

低能耗、低排放、高性能、低热硅酸盐水泥及混凝土的应用

隋同波, 范磊, 文寨军, 王晶

(中国建筑材料科学研究总院, 北京 100024)

摘要:介绍了以贝利特(硅酸二钙, C_2S)为主导矿物的高贝利特水泥(HBC)的熟料制备、水泥性能以及典型混凝土性能及其应用。通过与以阿利特(硅酸三钙, C_3S)为主导矿物的通用硅酸盐水泥(PC)的系统比对研究以及 HBC 在三峡工程现场应用时与中热硅酸盐水泥(MHC)混凝土的比对分析, 证明 HBC 是一种新型低能耗、低 CO_2 排放、低水化放热、高强度、高性能的硅酸盐水泥。与 PC 相比, HBC 熟料烧成温度降低 $100\text{ }^\circ\text{C}$, CO_2 排放量减少 10% , 水泥混凝土不仅具有更为优越的工作性、力学性能和耐久性, 而且具有优异的热学性能和抗裂性能。

关键词:高贝利特水泥混凝土; 低能耗; 低 CO_2 排放; 高性能; 低热高强; 抗裂性能

中图分类号: TU528.44; TU528 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2009)11-0046-07

Low Energy & Low Emission Cement with High Performance & Low Hydration Heat and Its Concrete Application

SUI Tongbo, FAN Lei, WEN Zhaijun, WANG Jing
(China Building Materials Academy, Beijing 100024, China)

Abstract: Belite-based Portland cement (high belite cement, HBC) was introduced in terms of clinker preparation, cement and concrete performance, compared with alite-based normal Portland cement (PC). Laboratory research, industrial production and field application of the resultant HBC concrete demonstrate that HBC is a kind of low energy consumption and low CO_2 emission Portland cement with low hydration heat evolution, high later age strength and high performance, compared with normal PC. For example, the clinkering temperature of HBC is $1\ 350\text{ }^\circ\text{C}$, which is $100\text{ }^\circ\text{C}$ lower than that of normal PC. CO_2 emission for clinkering HBC is reduced by 10% due to the low calcium design in clinker mineral composition and low consumption of coal for clinker burning. The resultant HBC concrete shows excellent performance not only in better workability, higher mechanical strength and excellent durability, but also in excellent thermal properties and cracking resistance.

Key words: high belite cement; low energy; low CO_2 emission; high performance; low hydration heat & high strength; cracking resistance

1 前言

波特兰水泥自 1824 年问世到现在经历了 180 多年的历史, 已发展成为目前用量最大的人造建筑材料, 为人类社会进步及经济发展做出了巨大贡献。但是, 以硅酸三钙(阿利特, C_3S)为主导矿物的通用硅酸盐水泥(Portland Cement, PC)在生产和工程应用中存在一些问题。首先制备能耗大, 其熟料烧成温度高达 $1\ 450\text{ }^\circ\text{C}$,

同时还排放大量温室气体 CO_2 , SO_2 , NO_x 等, 生产 1 t 熟料直接和间接排放的 CO_2 约为 1 t 。在使用性能上, 存在水化放热高, 干燥收缩大, 容易产生裂缝, 抗折强度较低, 耐久性有待于进一步提高等问题。在节能减排与可持续发展已成为全球发展趋势下, 我国水泥年产量已达 14 亿 t , 占世界水泥产量的 50% , 因此所面临的挑战也是空前的。

近半个世纪以来, 尤其是上世纪 70 年代全球爆发能源危机以后, 世界水泥材料学家一直致力于以硅酸三钙为主导矿物的高钙组成设计, 开发以硅酸二钙(贝利特, C_2S)为主导矿物的高性能、低热硅酸盐水泥(即高贝利特水泥, High Belite Cement, HBC), 但由于难以

收稿日期: 2009-09-23

基金项目: 国家九五、十五科技支撑计划课题

通信作者: 隋同波, 男, 1965 年出生, 教授级高工

完全解决贝利特矿物的稳定与活化关键技术,使该体系水泥未能在工业化生产和规模应用方面取得突破。进入 90 年代,为满足水泥、混凝土工业节能、降耗、环保和高性能化的可持续发展要求,国际上再度兴起了高贝利特水泥研究的热潮,日本、德国、俄罗斯、印度、中国等国均在进行这一课题的相关研究^[1-6]。

本文介绍了我国在近 10 多年来在高性能、低热硅酸盐水泥(即高贝利特水泥)制备和水泥混凝土性能研究,以及混凝土应用方面的工作进展。

2 熟料制备

2.1 熟料组成设计原则

通用硅酸盐水泥由 C_3S (硅酸三钙 $3CaO \cdot SiO_2$), C_2S (硅酸二钙 $2CaO \cdot SiO_2$), C_3A (铝酸三钙 $3CaO \cdot Al_2O_3$)和 C_4AF (铁铝酸四钙 $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$)组成,其中起主要胶凝作用的是硅酸三钙和硅酸二钙,通常其熟料中 C_3S 和 C_2S 的含量(质量分数,以下同)分别为 50% ~ 65% 和 15% ~ 25%。硅酸三钙大量形成的温度在 1 450 °C 左右,具有早强、快硬的特点,但水化热较高、抗侵蚀性较差;硅酸二钙大量形成的温度在 1 300 °C 左右,具有水化热低、需水量小、后期强度增进率高、耐久性好等特点。如表 1 所示,由于 C_2S 较 C_3S 所含 CaO 量的减少,使其单位质量矿物所消耗的石灰石分解产生的 CO_2 排放量降低 11.6%;此外,由于 C_2S 形成温度低,使得它在矿物形成过程中因能源消耗少而使其 CO_2 排放量更加降低。

