

文章编号:1007-9629(2022)10-1077-09

# 钢渣骨料混凝土体积安定性及其抑制效果评价

谢智超<sup>1,2</sup>, 汪保印<sup>1,2</sup>, 蒋正武<sup>1,2,\*</sup>

(1. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804;

2. 同济大学 材料科学与工程学院, 上海 201804)

**摘要:**采用图像分析软件 ImageJ 分析了钢渣骨料在实际工程用钢渣骨料混凝土(SSAC)中的含量及分布,采用煮沸法研究 SSAC 的体积安定性,并探明其劣化机理,同时评价了不同表面防护涂层对 SSAC 膨胀破坏的抑制效果.结果表明:实际工程用 SSAC 中的钢渣骨料平均含量约为 15%,粗、细钢渣骨料体积比接近 11:2;煮沸法可作为工程用 SSAC 体积安定性的有效评价方法;钢渣骨料中的游离氧化钙(f-CaO)、游离氧化镁(f-MgO)和 FeO 在空气和水分环境中易发生水化及氧化反应,水化产物和氧化产物的体积膨胀是导致 SSAC 安定性不良的根本原因;硅烷偶联剂(SCA)单层防护、硅烷偶联剂-聚合物防水砂浆(SCA-P)和硅烷偶联剂-环氧树脂砂浆(SCA-E)双层防护对 SSAC 膨胀破坏的抑制效果优于聚合物防水砂浆(PWM)及环氧树脂砂浆(EM)单层防护;表面防护涂层虽可在一定程度上延长 SSAC 的初裂时间,但未完全抑制其膨胀反应,无法从根本上改善 SSAC 的体积安定性.

**关键词:**钢渣;体积安定性;煮沸法;劣化机理;快速评价;抑制效果

**中图分类号:**TU528.1;TV42<sup>+</sup>.3 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1007-9629.2022.10.012

## Influence of Steel Slag Aggregate on Volume Stability of Concrete and Its Inhibitory Effect

XIE Zhichao<sup>1,2</sup>, WANG Baoyin<sup>1,2</sup>, JIANG Zhengwu<sup>1,2,\*</sup>

(1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The content and distribution of steel slag aggregate in steel slag aggregate concrete (SSAC) were analyzed by image analysis software ImageJ, and the volume stability of SSAC applied in a practical project during boiling method were evaluated. The deterioration mechanism of SSAC was discussed, and the inhibitory effect of various surface coatings as protection was evaluated. The results show that the average content of steel slag aggregate in SSAC is about 15%, and the volume ratio of coarse and fine aggregates is close to 11:2;boiling method can be used as an effective way to evaluate the volume stability of SSAC. The hydration reaction of free calcium oxide(f-CaO), free calcium oxide(f-MgO)and oxidation reaction of FeO in steel slag aggregate is easy to occur in the presence of air and water, and the volume expansion caused by the above products is the essential cause of the volume instability of SSAC. The inhibition effect of silane coupling agent (SCA) single layer coating, silane coupling agent-polymer waterproof mortar (SCA-P) or silane coupling agent-epoxy mortar (SCA-E) double layer coatings on SSAC expansion failure is better than that of polymer waterproof mortar (PWM) and epoxy mortar (EM) single layer coatings. To some extent, surface protective coatings can prolong the initial cracking time of SSAC, but it cannot

收稿日期:2021-08-18; 修订日期:2021-09-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878480, 52078369)

第一作者:谢智超(1997—),女,浙江丽水人,同济大学硕士生. E-mail:alettachao@tongji.edu.cn

通讯作者:蒋正武(1974—),男,安徽潜山人,同济大学教授,博士生导师,博士. E-mail:jzhw@tongji.edu.cn

completely inhibit the expansion reaction of steel slag aggregate, thus it cannot fundamentally improve its volume stability.

**Key words:** steel slag (SS); volume stability; boiling method; deterioration mechanism; rapid evaluation; inhibitory effect

近年来,现代化工程建设对钢材需求量急剧增加,中国每年钢材产量已超过10亿t,随之产生的钢渣(SS)也超过1.6亿t<sup>[1]</sup>,但钢渣的实际综合利用率仅为30%<sup>[1]</sup>,由此所产生的大量未消纳废弃钢渣不仅占用宝贵的土地资源,还威胁到生态环境安全.为实现中国积极倡导并推动的“碳达峰、碳中和”理念,寻求现有废弃钢渣资源高附加值综合利用的新途径,实现钢铁行业及建筑行业的节能减排与高效可持续发展<sup>[2]</sup>迫在眉睫.目前,钢渣的资源化再利用主要有2个途径:一是用作炼钢厂回收的冶炼熔剂;二是采用陈化、改性、碳化、酸化及膜包覆等预处理方法改善钢渣体积安定性<sup>[3]</sup>,将其作为建筑或道路建设的原材料<sup>[4-5]</sup>.将钢渣作为混凝土骨料并应用于建筑工程中,不仅可有效提高废弃钢渣的综合利用率,还能极大地缓解建材行业砂石骨料资源紧缺的现状.然而,在实际工程中,未经消纳处理的钢渣作为骨料使用时常存在体积安定性不良的隐患.已有大量报道<sup>[6]</sup>显示,因钢渣体积安定性不良等问题导致混凝土出现大面积点状爆裂,从而产生工程事故.这与钢渣内游离氧化钙(f-CaO)和游离氧化镁(f-MgO)持续且缓慢的水化息息相关.此类现象多发于楼板、阳台等邻近外墙处,脱落的混凝土块呈不规则锥形且爆裂点分布无规律,崩裂中心多为黑色钢渣骨料及黄褐色疑似反应产物粉体,对钢渣骨料在建筑工程中的推广应用产生了极大的负面影响.因此,实现钢渣骨料混凝土(SSAC)体积安定性的快速评价并提出有效的抑制措施,对实现混凝土结构工程的安全性、可靠性及耐久性具有重要意义.

目前关于钢渣骨料混凝土(SSAC)的体积安定性主要集中于试验研究,针对其对现有工程结构产生的不利影响及相应抑制技术的研究并不多见.鉴于此,本文采用图像分析法,针对某实际工程所用的混凝土芯样中钢渣骨料的含量(体积分数,下同)及分布建立快速评估机制,并采用煮沸法作为快速评价掺钢渣骨料混凝土体积安定性的方法,通过X射线荧光光谱仪(XRF)、X射线衍射仪(XRD)、热重(TG)分析仪、扫描电镜(SEM)及X射线能谱(EDS)等分析了掺钢渣骨料混凝土体积安定性不良的原因,并进一步研究了表面涂覆硅烷偶联剂(SCA)、聚合物防水砂浆(PWM)及环氧树脂砂浆(EM)等防护

措施对钢渣骨料混凝土膨胀的抑制效果.

