

文章编号:1007-9629(2022)11-1115-06

固废基低钙固碳水泥熟料组成设计及烧成过程

王晓丽, 林忠财*

(湖南大学 土木工程学院, 湖南长沙 410082)

摘要:以城市垃圾焚烧飞灰(MSWIFA)和焚烧底灰(BA)为原料,成功制备了一种以 β 型硅酸二钙(β -C₂S)为主的低钙固碳水泥熟料.结果表明:熟料在1150~1250℃之间均可被烧结,且实际所需的 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值要高于理论设计值,即 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})>2.6$,否则容易过烧且易形成钙铝黄长石,不利于水泥强度的发展; $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值对水泥早期抗压强度和碳化程度的影响较大,总体来说抗压强度随着 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值的增加呈递减趋势, $n(\text{Ca})/n(\text{Si})=2.8\sim 3.2$ 时水泥碳化养护2d的抗压强度基本维持在50MPa以上,甚至高达72MPa;当 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值升至3.3~3.7时,水泥的抗压强度降至25~30MPa, CaCO₃生成量基本维持在12.00%左右;关于熟料各矿物的水化及碳化作用对其强度的贡献还需要进一步探究.

关键词:工业固废;低钙固碳; $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$;矿物形成;煅烧温度

中图分类号:TQ172.1

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.11.002

Composition Design and Sintering Process of Solid Waste-Based Low-Calcium Carbon-Fixing Cement Clinker

WANG Xiaoli, LING Tungchai*

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: A low-calcium carbon-fixing cement clinker mainly composed of β -C₂S was successfully manufactured using from municipal solid waste incineration fly ash and bottom ash. The results show that the clinker can be sintered at 1150–1250 °C, and the actual $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ value required is higher than the theoretical design value, that is, $n(\text{Ca})/n(\text{Si})>2.6$. Otherwise, it is easy to over sinter and prone to produce calcium alumina feldspar, which is not conducive to the clinker strength development. $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ value has a significant influence on the early compressive strength and carbonation degree of cement, and the compressive strength decreases with the increase of $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ value. The produced cement with $n(\text{Ca})/n(\text{Si})=2.8\sim 3.2$ upon 2 days of carbonation can attain a compressive strength of 50 MPa, or even up to 72 MPa. However, when the $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ value increases to 3.3–3.7, the compressive strength drops to 25–30 MPa with CaCO₃ content of about 12.00%. Future research is needed to elucidate the role of hydration and carbonation mechanism of various minerals in contributing the strength development.

Key words: industrial waste; low-calcium carbon-fixing; $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$; mineral formation; sintering temperature

水泥行业作为碳排放的第2大户,2020年碳排放量高达14.66亿t,占中国碳排放总量的14.3%^[1].因此,水泥行业势必成为“双碳”目标下的重点减排行业.传统硅酸盐水泥(OPC)作为建材业应用面最

广、使用量最大的水泥种类,其高碳足迹主要来自熟料矿物(C₃S)的高温形成(1450℃)和石灰石的高温分解,这归根于熟料高钙矿物的组成设计^[2].因此,实现水泥生产节能降耗的最可行途径之一就是降低

收稿日期:2022-04-27; 修订日期:2022-06-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52250710158)

第一作者:王晓丽(1993—),女,山东潍坊人,湖南大学博士生. E-mail: wxl931220@hnu.edu.cn

通讯作者:林忠财(1980—),男,马来西亚华裔,湖南大学教授,博士生导师,博士. E-mail: tcling@hnu.edu.cn

C₃S的含量,提高低钙矿物(C₂S、C₃S₂和CS)的占比。然而,低钙矿物因水化活性低而限制了其在水泥制品中的应用。

20世纪70年代,有研究发现CO₂可以激发低钙矿物的反应活性^[3-7]。与OPC相比,低钙水泥仅含45%的CaO,单位碳排放量大约降低了30%,熟料合成温度降低了200℃(煅烧能耗减少了15%),同时还可以封存25%~30%的CO₂^[8-9],经济和环境效益显著。此外,若能有效利用大宗工业固废中所含的Ca、Si等成分作为水泥的替代原料^[10],可以进一步推进水泥行业的净零碳排放。