表 1 C_3S 和 C_2S 矿物形成及排放相关参数

Table 1 Basic data of C_3S and C_2S minerals

Minerals	Formation enthalpy / $kg \cdot kJ^{-1}$	Formation temperature/°C	$CaO/\%$	CO_2 emissions coefficient per unit mass of mineral
C_3S	1 848	1 450	73.7	0.578
C_2S	1 336	1 300	65.1	0.511

为此,所设计的高性能、低热硅酸盐水泥(HBC)与通用硅酸盐水泥(PC)同属硅酸盐水泥体系,将以 C_2S 为主导矿物,该水泥即熟料矿物也是由 C_3S , C_2S , C_3A 和 C_4AF 组成,两者不同之处主要是高性能、低热硅酸盐水泥是以贝利特矿物(C_2S)为主,其质量分数在 50% 左右。正是由于高贝利特水泥的低钙矿物组成特点,赋予了该材料在制备和性能上一系列优于通用硅酸盐水泥的特点。如熟料生产烧成温度低、温室气体排放量少,水泥具有优良的工作性、低水化热、高后期强度和高耐久性。本文对高贝利特水泥制备基本原理、水泥性能、典型混凝土性能如高强、高性能混凝土的工作性、物理力学性能、耐久性以及大体积混凝土的热学性能和抗裂

性能进行了研究。表 2 给出了 HBC, PC 两种水泥典型的熟料矿物组成。

表 2 通用硅酸盐水泥与高贝利特水泥典型熟料矿物组成(w/%)

Table 2 Typical mineral composition of HBC and PC clinkers(w/%)

Clinker	PC	HBC
C_3S	45 ~ 65	20 ~ 30
C_2S	15 ~ 30	45 ~ 60
C_3A	5 ~ 10	3 ~ 7
C_4AF	8 ~ 15	10 ~ 15

2.2 熟料制备

图 1 所示为高贝利特水泥的易烧性实验结果。根据不同温度下熟料中游离氧化钙(f-CaO)的变化,从图可以看出其最佳烧成温度为 1 350 °C,较通用硅酸盐水泥低 100 °C。在工业窑实际生产的结果同样表明,根据窑型的不同,高贝利特水泥熟料的煤耗较通用硅酸盐水泥熟料低 10% ~ 30%。

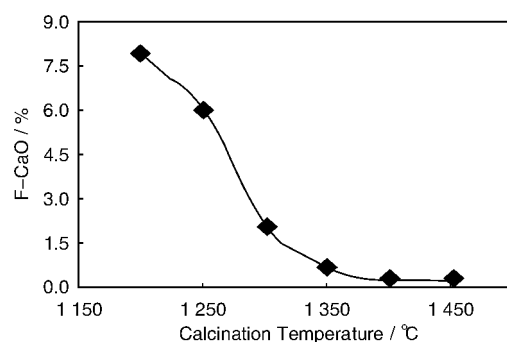


图 1 HBC 生料的易烧性曲线

Fig. 1 Burnability of HBC raw meal

硅酸二钙存在 α , β 和 γ 3 种晶型,在熟料烧成过程中,高水化活性的 α , β 晶型容易向几乎没有水化活性的 γ 型转变,导致熟料粉化和水泥强度锐减。因此,贝利特矿物的稳定、活化技术是制备以硅酸二钙(贝利特, C_2S)为主导矿物的高性能、低热硅酸盐水泥(又称高贝利特水泥,简称 HBC)的关键。通过采用矿物组成优化设计、异离子固溶、热历程调控技术,使所制备的高贝利特水泥的 28 d 抗压强度达到与通用硅酸盐水泥相当,后期强度更高,后面将详述其水泥混凝土性能。

工业生产结果表明^[3-4],与通用硅酸盐水泥相比,高贝利特水泥熟料的烧成温度降低 100 °C,烧成节煤 10% 以上;单位熟料石灰石消耗降低 5% ~ 10%,可利用低品位原料; CO_2 排放降低 10% 以上, SO_2 , NO_x 排放相应减少。

3 水泥性能

对工业制备的高贝利特水泥(HBC)进行评价时,采

用硅酸盐水泥 (PC) 进行对比试验。水泥基本物理性能 见表 3。

表 3 HBC、PC 水泥基本物理性能

Table 3 Basic physical property of HBC & PC

No.	Relative surface / $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$	Fineness/%	Consistency/%	Solidification time/min		Stability	Mortar fluidity/mm
				Initial solidification	Final solidification		
HBC-1	347	2.3	23.4	145	215	Qualified	137
PC	337	2.0	25.4	125	185	Qualified	131