## 1 工程概况与试验方法

### 1.1 工程概况

本研究用钢渣骨料混凝土主要应用于商业住宅的主体结构,设计强度等级为C30.混凝土浇筑15个月,在10F、11F楼板下表面及阳台处发现了局部性爆胀现象,爆点直径为1~8 cm,相邻爆点间距为10~80 cm.此外,爆点中心发现黑色钢渣骨料及黄褐色及白色疑似反应产物粉末.经相关机构检测并核验,该爆胀现象不影响建筑主体结构的工程验收与安全使用.通过对钢渣骨料混凝土钻芯,得到10个尺寸为 $\phi 100 \times 100$  mm的圆柱体钻芯试样,并将其中7个芯样沿径向切割均分为四等份试件,用于体积安定性试验,如图1所示.

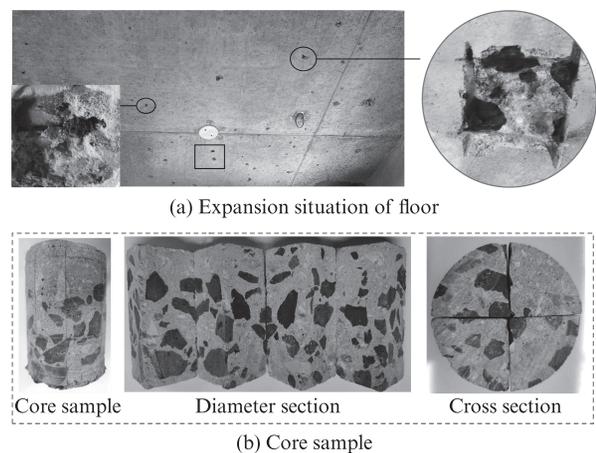


图1 钢渣骨料混凝土钻芯试样  
Fig. 1 Core sample of SSAC

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 钢渣骨料的含量及分布

对切割前的圆柱体芯样和切割后的四等份试件进行拍照整理,采用图像分析软件ImageJ对其侧面、横切面及径切面进行灰度分析及二值化处理,获得钢渣骨料在混凝土各截面的分布图并计算其含量,从而评估工程所用的混凝土内钢渣骨料含量对混凝土体积安定性的影响.将钢渣骨料等效为相同投影面积的圆形颗粒,钢渣密度取为 $3.45 \text{ g/cm}^3$ (钢渣密度一般为 $3.3 \sim 3.6 \text{ g/cm}^3$ <sup>[5]</sup>),推算出混凝土内钢渣骨料的平均等效粒径和粒径分布情况.

### 1.2.2 体积安定性

因无法采用GB/T 1346—2011《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》中的雷氏法及试饼法对圆柱体芯样进行体积安定性测试,故以其中的沸煮机制为参考,采用沸煮法加速芯样破坏过程,并持续监测钢渣骨料混凝土芯样整体形貌变化及裂缝扩展情况.将芯样放入沸煮箱中,保证在 $(30\pm 5)$  min内加热至沸并恒沸 $(180\pm 5)$  min;沸煮过程中沸煮箱内的水位始终高于芯样;沸煮结束后先将芯样放入 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热水中,再缓慢加冷水使试件在15 min内冷却至室温.上述过程为1次沸煮试验,每次沸煮结束后对芯样劣化情况进行观测.

### 1.2.3 微观测试

采用X射线荧光光谱仪(XRF)(型号XRF-1800)、X射线衍射仪(XRD)(型号D/max2550VB3+/PC)、热重(TG)分析仪(型号SDT Q600 V20.9 Build 20)、扫描电镜(SEM)(型号Quanta200)及X射线能谱(EDS)等对钢渣骨料、黄褐色及白色粉体产物的化学组成、矿物组成及其微观形貌等进行表征.

### 1.2.4 表面涂层对钢渣骨料混凝土膨胀的抑制效果

本试验选用WM-100双组分聚合物防水砂浆(液固比(质量比,下同)为2:5)、瑞纳德环氧树脂砂浆(液固比2:5)、USI-6802硅烷偶联剂(溶质质量分数为40%)作为混凝土四等份试件的表面涂层材料.3种涂层材料的用量均为 $2\text{ kg}/\text{m}^3$ .选取钢渣骨料平均含量为15%的四等份试件,按照表面涂层种类分为6组,分别为对照组(Control)、聚合物防水砂浆组(PWM)、环氧树脂砂浆组(EM)、硅烷偶联剂涂层组(SCA),以及内层为硅烷偶联剂、外层分别为聚合物防水砂浆或环氧树脂砂浆(内外层质量比为3:7)的复合涂层组(SCA-P、SCA-E),每组3个四等份试件.需要说明的是,试验采用的沸煮机制与1.2.2中的体积安定性测试方法一致.由于钢渣骨料疏松多孔,吸水率高于天然骨料,其内部水分或加剧膨胀反应,从而导致四等份试件体积安定性不良,故选用试件的饱和吸水率及初裂时间( $t_{ic}$ )作为评价指标,以评价不同表面涂层对钢渣骨料混凝土膨胀的抑制效果.其中饱和吸水率试验参照GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行.

## 2 结果与讨论

### 2.1 混凝土中钢渣骨料的含量及分布

本试验基于图像法,选取3个完整芯样和7个切割为四等份试件的芯样来分析混凝土内钢渣骨料的含量及分布.图2为其中切割为四等份试件的3个芯

样根据灰度图获得的二值化图,其中白色色块为钢渣骨料,黑色区域为砂浆基体.由图2可见,钢渣骨料集中分布于芯样中下部区域.由于钢渣内CaO、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的相对密度在2.65~3.50之间,FeO、MnO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的相对密度在5.24~5.70之间<sup>[1]</sup>,钢渣骨料相对密度通常大于3,比天然骨料高出10%~30%,所以相对密度较大的钢渣骨料在浇筑不当或者振捣不均匀时容易导致混凝土出现离析或泌水现象,进而引起钢渣骨料的非均匀沉降.由图2还可见,不同芯样之间以及同一芯样不同区域中的钢渣骨料含量差异较大.

