

ICS 27.140
P 59
备案号: J1692—2013

DL

中华人民共和国电力行业标准

P DL / T 5298 — 2013

水工混凝土抑制碱-骨料反应 技术规范

Technical specifications for inhibiting alkali-aggregate
reaction of hydraulic concrete

2013-11-28 发布

2014-04-01 实施

国家能源局 发布

DL / T 5298 — 2013

中华人民共和国电力行业标准

水工混凝土抑制碱-骨料反应 技术规范

Technical specifications for inhibiting alkali-aggregate
reaction of hydraulic concrete

DL / T 5298 — 2013

主编机构: 中国电力企业联合会

批准部门: 国家能源局

施行日期: 2014 年 4 月 1 日

中国电力出版社

2014 北京

前 言

本规范根据《国家能源局关于下达 2010 年第一批行业标准制(修)订计划的通知》(国能科技〔2010〕320 号)的要求制定。

本规范在制定过程中,专题调研了骨料碱活性试验方法和抑制碱-骨料反应有效性的试验方法,开展了大量抑制碱-骨料反应的试验研究,参考了国内外相关标准中适合我国水工混凝土抑制碱-骨料反应的有关内容,总结和吸收了国内外水电水利工程混凝土抑制碱-骨料反应的研究成果和工程经验,兼顾耐久性和经济性,科学合理地对水工混凝土抑制碱-骨料反应的技术措施进行了规定。

本规范主要技术内容包括:骨料碱活性检验、抑制混凝土碱-骨料反应的技术措施、抑制碱-骨料反应有效性的检验。

本规范由中国电力企业联合会提出。

本规范由电力行业水施工标准化技术委员会归口。

本规范起草单位:长江水利委员会长江科学院。

本规范参加起草单位:中国水利水电科学研究院、南京水利科学研究院、中国水电顾问集团成都勘测设计研究院、中国长江三峡集团公司。

本规范主要起草人:杨华全、李珍、李鹏翔、蔡跃波、陈改新、李光伟、李文伟、丁建彤、纪国晋、李晓鄂、董芸、邵晓妹、苏杰、白银、周麒麟、杨忠义。

本规范主要审查人:许松林、汪毅、周厚贵、郭光文、梅锦煜、孙来成、吴国如、张建华、楚跃先、康明华、魏志远、余英、陈宏、田育功、方坤河、常焕生、陈文耀、牛宏力、吴勇、涂怀健、陈振华、朱明星、吕芝林。

本规范在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心(北京市白广路二条一号,100761)。

中华人民共和国电力行业标准 水工混凝土抑制碱-骨料反应 技术规范

Technical specifications for inhibiting alkali-aggregate

reaction of hydraulic concrete

DL/T 5298—2013

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京九天众诚印刷有限公司印刷

2014 年 4 月第一版 2014 年 4 月北京第一次印刷
850 毫米×1168 毫米 32 开本 1.125 印张 25 千字
印数 0001—3000 册

统一书号 155123·1799 定价 10.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

目 次

前言	I
1 总则	1
2 术语	2
3 骨料碱活性检验	3
3.1 取样要求	3
3.2 试验方法	3
3.3 检验结果评价	4
4 抑制混凝土碱-骨料反应的技术措施	5
4.1 一般规定	5
4.2 水泥	5
4.3 掺和料	5
4.4 外加剂	6
4.5 混凝土总碱量	6
4.6 原材料碱含量检验	7
5 抑制碱-骨料反应有效性的检验	9
本规范用词说明	10
引用标准名录	11
附：条文说明	13

Contents

Foreword	I
1 General Provisions	1
2 Terms	2
3 Alkali Reactivity Test of Aggregate	3
3.1 Sampling Requirements	3
3.2 Test Methods	3
3.3 Evaluation of Test Results	4
4 Technical Solution of Inhibiting Alkali-Aggregate Reaction	5
4.1 General Requirement	5
4.2 Cement	5
4.3 Mineral Addition	5
4.4 Chemical Admixture	6
4.5 Total Alkali Content of Concrete	6
4.6 Alkali Content Test of Raw Materials	7
5 Validity Test on Inhibiting Alkali-Aggregate Reaction	9
Explanation of Wording in this Specification	10
List of Quoted Standards	11
Additions: Explanation of Provisions	13

3 1 总 则

1.0.1 为抑制水工混凝土碱-骨料反应，提高混凝土工程的耐久性和长期安全性，制定本规范。

1.0.2 本规范适用于水电水利工程的混凝土。

1.0.3 水工混凝土宜采用非碱活性骨料。当采用碱活性骨料且需要抑制碱-骨料反应时，应采取抑制混凝土碱-骨料反应的技术措施，并进行试验论证。

1.0.4 水工混凝土抑制碱-骨料反应除应符合本规范的规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

3.2 试 验 方 法

3.2.1 骨料碱活性检验包括岩相分析、碱-硅酸反应活性检验和碱-碳酸盐反应活性检验。

3.2.2 采用岩相法确定岩石类型，初步判断骨料含有的碱活性矿

2 术 语

2.0.1 有效碱含量 effective alkali content

混凝土原材料中能参与碱-骨料反应的碱的含量,以当量 Na_2O 表示,即 Na_2O 含量与 0.658 倍的 K_2O 含量之和,用百分数表示。

2.0.2 碱-骨料反应 alkali-aggregate reaction

混凝土中的碱与骨料中的碱活性矿物发生化学反应,导致混凝土产生膨胀开裂的现象。

2.0.3 碱-硅酸反应 alkali-silica reaction

混凝土中的碱与骨料中活性 SiO_2 发生化学反应,导致混凝土产生膨胀开裂的现象。

2.0.4 碱-碳酸盐反应 alkali-carbonate reaction

混凝土中的碱与碳酸盐骨料中活性白云石晶体发生化学反应,导致混凝土产生膨胀开裂的现象。

3 骨料碱活性检验

3.1 取 样 要 求

3.1.1 在勘察和选择骨料料场时,骨料碱活性的检验取样应符合以下规定:

1 从砂砾料料场和人工骨料料场取样时,应符合 DL/T 5388《水电水利工程天然建筑材料勘察规程》的有关规定,样品应为开采或爆破的料场非表层部分。

2 每份样品应至少进行一组碱活性检验。

3 每组试样的最小取样量应满足 DL/T 5151《水工混凝土砂石骨料试验规程》的要求。

3.1.2 成品料场骨料碱活性的检验取样应符合以下规定:

1 应在不同料场的成品料堆分别取样,每个料场宜分别选取至少 3 组具有代表性的样品。取样时先将取样部位表层的骨料铲除。对于细骨料,应分别从每批骨料 8 个均匀分布的部位取得数量大致相等的细骨料混合成 1 组样品。对于粗骨料,应分别从每批骨料 15 个均匀分布的部位取得数量大致相等的粗骨料混合成 1 组样品。样品应混合均匀,再用四分法缩取。

2 对于料源稳定的料场,应每 3 个月检验一批次,每批次至少选取 3 组有代表性的样品。料源发生变化时,应重新取样检验。

3.2 试 验 方 法

3.2.1 骨料碱活性检验包括岩相分析、碱-硅酸反应活性检验和碱-碳酸盐反应活性检验。

3.2.2 采用岩相法确定岩石类型,初步判断骨料含有的碱活性矿

物,对含有碱-硅酸反应活性矿物的骨料检验方法为砂浆棒快速法、砂浆长度法、混凝土棱柱体法;对含有碱-碳酸盐反应活性矿物的骨料检验方法为岩石柱法、混凝土棱柱体法,也可采用其他方法检验骨料碱-碳酸盐反应活性。

3.2.3 用于检验骨料的岩石类型、碱-硅酸反应活性和碱-碳酸盐反应活性的岩相法,用于检验骨料碱-硅酸反应活性的砂浆棒快速法、砂浆长度法、混凝土棱柱体法,用于检验骨料碱-碳酸盐反应活性的岩石柱法、混凝土棱柱体法,均应符合 DL/T 5151 的规定。

3.3 检验结果评价

3.3.1 岩相法、砂浆棒快速法、岩石柱法、砂浆长度法和混凝土棱柱体法的试验结果判定应符合 DL/T 5151 的规定。

3.3.2 应取同一检验批的同一检验项目所有试验结果中膨胀率最大者作为检验结果。

3.3.3 检验报告应明确骨料碱活性类型。

3.3.4 当采用砂浆棒快速法、砂浆长度法或岩石柱法进行碱活性检验时,若评定结果为骨料具有碱活性,则应进行混凝土棱柱体法检验,并以混凝土棱柱体法评定结果为准。

4 抑制混凝土碱-骨料反应的技术措施

4.1 一般规定

4.1.1 活性骨料用于混凝土工程时,应采取工程措施抑制碱-骨料反应的发生。

4.1.2 可采用掺活性掺和料、使用低碱水泥、控制混凝土总碱量等措施抑制混凝土碱-骨料反应,也可采用阻止外来水分进入混凝土内部等措施抑制混凝土碱-骨料反应。

4.2 水泥

4.2.1 水泥碱含量不宜大于 0.60%,水泥碱含量试验方法按 GB 176 《水泥化学分析方法》执行。

4.2.2 水泥品种宜采用硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、中热硅酸盐水泥、低热硅酸盐水泥、低热矿渣硅酸盐水泥等。

4.3 掺和料

4.3.1 掺和料宜优先采用粉煤灰。

4.3.2 粉煤灰应符合 DL/T 5055 《水工混凝土掺用粉煤灰技术规范》的规定;宜采用 I 级或 II 级的 F 类粉煤灰,碱含量不宜大于 2.00%;粉煤灰碱含量试验方法按 GB 176 执行。

4.3.3 粒化高炉矿渣粉应符合 GB/T 18046 《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》的规定;粒化高炉矿渣粉碱含量不宜大于 1.00%;粒化高炉矿渣粉碱含量试验方法按 GB 176 执行。

4.3.4 硅粉的二氧化硅含量不宜小于 85%,碱含量不宜大于 1.50%;硅粉碱含量试验方法按 GB 176 执行。

4.3.5 磷渣粉、天然火山灰等其他类型的活性掺和料应进行试验论证。

4.4 外加剂

4.4.1 宜采用低碱含量的外加剂。

4.4.2 外加剂除应符合 DL/T 5100《水工混凝土外加剂技术规程》的规定外，带入混凝土中的总碱含量不宜大于 0.25kg/m^3 。外加剂碱含量试验方法按 GB/T 8077《混凝土外加剂匀质性试验方法》执行。

4.5 混凝土总碱量

4.5.1 按表 4.5.1 对混凝土工程进行环境分类。

表 4.5.1 环境分类

环境类别	环境条件
干燥环境	构件四周及混凝土内部相对湿度小于 80%，并且不暴露于外部水源
潮湿环境	直接与水、潮湿土壤接触的混凝土工程及干湿交替环境等
含碱环境	潮湿并且外部有供碱环境

4.5.2 按 DL/T 5180《水电枢纽工程等级划分及设计安全标准》对水工建筑物级别进行划分，应根据表 4.5.2 的要求对混凝土总碱量进行限制。

表 4.5.2 混凝土中最大总碱量限制 kg/m^3

骨料类型		碱-硅酸反应活性骨料			碱-碳酸盐反应活性骨料		
水工建筑物级别		1 级	2、3 级	4、5 级	1 级	2、3 级	4、5 级
环境条件	干燥环境	3.0	3.5	不限制	3.0	3.5	不限制
	潮湿环境	2.5	3.0	3.5	用非碱活性骨料		
	含碱环境	用非碱活性骨料			用非碱活性骨料		

