

不同种类转炉钢渣对高铁分相熟料烧成与性能的影响

赵德强^{1,2}, 沈卫国^{1,2,3}, 王桂明^{1,2}, 张文生⁴, 赵志成^{1,2}, 余震^{1,2}, 赵青林^{1,2}

(1. 武汉理工大学, 硅酸盐建筑材料国家重点实验室, 武汉 430070; 2. 武汉理工大学材料科学与工程学院, 武汉 430070; 3. 大宗固废综合利用与绿色建材襄阳市重点实验室, 湖北 襄阳 441022; 4. 中国建筑材料科学研究总院有限公司, 绿色建筑材料国家重点实验室, 北京 100024)

摘 要: 钢渣分相熟料是直接利用粒状钢渣煅烧的水泥熟料, 因此钢渣自身的物理化学特性对分相熟料的烧成至关重要。为探究不同种类转炉钢渣对分相熟料烧成与性能的影响机制, 采用热焖渣、滚筒渣和有压热焖渣在 1 420 °C 制备了 3 种钢渣分相熟料。结果表明: 不同种类转炉钢渣分相熟料矿物以 C_3S 、 C_2S 和 C_4AF 为主, 钢渣中的铁质成分含量高, 使分相熟料中的 Al 基本转化为铁铝酸盐矿物(Ferrite), 呈现典型的高铁(Ferrite 含量 > 18%, 质量分数)特征。不同种类转炉钢渣间化学成分、矿物组成及粒径分布的差异, 对分相熟料矿物晶体的形成发育和性能产生了不同的影响。分相熟料中水溶性铬(VI)含量与钢渣中的 Cr_2O_3 和碱含量呈正相关, 且钢渣中的细颗粒含量越高, Cr 越容易在烧成过程中被氧化成水溶性高价铬酸盐。

关键词: 转炉钢渣; 高铁; 分相熟料; 烧成; 性能

中图分类号: TQ172.11 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)08-1885-13

网络出版时间: 2023-05-09



Effect of Different Types of Converter Steel Slag on Sintering and Properties of High-Ferrite Multi-Phased Clinker

ZHAO Deqiang^{1,2}, SHEN Weiguo^{1,2,3}, WANG Guiming^{1,2}, ZHANG Wensheng⁴, ZHAO Zhicheng^{1,2}, YU Zhen^{1,2}, ZHAO Qinglin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Bulk Solid Waste and Green Building Materials, Xiangyang 441022, Hubei, China; 4. State Key Laboratory of Green Building Materials, China Building Materials Academy, Beijing 100024, China)

Abstract: Steel slag multi-phased clinker is a cement clinker directly calcined by granular steel slag, so the physical and chemical characteristics of steel slag are very important to the sintering of multi-phased clinker. In order to explore the influence mechanism of different types of converter steel slag on the sintering and properties of multi-phased clinker, three kinds of multi-phased clinker were prepared by using hot smoldering slag, roller slag and pressurized hot smoldering slag at 1 420 °C. The results show that the multi-phased clinker minerals with different steel slag were mainly C_3S , C_2S and C_4AF , the higher iron content in steel slag resulted in the Al transformed into ferrite minerals, showing a typical high ferrite (Ferrite content > 18%, mass fraction) characteristic. The differences of chemical composition, mineral composition and particle size distribution among different steel slag had different influences on the formation and development of mineral crystals and properties of multi-phased clinker. The content of water-soluble chromium (VI) in multi-phased clinker was positively correlated with the content of Cr_2O_3 and alkali in steel slag, and the higher the content of fine particles in steel slag, the more easily Cr was oxidized into water-soluble high valence chromate in the sintering process.

Keywords: converter steel slag; high-ferrite phase; multi-phased clinker; sintering; properties

收稿日期: 2023-03-16。 修订日期: 2023-04-10。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51972247); 广西重点研发计划(AB18126035)。

第一作者: 赵德强(1995—), 男, 博士研究生。

通信作者: 沈卫国(1971—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2023-03-16. Revised date: 2023-04-10.

First author: ZHAO Deqiang (1995—), male, Doctoral candidate.

E-mail: 541499873@qq.com

Correspondent author: SHEN Weiguo (1971—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: shenwg@whut.edu.cn

钢渣是炼钢过程中造渣工艺环节产生的废渣。由于其本身存在易磨性差、安定性不良及水化活性低的问题,导致钢渣在中国的综合利用率仍不足 30%,其中转炉钢渣占钢渣总产生量的 70%以上^[1]。在粗钢的实际生产中,由于处理工艺(热泼法、热焖法、滚筒法)的不同,转炉钢渣可分为热泼渣、热焖渣和滚筒渣等,不同处理工艺产生的转炉钢渣在粒度、化学成分及矿物相组成上差异较大^[2],这在转炉钢渣的利用中是不可忽视的。钢渣中因含有较高的 Fe_2O_3 成分,在硅酸盐水泥熟料生产中常被用作铁质校正材料^[3]。为了进一步提高钢渣在熟料生产中的利用率,越来越多的学者将钢渣用于制备低钙高铁硅酸盐水泥熟料^[4-5]、贝利特-硫铝酸钙熟料及铁铝酸钙熟料^[6-7],但上述研究基本只选用一种钢渣作为原材料,虽然得到了较为理想的熟料矿物,基于钢渣种类的复杂性和化学成分的多变性,稳定生产高质量的熟料依旧存在很大的挑战。此外,出厂钢渣需要预先粉磨成微粉才可用于生料配料,钢渣易磨性差的问题依旧存在于熟料生产过程。钢渣分相熟料烧成技术是将未经粉磨的原状钢渣从窑尾 C5 级下料管翻板阀下方靠近窑尾斜坡处随预分解的生料一同入窑,钢渣中的细颗粒与生料混合并参与熟料矿物烧成反应,粗颗粒钢渣入窑后则率先熔融并裹附生料,经高温烧成后形成一种以高温重构钢渣为内核、高铁相熟料为过渡区以及普通熟料为外壳的钢渣分相熟料^[8]。经过不断的研究和探索,该技术已从实验室模拟烧成阶段成功过渡到了工业化生产阶段^[9]。钢渣分相熟料烧成的基础之一源于

高温热处理对钢渣矿物相的重构、f-CaO 与方镁石的消解以及易磨性和胶凝活性的改善^[10-11],另一方面则是钢渣对熟料矿物烧成的促进作用。因此,钢渣分相熟料的高质量烧成与入窑钢渣的物理化学特性密切相关。

钢渣中 CaO、MgO 与 FeO 等碱性氧化物的含量决定了熔融钢渣的黏度和流动性^[12],而对于同一种熔渣,冷却过程的不同也导致钢渣的粒度和矿物相组成差异较大^[13]。因此,不同处理工艺产生的转炉钢渣必定会对分相熟料的烧成与性能产生重要影响,但该方面的研究尚未有系统的探讨,也限制了钢渣分相熟料烧成技术的跨区域推广应用。因此,本工作旨在用不同种类转炉钢渣在实验室模拟制备分相熟料,研究其对分相熟料矿物烧成的影响,进而获得不同种类转炉钢渣对分相熟料性能的影响规律,为钢渣分相熟料烧成技术的推广应用提供理论基础。

1 实验

1.1 原材料与样品制备

钢渣分别为陕西龙门钢铁公司的热焖法转炉钢渣(LS)、武钢的滚筒法转炉钢渣(WG)和有压热焖法转炉钢渣(WY),水泥生料来自陕西富平生态水泥有限公司,天然石膏来自葛洲坝水泥厂,原材料化学成分见表 1。3 种钢渣的主要成分均为 CaO、 SiO_2 、 Fe_2O_3 ,还有少量的 Al_2O_3 、MgO、MnO、及 P_2O_5 。根据 Mason 钢渣碱度公式可知^[14],LS 为中碱度钢渣, WG 与 WY 为高碱度钢渣。

表 1 钢渣的化学成分及碱度

Table 1 Chemical composition and basicity of steel slag

Material	w(SiO_2)/ %	w(Al_2O_3)/ %	w(Fe_2O_3)/ %	w(CaO)/ %	w(MgO)/ %	w(MnO)/ %	w(P_2O_5)/ %	w(TiO_2)/ %	w(Cr_2O_3)/ %	w(K_2O)/ %	w(Na_2O)/ %	w(SO_3)/ %	w(LOI)/ %	Basicity
LS	15.57	3.89	23.87	36.45	7.28	6.99	2.22	1.46	0.37	0.11	0.22	0.73	1.28	2.05
WG	14.46	1.60	24.09	47.77	4.91	1.93	1.97	1.00	0.13			0.26	1.55	2.91
WY	13.18	2.27	25.82	46.18	4.47	2.27	1.69	0.87	0.26	0.04	0.27	0.51	1.78	3.11
Raw meal	11.56	4.25	2.09	44.69	1.40	0.30	0.07	0.26	0.03	0.63	0.17	0.08	34.41	
Natural gypsum	16.02	5.64	1.54	24.63	3.14	0.07	0.09	0.24	0.01	1.20	0.65	33.54	12.72	

LOI: Loss on ignition; LS: Hot smoldering slag; WG: Roller slag; WY: Pressurized hot smoldering slag. w is mass fraction.