3.1 工作性

基本物理性能分析表明,高贝利特水泥与通用硅酸盐水泥相比具有较低的标准稠度需水量,前者一般在 21.5% ~ 24.0% 之间,而后者多在 24.0% ~ 27.5% 之间,从而预示着高贝利特水泥具有更好的工作性。这已由相同水灰比下的砂浆流动度和混凝土坍落度对比得到证明。

高贝利特水泥良好的工作性能还表现为它对混凝土外加剂,具有很好的适应性。表 4 所示为高贝利特水泥对外加剂的适应性试验结果。

表 4 掺不同外加剂时水泥的净浆流动性

Table 4 Flowability of HBC & PC pastes with different concrete admixtures

Admixture	CLS	UNF-5	JFL-5	FDN
Adding amount C/%	0.2	0.7	0.7	0.7
Water-Cement ratio (W/C)	0.35	0.29	0.29	0.29
Paste fluidity /mm	PC	174	172	178
	HBC	192	270	250

注:CLS 为木钙缓凝减水剂,其余均为萘系高效减水剂

掺加普通减水剂时,高贝利特水泥的净浆流动度比传统硅酸盐水泥提高 10%,而掺萘系高效减水剂时提高幅度更大,达到 40% ~ 60%。

3.2 强度

3.2.1 标准养护条件

标准养护条件下高贝利特水泥及通用硅酸盐水泥的强度发展规律如图 2 所示。尽管高贝利特水泥早期强度 (1 ~ 7 d) 相对较低,但后期强度增长率大,28 d 强度即达到与硅酸盐水泥相当的水平,且此后强度的发展保持较高的增长幅度。3 ~ 6 个月的强度则比同等级通用硅酸盐水泥大约高 10 MPa。

高贝利特水泥 28 d 抗压强度与通用硅酸盐水泥相当、后期强度远高于通用硅酸盐水泥的这一强度发展规律,决定了它更加有利于保证水泥混凝土后期性能的稳定性。此外值得指出的是与通用硅酸盐水泥相比,高贝利特水泥的抗折强度更高,在 28 d 抗压强度相当条件下,HBC 抗折强度略高,而 90 d 龄期 HBC 的抗折强度要高于 PC 1 MPa。

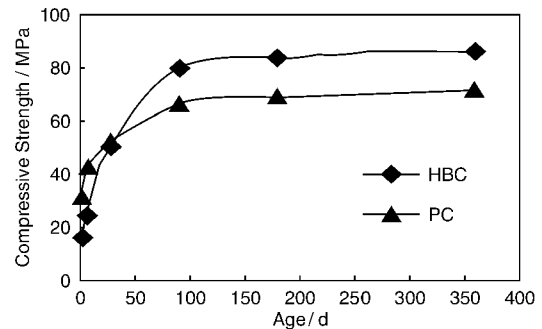


图 2 标准养护条件下 HBC、PC 抗压强度发展规律

Fig. 2 Mortar strength of HBC & PC under elevating curing conditions

3.2.2 高温养护条件

水泥的水化过程伴随着水化热的释放和温度的升高。以低水化热为显著特征的高贝利特水泥主要应用于大体积混凝土及高强混凝土等,因此有必要了解在温升条件高贝利特水泥的强度发展规律^[7]。图 3 所示为对应龄期水泥胶砂强度随养护温度的变化规律。

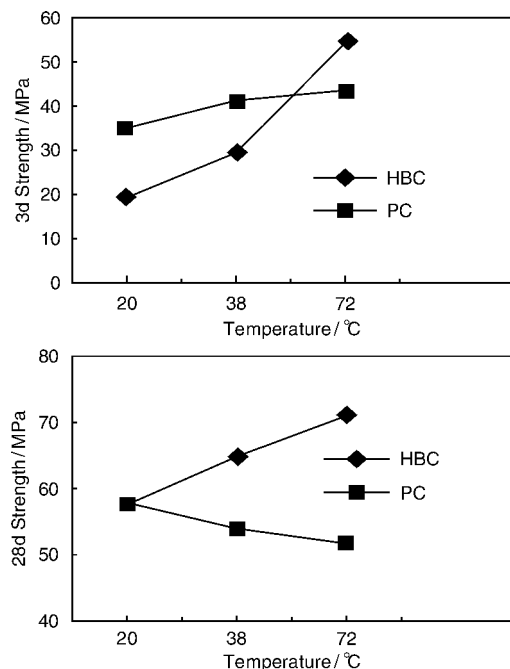


图 3 不同养护温度下 HBC、PC 抗压强度发展规律

Fig. 3 Mortar strength of HBC & PC under elevating curing temperature

由图 3 可知,随着养护温度的升高,两种水泥的 3 d 抗压强度均呈现增长趋势, HBC 增长更快;而 28 d 龄期时存在显著不同,对于 PC 水泥,其 28 d 抗压强度随养护温度的升高而降低^[8],且温度越高,强度下降越显著;而对于 HBC,其 28 d 抗压强度均随养护温度的升高而稳步提高。可见高贝利特水泥具有通用硅酸盐水泥不可比拟的高温强度特性,预示它在大体积混凝土、高强混凝土、蒸养混凝土制品、夏季高温施工及高温使用环境具有广阔的应用前景。