注：对三级配和四级配混凝土的总碱量应折算成相应二级配混凝土的总碱量后进行最大总碱量限制。

4.5.3 混凝土的总碱量按式 (4.5.3) 计算：

$$M_h = W_c \times C_c + W_a \times C_a + W_m \times C_m \quad (4.5.3)$$

式中： M_h ——混凝土的总碱量 (kg/m^3)；

W_c ——混凝土水泥用量 (kg/m^3)；

W_a ——混凝土外加剂用量 (kg/m^3)；

W_m ——混凝土掺和料用量 (kg/m^3)；

C_c ——水泥有效碱含量 (%)；

C_a ——外加剂有效碱含量 (%)；

C_m ——掺和料有效碱含量 (%)；

C_c 、 C_a （水泥有效碱含量、外加剂有效碱含量）按 100% 碱含量计算。

C_m （掺和料有效碱含量）按以下方法计算：

1 粉煤灰有效碱含量可按粉煤灰碱含量的 1/5 计算；

2 硅粉有效碱含量可按硅粉碱含量的 1/2 计算；

3 粒化高炉矿渣粉有效碱含量可按粒化高炉矿渣粉碱含量的 1/2 计算；

4 其他矿物掺和料的有效碱含量宜通过试验研究确定。

4.5.4 采用掺加活性掺和料作为抑制措施时，掺和料的种类、掺量应通过抑制试验确定。当使用粉煤灰时，掺量不宜低于 20%；当使用粒化高炉矿渣粉时，掺量不宜低于 50%。

4.6 原材料碱含量检验

4.6.1 原材料碱含量应定期检验，检验批量应符合以下规定：

1 散装水泥应按每 400t（袋装水泥每 200t）为一个检验批；粉煤灰或粒化高炉矿渣粉等矿物掺和料应按每 200t 为一个检验批；硅粉应按每 20t 为一个检验批；外加剂应按掺量划分检验批次，掺量大于或等于 1% 的外加剂以 100t 为一个检验批，掺量小于 1% 的外加剂以 50t 为一个检验批，掺量小于 0.01% 的外加剂以 1t~2t 为一个检验批；拌和用水应按同一水源不少于一个检验批。

2 不足一个检验批量的混凝土原材料应作为一个检验批。

4.6.2 当符合下列条件之一时，可每3个月检验一次。

1 对经产品认证机构认证符合要求的产品。

2 来源稳定且连续二次检验合格。

3 同一厂家的同批出厂材料，用于同时施工且属于同一工程项目的多个单位工程。

5 抑制碱-骨料反应有效性的检验

5.0.1 抑制碱-骨料反应有效性检验的对象为具有碱-硅酸反应活性的骨料。

5.0.2 抑制碱-骨料反应有效性试验方法应符合 DL/T 5151 的规定。对1级和2级水工混凝土建筑物，宜采用抑制碱-骨料反应有效性试验（混凝土棱柱体法）进行不少于2年的长期观测。

5.0.3 当采用砂浆棒快速法进行抑制碱-骨料反应有效性检验时，若28d龄期试件长度膨胀率小于0.10%，则抑制效果评定为有效。采用混凝土棱柱体法进行抑制碱-骨料反应有效性检验时，若2年龄期试件长度膨胀率小于0.04%，则抑制效果评定为有效。当上述砂浆棒快速法与混凝土棱柱体法的结果不一致时，以混凝土棱柱体法的试验结果为准。

5.0.4 碱-硅酸反应活性骨料用于工程时，工程使用的水泥、掺和料等原材料应检验其抑制碱-骨料反应有效性，可每6个月检验一次。水泥、掺和料等原材料来源发生变化时，应重新检验其抑制碱-骨料反应有效性。

2 不足一个检验批量的混凝土原材料应作为一个检验批。

4.6.2 当符合下列条件之一时，可每3个月检验一次。

1 本规范用词说明

1 为便于在执行本规范条文时区别对待，对于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

GB 176 水泥化学分析方法

GB/T 8077 混凝土外加剂匀质性试验方法

GB/T 18046 用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉

DL/T 5055 水工混凝土掺用粉煤灰技术规范

DL/T 5100 水工混凝土外加剂技术规程

DL/T 5151 水工混凝土砂石骨料试验规程

DL/T 5180 水电枢纽工程等级划分及设计安全标准

DL/T 5388 水电水利工程天然建筑材料勘察规程

目次

1 总则	1
2 术语和定义	2
3 基本规定	3
4 试验方法	4
5 检验与验收	5
6 工程应用	6
7 附录A 混凝土碱含量限值	7
8 附录B 混凝土碱含量限值	8
9 附录C 混凝土碱含量限值	9
10 附录D 混凝土碱含量限值	10
11 附录E 混凝土碱含量限值	11
12 附录F 混凝土碱含量限值	12
13 附录G 混凝土碱含量限值	13
14 附录H 混凝土碱含量限值	14
15 附录I 混凝土碱含量限值	15
16 附录J 混凝土碱含量限值	16
17 附录K 混凝土碱含量限值	17
18 附录L 混凝土碱含量限值	18
19 附录M 混凝土碱含量限值	19
20 附录N 混凝土碱含量限值	20
21 附录O 混凝土碱含量限值	21
22 附录P 混凝土碱含量限值	22
23 附录Q 混凝土碱含量限值	23
24 附录R 混凝土碱含量限值	24
25 附录S 混凝土碱含量限值	25
26 附录T 混凝土碱含量限值	26
27 附录U 混凝土碱含量限值	27
28 附录V 混凝土碱含量限值	28
29 附录W 混凝土碱含量限值	29
30 附录X 混凝土碱含量限值	30
31 附录Y 混凝土碱含量限值	31
32 附录Z 混凝土碱含量限值	32