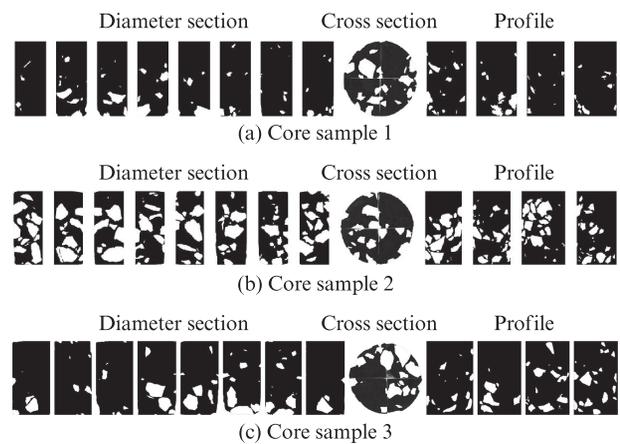


图2 芯样的二值化图

Fig. 2 Binary images of core samples

使用ImageJ软件对二值化图进行分析计算后,得出钢渣骨料在芯样中的含量、钢渣骨料的等效颗粒粒径及粒径分布范围,结果如图3、4所示.其中径切面和横切面的数据来自于7个切割为四等份试件的芯样.由图3、4可知:钢渣骨料在整个芯样中的平均含量约为15%,钢渣骨料的数量约为 $2\ 377$ 个/ $\text{m}^2$ ;粒径范围在 $0.6\sim 2.5\text{ mm}$ 、 $2.5\sim 5.0\text{ mm}$ 、 $5.0\sim 10.0\text{ mm}$ 和大于 $10.0\text{ mm}$ 的钢渣骨料平均含量分别为1.5%、14.0%、54.1%和30.4%,粗、细钢渣骨料体积比约为11:2,可见芯样中的钢渣主要以粗骨料形式存在.因钢渣粗骨料占比越大,对混凝土造成的损伤越严重<sup>[7]</sup>,故工程中应严格控制钢渣粗骨料含量,以降低混凝土结构体积安定性不良的风险.

### 2.2 钢渣骨料混凝土的破坏特征

以钢渣平均含量分别为8%和20%的钢渣骨料混凝土为例,展示其破坏特征,见图5.由图5在沸煮过程中的形貌变化、初裂时间( $t_{ic}$ )和破坏时间( $t_f$ )可知:(1)钢渣骨料含量对钢渣骨料混凝土的体积安定性起决定性作用,骨料粉化及混凝土块崩裂等体积安定性不良的现象均与之密切相关.(2)当钢渣平均