本文以城市垃圾焚烧飞灰(MSWIFA)和焚烧底灰(BA)为原料,研发一种以低钙固碳矿物为主的碳

化-水化复合水泥熟料体系,通过对水泥熟料组成设计及烧成过程的研究,以期为今后低钙水泥熟料的合成提供理论参考。

1 试验

1.1 原材料

MSWIFA和BA均由湖南浦湘生物能源股份有限公司提供。所用原料先置于105℃烘箱中烘干直至恒重,后于球磨机中粉磨,细度控制在80μm方孔筛筛余(质量分数,文中涉及的筛余、组成、比值等除特别说明外均为质量分数或质量比)10%以下。采用X射线荧光光谱分析仪(XRF)分析原料的化学组成,结果如表1所示。

表1 原材料的化学组成

Table 1 Chemical compositions of raw materials

Raw material	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Cl	Na ₂ O	K ₂ O	IL
MSWIFA	35.584	1.043	0.287	0.413	0.467	4.910	12.606	5.602	2.975	35.110
BA	12.461	54.618	11.546	2.887	4.704	0.614	0.508	4.716	1.739	3.680

1.2 试验方法

1.2.1 矿物组成设计

工业废渣中由于含有大量杂质成分,实际矿物组成往往低于理论设计值。因此,将钙硅比($n(\text{Ca})/n(\text{Si})$)值设计范围扩大为1.70~4.00,以进行熟料烧成的探索性试验。根据表1中原料的化学组成及矿物组成设计,确定生料的配料方案如表2所示。

1.2.2 生料制备

首先,根据表2中的配料方案准确称取准备好的原料,用转速为1000 r/min的小型四叶搅拌机充分混合5~10 min,干燥后制得生料;然后,在生料中掺加

8%~10%的水并搅拌均匀,利用钢制模具将混合半湿态物料压成20 mm×20 mm×20 mm的立方体试块;最后,将试块放入105℃的真空干燥箱中烘干直至恒重以备用。

1.2.3 熟料煅烧

首先,将烘干后的立方体试块置于马弗炉中,以10℃/min的升温速率升至900℃并预烧30 min;然后,以相同升温速率分别升至煅烧温度(t)1100、1125、1150、1175、1200、1225、1250℃后保温2 h,煅烧结束后在炉内自然冷却至200℃以下后取出;最后,将烧成熟料用球磨机或刚玉研钵粉磨至80μm方孔筛筛余

表2 矿物组成设计及生料配料方案

Table 2 Design of mineral compositions and the mix proportions of raw materials

Theoretical mineral phase	$n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ value	$m(\text{MSWIFA})/$ $m(\text{BA})$	$w(\text{MSWIFA})/\%$	Theoretical mineral phase	$n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ value	$m(\text{MSWIFA})/$ $m(\text{BA})$	$w(\text{MSWIFA})/\%$
	4.0	5.789	85.27		2.8	3.948	79.79
	3.9	5.636	84.93		2.7	3.794	79.14
	3.8	5.482	84.57		2.6	3.641	78.45
	3.7	5.329	84.20		2.5	3.487	77.71
	3.6	5.176	83.81	C ₃ S-C ₂ S ($n(\text{Ca})/$ $n(\text{Si})=2.80-1.87$)	2.4	3.334	76.92
	3.5	5.022	83.39		2.3	3.180	76.08
	3.4	4.869	82.96		2.2	3.027	75.17
	3.3	4.715	82.50		2.1	2.873	74.18
	3.2	4.562	82.02		2.0	2.720	73.12
	3.1	4.408	81.51			1.9	2.566
	3.0	4.255	80.97	C ₂ S-C ₃ S ₂ ($n(\text{Ca})/$ $n(\text{Si})=1.87-1.40$)	1.8	2.413	70.70
	2.9	4.101	80.40		1.7	2.259	69.32

10%以下,并利用X射线衍射仪(XRD)测定不同 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值和煅烧温度下制备熟料的矿物组成。

1.2.4 碳化性能测试

将烧结好的熟料在水灰比 $m_w/m_c=0.13$ 下以15 MPa压力干压,制成 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 的立方体试块,置于 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 、 CO_2 体积分数20%、相对湿度65%的碳化箱中养护2 d,然后采用YAW-300型微机控制压力试验机 and 热重分析仪(TG-DTG)分别测试其抗压强度及 CaCO_3 生成量。