钢渣分相熟料实验室模拟制备过程如图 1 所示。将准确称量的生料与颗粒状钢渣放入到混料瓶中,在翻转式混料机中混合 3 h 后得到混合料,其中钢渣掺量为生料质量的 10%。然后用 0.3 mm 方孔筛对混合料进行筛分,小于 0.3 mm 的细颗粒钢渣与生料充分混合并参与熟料矿物烧成,大于 0.3 mm 的粗颗粒钢渣被包裹在生料内部,然后在 20 kN 的作用力下压制成为直径为 25 mm 的生料球。生料球

经过 80 °C 鼓风干燥箱烘干 3 h 后,置于硅钼炉中以 5 °C/min 的升温速率加热至 1 420 °C,保温 30 min 后取出风冷。

1.2 测试方法

采用 EMPYREAN 型 X 射线衍射仪测定钢渣和分相熟料的矿物相组成,在样品中添加 10% (质量分数)的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 作为内标物进行钢渣和分相熟料中的非晶相和结晶较差的相的标定,利用 X'Pert High

Score Plus v3.0e 软件进行 Rietveld 全谱拟合定量分析矿相, 扫描角度为 $5^{\circ} \sim 70^{\circ}$, 步长为 0.02° , 扫描速率为 $1.5 (^{\circ})/\text{min}$ 。峰型拟合选择 Split width and shape 模式, 背底采用 Polynomial 模式自动扣除。

破碎后的钢渣分相熟料用环氧树脂封装, 经过研磨、抛光以及 1% 硝酸酒精侵蚀并干燥后, 立即采用 NIKON LV100POL 光学显微镜观察分相熟料的岩相结构, 钢渣分相熟料岩相光片见图 2。

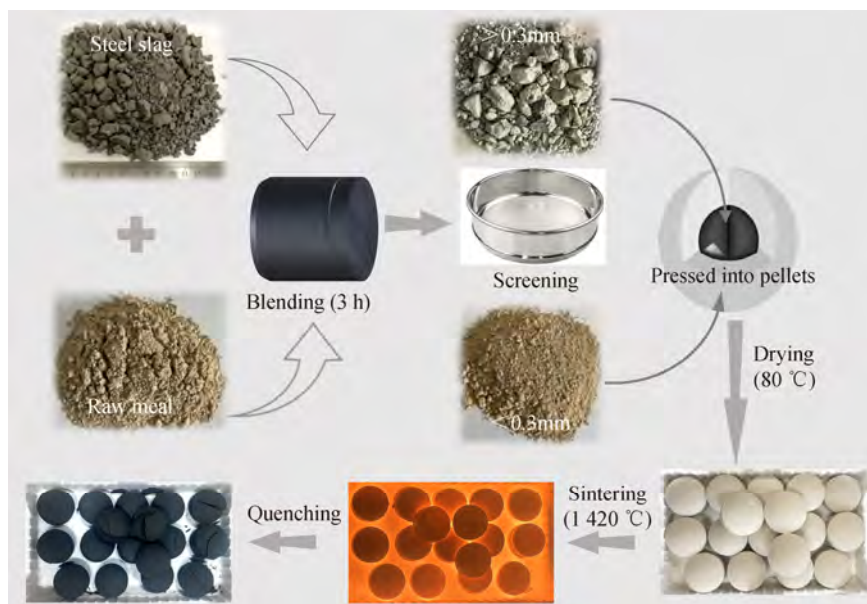


图 1 钢渣分相熟料实验室模拟制备示意图

Fig. 1 Diagrammatic drawing of laboratory simulation preparation of steel slag multi-phased clinker



图 2 钢渣分相熟料的岩相光片

Fig. 2 Polished petrographic section of steel slag multi-phased clinker

依据 GB/T 176—2017《水泥化学分析方法》，采用乙二醇法测定分相熟料中的游离氧化钙。将分相熟料破碎至 13.2 mm 以下，称取 40 g 分相熟料置于 DF-6 电磁式矿石粉碎机中，粉磨至设定时间后分别过 $45 \mu\text{m}$ 和 $80 \mu\text{m}$ 筛，根据筛余百分比评价其易磨性。按照 GB/T 1346—2011《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》中规定的雷士法来检验钢渣分相熟料水泥的安定性。将钢渣分相熟料与质量分数为 5% 的天然石膏共同粉磨制成钢渣分相熟料水泥。按水灰比为 0.3 制成 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的净浆试块并标准养护至指定龄期，以 6 个试块的抗压强度平均值作为净浆抗压试验结果。将 5.0 g 钢渣分相熟料水泥与 2.5 g 去离子水在 20 mL 塑料瓶中搅拌混合，另取一塑料瓶放入 3.14 g 去离子水作为参比样，采用 TAM Air 型八通道微量热仪

进行水化热测试。

基于实验室制备的熟料量少，参照 GB/T 31893—2015《水泥中水溶性铬(VI)的限量及测定方法》提出了实验室烧制熟料水溶性 6 价铬测定方法。具体实验步骤如下：1) 取 30 g 水泥熟料与 60 g 砂按水灰比 1.0 制成胶砂。先将熟料与水混合后低速搅拌 30 s ，然后加入标准砂再高速搅拌 30 s ，停止搅拌 90 s 后继续高速搅拌 60 s ，用布氏漏斗过滤获得滤液；2) 吸取 5 mL 滤液放入 50 mL 烧杯中，加水稀释至 20 mL ，加入 5 mL 二苯碳酰二肼溶液摇动。在 pH 计下用 1.0 mol/L 的盐酸调节溶液的 pH 值在 $2.1 \sim 2.5$ 之间，然后将溶液转移至 50 mL 容量瓶中；3) 放置 15 min 后采用分光光度计在 540 nm 处测量溶液的吸光度。实验所需试剂与材料及工作曲线的绘制均参照 GB/T 31893—2015《水泥中水溶性铬(VI)的限量及测定方法》。水泥熟料中水溶性铬(VI)的含量(w)按下式计算：

$$w = c \times W \times \frac{V_2}{V_1} \quad (1)$$

式中： w 为水泥熟料中水溶性铬(VI)的含量(mg/kg)； c 为从工作曲线上查得铬(VI)的浓度(mg/L)； W 为胶砂的水灰比，本实验为 1.0； V_2 为容量瓶的体积(mL)；

V_1 为滤液的体积(mL)。

改进后的实验方法采用的水灰比大, 在样品搅拌和过滤阶段不会出现快凝现象。熟料胶砂体系中所溶出的铬(VI)量无限趋近于熟料中存在的全部水溶性铬(VI), 经实验室反复验证, 该方法的测试结果数值比 GB/T 31893—2015《水泥中水溶性铬(VI)的限量及测定方法》中规定的方法偏高。

2 结果与讨论

2.1 不同种类转炉钢渣的基本特性

根据图 3b 可见, WY 钢渣中小于 1.18 mm 的细颗粒含量为 33.96%, LS 钢渣为 18.69%, 而 WG 钢渣仅为 4.03%。LS 钢渣以硅酸二钙(C_2S)、绿辉石 $[(Ca, Na)(Mg, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Al)(Si_2O_6)]$ 、钙铁矿($Ca_2Fe_2O_5$)及非晶相为主, 还包含少量的镁黄长石($Ca_2Mg(Si_2O_7)$)、镁硅钙石($Ca_3MgSi_2O_8$)以及磁铁矿(Fe_3O_4), WG 与 WY 钢渣则以 C_2S 、 $Ca_2Fe_2O_5$ 、 C_3S 和非晶相为主。非晶相中包括结晶较差的 RO 相