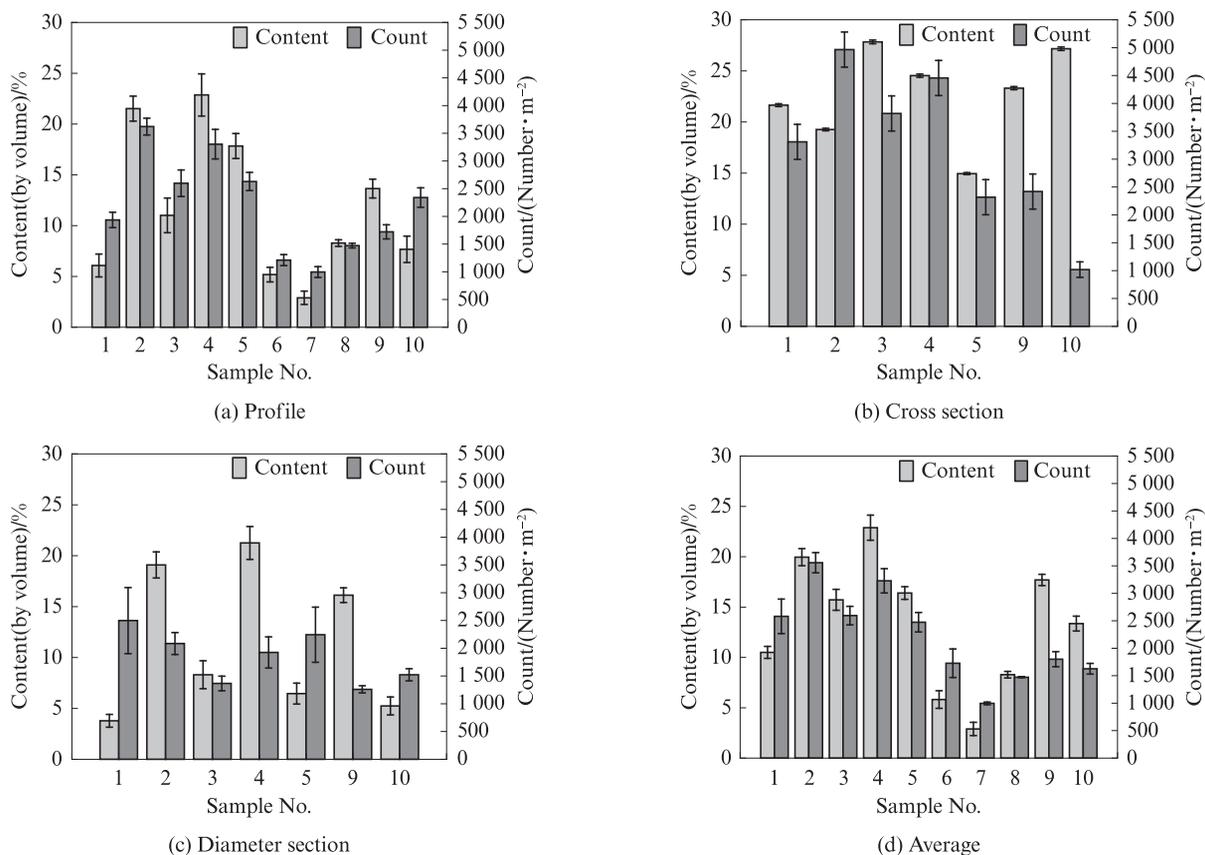


图3 钢渣骨料在芯样中的含量及分布

Fig. 3 Contents and distributions of steel slag aggregate in core samples

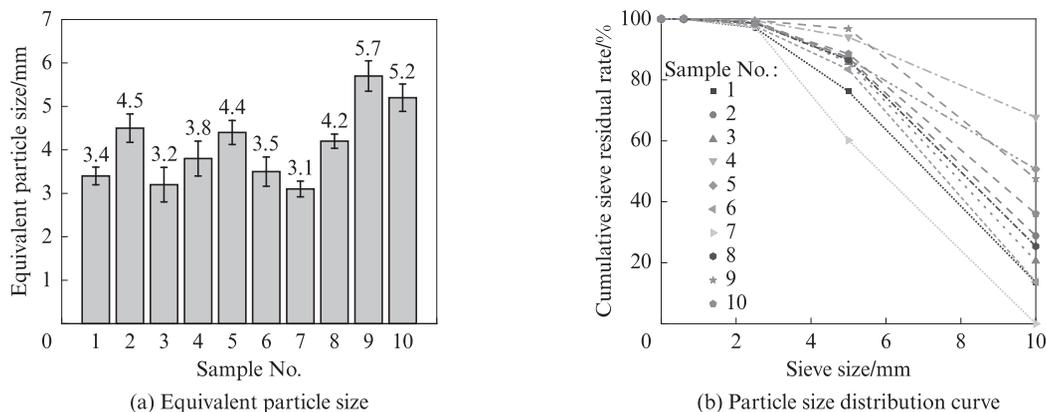


图4 芯样中钢渣骨料的等效颗粒粒径及粒径分布曲线

Fig. 4 Equivalent particle sizes and particle size distribution curves of steel slag aggregate in core samples

含量为8%时,芯样的 $t_{ic}$ 和 $t_f$ 分别为15、18 h;当钢渣平均含量增至20%时,芯样内部膨胀应力远大于黏结应力,芯样粉化及崩裂程度加剧, $t_{ic}$ 和 $t_f$ 分别提前至3.6 h.钢渣分布的不均匀性加剧了体积不稳定性,各爆点引发的裂缝均可能导致结构的整体破坏.

由图5还可见:部分钢渣骨料疏松多孔,平均孔径约为 $561\ \mu\text{m}$ ,与工程现场观察到的现象一致;黑色钢渣骨料逐渐粉化为疏松多孔的无黏结性且无强度的黄褐色及白色粉体,导致钢渣骨料与浆体界面之

间出现裂缝且不断扩展,裂缝平均宽度约为 $566\ \mu\text{m}$ ;当裂缝宽度达到临界裂缝宽度时,裂缝失稳扩展,最终导致芯样破坏.

### 2.3 沸煮试验中钢渣骨料混凝土的体积安定性劣化机理

#### 2.3.1 钢渣骨料的化学组成

对沸煮后芯样内部钢渣骨料和工程现场取样的钢渣骨料及其各自产生的黄褐色粉体进行化学组成分析,结果列于表1.将其与表2所列碱性氧气转炉钢渣(BOFS)、电弧炉钢渣(EAFS)以及不同碱度<sup>[8]</sup>(钢

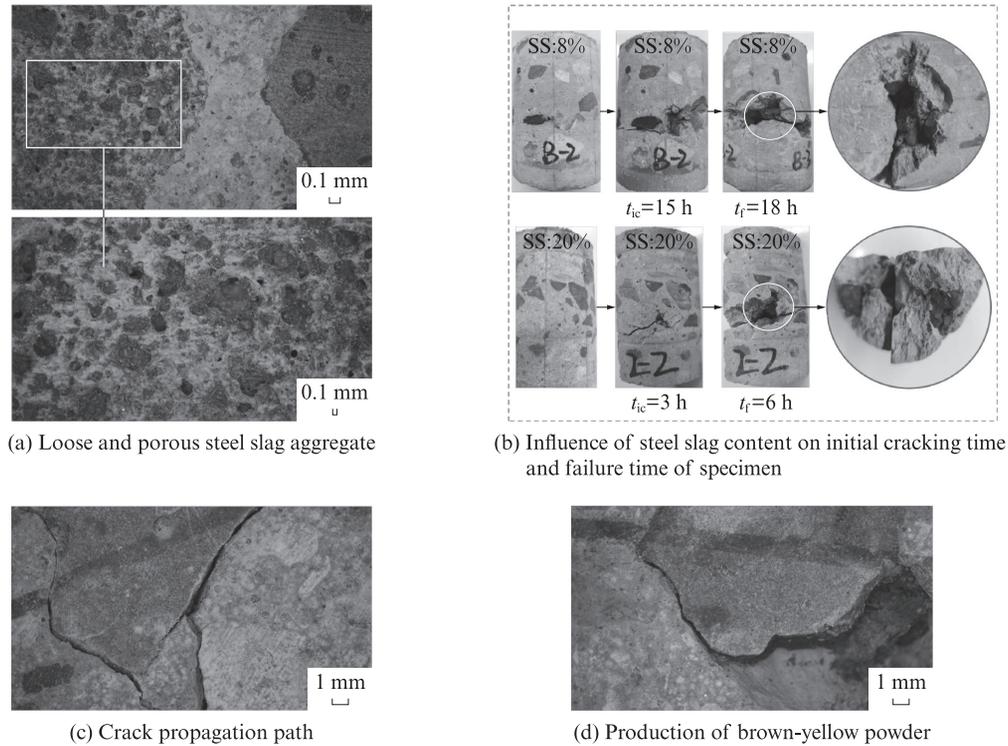


图5 钢渣骨料混凝土的破坏特征  
Fig. 5 Failure characteristics of SSAC

渣碱度值  $R=w(\text{CaO})/(w(\text{SiO}_2)+w(\text{P}_2\text{O}_5))$  钢渣的组成进行对比.由表1、2可见:钢渣骨料的化学组成主要为CaO、Fe/FeO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>、MgO、MnO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等,其中CaO、MgO、SiO<sub>2</sub>、Fe/FeO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的质量分数分别为20%~60%、2%~13%、10%~20%、10%~40%;芯样内钢渣骨料属于高碱度钢渣( $R=3.7$ )及BOFS,钙硅比为4.54.

2.3.2 钢渣骨料的矿物组成

对黑色钢渣骨料、骨料粉化产生的黄褐色粉体及白色粉体的矿物组成进行XRD分析,结果如图6所示.由图6可见:(1)黑色钢渣主要由RO相(MgO、CaO、FeO及MnO组成的固溶体)、游离氧化钙(f-CaO)和硅酸二钙(C<sub>2</sub>S)组成;黄褐色粉体中除f-CaO、C<sub>2</sub>S、RO相外,还存在Ca(OH)<sub>2</sub>、铁酸二钙

表1 钢渣及黄褐色粉体的化学组成  
Table 1 Chemical compositions of steel slag and yellow-brown powder

Material	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>total</sub>	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	w/%
Steel slag*	46.6	11.0	1.0	30.2	4.6	1.7	3.0	
Brown-yellow powder*	67.0	4.3	1.3	21.0	2.0	0.3	2.9	
Steel slag <sup>⊕</sup>	34.6	14.7	2.2	26.3	5.0	1.3	4.8	
Brown-yellow powder <sup>⊕</sup>	64.2	8.4	2.0	13.3	4.3	0.3	1.4	

Note: \*denotes steel slag and powder after boiling; ⊕denotes steel slag and powder obtained from the construction site.