2 结果与讨论

2.1 不同煅烧温度下熟料的外观形貌

根据表2配置的生料分别在1 100、1 125、1 150、1 175、1 200、1 225、1 250 $^\circ\text{C}$ 下进行高温煅烧,得到熟料的外观形貌如图1所示。由图1可见:每个温度下烧结熟料的颜色都随着 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值的增加呈逐渐加深的趋势,大致发生了由棕黄色 \rightarrow 淡黄色 \rightarrow 淡绿色 \rightarrow 墨绿色的转变,煅烧温度越高,熟料的颜色加深越明显;熟料结构随着 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值和煅烧温度的增加逐渐变得致密,体积不断收缩, $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值越小,液相出现的温度越低,在1 200~1 250 $^\circ\text{C}$ 下煅烧时, $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值为1.7~2.0的烧结试样便已出现熔融,主要是因为BA中含有的玻璃相降低了熔融温度;当 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值大于3.7时,冷却后的熟料结构致密坚硬,体积收缩严重,难以粉磨;在同一 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值下,煅烧温度从1 100 $^\circ\text{C}$ 逐步升至1 250 $^\circ\text{C}$ 时,熟料的颜色也呈加深趋势,且随着煅烧温度的升高,熟料颜色的加深速度加快,这源于熟料中不同的矿物组成。值得注意的是,在这7个煅烧温度下,熟料颜色的变化规律一致且颜色梯度明显。若在任一温度下有目标矿物生成,这说明熟料在相对较低温度1 100 $^\circ\text{C}$ 时就已烧成,而且矿物形成受煅烧温度和 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值的影响明显。

2.2 熟料的矿物组成

水泥熟料的颜色主要与其矿物组成及煅烧工艺有关。因此,为确定熟料的煅烧温度和最佳矿物组成,选取图1中颜色和形态跨度较大的熟料试样(蓝色框内试样)进行矿物组成分析,结果见图2。

由图2可见:

(1)在1 200 $^\circ\text{C}$ 下煅烧的熟料,当 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值为2.0时,其颜色大致呈棕黄色,主要生成钙-铝/镁硅酸盐矿物(Ca-Mg/Al-SiO_4),表明此时钙质原料不足,Mg/Al替代Ca与 SiO_2 反应生成矿物;随着 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值增加至2.4,熟料体系中的主要矿物逐渐转变为七铝酸十二钙($\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$)和钙镁橄榄石($\text{Ca}_7\text{Mg}(\text{SiO}_4)_4$),

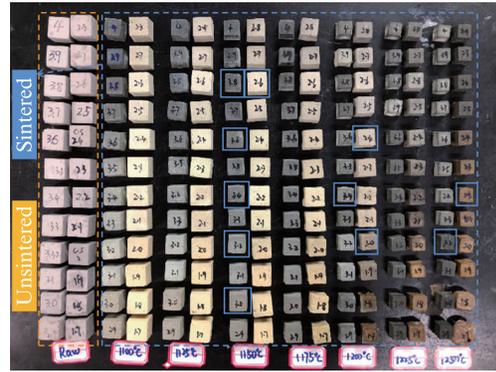


图1 1 100~1 250 $^\circ\text{C}$ 下烧结熟料的外观形貌
Fig. 1 Appearance of sintered clinkers at 1 100~1 250 $^\circ\text{C}$

熟料呈淡黄色;当 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值为3.4时,出现矿物 $\beta\text{-C}_2\text{S}$,但MSWIFA中的氯盐参与形成了重要的过渡相氯硫硅酸钙($\text{Ca}_{10}(\text{SiO}_4)_3(\text{SO}_4)_3\text{Cl}_2$)^[11],表明此时CaO足量。因此,以MSWIFA和BA作为原料,由于杂质成分的存在,导致实际所需 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值(>2.4)要高于理论设计值(2.0),但不宜过高。

(2)当 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})=2.2$ 时,主要生成钙铝黄长石($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO}_7)$)及少量含Cl的杂质化合物,无理想矿物 $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 形成,这说明钙质原料不足,且含氯化合物消耗了一部分Ca;当 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值升至3.2时,发现有大量 $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 形成,同时出现少量 $\text{Ca}_{10}(\text{SiO}_4)_3(\text{SO}_4)\text{Cl}_2$ 、钙铝硅酸盐(Ca-Al-SiO_4)。因此,以MSWIFA和BA为原料,在矿物组成设计时实际所需的 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值要高于2.2~2.4。