3.3 水化放热特征

低水化热是以 C_2S 为主导矿物的高贝利特水泥区别于通用硅酸盐水泥的一个显著特征。表 5 列出了两种水泥的水化放热及温升数据。

表 5 水泥水化放热及温升试验结果

Table 5 Hydration heat and temperature rise of HBC & PC

Cement	Heat of hydration/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$		Hydration temperature/ $^{\circ}\text{C}$		
	3 d	7 d	Initial temperature	Peak temperature	Maximum temperature
PC	247	289	21.5	35.8	14.3
HBC	192	222	21.1	29.0	7.9

由表 5 可知,高贝利特水泥在 28 d 强度与通用硅酸盐水泥强度相当的同时,其水化热却很低,且水化温升较同等级通用硅酸盐水泥低 6°C 左右,两种水泥的水化温升曲线(图 4)清楚地表明了这一点。高贝利特水泥水化时,不仅其峰值温度低,而且该峰值温度滞后出现几小时,从而预示着高贝利特水泥对于大体积混凝土的温

控防裂非常有利。

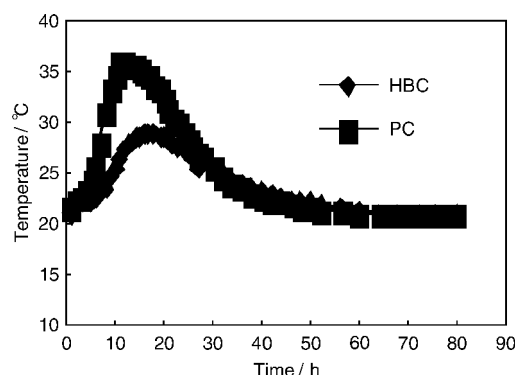


图 4 HBC、PC 水泥水化温升对比

Fig. 4 Hydration temperature rise of HBC & PC

3.4 抗化学侵蚀性能

研究结果表明,高贝利特水泥比传统硅酸盐具有更好的抗化学侵蚀能力,如表 6 所示。值得指出的是高贝利特水泥在 3% Na_2SO_4 溶液中养护 6 个月,其耐蚀系数仍能保持在 1.00,而通用硅酸盐水泥在同等条件下耐蚀系数在 0.60 以下,证明高贝利特水泥具有超强的抗硫酸盐侵蚀性能。高贝利特水泥的优异的抗海水、氯离子及硫酸盐侵蚀性能,一则与其较低的 C_3A 含量有关,二则与其水泥产物中具有二次反应能力的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的生成量大幅度减少有关,从而有效地减小或抑制了由于钙矾石/二水石膏的有害膨胀对硬化体结构产生的不利影响。

表 6 高贝利特水泥及通用硅酸盐水泥的抗化学侵蚀性能对比

Table 6 Comparison of chemical corrosion resistance of HBC & PC

No.	Anti-erosion coefficient(Rapid method, 1 cm × 1 cm × 1 cm specimen)								
	3 times seawater			3% Na_2SO_4			5% MgCl_2		
	28 d	3 Months	6 Months	28 d	3 Months	6 Months	28 d	3 Months	6 Months
PC	0.90	0.74	0.80	0.98	0.56	0.59	0.79	0.79	0.85
HBC	0.94	0.81	0.85	1.16	1.08	1.07	0.84	0.91	0.86

Note: Composition of 1 times seawater (g/L) $\text{NaCl}=30$, $\text{CaSO}_4=1.2$, $\text{KHCO}_3=0.2$, $\text{MgCl}_2=2.8$, $\text{MgSO}_4=2.4$

3.5 耐磨及干缩性能

高贝利特水泥及通用硅酸盐水泥的耐磨及干缩性能对比如表 7 所示。从以上结果可知,高贝利特水泥磨耗量和干缩率达到了道路用硅酸盐水泥国家标准相应的规

表 7 水泥的耐磨及干缩性能

Table 7 Abrasion resistance and dry shrinkage of HBC & PC

No.	28 d Wear $/\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	Drying shrinkage/ $\%$				
		7 d	14 d	28 d	3 Months	6 Months
PC	—	0.060	0.083	0.103	0.115	0.096
HBC	1.96	0.030	0.042	0.057	0.058	0.057

定值(28 d 龄期磨耗 $\leq 3.60 \text{ kg/m}^2$, 干缩率 $\leq 0.10\%$),而且,与传统硅酸盐水泥相比,高贝利特水泥的干缩率显著降低,仅占硅酸盐水泥干缩率的 50% ~ 60%,从而保证了高贝利特水泥优良的体积稳定性。

4 典型混凝土(HBC 高强、高性能混凝土)性能及应用

4.1 工作性能

对不同水胶比条件下 HBC 高强、高性能混凝土(C60, C80)的工作性能进行了对比试验,试验结果表

明, 和 OPC 混凝土相比, HBC 混凝土在低水胶比下表现出更为优异的工作性能, 试验结果见表 8。

表 8 不同水胶比条件下 HBC 高强高性能混凝土的工作性能

Table 8 Workability of HBC high strength high performance concrete in comparison with OPC concrete

Cement type	Cement consumption /kg · m ⁻³	Water-cement ratio	Coal powder /kg · m ⁻³	Water/kg · m ⁻³	FDN - II/%	Initial slump/cm	90 min slump/cm
C60 HBC	414	0.32	104	165	1.0	23.2	22.5
C60 OPC	414	0.32	104	165	1.0	22.4	20.3
C80 HBC	510	0.25	90	150	1.7	24.4	20.6
C80 OPC	510	0.25	90	150	1.7	0	0

