34. 《水泥-水玻璃灌浆材料》 JC/T 2536
35. 《页岩气 固井工程 第2部分：水泥浆技术要求和评价方法的规定》 NB/T
14004.2
36. 《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》 DL/T 5148
37. 《固井作业规程》 SY/T 5374
38. 《地下工程防水饰面砂浆应用技术规程》 T/CECS 484
39. 《固碳钢渣粉》 T/CECS xxx