(C<sub>2</sub>F)和赤铁矿(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>);白色粉体主要由方镁石(游离氧化镁(f-MgO))、镁铝尖晶石、尖晶橄榄石、钙镁橄榄石和Mg(OH)<sub>2</sub>组成.(2)沸煮后钢渣的主要矿物组成发生了变化,黄褐色粉体及白色粉体中出现了

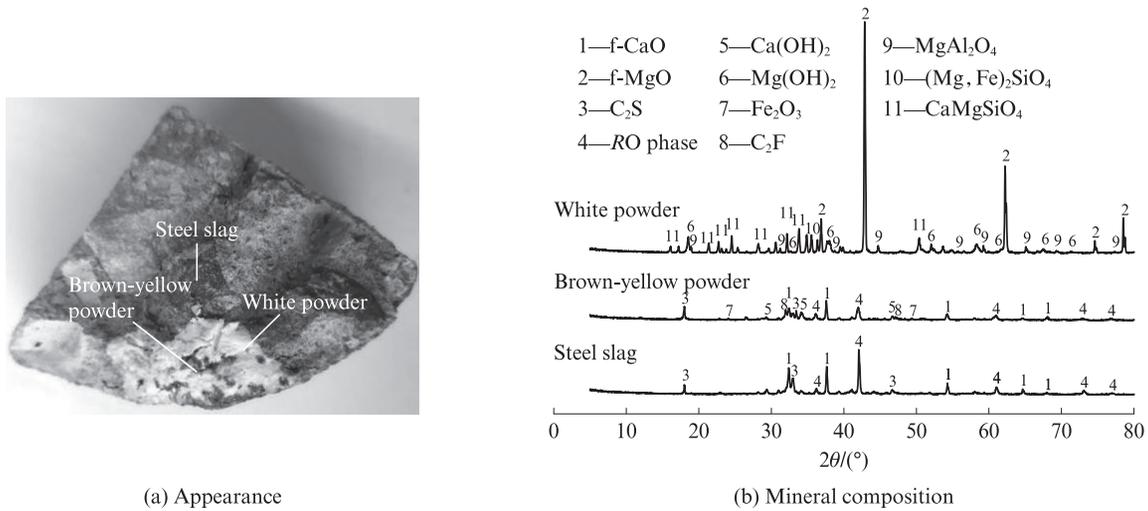
表2 文献中钢渣的化学组成  
Table2 Chemical compositions of steel slag in literatures

Type of steel slag	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe total	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	w/%
H-basidity SS <sup>[9-10]</sup>	38-60	9-15	1-5	10-30	3-13	1.0-2.7	0.06-1.4	
M-basidity SS <sup>[7, 11]</sup>	38-40	16-20	3-5	18-26	4.8-5.7	0.74	1.8-4.4	
L-basidity SS <sup>[12]</sup>	20-50	13-20	3-12	0.9-48.3	7.4-13.4	1-4	0.6-6.8	
BOFS <sup>[9]</sup>	40-60	10-19	1-5	10-29	3-13	1-4	2-6	
EAFS <sup>[9]</sup>	30-53	11-23	2-18	13-28	8-13	0.1-5.0	5-10	

Note: H-basidity SS—High-basidity steel slag( $R>2.5$ ); M-basidity SS—Medium-basidity steel slag( $R=1.8-2.5$ ); L-basidity SS—Low-basidity steel slag( $R<1.8$ ).

Ca(OH)<sub>2</sub>和Mg(OH)<sub>2</sub>,且RO相的峰强减小.据此,初步判定f-CaO和f-MgO的进一步水化及方铁矿的氧化

所导致的体积膨胀是芯样体积安定性不良的主要原因.