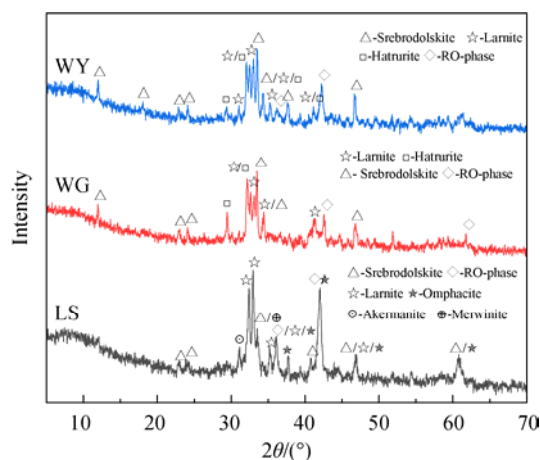
(FeO 、 MgO 和 MnO 的固溶体)和 $Ca-Fe-Si-Mg$ 硅酸盐的玻璃相。钢渣的矿物组成表明其本身具有一定的水硬性和潜在的胶凝活性, 采用滚筒法及有压热焖技术处理的 WG 与 WY 钢渣中含有 7%~8% 的 C_3S , 表明其水化活性高于 LS 钢渣^[15]。由图 4 可知, LS 钢渣中的硅酸相形貌不规则, 这与热焖法工艺的冷却速率快有关, 导致晶体发育不全而呈不规则多边形^[16]。WG 钢渣中可观察到长度大于 155 μm 的大尺寸 A 矿(硅酸三钙), B 矿(硅酸二钙)尺寸则大小不一。WY 钢渣中的六方长板状 A 矿尺寸更大, 长度可达 429.7 μm , 宽度达 306.6 μm , 但晶体内部包裹物多且出现分解, B 矿则结晶良好, 均匀分布在玻璃相中。3 种钢渣岩相中均可观察到游离的细小圆粒状 CaO 和 MgO ^[17], RO 相在反光镜下呈白色圆粒状或无定形状, 铁酸盐矿物则填充于硅酸盐相和玻璃相之间, 也呈无定形状。综上所述, 转炉钢渣的粒度分布、矿物相组成及晶体形貌因处理工艺的不同存在明显差异。

表 2 钢渣的矿物组成

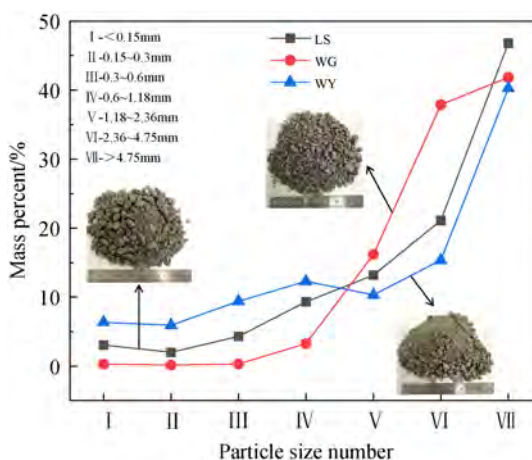
Table 2 Mineralogical composition of the steel slag according to Rietveld analysis

LS		WG		WY	
Mineral	w/%	Mineral	w/%	Mineral	w/%
Larnite	36.85	Larnite	32.55	Larnite	39.05
Akermanite	2.42	Srebrodolskite	14.46	Srebrodolskite	11.32
Merwinite	1.33	Hatnurite	7.74	Hatnurite	8.30
Srebrodolskite	4.52	Magnetite	1.34	Magnetite	1.64
Omphacite	19.10	Amorphous phase	43.90	Amorphous phase	39.70
Magnetite	1.15				
Amorphous phase	34.63				
Total	100		100		100

w is mass fraction.



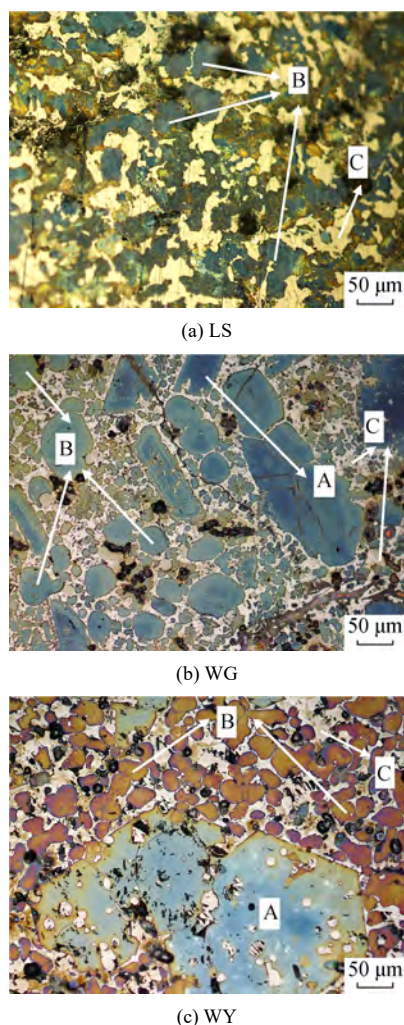
(a) XRD pattern



(b) Screening result

图 3 3 种钢渣的 XRD 谱与筛分结果

Fig. 3 XRD pattern and screening result of three kinds of steel slag



A: Alite, B: Belite, C: Srebrodolskite

图 4 3 种钢渣的岩相结构

Fig. 4 Petrographic morphology of different steel slag

2.2 不同种类转炉钢渣分相熟料的外观特征

图 5 展示了不同种类转炉钢渣分相熟料的外观和内部剖面。由于钢渣与生料在烧成过程中的熔融特性不同,在重构颗粒状钢渣与熟料间产生了明显的界面。钢渣在升温过程中率先熔融为液相,且钢渣出现液相的温度远低于熟料,因此钢渣熔融产生的液相会向周围生料区域不断扩散,并在急冷后在熟料内部形成孔洞,这些内部的塌缩有利于分相熟料的初次破碎。LS 钢渣对外围普通熟料的渗透效应更明显, WG 和 WY 钢渣则对周围熟料区域的影响较小,高温重构钢渣与熟料连成一体。

2.3 钢渣分相熟料的矿物相与化学成分

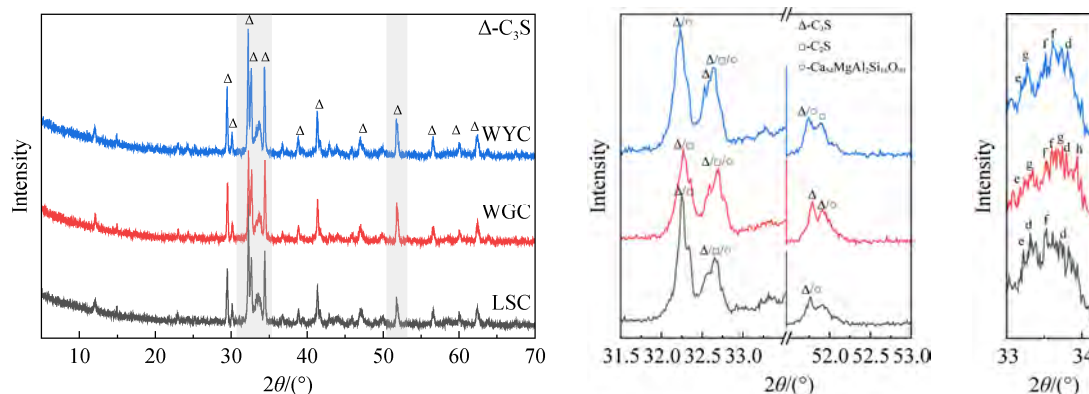
由图 6 可知,不同种类转炉钢渣的掺入并未改变熟料的主要矿物类型,仍以 C_3S 、 C_2S 及 C_4AF 为主,但 C_3A 的衍射峰较为微弱,这与文献报道的转炉渣未影响熟料主要矿物相的形成的结论略有

不同^[18],表明粒状钢渣制备分相熟料与钢渣微粉参与配料烧成熟料相比,前者对熟料矿物形成的影响更大。3 种钢渣分相熟料的 C_3S 含量均在 50% 以上, WGC 与 WYC 中结晶良好的 C_2S 含量低于 LSC。由于 LS 钢渣的 CaO 含量相对较低,而 MgO 、 MnO 和 TiO_2 含量高于 WG 和 WY 钢渣,这导致 LS 分相熟料在高温烧成过程中产生的液相量增加,液相黏度降低^[19],从而促进了熟料矿物的结晶生长。 $31.5^\circ \sim 33^\circ$ 及 $51^\circ \sim 53^\circ$ 是 C_3S 特征指纹区内的衍射峰^[20],不同钢渣分相熟料中的 C_3S 晶型以 M 型为主,其中 LSC 熟料主要为 M_3 型,而 WGC 与 WYC 熟料为 M_1 型^[21]。 $33^\circ \sim 34^\circ$ 之间是铁铝酸盐矿物与含镁矿物,也是高温重构钢渣矿物相衍射峰的集中分布区域,这是由钢渣本身及其对熟料矿物烧成产生的影响共同决定的。生料增加了钢渣与生料界面处的 Ca/Si 比,促进了钢渣中 RO 相的转变。在高温过程中 RO 相分解并与 CaO 、 SiO_2 反应生成 $Ca_2Fe_2O_5$ 、 $Ca_3Mg(SiO_4)_2$ 、 Ca_2FeMnO_5 等矿物,在 Al_2O_3 的存在下则生成 Ca_2FeAlO_5 、 $Ca_3MgAl_4O_{10}$ 等矿物,提高了高温重构钢渣的易磨性与胶凝活性^[22]。钢渣的掺入降低了分相熟料体系中液相出现的温度,增加了液相量,水泥生料出现液相前的部分固相反应被固液相反应所取代,从而对中间相矿物以及 C_3S 的形成与转变产生了影响。钢渣中的铁质成分,如 $Ca_2Fe_2O_5$ 等,在液相环境下极易与 Al_2O_3 反应生成 C_4AF ,使分相熟料中 C_4AF 的含量显著增加而不含 C_3A 或含量极低。