基于上述分析,在1 200、1 250 $^\circ\text{C}$ 下烧结,当 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值较低时熟料矿物多以钙-镁/铝硅酸盐形式存在;当 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值升至2.2时,才有目标矿物 $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 出现,并受含Cl化合物的一定影响;当 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值过高时, $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 生成量增多,也形成了较多的 $\text{Ca}_{10}(\text{SiO}_4)_3(\text{SO}_4)\text{Cl}_2$ 。值得注意的是, $\text{Ca}_{10}(\text{SiO}_4)_3(\text{SO}_4)\text{Cl}_2$ 作为水泥熟料合成过程中的一个重要过渡相,在1 200 $^\circ\text{C}$ 左右分解,析出 CaCl_2 液相,被认为是一种重要的矿化剂,提高了熟料的易烧性,并有利于降低煅烧温度^[12]。

2.3 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值对熟料矿物组成的影响

为了确定水泥熟料的矿物组成范围及最佳配料方案,设置了7组 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值生料在1 150 $^\circ\text{C}$ 下进行煅烧,结果如图3所示。由图3可见:

(1)当 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})\leq 2.6$ 时,钙质原料不足,主要生成 Ca-Al/Mg-SiO_4 ;当 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值在3.0~3.2之间时,开始出现大量 $\beta\text{-C}_2\text{S}$,并伴有含铁矿物出现,说明熟料矿物在1 150 $^\circ\text{C}$ 的相对较低温度下即可烧成。值得注意的是,熟料煅烧过程中即使在自然

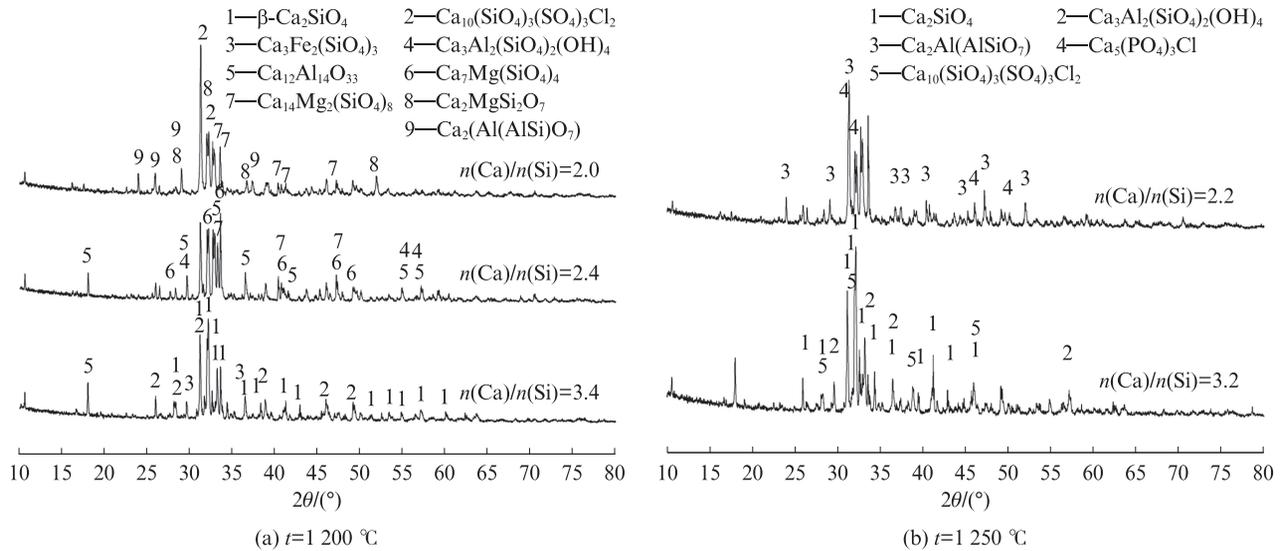


图2 烧结熟料的XRD图谱
Fig. 2 XRD patterns of sintered clinkers

冷却下,形成的目标矿物 C_2S 均为介稳晶型- β 型,这源于MSWIFA中含有的 K_2O 、 MgO 、 Na_2O 等氧化物及部分重金属离子如 Cr^{3+} 、 Ba^{2+} 、 Zn^{2+} 具有稳定矿物晶型的作用.

(2)当 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值太高(≥ 3.4)时,出现了游离 NaCl ,这是MSWIFA中存在的固有成分.因此,应加强对熟料配料方案的精准控制及对应混凝土的耐久性试验^[13-14].