(a) Appearance

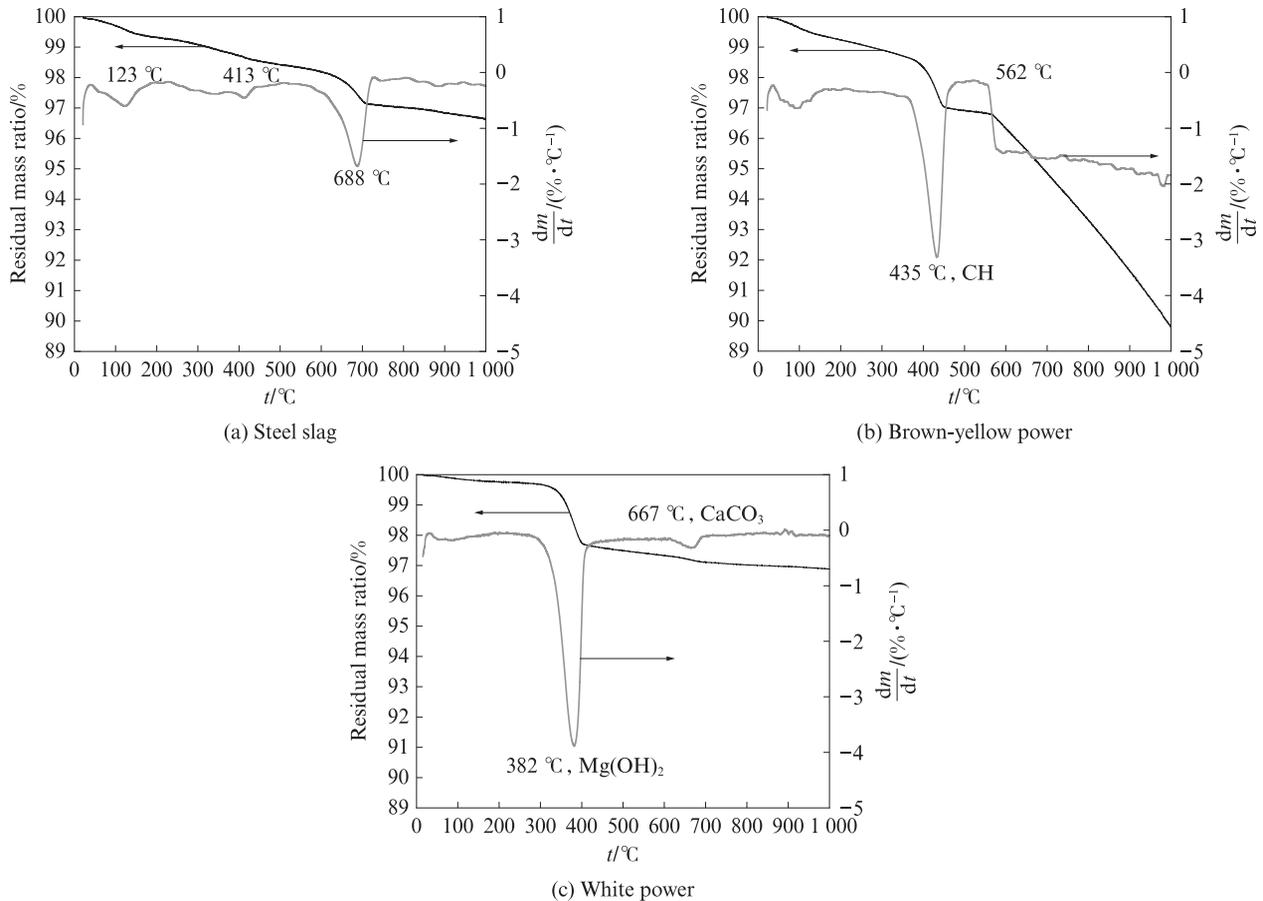
(b) Mineral composition

图6 芯样中钢渣、黄褐色粉体及白色粉体的外观和矿物组成

Fig. 6 Appearances and mineral compositions of steel slag, brown-yellow powder and white powder in core sample

图7为芯样中钢渣、黄褐色粉体及白色粉体的TG-DTG曲线.由图7可知:黄褐色粉体中含有在435℃脱去结构水的Ca(OH)<sub>2</sub>,白色粉体中含有在

382℃失去化学结合水的Mg(OH)<sub>2</sub>,故沸煮过程中钢渣中的f-CaO和f-MgO发生了水化反应并生成了Ca(OH)<sub>2</sub>和Mg(OH)<sub>2</sub>,与XRD结果一致.f-CaO和



(a) Steel slag

(b) Brown-yellow powder

(c) White powder

图7 芯样中钢渣、黄褐色粉体及白色粉体的TG-DTG曲线

Fig. 7 TG-DTG covers of steel slag, brown-yellow powder and white powder in core sample

f-MgO进一步水化导致的体积安定性不良是制约钢渣大规模应用的根本原因之一<sup>[12]</sup>.钢渣中的MgO主要以游离态、固溶态及化合态形式存在,游离态的MgO(即方镁石)易引起钢渣混凝土体积安定性不良<sup>[13]</sup>.若其以化合态形式存在于钙镁橄榄石中,一般不会影响钢渣混凝土的体积安定性;但当RO相中的MgO的质量分数大于70%<sup>[14]</sup>或者方镁石固溶体中 $m(\text{MgO})/m(\text{FeO}+\text{MnO})$ 大于1时<sup>[15]</sup>,钢渣混凝土的体积安定性就会不良.钢渣混凝土的体积膨胀率随着钢渣骨料中铁含量的提高而增大<sup>[16]</sup>,高碱度和高CaO含量(质量分数为30%~55%)的钢渣骨料因铁的氧化或者锈蚀导致混凝土体积安定性不良<sup>[17]</sup>.芯

样中骨料粉化及混凝土结构体积安定性不良的根本原因主要为f-CaO和f-MgO的持续水化,以及方铁矿的氧化.

### 2.3.3 钢渣骨料的微观形貌

芯样中钢渣和黄褐色粉体的SEM照片及EDS分析结果如图8所示.由图8可见:黑色钢渣骨料中含有O、Fe、Mg、Mn、Ca、Al和Si等元素,且Ca、Mg、Fe和O的含量较高,与XRF和XRD结果一致;黄褐色粉体疏松多孔,界面间的黏结较弱.由此进一步验证了2.3.2中的结论,即在f-CaO和f-MgO水化反应及铁类化合物氧化反应的共同作用下,钢渣骨料逐渐粉化并最终导致混凝土体积安定性不良.

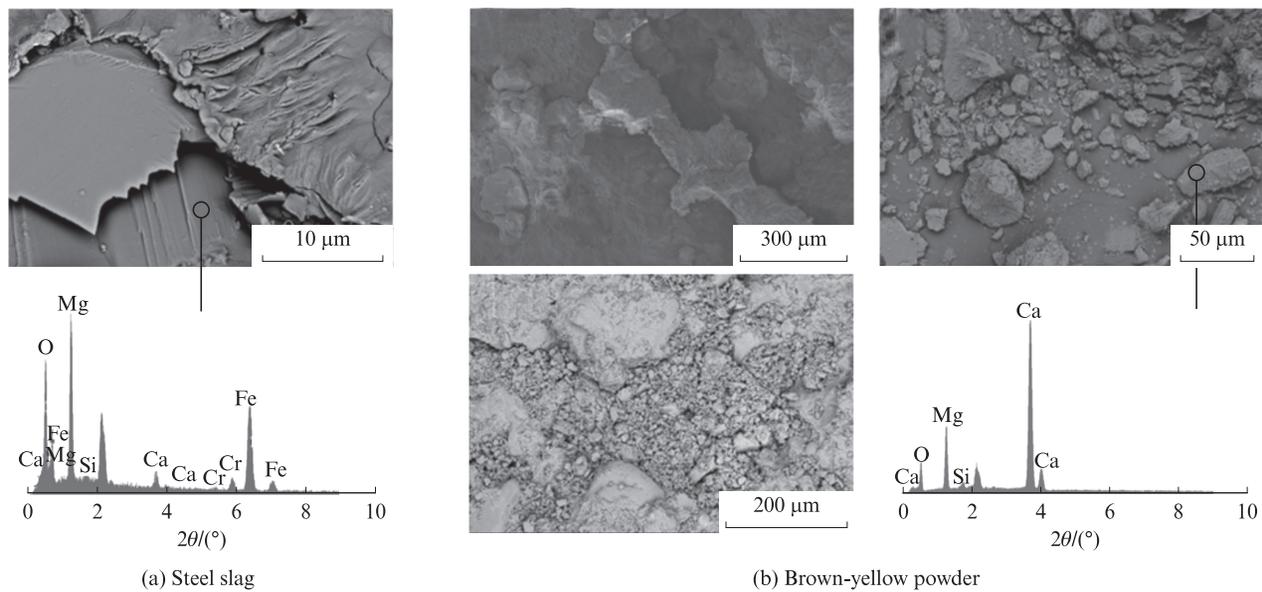


图8 芯样中钢渣和黄褐色粉体的SEM照片及EDS分析  
Fig. 8 SEM images and EDS analysis of steel slag and brown-yellow powder