注: C80 OPC 在与 HBC 相同配合比下其坍落度为 0, 增加 0.01 水胶比后其坍落度为 (22 ± 2) cm

从上表试验结果可知, 在相同水灰比时, C60 HBC 与 OPC 混凝土的初始坍落度相当, 由 HBC 配制的混凝土坍落度经时损失较 OPC 略小。但当水胶比降到 0.25 时, C80 HBC 混凝土坍落度仍保持在 20 cm 以上, 显现出优异的工作性能。而 OPC 混凝土基本无流动性, 必须增加 0.01 的用水量才能达到要求的坍落度, 这意味着 HBC 能更容易配制出高流动度的高强 HBC 混凝土。

4.2 抗压强度

C60, C80 强度等级 HBC 混凝土和 OPC 混凝土的抗压强度对比如图 5 所示。各强度等级下, HBC 混凝土 3 d, 7 d 强度低于 OPC 混凝土, 但 28 d 强度基本与 OPC 混凝土持平, 90 d 则超过 OPC 混凝土近 10 MPa, 说明 HBC 混凝土具有优异的后期强度增进率。

4.3 抗折、劈拉强度

抗折试验采用 100 mm × 100 mm × 400 mm 小梁进行试验, 劈拉采用 100 mm × 100 mm × 100 mm 立方体试件, 标准养护至规定龄期, 分别测定其抗折和劈拉强度, 试验结果见表 9。

表 9 HBC 混凝土抗折和劈拉强度

Table 9 Flexural & tensile strength of HBC & OPC concretes

Type	Flexural strength/MPa			Splitting tensile strength/MPa			Compressive strength/MPa		
	7 d	28 d	90 d	7 d	28 d	90 d	7 d	28 d	90 d
HPC-60	3.5	7.2	8.9	3.81	5.37	7.44	54.6	77.6	98.5
OPC-60	5.2	6.7	8.2	4.45	5.16	6.36	60.3	78.5	90.2
HPC-80	4.5	8.4	10.3	4.76	6.72	8.25	68.3	95.4	116.4
OPC-80	6.2	7.9	9.1	5.28	5.94	7.35	72.5	91.0	107.5

从表 9 可知, 与 OPC 混凝土相比, HBC 混凝土 7 d 抗折、劈拉强度偏低, 但 28 d 就超过 OPC 混凝土, 90 d 则超过 OPC 混凝土 1 MPa 左右, 说明 HBC 混凝土具有优异的抗折、劈拉强度, 这也意味着 HBC 在改善混凝土脆性方面较 PC 更为优越。

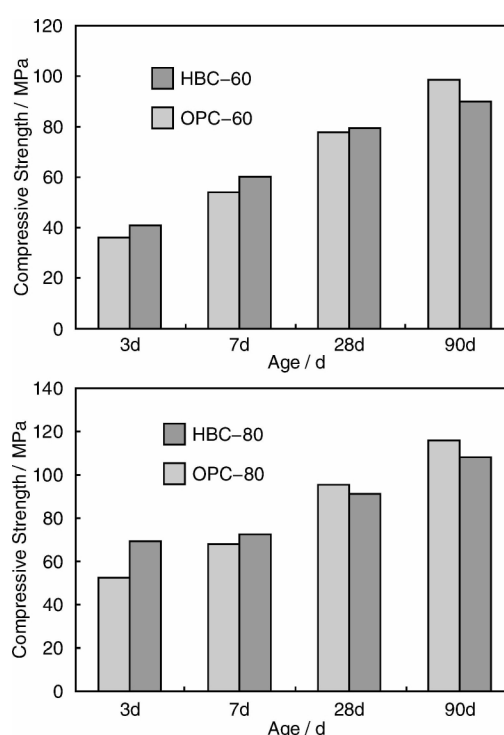


图 5 HBC 和 OPC 高强高性能混凝土各龄期的强度对比

Fig. 5 Strength of HBC & OPC high strength high performance concrete

4.4 抗冻性能

试验方法采用“水工混凝土试验规程 SD105-82”, 混凝土含气量控制在 (5 ± 0.5)%, 试验参数及结果见表 10。

国家标准规定, 当相对动弹性模数下降至 60% 或质量损失率达 5% 或相对耐久性指数小于或等于 60% 的冻融循环次数, 即为试件的抗冻标号。从表 10 的试验结果可见, HBC 混凝土经 300 次冻融循环后抗冻性检验结果远远大于标准规定指标, 其在 5% 左右的含气量、320 kg/m³ 水泥用量、水灰比 0.50 的条件下的抗冻标号可超过 D300, 在水灰比降至 0.40 的情况下, 抗冻标号仍可进一步提高; 且不同水灰比下, HBC 混凝土相对耐久性指标均大于 OPC 混凝土。