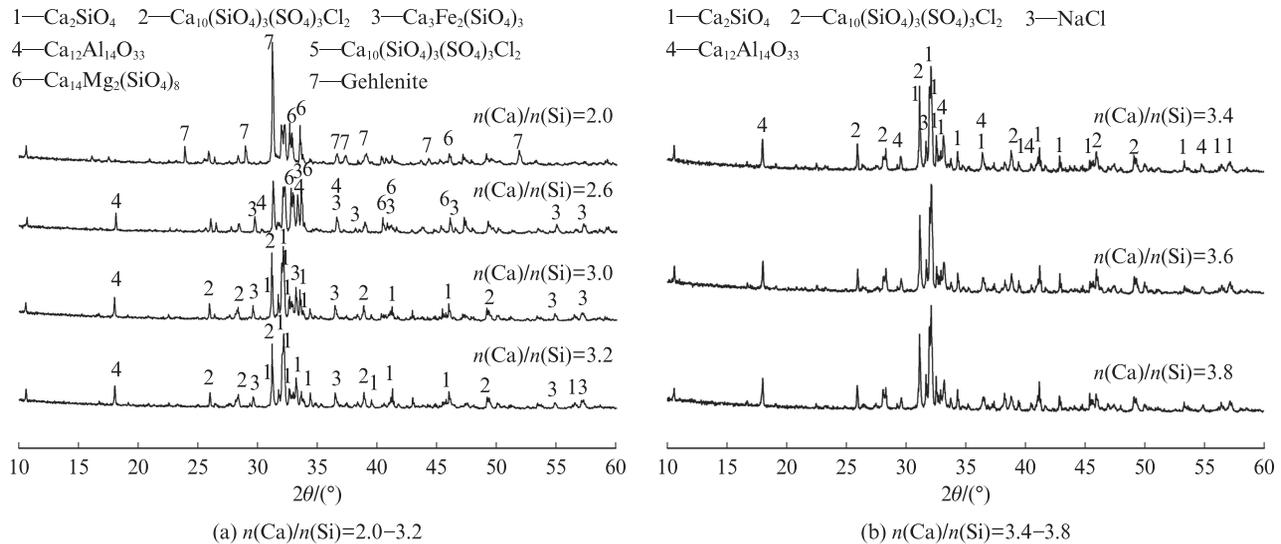


图3 1150 °C烧结熟料的XRD图谱
Fig. 3 XRD patterns of sintered clinkers at 1150 °C

综上所述, $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值和煨烧温度对熟料矿物组成及其烧成规律的影响较大.在同一 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值下,煨烧温度越高,熟料的颜色越深,这是由于含Cl化合物的高温分解,并挥发附着在物料表面所致.此外, $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值越高,开始出现液相的温度越低.

2.4 水泥性能及碳化程度分析

为了确定熟料矿物与水泥性能之间的关系,将不同 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值(2.8~4.5)的生料以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速

率升至 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$,烧结2h后,自然冷却再球磨至 $80\text{ }\mu\text{m}$ 筛余10%以下,在0.13水灰比下以15 MPa压力干压制成 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 的立方体试块,置于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 CO_2 体积分数20%、相对湿度65%的碳化箱中养护2 d.图4为碳化2 d后水泥的抗压强度.由图4可见: $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值对水泥早期强度的发展有较大影响,当 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值在2.8~3.2之间时,抗压强度基本维持在50 MPa以上,甚至高达72 MPa;随着 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值的持续增加,抗压强度呈递减趋势,当

$n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值升至3.3~3.7时,2 d抗压强度维持在25~30 MPa,仍满足42.5水泥的强度要求; $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值一旦超过3.7,抗压强度降到20 MPa以下。

为了探究水泥碳化性能与抗压强度间的对应关系,通过TG-DTG计算了 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})=2.8\sim 4.0$ 试块的 CaCO_3 生成量^[15-16],结果如图5所示。

由图5可见:当 $n(\text{Ca})/n(\text{Si}) < 3.7$ 时,水泥的碳化程度较高, CaCO_3 生成量基本维持在12.00%左右,最高可达14.72%;当 $n(\text{Ca})/n(\text{Si}) \geq 3.8$ 时,其生成量迅速降至8.00%以下,碳化程度明显降低,这也充分证明了碳化程度和强度发展具有一致性。然而值得注意的是,当 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值在3.3~3.7时, CaCO_3 的生成量较高,甚至高于2.8~3.1组,但其抗压强度值却低于后者。