### 2.3.4 钢渣骨料混凝土的体积安定性劣化机理

综合分析XRF、XRD和SEM-EDS结果可知:在空气和水分环境中,膨胀源组分f-CaO、f-MgO的水化反应及FeO的氧化反应共同促使钢渣骨料粉化及混凝土结构崩裂;随着水化反应的持续进行,Ca(OH)<sub>2</sub>和Mg(OH)<sub>2</sub>晶体尺寸逐渐增大,并不断挤压周围水化产物,使基体内部产生局部膨胀应力,从而导致混凝土具有爆裂风险<sup>[7]</sup>.

f-CaO主要来自于炼钢过程中因引入助熔剂所产生的过剩CaO、部分吸收却弥散于固溶体中的CaO,以及缓慢冷却过程中硅酸三钙(C<sub>3</sub>S)分解形成的次生CaO;f-MgO主要来源于炉内镁质材料的脱落.钢渣在1700℃左右煅烧过程中形成结构致密、晶粒粗大的f-CaO(过烧CaO)和f-MgO,两者水化过程极其缓慢且伴随着体积膨胀<sup>[18]</sup>,f-CaO、f-MgO分

别水化成Ca(OH)<sub>2</sub>、Mg(OH)<sub>2</sub>时体积膨胀率约为98%、148%<sup>[1,8,14,19]</sup>,FeO被氧化为Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>时体积增大为原来的2.47倍<sup>[4]</sup>.

图9为钢渣骨料的劣化机理示意图.由图9可见,f-CaO、f-MgO与水的局部化学反应始于颗粒间的界面区且导致混凝土内部应力集中,当混凝土表层拉应力小于钢渣中心形成的径向爆裂应力时,混凝土内部界面区会产生大量裂缝且丧失结构完整性,进而表现为混凝土体积安定性不良.膨胀源组分与水分之间的反应速度、程度与约束大小,骨料粒径,环境温湿度及骨料在构件中的深度等多重因素密切相关.因此,由钢渣骨料体积安定性不良所引起的混凝土开裂时间及严重程度均具有不确定性和难以预测性<sup>[6]</sup>.由2.1可知,本工程中的钢渣骨料集中于芯样底部(即楼板底部),因此由钢渣骨料内部

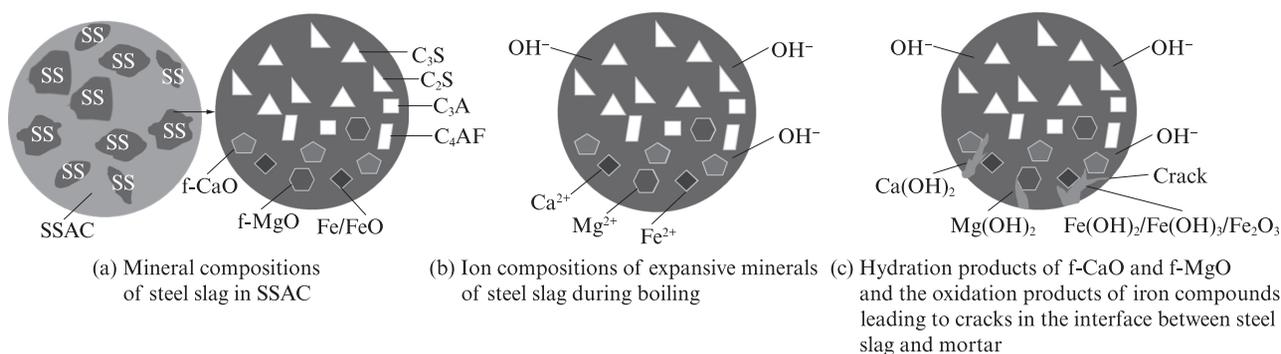


图9 钢渣骨料的劣化机理

Fig. 9 Deterioration mechanism of steel slag aggregates

f-CaO与f-MgO膨胀引起的点状爆裂现象在楼板底部更为显著,与工程实际现象一致.

#### 2.4 不同表面防护涂层对钢渣骨料混凝土的膨胀抑制效果评价

采用涂层法在SSAC表面形成致密的防护层,以阻止SSAC内部活性成分的进一步水化.表面防护涂层采用硅烷偶联剂(SCA)、聚合物防水砂浆(PWM)及环氧树脂砂浆(EM).

图10为不同表面防护涂层对芯样吸水率(质量分数)及初裂时间( $t_{ic}$ )的影响.由图10可见:(1)SCA比PWM、EM具有更好的憎水效果,硅烷

偶联剂-聚合物防水砂浆复合涂层(SCA-P)和硅烷偶联剂-环氧树脂砂浆复合涂层(SCA-E)能够大幅降低芯样的早期吸水速率,降幅为46%~47%;PWM、EM及SCA将对对照组(Control)的48 h吸水率从10.8%降至10.5%,甚至5.5%.(2)沸煮试验结果与吸水率测试结果基本一致,表面防护涂层可将 $t_{ic}$ 延长71%~149%,且复合涂层对 $t_{ic}$ 的延长效果优于单一涂层,表面防护涂层能够延缓因钢渣骨料体积安定性不良所导致的芯样初裂;但表面防护涂层处理的保护效果有限,无法起到长期防护作用.

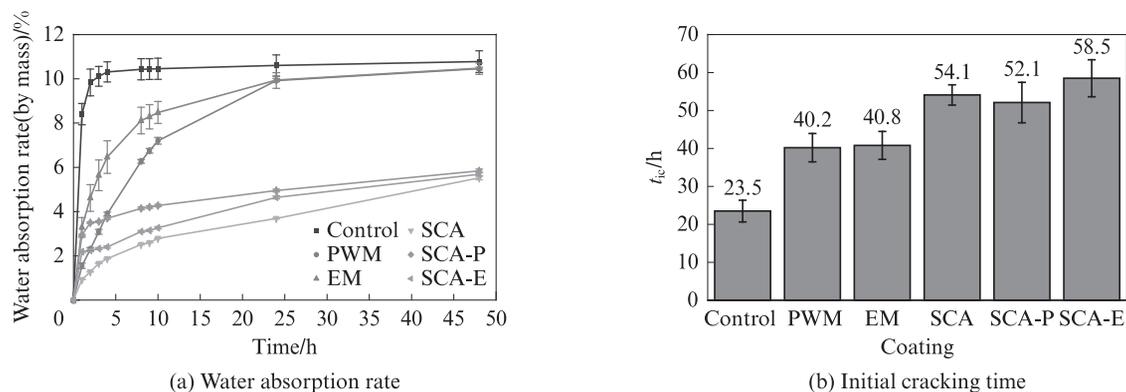


图10 不同表面涂层对芯样吸水率及初裂时间的影响

Fig. 10 Effect of various coatings on water absorption rate and initial cracking time of core samples