图 5 不同种类转炉钢渣分相熟料外观

Fig. 5 Exterior and interior section of steel slag multi-phased clinker at macrolevel



d: Brownmillerite ($\text{Ca}_2\text{FeAlO}_5$); e: C_3A ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$) or Calcium aluminum oxide ($\text{Ca}_5\text{Al}_6\text{O}_{14}$); f: srebrodolskite ($\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$) or merwinite ($\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$) or calcium iron manganese oxide ($\text{Ca}_2\text{FeMnO}_5$) or calcium magnesium aluminum oxide ($\text{Ca}_3\text{MgAl}_4\text{O}_{10}$); g: Calcium aluminum iron oxide ($\text{Ca}_2\text{Fe}_{1.40}\text{Al}_{0.60}\text{O}_5$) h-grossular ($\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$).

图6 分相熟料的XRD谱

Fig. 6 XRD patterns of multi-phased clinker

采用 Rietveld 全谱拟合方法对钢渣分相熟料的矿物组成进行了定量分析, 结果如图 7 所示。钢渣分相熟料呈现典型的高铁特征(Ferrite 含量 $>18\%$, 质量分数), LSC 分相熟料中的铁相含量可达 24.87%。WG 与 WY 钢渣产生的液相量少, 且液相黏度高, 导致分相熟料冷却后结晶度高的铁铝酸钙含量低于 LSC。此外, 钢渣改变了液相的平衡条件, 在 WGC 与 WYC 分相熟料中形成了 13.64%和 11.90%的非晶相, 非晶相主要包括中间相凝结成的玻璃体和结晶较差的硅酸盐矿物^[23], 这在分相熟料岩相分析部分还将进一步讨论。

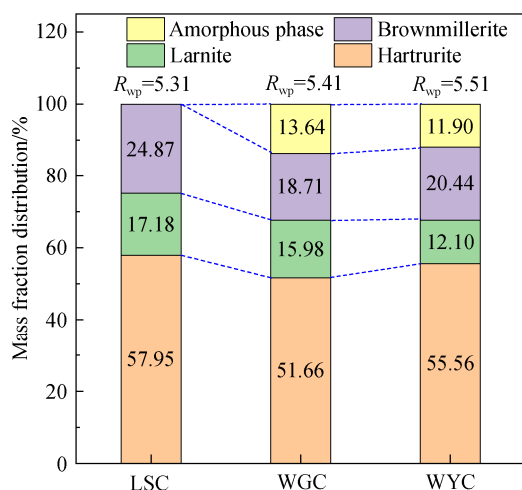


图7 分相熟料的矿物组成

Fig. 7 Mineralogical composition of the multi-phased clinkers calculated with Rietveld refinement

由表 3 可知, 不同种类转炉钢渣分相熟料的烧矢量及碱含量等基本化学性质均满足 GB/T 21372—2008 《硅酸盐水泥熟料》的要求, 且表现出良好

的易烧性。钢渣的掺入改变了原有生料的化学组成和高温反应相平衡, 因此 Bogue 公式计算出来的理想矿物组成已严重偏离实际矿物组成, 主要表现为 C_3S 含量的高估以及 C_2S 含量的低估。LSC、WGC 和 WYC 分相熟料的 Ca/Si 比分别为 3.20、3.35、3.42, 与钢渣的碱度值呈现的规律一致。

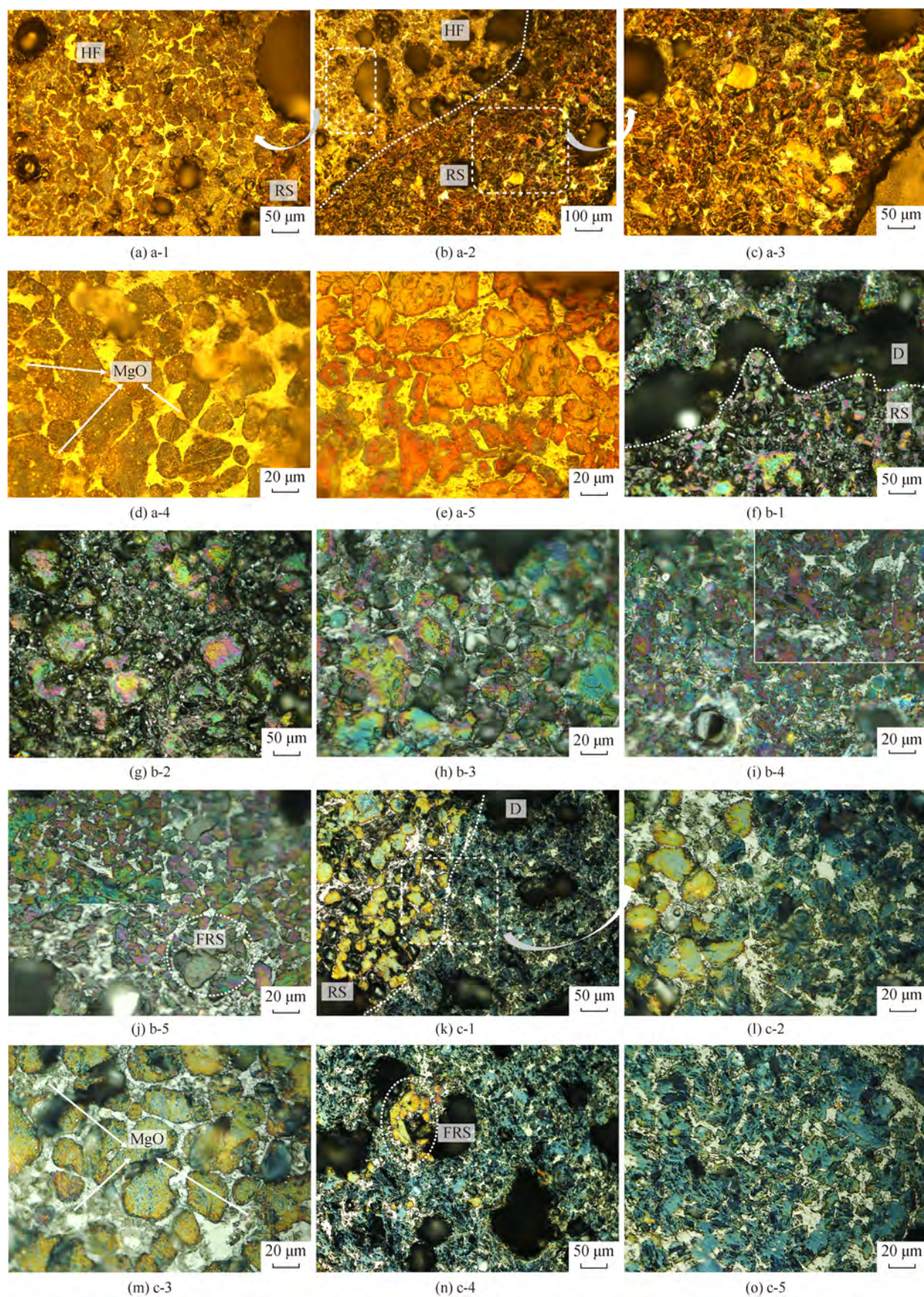
表3 分相熟料的化学全分析与理想矿物组成

Table 3 Chemical analysis and Bogue calculations of the multi-phased clinker

Group	LSC	WGC	WYC
LOI	0.42	0.17	0.84
Na_2O	0.20	0.18	0.21
MgO	3.53	3.14	3.33
Al_2O_3	4.90	4.52	4.48
SiO_2	19.20	19.19	18.51
P_2O_5	0.54	0.38	0.39
SO_3	0.27	0.11	0.14
K_2O	0.32	0.23	0.26
CaO	61.43	64.02	63.23
TiO_2	0.52	0.35	0.81
Cr_2O_3	0.06	0.05	0.05
MnO	1.46	0.85	0.88
Fe_2O_3	6.94	6.66	6.75
Alite (C_3S)	60.49	74.54	76.50
Belite (C_2S)	9.49		
Aluminate (C_3A)	1.27	0.72	0.47
Ferrite (C_4AF)	21.09	20.24	20.51
f-CaO	0.42	0.42	0.48