中华人民共和国电力行业标准

水工混凝土抑制碱-骨料反应 技术规范

DL/T 5298—2013

条文说明

1 总则	1
2 术语和定义	2
3 基本规定	3
4 试验方法	4
5 检验与验收	5
6 工程应用	6
7 附录A 混凝土碱含量限值	7
8 附录B 混凝土碱含量限值	8
9 附录C 混凝土碱含量限值	9
10 附录D 混凝土碱含量限值	10
11 附录E 混凝土碱含量限值	11
12 附录F 混凝土碱含量限值	12
13 附录G 混凝土碱含量限值	13
14 附录H 混凝土碱含量限值	14
15 附录I 混凝土碱含量限值	15
16 附录J 混凝土碱含量限值	16
17 附录K 混凝土碱含量限值	17
18 附录L 混凝土碱含量限值	18
19 附录M 混凝土碱含量限值	19
20 附录N 混凝土碱含量限值	20
21 附录O 混凝土碱含量限值	21
22 附录P 混凝土碱含量限值	22
23 附录Q 混凝土碱含量限值	23
24 附录R 混凝土碱含量限值	24
25 附录S 混凝土碱含量限值	25
26 附录T 混凝土碱含量限值	26
27 附录U 混凝土碱含量限值	27
28 附录V 混凝土碱含量限值	28
29 附录W 混凝土碱含量限值	29
30 附录X 混凝土碱含量限值	30
31 附录Y 混凝土碱含量限值	31
32 附录Z 混凝土碱含量限值	32

目 次

1 总则	15
3 骨料碱活性检验	16
3.1 取样要求	16
3.2 试验方法	16
3.3 检验结果评价	17
4 抑制混凝土碱-骨料反应的技术措施	18
4.1 一般规定	18
4.2 水泥	18
4.3 掺和料	18
4.4 外加剂	22
4.5 混凝土总碱量	22
4.6 原材料碱含量检验	27
5 抑制碱-骨料反应有效性的检验	28

1 总 则

1.0.1 混凝土碱-骨料反应产生的破坏,往往无法修复,直接危害工程耐久性和安全性。受工程条件限制不得不使用碱活性骨料时,采取混凝土碱-骨料反应抑制措施是解决上述问题的有效途径,为此,特制定本规范。

1.0.3 水工混凝土宜采用非碱活性骨料,当工程受条件限制需采用碱活性骨料时,应采取抑制混凝土碱-骨料反应的技术措施,并进行试验论证,满足本规范的要求。

3 骨料碱活性检验

3.1 取样要求

3.1.1 选择骨料料场是预防混凝土碱-骨料反应的关键环节之一。发生碱-骨料反应的三个必备条件：碱、活性骨料、水；选择非碱活性骨料可避免碱-骨料反应的发生。因此，在勘察和选择骨料料场时，应进行岩石或骨料碱活性检验，根据检验结果，决定采用或弃用。在勘察和选择骨料料场进行碱活性检验取样时，最好在具有代表性的多个不同部位（未受风化影响）取样；在需要用岩石柱法检验碱-碳酸盐反应活性时，由于需要从三个方向钻取小圆柱体，原岩尺寸应保证加工试样要求，最好各方向尺寸相近。

3.2 试验方法

3.2.2 岩相分析包括岩石的矿物鉴定、化学成分分析、矿物成分分析，可以初步判断骨料含有的碱活性矿物，对选择相应的试验方法具有指导作用。

3.2.3 如有条件，除按 DL/T 5151 规定进行岩相法外，还应结合 X 射线衍射、微观形貌观测等方法，对岩石的岩相进行综合分析。

砂浆长度法是国际上公认的传统方法，仅适用于一些高活性快速膨胀的岩石和矿物，对慢膨胀骨料则不适用。混凝土棱柱体法适用于碱-硅酸反应活性和碱-碳酸盐反应活性检验，是目前唯一采用混凝土试件检验骨料碱活性的标准方法，可用于检验砂和石的碱活性，但试验周期较长（52 周）。

岩石柱法是目前国内普遍采用的试验方法。试验时在小岩石柱两端粘接不锈钢小测头，可提高测试结果的准确性和重复性。

现在水工混凝土大量使用碳酸盐岩骨料，水工混凝土试验规程中现有检测碳酸盐岩骨料碱活性方法为岩相法、岩石柱法、混凝土棱柱体法。岩相法只能给出定性的结果，不能给出定量的数据；岩石柱法检测周期为 3 个月，且对样品有一定的尺寸要求；混凝土棱柱体法检测周期为 12 个月，这三种方法均不太适合工程实际所用骨料的碱活性检测。碳酸盐骨料快速法（RILEM TC 191-ARP AAR-5）是国际材料与建筑构造研究实验所联合会的 RILEM 所推荐的试验方法，检测周期为 1 个月，对样品尺寸要求不高，能较快检测骨料的碱活性，该方法试验周期较短，重复性好，具有使用价值。

3.3 检验结果评价

3.3.2 由于岩石矿物的不均匀性，并且试验量有限，因此，采取一组以上试验时取所有试验结果中膨胀率最大者作为检验结果是偏于安全的做法。

3.3.3 对于碱-硅酸反应活性的骨料，采取有效抑制措施后不会产生碱-骨料反应，可用于混凝土；而对于碱-碳酸盐反应活性的骨料，目前尚无好的抑制措施，不宜用于混凝土。检验报告应明确骨料碱活性类型。

3.3.4 混凝土棱柱体法试验结果与真实情况最为接近，误判和错判的情况较少，故以混凝土棱柱体法评定结果为最终评定结果。

4 抑制混凝土碱-骨料反应的技术措施

4.1 一般规定

4.1.2 活性骨料用于混凝土工程时,混凝土中的碱含量是影响碱-骨料反应最重要的因素,采用掺活性掺和料、使用低碱水泥、控制混凝土总碱量等措施可减少参与碱-骨料反应的碱量,从而达到抑制混凝土碱-骨料反应的目的。没有外来水分参与,碱-骨料反应就不会产生危害性膨胀,阻止外来水分进入混凝土内部也可抑制混凝土碱-骨料反应。