表 10 HBC 混凝土抗冻性能试验
Table 10 Freeze-thaw cycle resistance of HBC concrete

Cement type	Cement consumption / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	W/C	Water consumption / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Slump /cm	Gas content/%	28 day cement compressive strength/MPa	after 300 freeze-thaw cycles		Relative durability index(DF)
							Relative dynamic elastic modulus	Mass loss rate/%	
OPC	320	0.5	160	7.1	5.5	28.1	81.0	3.85	81.0
HBC	320	0.5	160	7.0	5.2	24.9	92.5	1.89	92.5
OPC	320	0.4	128	5.0	5.5	35.1	93.7	1.03	93.7
HBC	320	0.4	128	6.0	5.5	39.0	96.0	0.20	96.0

4.5 干缩性能

采用 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 515 \text{ mm}$ 的棱柱体标准试件。试件在 3 d 龄期(从搅拌混凝土加水时算起)从标准养护室取出并立即移入恒温恒湿室(温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, 相对湿度 $(60 \pm 2)\%$)测定初始长度, 然后按以下规定的时间间隔测量其变形读数: 1, 3, 7, 14, 28, 45, 60, 90, 120, 180 d。试验结果见图 6。

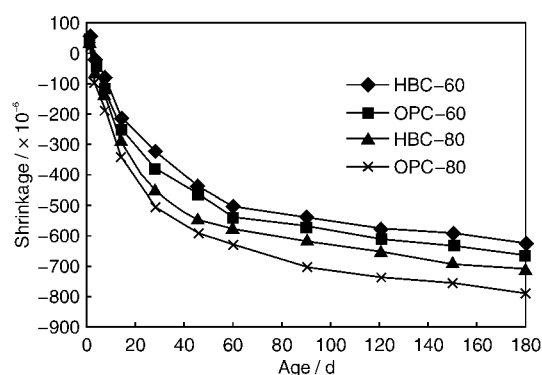


图 6 HBC 混凝土的干缩—时间曲线

Fig. 6 Dry shrinkage of HBC & PC concretes

结果表明: 两种混凝土的收缩均随着龄期的增加而增大, 其中 60 d 以前收缩增长幅度较大, 而 60 d 以后增长比较平缓。强度等级为 C80 的两种混凝土其龄期收缩值均大于强度等级为 C60 的混凝土, 这可能是由于胶凝材料用量较大且 C80 混凝土的粉煤灰掺量较小(15%)所致(C60 粉煤灰掺量为 20%)。与 OPC 混凝土相比, 两种等级的 HBC 混凝土其龄期干缩值均较小, 这说明 HBC 混凝土具有良好的体积稳定性。

5 水工大体积混凝土

高性能混凝土通常要求良好的工作性能、力学性能和耐久性, 水工大体积混凝土要求则不仅如此, 更重视混凝土的热学性能和抗裂性能。试验研究与三峡 3 期现场应用结果表明^[9], HBC 大体积混凝土与 MHC 大体积混凝土相比具有更为优越的性能。以下主要从水泥混凝土温升和抗裂能力加以分析。

5.1 绝热温升

水泥水化是一个放热过程, 过度集中的放热可能导致由于温升应力产生的混凝土开裂、后期强度的下降乃至耐久性劣化和结构失效, 因此温控防裂对于大体积混凝土尤其关键。

图 7 所示为高贝利特水泥(HBC)与以 C_3S 为主导矿物的通用硅酸盐水泥(PC)和中热硅酸盐水泥(MHC)的水化放热的对比。高贝利特水泥的最高温升分别比 PC 和 MHC 低 7°C 和 3.7°C , 最高温升出现的时间也有所延迟。这一结果与后来三峡大坝中热水泥混凝土的绝热温升比对相符合。

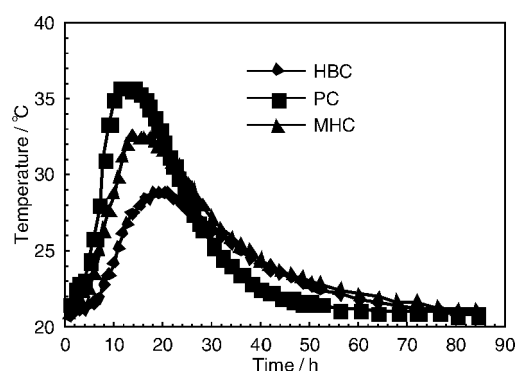


图 7 HBC, MHC & PC 水化温升对比($\text{C}/\text{S}=0.33$, $\text{W}/\text{C}=0.29$)

Fig. 7 Hydration temperature rise of HBC, MHC & PC

如图 8 所示, 在同样掺加 40% 粉煤灰和相同混凝土配合比的条件下, HBC 混凝土比 MHC 混凝土的绝热温升低 $3 \sim 5^\circ\text{C}$, 这对于大体积混凝土的温控防裂和成本降低非常重要。

三峡 3 期工程应用 HBC 大体积混凝土的温升现场监测结果同样证明了 HBC 大体积混凝土在温升控制方面相对于 MHC 大体积混凝土的优越性能, 如图 9 所示。