2.4 钢渣分相熟料的岩相结构

由分相熟料岩相结构图片可见, 不同种类转炉钢渣分相熟料均表现出明显的分相特征(图 8b、图 8f, 图 8k), 可分为高温重构钢渣区(RS)、过渡区(HF)及熟料区(D)。LSC 在重构钢渣周围形成了以 B 矿



RS: Reconstructed steel slag; D: Clinker; HF: High-ferrite transition area; FRS: Fine reconstructed steel slag

图 8 分相熟料的岩相结构

Fig. 8 Petrographic morphology of multi-phased clinker

为主要矿物相的高铁过渡区(图 8a), 而 WGC 与 WYC 的熟料矿物与高温重构钢渣连接紧密, 未出现此特征过渡区, 这与钢渣在高温条件下的熔融特性有关。LS 钢渣高温熔融后产生的液相量多, 极易向周围生料区域扩散, 导致过渡区的 Ca 含量被液相所稀释, C_2S 无法在液相中吸收足够的 f-CaO, 进而形成了自行晶 B 矿均匀分布的高铁相显微结构特点。此区域的 B 矿边界稍有溶蚀且晶体内部包裹着少许白色中间相, 表明存在轻微的还原性气氛, 这与钢渣中存在的单质铁和 Fe^{2+} 有关(图 8d), 而 WG 与 WY 钢渣熔融后产生的液相量少, 液相的转移扩散现象较弱, 从而在重构钢渣周围未产生明显的过渡区, 重构钢渣与熟料间存在清晰的界面(图 8f、图 8k)。

重构 WY 钢渣区域的白色中间相含量高于熟料区, 并且呈递减的趋势, 说明 WY 钢渣熔融的液相也会向周围区域扩散。靠近重构钢渣的 A 矿晶体边界溶蚀严重, 受钢渣影响较大(图 8l)。靠近 WG 重构钢渣的熟料区域的 A 矿晶体边界连生且大小不一, 包裹物较多(图 8i), 而远离钢渣的边缘熟料区中的 A 矿边界清晰且在中间相中的分布更加均匀(图 8j), 表明钢渣对周围熟料矿物的影响程度是梯度递减的。

LSC 的重构钢渣中的矿物晶体结晶较好, 但内部包裹物较多, 存在较多的杂质离子(图 8c)。WGC 与 WYC 的重构钢渣矿物相以 B 矿为主, 晶体尺寸大小不一, 形态以圆形为主。其中 WGC 的 B 矿尺寸可达 $90.47\ \mu\text{m}$, 大小晶体相间分布, 且晶体内部可观察到大量的微裂纹缺陷, 造成部分矿物晶体结晶度变差, 因此 WGC 熟料中的非晶相还包含有部分硅酸盐矿物。值得注意的是, 大尺寸的 B 矿晶体中间有明显的交叉双晶条纹, 而边缘部分则被染成蓝色且形态不再为圆形, 呈现出 A 矿的特征, 这证实了钢渣中的矿物在高温重构过程中的熔融再结晶行为。钢渣中原有的部分 A 矿分解形成 B 矿, 而原有的 B 矿也会在液相中重吸收 f-CaO 而形成新的 A 矿, 新形成的 A 矿和 B 矿经过急冷后会显著提高其易磨性和水化活性(图 8g, 图 8h)。WYC 重构钢渣中的不定形 B 矿则分布在白色中间相中, 晶体尺寸在 $21.03\sim72.83\ \mu\text{m}$ 之间, 晶体边界清晰、结晶良好, 其中的麻点也表明晶体内部固溶了较多的外来离子, 水硬活性较高(图 8m)。0.3 mm 以下的钢渣细颗粒在熟料中表现为 B 矿小矿巢, 且在周围存在熔融液相产生的细小孔洞, 而矿巢边缘的部分 B 矿转变

为 A 矿, 且晶体尺寸较大, 这说明细颗粒钢渣中的硅酸盐矿物起到了晶种作用, 促进了 A 矿晶体的发育生长, 且高温重构后的细颗粒钢渣中仍有尺寸较大的 B 矿保留, 并非全部转化为 A 矿(图 8n)。

LSC 熟料区的六方板片状的 A 矿边界清晰, 晶体形态规则且结晶发育完整, 均匀分布在中间相中。LS 钢渣引入的液相量多且黏度低, 促进了熟料矿物晶体的形成和发育, 故在 Rietveld 精修时并未得到明显的非晶相, 并形成了典型的高铁过渡区(图 8e)。WGC 与 WYC 熟料区的矿物晶体形态各异且大小不一, 黑色中间相与 A 矿晶体连生, 但 WGC 中的 A 矿晶体边界更为清晰。WYC 由于细颗粒钢渣含量多且与生料充分混合, 导致部分 A 矿结晶程度差, 晶体连生现象普遍, A 矿边界出现溶蚀且与黑色中间相矿物交接在一起, 内部包裹物较多, 并且可观察到不定形的细小矿物晶体(图 8o)。由图 9 可知, WGC 与 WYC 熟料区域的平均晶体粒径小于 LSC, 且存在 $10\ \mu\text{m}$ 以下的细晶, 这种尺寸微小的 C_3S 纳米晶被 XRD-Rietveld 定义为了非晶相^[24]。因此, WGC 与 WYC 熟料中的总 C_3S 含量高于 51.66% 和 55.56%, 保证了熟料水化后强度的形成与发展。

2.5 水溶性铬(VI)

由图 10 可见, 不同种类转炉钢渣制备的分相熟料中的水溶性铬(VI)含量差异较大, 其含量与钢渣中的 Cr_2O_3 含量变化规律一致。钢渣引入的部分 Cr 在熟料烧成中取代 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 固溶于 C_2S 、 C_3S 及 C_4AF 中, 这部分 Cr 不会在水泥加水后中立即溶解出来^[25–26]。残余的 Cr 则在高温下被氧化成水溶性的铬酸盐, 如 Na_2CrO_4 、 K_2CrO_4 ^[27]。WGC 熟料中的钢渣中的 Cr(VI)含量仅为 3.65 mg/kg, 这与 WG 钢渣中的低碱含量对应。钢渣与生料中的碱含量与分相熟料中水溶性铬(VI)含量呈正相关, 这与文献报道的研究结果一致^[28–29]。此外, 有压热焖钢渣分相熟料中水溶性铬(VI)含量达到 14.48 mg/kg, 这与有压热焖渣中细颗粒含量高一致。细颗粒钢渣没有被包裹在生料内部, 因而极易在烧成过程中接触空气被氧化, 导致分相熟料中水溶性 Cr(VI)含量增加。而 LS 钢渣的细颗粒含量低于 WY 钢渣, 粗颗粒钢渣被包裹在生料内部与空气隔绝, 使得 LSC 熟料中水溶性 Cr(VI)含量明显低于 WYC。

在相同的物相检索条件下, LS 钢渣中存在 $CuCr_2O_4$ 、 $MnCr_2O_4$ 、 $Mn_{1.2}Cr_{1.7}Sb_{0.1}O_4$, WG 钢渣中存在 Cr_2SiO_4 、 $Sr_4Cr_3O_9$ 、 $CuCr_2O_4$, WY 钢渣中存在 $MnCr_2O_4$ 、 $CuCr_2O_4$ 、 $Co_{1.8}Cr_{0.8}Sb_{0.4}O_4$ 、 $Ca_2Cr_{0.5}Fe_{1.5}O_5$,

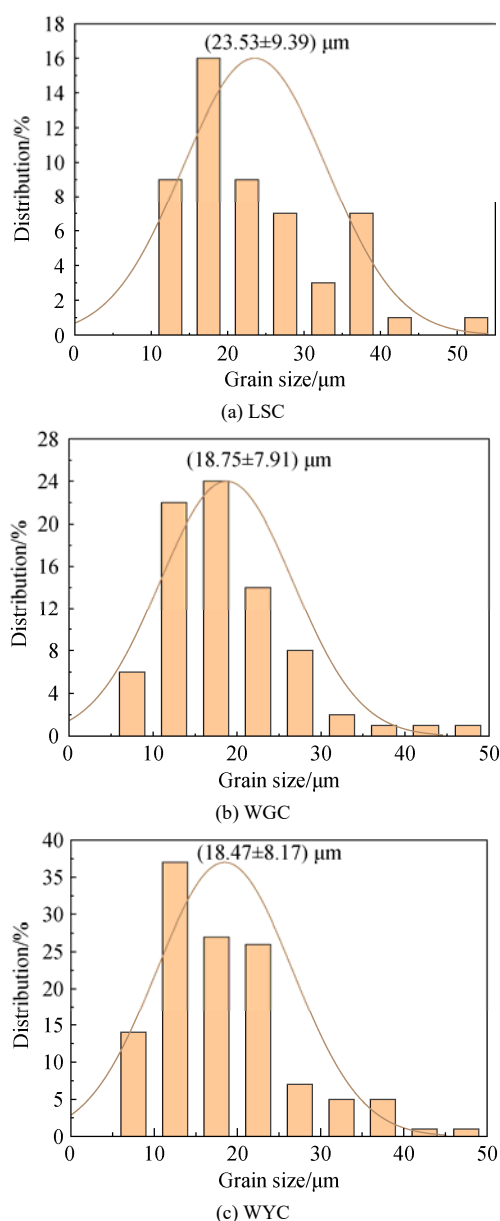


图 9 分相熟料的熟料区域的晶体尺寸统计
Fig. 9 Grain size distribution statistics of clinker area

Cr 均主要以低价态存在。但 3 种钢渣烧成的分相熟料中均未检测到以上含 Cr 矿物的特征峰, 文献中报道的 Cr 富集矿物 CaCrO_4 的特征峰也并未发现^[30], 这表明分相熟料中几乎不存在独立的含 Cr 矿物相, 绝大部分 Cr 已被固溶到熟料矿物晶格或玻璃相中^[31]。Cr 在分相熟料中的存在形式如图 11 所示, 钢渣中的含 Cr 矿物相在升温过程中与其他物相