4.2 水 泥

4.2.1 控制水泥碱含量是控制混凝土碱含量的重要环节。水泥是混凝土中碱的主要来源,目前,有关混凝土碱-骨料反应或耐久性的相关标准中,对水泥碱含量的控制基本均采用 GB 175《通用硅酸盐水泥》中对低碱水泥的规定,即水泥中碱含量不大于 0.60%。

4.3 掺 和 料

4.3.2 验证试验和工程实践表明, I 级或 II 级的 F 类粉煤灰在达到一定掺量的情况下都可以有效抑制碱-骨料反应,粉煤灰碱含量的影响作用不明显。我国部分电厂粉煤灰的化学成分见表 1。三峡工程标准规定粉煤灰的碱含量不得超过 1.70%,由于验证试验和工程实践采用粉煤灰的碱含量最大值为 2.00%,因此规定碱含量不宜大于 2.00%。

表 1 我国部分电厂粉煤灰的化学成分 %

粉煤灰	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	R ₂ O	SO ₃	烧失量
南京华能 I 级	52.00	31.96	7.77	4.51	1.36	0.76	0.59	1.09	0.35	0.41
阳逻电厂 I 级	51.28	30.32	7.39	4.51	1.82	1.01	0.41	1.07	0.45	2.21
珞璜电厂 I 级	44.66	24.88	18.05	4.33	0.91	0.96	0.61	1.24	1.03	3.34
平圩电厂 I 级	55.30	30.60	7.58	1.26	1.36	1.00	0.51	1.17	0.68	0.91
首阳山电厂 I 级	53.87	25.66	9.66	4.22	1.38	1.22	0.80	1.60	1.05	1.60
南京热电厂 I 级	50.72	28.96	7.97	6.22	2.08	1.14	0.41	1.16	0.62	1.37
神头二电厂 I 级	46.08	39.48	5.72	3.30	1.23	0.36	0.40	0.64	0.36	0.59
石门电厂 I 级	52.50	30.55	4.52	3.18	2.80	1.10	0.76	1.48	0.32	3.20
邹县电厂 I 级	52.98	28.45	5.80	4.15	2.31	1.10	0.55	1.27	0.80	1.67
襄樊电厂 I 级	56.76	27.52	3.23	5.21	2.30	1.20	0.68	1.47	0.41	1.71
鸭河口电厂 I 级	57.00	26.65	5.65	3.81	1.82	1.30	0.30	1.16	0.82	2.06
南通电厂 I 级	50.44	28.56	7.96	4.28	2.36	0.77	0.57	1.08	0.65	3.41
凯里电厂 I 级	48.11	16.43	23.48	2.06	1.75	1.29	0.31	1.16	0.89	—
元宝山电厂 I 级	58.06	20.73	8.86	3.43	1.52	2.58	1.90	3.60	—	—
元宝山电厂 II 级	57.57	21.91	7.72	3.87	1.68	2.51	1.54	3.19	—	—
元宝山电厂 III 级	49.73	32.19	6.09	2.82	0.67	1.15	0.52	1.28	—	—
重庆电厂 II 级	44.38	27.06	12.37	3.90	2.46	0.68	0.55	1.00	1.04	—
珞璜电厂 II 级	46.88	26.61	18.06	4.88	1.87	1.08	0.58	1.29	0.91	—
湘潭电厂 II 级	52.20	25.14	8.10	4.07	2.10	1.76	0.42	1.58	0.60	—
汉川电厂 II 级	60.08	26.31	5.56	4.07	1.52	1.64	0.22	1.30	0.16	—
珞璜电厂 II 级	43.77	27.37	17.20	4.09	0.51	—	—	1.29	1.17	—
南京热电厂 II 级	57.74	27.8	6.34	3.36	1.11	—	—	1.43	2.30	—
神头电厂 II 级	45.97	42.87	3.24	3.13	0.23	—	—	1.14	0.43	—

4.3.3 粒化高炉矿渣粉的主要化学成分是二氧化硅、三氧化二铝、氧化钙、氧化镁、氧化锰、氧化铁。此外,某些粒化高炉矿渣粉

中还含有微量的氧化钛、氧化钒、氧化钠、氧化钡、氧化磷、三氧化二铬等。粒化高炉矿渣粉中氧化钙、二氧化硅、氧化铝占 90% 以上。我国部分钢铁厂粒化高炉矿渣粉的化学成分及其有害物质含量见表 2、表 3。粒化高炉矿渣粉碱含量一般不大于 1.00%，采用碱含量不大于 1.00% 的粒化高炉矿渣粉，在达到一定掺量的情况下也可有效抑制碱-骨料反应。《英国建筑协会标准》（BRE Digest 330 Part 2 Alkali-silica reaction in concrete Detailed guidance for new construction）中，允许粒化高炉矿渣粉碱含量为 1.00%，因此规定碱含量不宜大于 1.00%。

表 2 我国部分钢铁厂粒化高炉矿渣粉的化学成分 %

粒化高炉矿渣粉产地	粒化高炉矿渣粉化学成分							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	TiO ₂	S
北京	32.62	9.92	4.21	41.53	8.89	0.29	0.84	0.70
邯郸	37.83	11.02	3.47	45.54	3.52	0.29	0.30	0.88
唐山	33.84	11.68	2.20	38.13	10.61	0.26	0.21	1.12
本溪	37.50	8.08	1.00	40.53	9.56	0.16	0.15	0.66
鞍山	40.55	7.63	1.37	42.55	6.16	0.08	—	0.87
马鞍山	33.92	11.11	2.15	37.97	8.03	0.23	1.10	0.93
临汾	35.01	14.44	0.88	36.78	9.72	0.30	—	0.53
武汉	34.66	15.02	0.68	43.45	5.35	0.21	0.04	0.66
太原	37.00	10.99	1.00	45.10	3.03	0.27	—	0.09
济南	34.58	14.02	0.68	41.71	7.13	0.45	—	1.14
新乡	40.40	11.10	3.88	40.06	4.73	0.08	—	0.69
西安	32.10	10.84	0.46	51.64	3.74	0.03	—	1.83
郑州	30.92	21.50	1.45	42.21	1.44	0.11	—	0.48
昆明	38.00	5.13	1.75	48.91	2.41	0.60	—	0.68
贵州	30.80	11.41	1.36	45.44	8.55	0.00	—	2.06