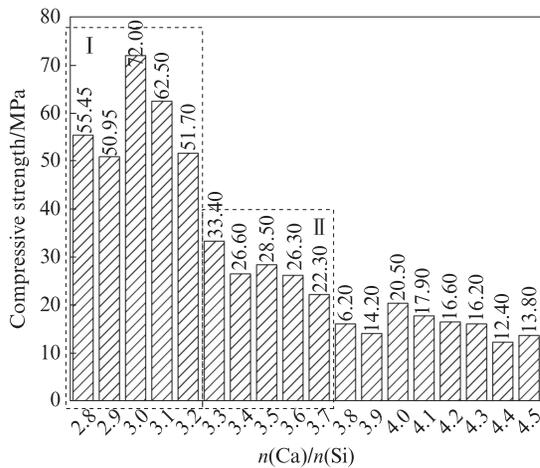


图4 碳化2 d后水泥的抗压强度

Fig. 4 Compressive strength of cements after carbonation for 2 d

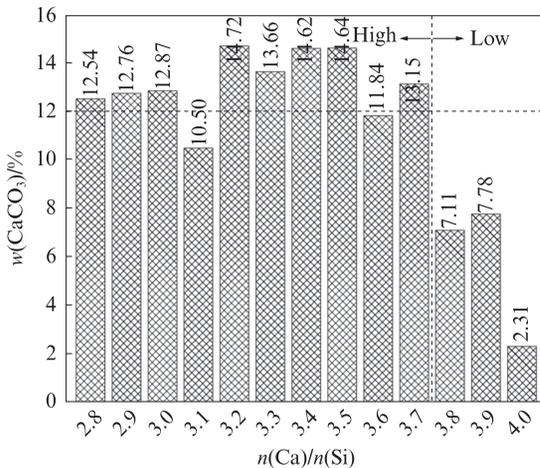


图5 碳化2 d后水泥的 CaCO_3 生成量

Fig. 5 CaCO_3 contents of cements after carbonation for 2 d

图6为不同 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值下碳化2 d后水泥的DTG分析.由图6可见,由于水泥在硬化过程中碳化

(产物晶型)和水化的双重作用, $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值在2.8~3.1时虽碳化产物较少,水化峰C-S-H相比 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})=3.3\sim 3.7$ 时却较高,即水化和碳化这两者的协同作用使得I组的抗压强度相对较高.此外,在熟料矿物组成中含有的化合物种类繁多,其各矿物的具体水化及碳化机理还需进一步探索。

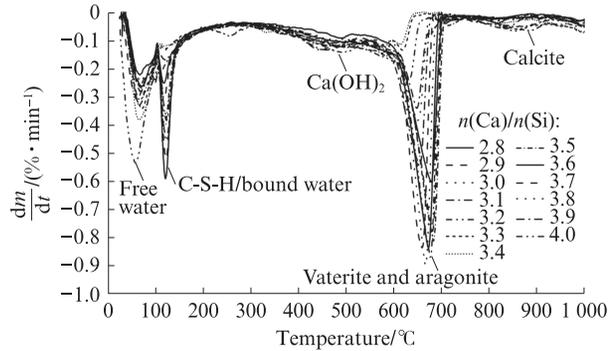


图6 不同 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值下碳化2 d后水泥的DTG分析

Fig. 6 DTG analysis of cements after carbonation for 2 d under different $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ values

3 结论

(1)固废基低钙固碳水泥熟料在1 150 °C时已成功烧成,且实际所需的 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值要高于理论设计值,即 $n(\text{Ca})/n(\text{Si}) > 2.6$,否则容易过烧且易形成钙铝黄长石,不利于水泥强度的发展。

(2)在1 200、1 250 °C下烧结,当 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值较低时,熟料矿物多以钙-镁/铝硅酸盐形式存在;随着 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值升至2.2,目标矿物 β 型硅酸二钙($\beta\text{-C}_2\text{S}$)出现;当 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值过高时, $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 生成量增多的同时,也形成较多的 $\text{Ca}_{10}(\text{SiO}_4)_3(\text{SO}_4)\text{Cl}_2$,使熟料颜色呈加深趋势,且 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值越高,熟料开始出现液相的温度越低。

(3) $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值对水泥早期抗压强度和碳化程度的影响较大,总体来说抗压强度随着 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值的持续增加呈递减趋势.当 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})=2.8\sim 3.2$ 时,水泥碳化2 d的抗压强度维持在50 MPa以上,甚至高达72 MPa;当 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值升至3.3~3.7时,水泥碳化2 d的抗压强度降至25~30 MPa, CaCO_3 生成量基本维持在12.00%左右; $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值一旦超过3.7,水泥碳化2 d的抗压强度降到20 MPa以下, CaCO_3 生成量迅速降至8.00%以下。

参考文献:

[1] 丁美荣. 水泥行业碳排放现状分析与减排关键路径探讨[J]. 中国水泥, 2021(7):46-49.