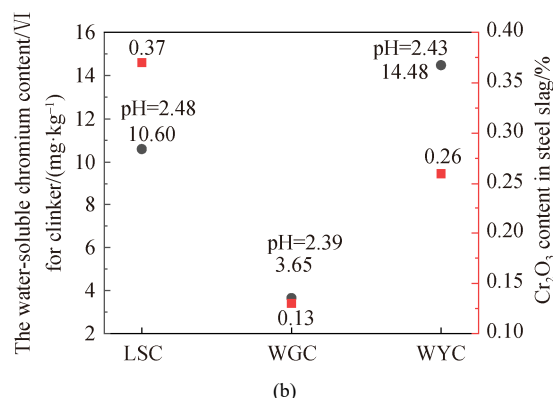
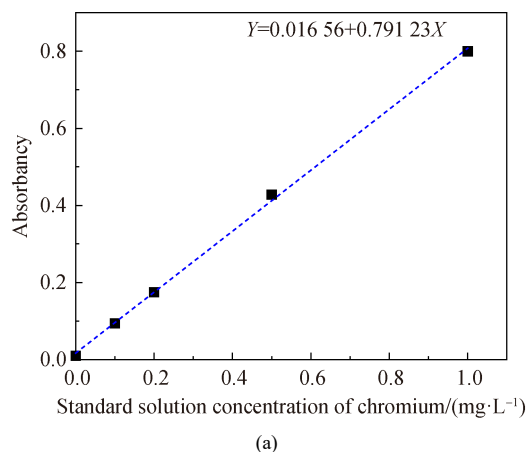


图 10 工作曲线和分相熟料中水溶性铬(VI)的含量
Fig. 10 Working curves and water-soluble chromium (VI) content for multi-phased clinker

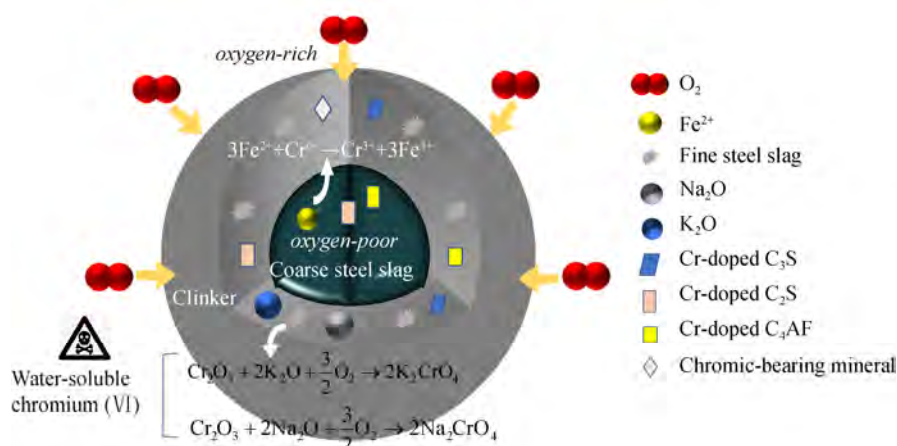


图 11 钢渣分相熟料中 Cr 的存在形式示意图
Fig. 11 Schematic sketch of the form of Cr in steel slag multi-phased clinker

共同熔融为液相, 然后经过固液相反应固溶于熟料矿物晶格或非晶相中, 只有细颗粒钢渣中含有的 Cr 与碱接触后被充分氧化而形成了水溶性铬酸盐。此外, 钢渣 RO 相中存在的 FeO 及金属单质, 在分相熟料核心缺氧的环境下还可将部分 Cr^{6+} 还原成低价铬离子。因此, 碱含量、钢渣的粒径以及烧成气氛是影响钢渣分相熟料中水溶性 Cr(VI) 含量的主要影响因素。

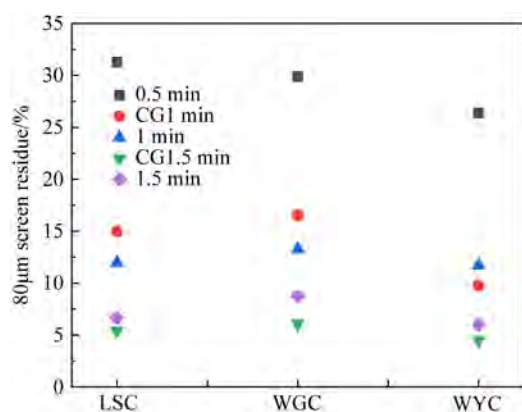
2.6 易磨性

由图 12 可见, 初粉磨 0.5 min 时, 筛余量从高到低依次为 LSC、WGC、WYC, 而随着粉磨时间的延长, WGC 的易磨性开始略差于 LSC。WYC 分相熟料的易磨性优于 WGC 与 LSC, 在各设定粉磨时间的 45 μm 和 80 μm 筛余量均最低。根据熟料岩相观察和矿物组成可知, LSC 熟料过渡区中被液相包裹的 C_2S 使得熟料的结构更加密实, 再加上 C_4AF 的易磨性较差, 导致其初始易磨性相对较差。但 LSC 熟料中 C_2S 的晶体尺寸相对较小且在液相中分布较为均匀, 因此对总体的易磨性影响不大。而

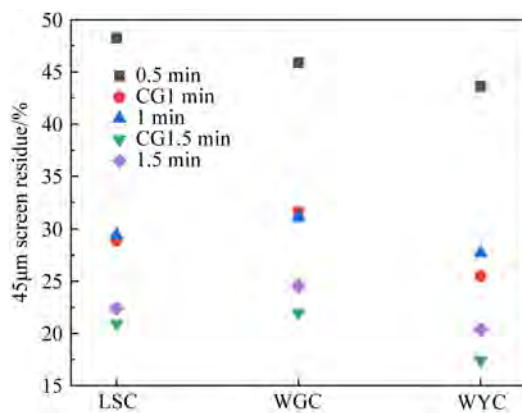
WGC 熟料中易磨性好的 C_3S 晶体含量略低, 重构钢渣中大尺寸的 C_2S 晶体含量高且集中分布, 使其更难磨细^[32]。

2.7 安定性

由图 13 可知, 3 种钢渣分相熟料水泥试件沸煮后增加距离的平均值远小于 5.0 mm, 表明钢渣分相熟料水泥安定性良好。造成钢渣安定性不良的主要因素是其中含有一定量的 f-CaO 和 f-MgO。高温重构过程促进了钢渣中 f-CaO 的再吸收, 且钢渣促进了熟料矿物的烧成, 因此钢渣分相熟料中的 f-CaO 含量很低, 不会对安定性带来负面影响。钢渣熔融后产生的液相多, 急冷后部分 MgO 以固溶方式进入到熟料矿物或来不及析出被固化在玻璃体中, 一部分 MgO 随熔融液相向熟料区域扩散, 与 CaO、 SiO_2 、 Al_2O_3 反应生成无膨胀破坏性的 $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$ 和 $\text{Ca}_3\text{MgAl}_4\text{O}_{10}$, 其余的 MgO 则呈游离状态在液相中析出为均匀分布的细小圆粒状方镁石^[33], 极大地消减了 MgO 对钢渣分相熟料水泥安定性的不利影响。



(a) 80 μm screen residue



(b) 45 μm screen residue

图 12 分相熟料粉磨至设定时间后的 45 μm 和 80 μm 筛余
Fig. 12 45 μm and 80 μm screen residue of multi-phased clinker