表 3 粒化高炉矿渣粉中有害物质含量 %

粒化高炉矿渣粉产地	烧失量	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	R ₂ O	Cl ⁻
武钢-300	0.31	2.06	0.46	0.36	0.66	0.0034
武钢-600	0.82	2.11	0.57	0.45	0.83	0.0046
武钢-800	0.36	2.26	0.40	0.36	0.62	0.0062
佛山-400	4.25	2.70	0.56	0.32	0.69	0.0067

4.3.4 硅粉可以有效抑制碱-骨料反应，二氧化硅含量不小于 85% 的硅粉质量较好，硅粉碱含量一般不超过 1.50%。

4.3.5 磷渣粉和粒化高炉矿渣粉类似，在达到一定掺量的情况下也可以有效抑制碱-骨料反应，磷渣粉的碱含量对碱-骨料反应影响有关数据较少，应注意积累资料。火山灰抑制碱-骨料反应有效性试验结果见表 4，火山灰在达到一定掺量的情况下也可有效抑制碱-骨料反应。火山灰和石粉等其他活性掺和料碱含量对碱-骨料反应影响有关数据较少，应注意积累资料。

表 4 火山灰抑制碱-骨料反应有效性试验结果

骨料种类	火山灰品种	火山灰掺量 %	试件膨胀率 %					膨胀降低率 %	
			3d	7d	14d	21d	28d	14d	28d
石英砂岩	—	0	0.059	0.121	0.189	0.251	0.304	—	—
		20	0.040	0.051	0.068	0.085	0.105	64	65
		30	0.036	0.040	0.048	0.064	0.079	75	74
		40	0.031	0.039	0.036	0.052	0.059	81	81
	气孔安山岩微粉	10	0.036	0.065	0.104	0.135	0.180	45	41
		20	0.033	0.038	0.047	0.063	0.075	75	75
		30	0.029	0.033	0.033	0.047	0.061	83	80
		40	0.027	0.025	0.023	0.040	0.051	88	83
	玄武岩微粉	20	0.043	0.071	0.109	0.148	0.188	42	38
		30	0.019	0.028	0.039	0.060	0.075	79	75
	凝灰岩微粉	20	0.043	0.071	0.109	0.148	0.188	42	38
		30	0.019	0.028	0.039	0.060	0.075	79	75

续表 4

骨料种类	火山灰品种	火山灰掺量 %	试件膨胀率 %					膨胀降低率 %	
			3d	7d	14d	21d	28d	14d	28d
石英砂岩	凝灰岩微粉	40	0.033	0.036	0.038	0.053	0.068	80	78
		50	0.018	0.017	0.018	0.022	0.035	90	88
	浮石粉	20	0.020	0.024	0.032	0.060	0.070	83	77
		30	0.019	0.025	0.031	0.045	0.057	84	81
		40	0.013	0.007	0	0.011	0.011	100	96
		50	0.015	0.011	0.004	0.009	0.009	98	97
		60	0.019	0.011	0.009	0.012	0.009	95	97

4.4 外加剂

4.4.1 高碱外加剂可能会加速碱-骨料反应,宜采用低碱含量的外加剂。

4.4.2 由于部分混凝土外加剂的碱含量较高,由外加剂带入混凝土中的碱应引起重视。当使用碱活性骨料时,应严格控制外加剂的碱含量。三峡工程标准规定,外加剂中硫酸钠含量应小于 8%。南水北调工程中线干线工程标准《预防混凝土工程碱-骨料反应技术条例(试行)》要求高效减水剂碱含量不超过 10%。以混凝土胶凝材料用量 $400\text{kg}/\text{m}^3$,外加剂掺量 0.6%,外加剂碱含量 10% 为例,外加剂引入混凝土中的总碱含量为 $0.24\text{kg}/\text{m}^3$ 。

4.5 混凝土总碱量

4.5.1 根据 DL/T 5241《水工混凝土耐久性技术规范》,混凝土工程环境划分为干燥环境、潮湿环境、含碱环境三种,但是没有相应的标准对碱-骨料反应环境进行具体分类。国际上针对碱-骨料反应对环境的分类不尽相同,但基本情况类似,见表 5。

表 5 国际上针对碱-骨料反应确定的环境分类

国家/地区	环境分级	定义或解释
RILEM	3 类: E1: 不会与外来水分接触 E2: 暴露于外界水分	室内混凝土,或有覆盖保护的混凝土; 室内混凝土,但是室内湿度大;暴露于大气中或者没有侵蚀性的泥土中;至少一个方向尺寸为 1m 或以上的大体积混凝土内部。
	E3: 暴露于外界水分,并且有加刷的因素	暴露于除冰盐、海水、盐雾;有冻融循环并且潮湿;高温并且潮湿
	3 类: 惰性环境 中等环境 侵蚀性环境	包括干燥、非侵蚀性环境,一般为室内环境; 包括潮湿、非侵蚀性室内外环境、流动的或者静止的淡水环境; 包括含有盐和烟雾的气体、海水及含盐水
	4 类: 1 级 2 级 3 级 4 级	干燥或者微湿 ($\text{RH}<80\%$); 潮湿或与水接触; 潮湿并且有冻融和除冰盐; 海上环境
加拿大	3 类: 1: 非大体积,干燥 2: 大体积,干燥 3: 所有混凝土暴露于湿润空气或被掩埋、浸泡	“大体积”构件至少有一个方向的尺寸大于或等于 1m; “干燥”环境指构件四周平均相对湿度小于 60%,一般指建筑物内部环境; 干燥环境中,大体积混凝土因内部湿度较高仍有可能存在碱-硅酸反应的危险; 一个非大体积构件长期浸泡在海水中时并不比暴露于潮湿空气、埋于地下、浸于纯水中更有碱-硅酸反应风险,因为海水中的碱浓度 (NaCl 浓度小于 $32\text{g}/\text{L}$,相当于 $0.55\text{mol}/\text{L}$ NaCl 或 Na) 比大多数混凝土孔溶液的碱度要低,而环境中氯离子扩散深度一般限于几厘米
	3 类: D: 干燥 M: 潮湿 M+A: 潮湿并且有外部碱源	建筑物内部; 外表暴露的部位; 暴露于海水或者除冰盐