5.2 抗裂能力

利用极限抗拉强度(混凝土的极限拉伸与抗拉强度之积)简化模型对用于三峡 3 期工程的 HBC 和 MHC 大体积混凝土的抗裂性能进行比对分析, 结果如图 10

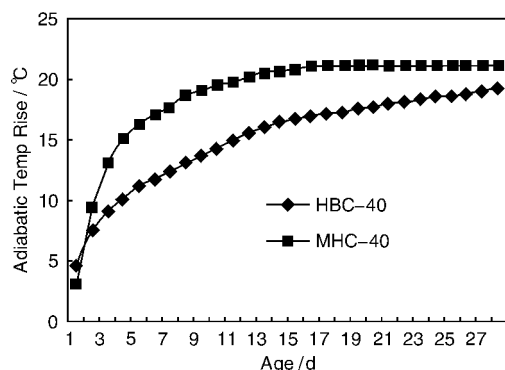


图8 HBC & MHC 大体积混凝土绝热温升对比

Fig. 8 Adiabatic temperature rise of HBC & MHC mass concretes

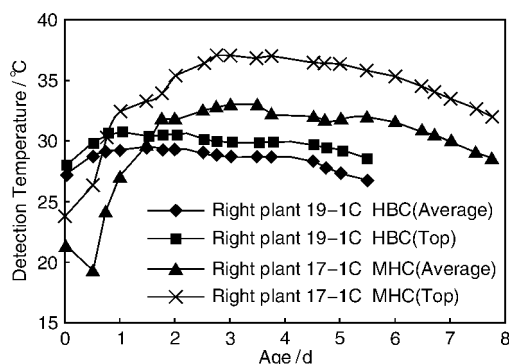


图9 右厂19-1丙、右厂17-1丙管槽混凝土温度变化过程曲线

Fig. 9 On-site monitoring of HBC & MHC mass concretes on Three Gorges dams

所示。在粉煤灰(Pfa)掺量40%以内,无论是28 d或90 d龄期,HBC混凝土的抗裂能力均优于MHC混凝土。

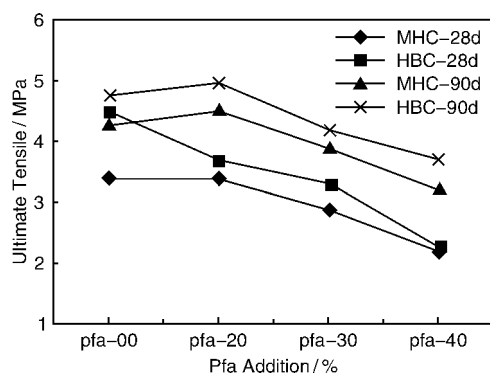


图10 HBC & MHC 抗裂能力对比

Fig. 10 Comparison of cracking resistance of HBC & MHC mass concretes

6 结论

研究、生产和工程应用结果表明,与通用硅酸盐水泥相比,HBC不仅在制备工艺上具有低资源、能源消

耗、低环境负荷、低生产成本等特色,而且在水泥混凝土性能上具有如下特点:

(1)水泥标准稠度需水量低,与外加剂适应性好。

(2)强度增进率高。其28 d强度与通用硅酸盐水泥相当,后期强度增进率大,90 d及以后龄期抗压强度比通用硅酸盐水泥高10 MPa以上,且抗折强度高。

(3)水化热低,耐磨性能好,抗化学侵蚀性能优良。干缩小,其不同龄期的干缩值为通用硅酸盐水泥的50%~70%。

(4)高强高性能混凝土具有更为优越的工作性能、力学性能和耐久性,不仅如此,HBC大体积混凝土还具有优异的热学性能和抗裂性能。

(5)对HBC混凝土的研究及其在三峡3期工程的成功应用预示其在高强混凝土、夏季高温施工、大体积混凝土等领域有广阔的发展前景。

参考文献 References

- [1] Chatterjee A K. High Belite Cements-Present Status and Future Technological Options: Part I [J]. *Cement Concrete Research*, 1996, 26(8), 1 213-1 237.
- [2] Sui Tongbo, Wang Jing, Wen Zhaijun, et al. Strength and Pore Structure of High Belite Cement [C]//*Proceedings of the 5th International Symposium on Cement & Concrete*. Shanghai: This Conference, 2002: 261-265.
- [3] Sui Tongbo, Guo Suihua, Liu Kezhong, et al. Research on High Belite Cement, Part I [R]. Beijing: 4th Beijing International Symposium on Cement and Concrete, 1998.
- [4] Sui Tongbo, Liu Kezhong, Wang Jing, et al. Research on High Belite Cement, Part II [R]. Beijing: 4th Beijing International Symposium on Cement and Concrete. 1998.
- [5] Sui Tongbo(隋同波), Liu Kezhong(刘克忠), Wang Jing(王晶), et al. 高性能新型胶凝材料——高贝利特水泥的性能研究[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*(中国硅酸盐学报), 1999(4): 488-492.
- [6] Sui T. Recent Progress in Special Cements in China [C]//*Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC)*. South Africa: Durban, 2003: 2 028-2 032.
- [7] Sui Tongbo, Fan Lei, Wen Zhaijun, et al. Study on the Properties of High Strength Concrete Using High Belite Cement [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2004, 2(2): 201-206.
- [8] Taylor H F W. *Cement Chemistry 2nd* [M]. London: Thomas Telford Publishing, 1997.
- [9] Sui T, Li J, Peng X, et al. A Comparison of HBC and MHC Massive Concrete for Three Gorges Project in China [C]//*Proceedings of Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties*. Greece: This Conference, 2006: 341-346.