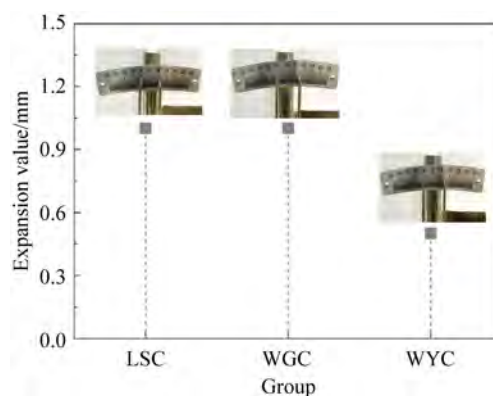


图 13 钢渣分相熟料水泥的雷氏夹安定性测试

Fig. 13 Le chatelier soundness test of steel slag multi-phased clinker cement

2.8 净浆强度

由图 14 可见, WGC 熟料的 3 d 强度高于 LSC 与 WYC, 3 种钢渣分相熟料的 7 d 强度相当, 而 LSC 熟料的 28 d 强度低于 WGC 与 WYC, 这似乎与 Rietveld 定量分析的 C_3S 含量相矛盾。根据岩相分析结果, 虽然 LSC 熟料中 C_3S 含量略高于 WYC 熟料, 但 LSC 中 C_3S 的晶体尺寸较大, 且矿物晶体缺陷少, 使其水化活性远不及 WYC 熟料中固溶了较多杂质离子的小尺寸 C_3S 高。另一方面, LSC 熟料中的铁相矿物结晶程度高且与 C_2S 形成的熟料结构紧密, 在影响易磨性的同时也降低了水化反应速率, 使得后期强度发展相对较慢, 而 WGC 熟料的高胶

凝活性则源于内部缺陷较多的高活性 A 矿和 B 矿。碱度高的高钙 WG 与 WY 钢渣分相熟料表现出较高的中后期强度, 与文献报道的钢渣的胶凝活性随碱度的增加而增加的结论一致^[34], 但分相熟料的强度与众多因素有关, 钢渣碱度与分相熟料强度之间的关系还需深入探讨。

2.9 水化热

图 15 为不同种类转炉钢渣分相熟料水泥的水化放热速率及累积水化放热量曲线。在水泥加水后的 3 h 内出现第 1 个短暂的放热峰, 主要为铝酸盐矿物的快速反应及硅酸盐矿物与铁铝酸盐矿物颗粒的初始水解^[35], 峰强从强到弱依次为 WGC、WYC、LSC, 3 h 内 LSC 的放热量大于 WGC 和 WYC。随后水泥水化进入诱导期, LSC 水泥的诱导期明显长于 WGC, WYC 的诱导期持续时间最短。同等水灰比下高铁相分相熟料的 3 d 水化放热量从高到低依次为 WYC、WGC、LSC, 这与净浆呈现的 3 d 强度

规律匹配。分相熟料水泥的水化热低于普通硅酸盐水泥^[36], 与文献中报道的高铁硅酸盐水泥熟料的 3 d 水化放热量相当^[37], 均低于 200 J/g, 因此高铁钢渣分相熟料水泥是典型的低热水泥。

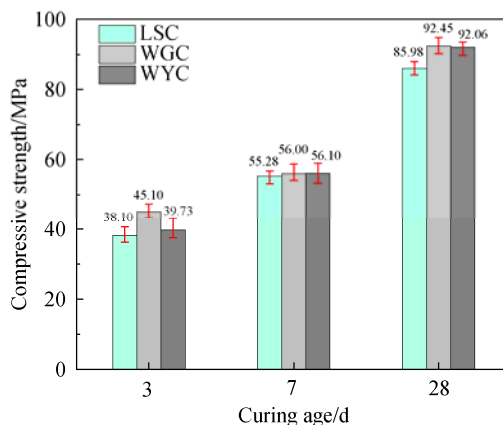


图 14 分相熟料水泥的净浆强度

Fig. 14 Compressive strength of multi-phased clinker cement

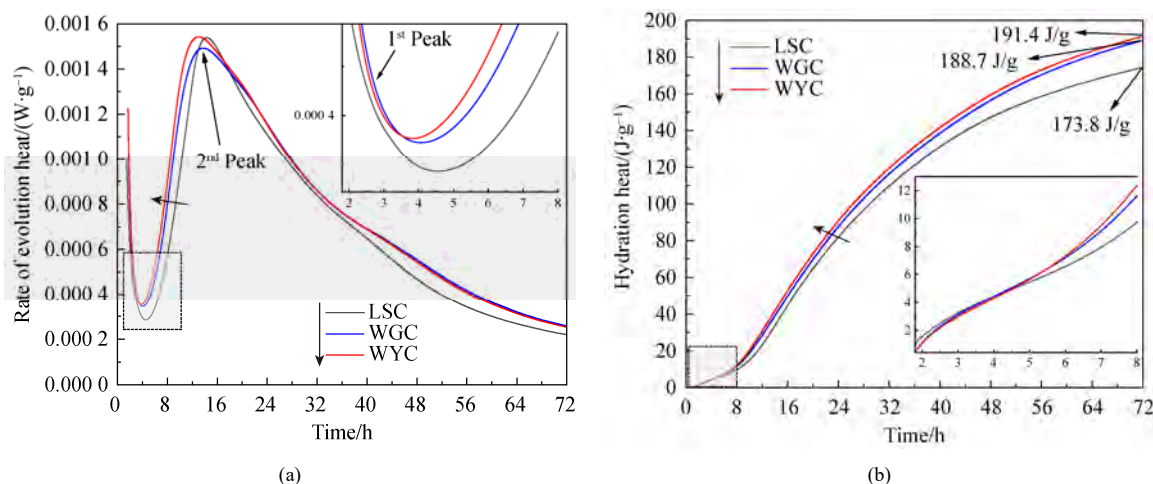


图 15 分相熟料水泥的水化热

Fig. 15 Heat of hydration and cumulative heat of multi-phased clinker cement

3 结论

1) 不同种类转炉钢渣分相熟料矿物以 C_3S 、 C_2S 与 C_4AF 为主, 并呈现高铁特征(Ferrite 含量 > 18%)。MnO 与 MgO 含量高的 LS 钢渣高温熔融后产生的液相量多、黏度低, 液相更容易向周围扩散迁移, 形成自形晶 B 矿均匀分布在白色中间相的高铁相过渡区, WG 和 WY 钢渣对周围熟料区的影响较弱, 重构钢渣与熟料间的界面清晰。

2) 钢渣中的 RO 相、 C_2S 及铁酸盐矿物在高温烧成与急冷过程中经过了重构, 提高了易磨性、安定性和水化活性。WGC 与 WYC 熟料中存在尺寸微小的 C_3S 纳米晶, 与结晶较差的中间相矿物共同构

成了熟料中的非晶相。钢渣中的细颗粒含量对熟料矿物烧成影响显著, 导致熟料矿物晶体中的包裹物较多, 但水化活性提高。

3) 碱度高的高钙 WG 与 WY 钢渣分相熟料表现出较高的中后期强度, 但钢渣碱度与熟料早期强度相关性不高。水溶性铬(VI)含量与钢渣中的 Cr_2O_3 和碱含量呈正相关, 钢渣中的细颗粒与生料充分混合后更容易在烧成过程中氧化成水溶性高价铬酸盐。

参考文献:

- [1] ZHAO J H, YAN P Y, WANG D M. Research on mineral characteristics of converter steel slag and its comprehensive utilization of internal and external recycle[J]. J Clean Prod, 2017, 156: 50–61.
- [2] DONG Q, WANG G T, CHEN X Q, et al. Recycling of steel slag