续表 5

国家/地区	环境分级	定义或解释
香港 (Read 和 Anderson 2002 年 建议)	3 类: 干燥 暴露 严酷	可以保持干燥, 变湿的风险很小, 如大气环境下的建筑物内部; 潮湿环境, 接触雨水或者地下水; 潮湿环境并且有盐类或者化学物质的侵蚀, 如港口
	3 类: E1 E2 E3	非大体积, 干燥; 大体积, 干燥; 所有混凝土暴露于湿空气、冷凝水、雨水、自来水、地下水或者其他水源; 暴露于潮湿环境, 并且有外界侵蚀如冻融循环、海港工程干湿循环、长期高温等
新西兰		“大体积”构件至少有一个方向的尺寸大于或等于 0.5m; “干燥”环境指构件四周平均相对湿度小于 60%, 并且不暴露于外部水源; 干燥环境中大体积混凝土因内部湿度较高仍有可能存在碱-硅酸反应的危险; 一个非大体积构件长期浸泡在海水中时并不比暴露于潮湿空气、埋于地下、浸于纯水中更有碱-硅酸反应风险, 因为海水中的碱浓度 (NaCl 浓度小于 32g/L, 相当于 0.55mol/L NaCl 或 Na) 比大多数混凝土孔溶液的碱度要低, 而环境中氯离子扩散深度一般限于几厘米

混凝土最大总碱量的限值参照国内外相关标准制定。国际上, 对于混凝土安全碱含量问题, 仍是有争议的。英国交通部和水泥学会都认为混凝土的总碱量控制在 3.0kg/m^3 以下是安全的。新西兰水泥和混凝土协会规定混凝土的总碱量低于 2.5kg/m^3 是安全的。南非标准 (SABS 0100-Part II) 中则规定混凝土的总碱量必须低于 2.1kg/m^3 才是无害的。国际材料与结构研究试验室联合会 (RILEM) 2003 年 4 月提出的《减少混凝土中碱-骨料反应的国际标准》草案中, 对于不同活性的骨料提出了不同的总碱量限制指标。对于低活性骨料, 没有对混凝土总碱量的限值提出要求; 对于中等活性骨料, 混凝土总碱量的限值为 3.0kg/m^3 或 3.5kg/m^3 ; 对于高活性骨料, 混凝土总碱量的限值为 2.5kg/m^3 。

TB/T 3054—2002《铁路混凝土工程预防碱-骨料反应技术条

件》中对混凝土总碱量的限值还与结构类型有关。该标准规定混凝土结构分为三类: I 类结构——普通钢筋混凝土结构物, II 类结构——大中型钢筋混凝土结构及重要预制构件, III 类结构——不允许发生开裂破坏的工程及重要预制构件。对总碱量的限值见表 6。

表 6 混凝土总碱量限值 (TB/T 3054—2002) kg/m^3

骨料类型	碱-硅酸反应活性骨料			碱-碳酸盐反应活性骨料		
结构类型	I 类	II 类	III 类	I 类	II 类	III 类
干燥环境	不限值	3.5	3.0	不限值	用非碱活性骨料	
潮湿环境	3.5	3.0	2.1	用非碱活性骨料		
含碱环境	3.0	用非碱活性骨料		用非碱活性骨料		

注 1: 处于含碱环境中的 I 类结构在限制混凝土总碱量的同时, 应对混凝土表面作防水防碱涂层处理, 否则应换用非碱活性骨料。

注 2: 当钢筋混凝土及预应力混凝土桥跨结构混凝土所用骨料具有碱活性时, 混凝土的总碱量不得超过 3.0kg/m^3 , 否则应换用非碱活性骨料。

发生碱-骨料反应的三个必备条件之一是存在一定浓度的碱。环境中的碱渗入混凝土会加剧碱-骨料反应, 虽然可以采取涂刷涂层材料等防护措施, 但其耐久性和长期有效性缺乏工程实例。应用于设计寿命较长的重要结构时, 防护材料需要定期维护或翻新, 成本较高, 因此, 防护材料往往仅作为辅助技术手段, 而应该优先使用非碱活性骨料。

我国工程中发现的混凝土碱-骨料反应普遍是碱-硅酸反应, 发生碱-碳酸盐反应破坏的情况很少, 往往难以判定。通常只有碳酸盐骨料中可能存在活性白云石晶体, 如细小菱形白云石晶体等, 由于白云石含黏土, 碱通过包裹在细小白云石微晶外的黏土渗入白云石颗粒, 使其产生去白云石化反应。这种反应的特点是混凝土产生明显的膨胀、开裂、破坏, 混凝土内某些碳酸岩岩石骨料的界面等处并无凝胶体存在, 在混凝土空隙中填充有碳酸钙、氢氧化镁及水化硫铝酸钙等产物, 因此, 活性掺和料对抑制碱-碳酸