专栏特约编辑李宗津

李宗津：博士。1982 年浙江大学毕业，1982~1986 年在山东建筑工程学院土木学院任教，后到美国留学，获得美国西北大学“结构工程”专业博士学位，现为香港科技大学土木系教授及工学院副院长，博士生导师，香港工程师协会注册工程师，国际标准化组织 TC71 技术委员会委员，美国混凝土协会中国分会创始主席，是香港科技大学具有国际影响力的知名学者之一。

其在混凝土耐久性、高性能混凝土、纤维混凝土等领域的研究成果及专利技术达到了世界先进水平。担任国际标准化组织技术委员会委员，欧洲混凝土委员会防火委员会委员，美国混凝土协会中国分会主席。已发表 180 余篇论文及著作。其中被 SCI、EI 收录的有 100 余篇。获得 5 项专利，其中 3 项已被开发成产品。

丁庆军：生于 1962 年，教授。现为湖北省科学技术咨询服务中心建材科技工程咨询部专家组成员，中国硅酸盐学会水泥分会第四届理



特约撰稿人丁庆军

事会理事，《施工技术》杂志理事会理事，江苏省建筑材料科技工程咨询专家等。主要从事高性能混凝土研究；先进混凝土技术在桥梁、道路、隧道工程中的应用；材料加工与制备技术；特种混凝土设计与施工技术。主持和参加了国家“863”、“973”、国家自然科学基金、国家“九五”科技攻关、国家“十五”科技攻关、湖北省自然科学基金、武汉市科技攻关等科研项目 20 余项。作为技术负责人之一，参加各种混凝土工程技术攻关与应用 30 余项。获国家发明专利授权 20 余项，发表学术论文 100 余篇，其中被 SCI 收录 10 余篇、EI 收录 20 余篇，专著 1 部。

孙伟：生于 1935 年，教授、博士生导师。1958 年 7 月毕业于南京工学院（现东南大学）工业与民用建筑专业并留校任教至今。曾任土木工程系建筑材料教研室副主任、主任，土木工程系副主任，材料科学与工程系主任。2005 年 11 月当选为中国工程院院士。曾任中国《硅酸盐学报》副主



特约撰稿人孙伟

编，英国《Cement and Concrete Composites》学报编委、南京市硅酸盐学会理事长等职。现任江苏省科协副主席、东南大学纤维与纤维混凝土技术研究所所长、《硅酸盐学报》国际编辑顾问委员会副主任、同济大学教育部重点实验室“先进土木工程材料”学术委员会主任、《建筑材料学报》编委会副主任、《混凝土》编委会主任等职。曾获全国先进女职工、江苏省优秀研究生导师、江苏省科技先进工作者、江苏省三八红旗手、《硅酸盐学报》优秀编委等多项荣誉称号。发表论文 350 多篇，被 SCI 和 EI 收录达 50% 以上。

金贤玉：博士，教授，博士生导师。1999~2000 年在香港科技大学博士后工作站进行研究工作，2004 年与 2006 年分别赴美国西北大学和休斯顿大学进行高访与交流，已出访二十多个国家进行学术交流。主持国家自然科学基金重点项目 1 项，面上项目 4 项，《863 项目》课题 1 项，《973 项目》课题 1 项，香港政府发展基金课题 1 项。主要研



特约撰稿人金贤玉

究方向为混凝土材料基本性能，混凝土结构耐久性，混凝土结构无损检测技术，混凝土结构测试技术，结构健康监测和损伤识别，大型混凝土结构工程断裂、损伤，预测结构寿命等。

缪昌文：1957 年生，江苏姜堰人。现任江苏省建筑科学研究院有限公司董事长，教授级高工，博士生导师，何梁何利基金产业创新奖获得者，享受国务院政府特殊津贴的专家，江苏省中青年首席科学家，第九、十、十一届全国人大代表。二十多年来专注于混凝土外加剂、高性能水泥基材料、高性能混凝土技术的研究，为该学科的人才培养和事业发展做出了突出的贡献。先后荣获全国“杰出专业技术人才”、“江苏省留学回国先进个人”、“江苏省科技成果转化奖”、“江苏省劳动模范”、“南京市十大科技功臣”、“江苏省十大创新创业人才奖”、“江苏省社会主义建设贡献奖”等荣誉。

隋同波：1965 年生，博士，教授级高工，博士生导师，享受国务院政府特殊津贴，



特约撰稿人缪昌文



特约撰稿人隋同波

新世纪百千万人才工程国家级人选。现任中国建筑材料科学研究总院副院长，联合国工业发展组织（UNIDO）材料技术国际促进中心主任，建材行业生产力促进中心主任。兼任中国硅酸盐学会水泥分会秘书长，中国材料学会青年委员会副主任委员，北京硅酸盐学会副主任委员，国家建材工业科教委副主任，中国水泥标准化技术委员会副主任委员，ASTM - C01 水泥技术委员会成员，联合国开发计划署（UNDP）与中国政府南南合作专家委员会委员。所开发的“高贝利特水泥”产品性能达到国际领先水平，填补了国内空白。2006 年获国家技术发明二等奖。迄今发表论文 60 余篇，参与编写论著 6 部，获国家发明专利 6 项，实用新型专利 2 项。