- DING Meirong. Current status analysis of carbon emission in cement industry and discussion on key path of emission reduction [J]. *China Cement*, 2021(7):46-49. (in Chinese)
- [2] 李娟. 高贝利特硫铝酸盐水泥的研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2013.
- LI Juan. Study on high-belite sulphoaluminate cement [D]. Wuhan:Wuhan University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [3] BERGER R L, YOUNG J F, LEUNG K. Acceleration of hydration of calcium silicates by carbon dioxide treatment [J]. *Nature*, 1972, 240(97):16-18.
- [4] GOODBRAKE C J, YOUNG J F, BERGER R L. Reaction of hydraulic calcium silicates with carbon dioxide and water [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1979, 62:488-491.
- [5] BUKOWSKI J M, BERGER R L. Reactivity and strength development of CO₂ activated non-hydraulic calcium silicates [J]. *Cement and Concrete Research*, 1979, 9(1):57-68.
- [6] BERGER R L, KLEMM W A. Accelerated curing of cementitious systems by carbon dioxide Part-II : Hydraulic calcium silicates and aluminates [J]. *Cement and Concrete Research*, 1972, 2(6):647-652
- [7] YOUNG J F, BERGER R L, BREESE J. Accelerated curing of compacted calcium silicate mortars on exposure to CO₂ [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1974, 57 (9) : 394-397.
- [8] ASHRAF W, OLEK J. Carbonation behavior of hydraulic and non-hydraulic calcium silicates: Potential of utilizing low-lime calcium silicates in cement-based materials [J]. *Journal of Materials Science*, 2016, 51(13):6173-6191.
- [9] ASHRAF W, OLEK J. Carbonation activated binders from pure calcium silicates: Reaction kinetics and performance controlling factors [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2018, 93:85-98.
- [10] 张文生, 刘潭, 任雪红. 硅质原料对熟料烧成的影响 [J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(3):618-624.
- ZHANG Wensheng, LIU Tan, REN Xuehong. Effects of siliceous raw materials on clinker formation [J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(3):618-624. (in Chinese)
- [11] 施惠生, 吴凯, 郭晓璐, 等. 垃圾焚烧飞灰研制硫铝酸盐水泥及其水化特性 [J]. *建筑材料学报*, 2011, 14(6):730-736.
- SHI Huisheng, WU Kai, GUO Xiaolu, et al. Preparation of sulphoaluminate cement from municipal solid waste incineration fly ash and its hydration properties [J]. *Journal of Building Materials*, 2011, 14(6):730-736. (in Chinese)
- [12] 陈明源. 氯硫硅酸钙的化学组成和晶胞参数 [J]. *硅酸盐通报*, 1988, 7(1):11-14.
- CHEN Mingyuan. Chemical composition and cell parameters of calcium chlorothiosilicate [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 1988, 7(1):11-14. (in Chinese)
- [13] 左晓宝, 邹帅, 李向南, 等. 氯盐环境下粉煤灰混凝土中钢筋的锈蚀过程 [J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(4):875-881.
- ZUO Xiaobao, ZOU Shuai, LI Xiangnan, et al. Corrosion process of steel bar in fly ash-concrete under chloride environment [J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(4):875-881. (in Chinese)
- [14] 陈克凡, 乔宏霞, 王鹏辉, 等. 氯氧镁水泥钢筋混凝土通电锈蚀的断裂性能分析 [J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(3):557-562.
- CHEN Kefan, QIAO Hongxia, WANG Penghui, et al. Fracture behavior analysis of magnesium oxychloride cement reinforced concrete under electric corrosion [J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(3):557-562. (in Chinese)
- [15] JIANG Y, LING T C. Production of artificial aggregates from steel-making slag: Influences of accelerated carbonation during granulation and/or post-curing [J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2020, 36:135-144.
- [16] LI X M, LING T C. Instant CO₂ curing for dry-mix pressed cement pastes: Consideration of CO₂ concentrations coupled with further water curing [J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2020, 38: 348-354.