盐反应膨胀基本无效。同时, Graffan 和 Cadu 的研究结果也表明, 若要阻止混凝土的碱-碳酸盐反应发生, 混凝土中的有效碱含量必须低于 0.8kg/m^3 , 相当于总碱量为 1.3kg/m^3 , 实际工程难以达到。因此, 宜尽量避免使用碱-碳酸盐反应活性骨料。

4.5.3 控制混凝土总碱量是抑制混凝土碱-骨料反应的重要措施之一。掺和料碱含量(酸溶性碱含量)并不代表实际参与碱-骨料反应的有效碱含量, 参与碱-骨料反应的粉煤灰、硅粉和粒化高炉矿渣粉的有效碱含量分别约为碱含量的 1/5、1/2 和 1/2。

4.5.4 粉煤灰抑制碱-骨料反应有效性试验结果见表 7, 试验结果表明, 粉煤灰掺量为 20% 时, 28d 膨胀率小于 0.10%, 可有效抑制碱-骨料反应; 粉煤灰掺量越大, 抑制效果越明显。掺量相同时, I 级粉煤灰和 II 级粉煤灰抑制碱-骨料反应的效果基本相同, 因此, 粉煤灰的掺量对抑制效果的影响更为显著。

表 7 粉煤灰抑制碱-骨料反应有效性试验结果

骨料种类	粉煤灰	粉煤灰 掺量 %	试件膨胀率 %			
			3d	7d	14d	28d
石英砂岩	白马Ⅰ级	0	0.043	0.088	0.211	0.408
		10	0.020	0.047	0.097	0.211
		15	0.018	0.035	0.060	0.120
		20	0.012	0.012	0.036	0.072
		30	0.008	0.011	0.021	0.040
		35	0.008	0.008	0.012	0.012
	成都Ⅱ级	35	-0.010	0.005	0.007	0.015
	博磊Ⅱ级	35	0.001	0.011	0.011	0.027
天然骨料	襄樊Ⅰ级	0	0.104	0.155	0.220	0.281
		10	0.045	0.070	0.095	0.152
		15	0.024	0.039	0.064	0.127
		20	0.012	0.015	0.028	0.060
		25	0.009	0.009	0.013	0.031

粒化高炉矿渣粉抑制碱-骨料反应有效性试验结果见表 8, 试验结果表明, 粒化高炉矿渣粉掺量达到 50% 以上时, 可有效抑制碱-骨料反应。

表 8 粒化高炉矿渣粉抑制碱-骨料反应有效性试验结果

骨料种类	掺和料	掺量 %	试件膨胀率 %			
			3d	7d	14d	28d
石英砂岩	粒化高炉矿渣粉	0	0.044	0.133	0.244	0.376
		20	0.025	0.091	0.151	0.228
		30	0.020	0.064	0.105	0.160
		40	0.017	0.048	0.076	0.116
		50	0.010	0.025	0.048	0.086
		60	0.008	0.015	0.030	0.050
		0	0.087	0.131	0.177	0.277
		20	0.045	0.072	0.122	0.184
		30	0.032	0.060	0.088	0.148
		40	0.024	0.040	0.064	0.100
		50	0.017	0.037	0.043	0.069

4.6 原材料碱含量检验

4.6.1 DL/T 5144—2001《水工混凝土施工规范》明确规定了水泥、掺和料、外加剂和水等混凝土原材料检验的取样、批量和评定等要求。除骨料以外, 其他原材料碱含量的检验批量与 DL/T 5144 一致。

5 抑制碱-骨料反应有效性的检验

5.0.1 砂浆棒快速法 14d 龄期试件长度膨胀率大于 0.20% 的骨料为具有碱-硅酸反应活性。14d 龄期试件长度膨胀率在 0.10%~0.20% 的骨料属于不确定,对于这类骨料用于工程,从偏于安全的角度考虑,进行抑制碱-骨料反应有效性检验并采取抑制措施是合理的。

5.0.2 DL/T 5151—2001 中只规定了“抑制骨料碱活性效能试验”一种方法。由于该方法主要借鉴了 1959 年美国 ASTM C 441 试验方法,采用高活性石英玻璃代替实际骨料和高碱水泥进行试验,与实际工程情况相差较大,其所用骨料、判据及可靠性受到广泛质疑,一般认为该方法只适用于特定的骨料和特定的配合比,不能评判工程实际的抑制效果,近年来,国际和国内较少采用,加拿大、美国等已将其废除。

新修定的 DL/T 5151 列入了碱-骨料反应抑制措施有效性试验方法,砂浆棒快速法是在 ASTM C1567-08 和 CSA A23.2-28A 基础上发展而来,混凝土棱柱体法是在 ASTM C 1293 和 CSA A23.2-14A 基础上发展而来,这两种试验方法取代了国内标准原来采用的抑制骨料碱活性效能试验方法。

5.0.3 当使用砂浆棒快速法判断抑制措施有效性时,美国 ASTM C 1567 和加拿大 CSA A23.2-28A 的判定标准为 14d 龄期试件长度膨胀率低于 0.10%;美国联邦航空局西北分局和内布拉斯加州公路局规定的判据为 28d 龄期试件长度膨胀率低于 0.10%;我国南水北调中线工程采用的判据也是 28d 龄期试件长度膨胀率低于 0.10%;DL/T 5151 判据为 28d 龄期试件长度膨胀率低于 0.10%。

当使用混凝土棱柱体法判断抑制措施有效性时,美国 ASTM

C 1293、加拿大 CSA A23.2-28A 等标准中规定判据为 2 年龄期试件长度膨胀率低于 0.04%,DL/T 5151 参照以上标准制定。

混凝土棱柱体法更接近混凝土的实际情况,当砂浆棒快速法与混凝土棱柱体法的结果不一致时,以混凝土棱柱体法的试验结果为准。

5.0.4 碱-硅酸反应活性骨料用于工程时,工程使用的水泥、掺和料等原材料应定期检验抑制碱-骨料反应有效性,以确保抑制措施的有效性。