- aggregate in Portland cement concrete: an overview[J]. *J Clean Prod*, 2021, 282: 124447.
- [3] TSAKIRIDIS P E, PAPADIMITRIOU G D, TSIVILIS S, et al. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production[J]. *J Hazard Mater*, 2008, 152(2): 805–811.
- [4] NOGUCHI N, SIVENTHIRARAJAH K, CHABAYASHI T, et al. Hydration of ferrite-rich Portland cement: evaluation of Fe-hydrates and Fe uptake in calcium-silicate-hydrates[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 288: 123142.
- [5] TANG Y J, ZHAO L, LI B, et al. Controlling the soundness of Portland cement clinker synthesized with solid wastes based on phase transition of MgNiO_2 [J]. *Cem Concr Res*, 2022, 157: 106832.
- [6] IACOBESCU R I, PONTIKES Y, KOUMPOURI D, et al. Synthesis, characterization and properties of calcium ferroaluminate belite cements produced with electric arc furnace steel slag as raw material[J]. *Cem Concr Compos*, 2013, 44: 1–8.
- [7] XUE P, XU A J, HE D F, et al. Research on the sintering process and characteristics of belite sulphoaluminate cement produced by BOF slag[J]. *Constr Build Mater*, 2016, 122: 567–576.
- [8] CAO L, SHEN W G, HUANG J Q, et al. Process to utilize crushed steel slag in cement industry directly: multi-phased clinker sintering technology[J]. *J Clean Prod*, 2019, 217: 520–529.
- [9] ZHAO D Q, ZHANG D, SHEN W G, et al. Investigation on industrial trial production of multi-phased clinker with crude granular steel slag[J]. *J Clean Prod*, 2022, 337: 130467.
- [10] LIAN F, MA L J, CHOU K. Industrial research on the high-temperature modification of Basic Oxygen Furnace slag with solid waste compound[J]. *J Clean Prod*, 2017, 143: 549–556.
- [11] HE T S, LI Z B, ZHAO S Y, et al. Effect of reductive component-conditioning materials on the composition, structure, and properties of reconstructed BOF slag[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 255: 119269.
- [12] LIAO J L, ZHANG Z H, JU J T, et al. Comparative analysis of steel slag characteristics and treatment process[J]. *Adv Mater Res*, 2013, 834–836: 378–384.
- [13] SHI C J. Steel slag—its production, processing, characteristics, and cementitious properties[J]. *J Mater Civ Eng*, 2004, 16(3): 230–236.
- [14] MASON B. The constitution of some open-heart slag[J]. *J Iron Steel Res Int*, 1994, 111: 69–80.
- [15] KOUROUNIS S, TSIVILIS S, TSAKIRIDIS P E, et al. Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag[J]. *Cem Concr Res*, 2007, 37(6): 815–822.
- [16] 侯贵华, 李伟峰, 郭伟, 等. 转炉钢渣的显微形貌及矿物相[J]. *硅酸盐学报*, 2008, 36(4): 436–443.
- HOU Guihua, LI Weifeng, GUO Wei, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2008, 36(4): 436–443.
- [17] BELHADJ E, DILIBERTO C, LECOMTE A. Characterization and activation of Basic Oxygen Furnace slag[J]. *Cem Concr Compos*, 2012, 34(1): 34–40.
- [18] GAO T M, DAI T, SHEN L, et al. Benefits of using steel slag in cement clinker production for environmental conservation and economic revenue generation[J]. *J Clean Prod*, 2021, 282: 124538.
- [19] ANTON Y, BJÖRN B, XINGWEN W, et al. Thermophysical properties of liquid $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-TiO}_2\text{-V}_2\text{O}_5$ slags[J]. *J Non-Cryst Solids*, 2022, 596: 121865.
- [20] FERNANDES W V, TORRES S M, KIRK C A, et al. Incorporation of minor constituents into Portland cement tricalcium silicate: bond valence assessment of the alite M1 polymorph crystal structure using synchrotron XRPD data[J]. *Cem Concr Res*, 2020, 136: 106125.
- [21] LE SAOÛT G, KOCABA V, SCRIVENER K. Application of the Rietveld method to the analysis of anhydrous cement[J]. *Cem Concr Res*, 2011, 41(2): 133–148.
- [22] 侯贵华, 李伟峰, 王京刚. 转炉钢渣中物相易磨性及胶凝性的差异[J]. *硅酸盐学报*, 2009, 37(10): 1613–1617.
- HOU Guihua, LI Weifeng, WANG Jinggang. *J Chin Ceram Soc*, 2009, 37(10): 1613–1617.
- [23] 姚武, 魏永起, 王伟. 基于QXRD/Rietveld法的水泥熟料中晶相与无定形相定量分析[J]. *建筑材料学报*, 2012, 15(5): 581–587.
- YAO Wu, WEI Yongqi, WANG Wei. *J Build Mater(in Chinese)*, 2012, 15(5): 581–587.
- [24] KANG H, LEE Y, LEE J, et al. Importance of amorphous content, surface energy, and preferred orientation on the accurate quantification of cement minerals in clinkers[J]. *J Build Eng*, 2023, 66: 105887.
- [25] ZHAO R Q, ZHANG L, GUO B K, et al. Unveiling substitution preference of chromium ions in sulphoaluminate cement clinker phases[J]. *Compos B Eng*, 2021, 222: 109092.
- [26] JIANG X L, YU Q J, WEI J X, et al. Chemical form and solidification of Cr in tricalcium silicate[J]. *Procedia Eng*, 2012, 27: 308–314.
- [27] Wang S, VIPULANANDAN S C. Solidification/stabilization of Cr (VI) with cement: leachability and XRD analyses[J]. *Cem Concr Res*, 2000, 30: 385–389.
- [28] 任建波, 张露瑶, 王永利, 等. 熟料生产各环节对钢渣中铬离子的转换率研究[J]. *水泥*, 2021(3): 16–18.
- REN Jianbo, ZHANG Luyao, WANG Yongli et al. *Cement(in Chinese)*, 2021(3): 16–18.
- [29] SHI F, JIANG D H, JI J R, et al. Effects of alkali on water soluble hexavalent chromium in ordinary Portland cement[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2022, 19(8): 4811.
- [30] SINYOUNG S, SONGSIRIRITTTHIGUL P, ASAVAPISIT S, et al. Chromium behavior during cement-production processes: a clinkerization, hydration, and leaching study[J]. *J Hazard Mater*, 2011, 191(1–3): 296–305.
- [31] 童大懋, 余其俊, 王善拔. 水泥熟料中铬离子的XPS和ESR研究[J]. *硅酸盐学报*, 1988, 16(4): 370–375.
- TONG Damao, YU Qijun, WANG Shanba. *J Chin Ceram Soc*, 1988, 16(4): 370–375.
- [32] 罗帆. 新型干法水泥熟料易磨性概论[J]. *水泥*, 2019(1): 13–18.
- LUO Fan. *Cement(in Chinese)*, 2019(1): 13–18.
- [33] 张文生, 栾政彬, 任雪红, 等. 冷却方式对不同铝率高镁熟料烧成与方镁石形成的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(11): 2809–2817.
- ZHANG Wensheng, LUAN Zhengbin, REN Xuehong, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2022, 50(11): 2809–2817.
- [34] WU L S, LIU K L, RAO L, et al. Effect of binary basicity and ferric oxide content on the soundness, grindability, and cementitious activity of converter steelmaking slag[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 300: 124287.

- [35] BERODIER E M J. Impact of the supplementary cementitious materials on the kinetics and microstructural development of cement hydration[D]. Lausanne: EPFL, 2015.
- [36] SKALAMPRINOS S, JEN G, GALAN I, et al. The synthesis and hydration of ternesite, $\text{Ca}_3(\text{SiO}_4)_2\text{SO}_4$ [J]. Cem Concr Res, 2018, 113: 27–40.
- [37] DENG Q S, ZHAO M C, RAO M J, et al. Effect of CuO-doping on the hydration mechanism and the chloride-binding capacity of C_4AF and high ferrite Portland clinker[J]. Constr Build Mater, 2020, 252: 119119.

※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※



赵德强，武汉理工大学材料科学与工程学院在读博士研究生，聚焦工业固体废弃物资源化利用与低碳水泥熟料研究。在 *Journal of Cleaner Production*、*Construction and Building Materials* 和 *建筑材料学报* 等期刊发表论文 10 余篇，申请发明专利 2 项，多次获得武汉理工大学博士研究生卓越奖学金、江西建材社会奖学金等。参与十三五国家重点研发计划项目、国家自然科学基金、广西重点研发项目、武汉理工大学自主创新研究基金等 4 项科研任务。



沈卫国，博士研究生导师，九三学社资源环境委员会委员，现为武汉理工大学硅酸盐建筑材料国家重点实验室研究员。中国硅酸盐学会水泥分会理事，中国公路学会会员，武汉理工大学—加州大学伯克利混凝土科学与技术联合实验室执行主任，武汉理工大学环境友好建筑材料国际科技合作基地副主任，中国水泥轻舟赛事委员会主席。长期致力于道路工程材料研究，高性能混凝土应用技术研究，智能绿色公路、正混凝土、水泥基材料纳米表征与改性、低碳水泥混凝土研发，固体废弃物综合利用研究。着眼工程应用，开发实用的材料与土木工程技术，成果在水泥制造、预制构件生产、公路铁路建设、水利工程中得到广泛应用。先后主持十三五重大基础专项 1 项，国家西部交通科技项目 2 项，湖北省交通局科技项目、湖北省住房与城乡建设厅科技项目，湖北省教育厅教学研究项目以及校企合作项目多项，主持、参与国家 973 重大基础研究项目课题，自然科学基金等多项，获得省部级科技进步奖数 10 项。公开发表学术论文 200 余篇，被 SCI、EI、ISTP 收录 70 余篇次，主编著作 8 部，申请发明专利 20 余项。担任数十种国际、国内刊物审稿人、编委，指导博、硕士生 60 余名。