### 3 结论

(1)采用图像分析法可定量计算混凝土中钢渣骨料的含量及分布.混凝土芯样中钢渣骨料平均含量约为15%,各粒径范围内的钢渣含量为3%~28%,钢渣骨料分布极不均匀,粗细骨料体积比接近11:2.沸煮法可以作为钢渣骨料混凝土体积安定性的评价方法.沸煮试验后,黑色钢渣骨料逐渐粉化成无黏结强度的黄褐色粉体及白色粉体,导致钢渣骨料与浆体界面之间出现裂缝,并最终引起芯样破坏.

(2)在空气和水分环境中,f-CaO、f-MgO的水化反应及FeO的氧化反应所引起的体积膨胀是钢渣骨料混凝土体积安定性不良的根本原因.钢渣骨料在结构混凝土中的应用存在较大潜在风险.

(3)硅烷偶联剂比聚合物防水砂浆、环氧树脂砂浆具有更佳的憎水效果.表面防护涂层虽然可延缓钢渣骨料混凝土的膨胀反应,且复合涂层抑制效果优于单一涂层,但上述3种表面防护涂层材料均未能完全抑制钢渣骨料混凝土的膨胀反应,无法从根本上改善其体积安定性.

## 参考文献:

- [ 1 ] DONG Q, WANG G T, CHEN X Q, et al. Recycling of steel slag aggregate in portland cement concrete: An overview[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 282:124447.
- [ 2 ] 蒋正武, 尹军. 可持续混凝土发展的技术原则与途径[J]. *建筑材料学报*, 2016, 19(6):957-963.  
JIANG Zhengwu, YIN Jun. Technical principles and approaches for development of sustainable concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2016, 19(6):957-963. (in Chinese)
- [ 3 ] QIAN C X, YI H H, DU W X. Bacteria fixing CO<sub>2</sub> to enhance the volume stability of ground steel slag powder as a component of cement-based materials aiming at clean production[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 314:127821.
- [ 4 ] MARTINS A C P, DE CARVALHO J M F, COSTA L C B, et al. Steel slags in cement-based composites: An ultimate review on characterization, applications and performance [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 291:123265.
- [ 5 ] GENCEL O, KARADAG O, OREN O H, et al. Steel slag and its applications in cement and concrete technology: A review[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 283:122783.
- [ 6 ] 张亚梅, 李保亮. 用钢渣作骨料引起的混凝土工程开裂问题案例分析[J]. *混凝土世界*, 2016(6):22-25.  
ZHANG Yamei, LI Baoliang. Case study on cracking problem of concrete engineering caused by steel slag aggregate[J]. *China Concrete*, 2016(6):22-25. (in Chinese)
- [ 7 ] 米贵东, 王强, 王卫仑. 蒸养条件下钢渣粗骨料对混凝土的破坏作用[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2015, 55(9):940-944.  
MI Guidong, WANG Qiang, WANG Weilun. Destructive effect of steel slag coarse aggregate on the concrete under autoclaved condition [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2015, 55(9):940-944. (in Chinese)
- [ 8 ] MASON B. The constitution of some open-heart slag[J]. *Journal of Iron and Steel Institute*, 1994, 11:69-80.
- [ 9 ] LI J X, YU Q J, WEI J X, et al. Structural characteristics and hydration kinetics of modified steel slag[J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(3):324-329.
- [ 10 ] 林志伟, 颜峰, 郭荣鑫, 等. 富水环境下钢渣骨料体积膨胀行为及抑制方法研究现状综述[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(1):118-124.  
LIN Zhiwei, YAN Feng, GUO Rongxin, et al. Summary of research status of volume expansion behavior and inhibition methods of steel slag aggregate in water-rich environment[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(1):118-124. (in Chinese)
- [ 11 ] 尚建丽, 邢琳琳. 钢渣粗骨料混凝土界面过渡区的研究[J]. *建筑材料学报*, 2013, 16(2):217-220.  
SHANG Jianli, XING Linlin. Study on interfacial transition zone of steel slag coarse aggregate concrete[J]. 2013, 16(2):217-220. (in Chinese)
- [ 12 ] 杨建伟. 钢渣和含钢渣的复合矿物掺合料对混凝土性能的影响[D]. 北京:清华大学, 2013.  
YANG Jianwei. Influence of steel slag and composite mineral admixture containing steel slag on the properties of concrete[D]. Beijing:Tsinghua University, 2013. (in Chinese)
- [ 13 ] ROJAS M F, DE ROJAS M I S. Chemical assessment of the electric arc furnace slag as construction material: Expansive compounds[J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(10):1881-1888.
- [ 14 ] 张同生, 刘福田, 王建伟, 等. 钢渣安定性与活性激发的研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2007, 26(5):980-984.  
ZHANG Tongsheng, LIU Futian, WANG Jianwei, et al. Recent development of steel slag stability and activating activity[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2007, 26(5):980-984. (in Chinese)
- [ 15 ] 罗寿荪. 钢渣中的氧化镁对水泥安定性的影响[J]. *硅酸盐通报*, 1980(4):7-10.  
LUO Shousun. Effect of magnesium oxide in steel slag on cement stability[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 1980(4):7-10. (in Chinese)
- [ 16 ] 李永鑫. 含钢渣粉掺合料的水泥混凝土组成、结构与性能的研究[D]. 北京:中国建筑材料科学研究院, 2003.  
LI Yongxin. Study on composition, structure and properties of cement and concrete with steel-making slag powder mineral additive[D]. Beijing:China Building Materials Academy, 2003. (in Chinese)
- [ 17 ] ROHDE L, NUNEZ W P, CERATTI J A P. Electric arc furnace steel slag-base material for low-volume roads[J]. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2003, 1819(1):201-207.
- [ 18 ] DAI S, ZHU H J, ZHAI M A, et al. Stability of steel slag as fine aggregate and its application in 3D printing materials [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 299:123938.
- [ 19 ] ZHAO J H, LIU Q, FANG K Z. Optimization of f-MgO/f-CaO phase in ladle furnace slag by air rapidly cooling[J]. *Materials Letters*, 2020, 280:128528.