

《高活性贝利特硅酸盐水泥熟料》

编制说明

北京建筑材料科学研究总院有限公司

唐山冀东水泥股份有限公司

2024年10月20日

目录

一、	工作简况	5
	(一) 任务来源	5
	(二) 工作过程	6
	(三) 主要参加单位和工作组成员及其分工	7
二、	标准编制原则和主要内容	8
	(一) 编制原则	8
	(二) 标准文本框架	8
	(三) 标准主要内容	8
	(四) 主要试验（或验证）情况分析	17
	(五) 高活性贝利特硅酸盐水泥混凝土性能	33
三、	产业化情况、推广应用论证和预期达到的经济效果等情况	37
四、	采用国际标准和国外先进标准情况，与国际、国外同类标准水平的对比情况，国内外关键指标对比分析或与测试的国外样品、样机的相关数据对比情况	39
五、	本标准与现行的相关法律、法规、规章及相关标准（包括强制性标准）是否具有一致性	39
六、	重大分歧意见的处理经过和依据	43
七、	标准性质的建议说明	43
八、	贯彻标准的要求和措施建议（包括组织措施、技术措施、过渡办法、实施日期等）	43
九、	废止现行相关标准的建议	43
十、	其它应予以说明的事项	43

一、 工作简况

(一) 任务来源

实现碳达峰碳中和,是以习近平同志为核心的党中央经过深思熟虑做出的重大战略决策,事关中华民族永续发展和构建人类命运共同体。2021年9月22日,中共中央、国务院印发《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》,对碳达峰碳中和工作作出系统谋划和总体部署,是汇聚全党全国力量完成碳达峰碳中和艰巨任务的纲领性文件。国务院2021年10月24日发布《2030年前碳达峰行动方案》,进一步明确了推进碳达峰工作的总体要求、主要目标、重点任务和保障措施。两份文件的发布,标志着我国碳达峰碳中和工作正式由目标愿景转向具体行动,展现了中国应对气候变化的大国担当。《2030年前碳达峰行动方案》明确要求加快实施重点行业节能降碳工程,实施重大节能降碳技术示范工程,支持已取得突破的绿色低碳关键技术开展产业化示范应用。2021年初,中国建筑材料联合会向全行业发出倡议,建材行业要在2025年前全面实现碳达峰,水泥等行业要在2023年前率先实现碳达峰。绿色低碳水泥的研发和应用成为实现上述目标和倡议的重要途径之一。

高活性贝利特硅酸盐水泥是目前国内外在低碳水泥研究领域的一个重要方向。北京建筑材料科学研究总院有限公司曾承担了国家“十二五”科技支撑计划项目(2014BAE05B00)“新型低钙水泥的研究及工业化应用”子课题《高活性贝利特水泥熟料研究》,负责并研发了具有自主知识产权(授权专利号ZL201210115342.9, ZL201610034309.1, ZL201610034418.3)的高活性贝利特硅酸盐水泥熟料,其熟料矿物主要由25-80%的高活性硅酸二钙,5~60%的硅酸三钙,0~5%的铝酸三钙,以及5~15%的铁铝酸四钙组成。高活性贝利特水泥熟料高活性贝利特水泥是一种高性能绿色低碳基础材料,不仅具有高强度特征,而且具有水化热更低、抗裂性更强、耐久性更好、碳足迹更小等特点,可以完全替代普通硅酸盐水泥用于生产低碳足迹的高性能混凝土,用于建设各种使用环境条件下的低碳基础设施工程。高活性贝利特水泥产业化推广实施后,具有非常可观的经济效益、社会效益和生态效益。与生产普通水泥熟料相比,以年产7.5亿吨高活性贝利特硅酸盐水泥熟料计算,可以减少标准煤用量高达1170万吨,节约成本187亿元;降低碳排放高达7500万吨,节约44亿元;处置钢渣等固废1.13亿吨,节约处置费用17亿元;使用低品位石灰石约8.5亿吨,节约成本255亿元;综合节约成本高达503亿元。

截至2023年11月,先后在1000t/d, 2500t/d, 3000t/d, 4000t/d新型干法水泥生产线上完

成了12次工业化生产试验，实现了规模化量产，成功地开展了工程应用示范，形成了一系列科研成果。

对高活性贝利特硅酸盐水泥及混凝土的物理、力学和耐久性研究表明，高活性贝利特硅酸盐水泥和减水剂的适应性良好，新拌高活性贝利特水泥混凝土工作性优于通用硅酸盐水泥混凝土，C15~C100混凝土各龄期强度发展特征完全满足现代混凝土施工周期要求，显示突出的抗开裂性能，其它主要的耐久性性能指标都优于通用硅酸盐水泥混凝土。

高活性贝利特硅酸盐水泥熟料具有早期强度高、后期强度增长率高、低水化热、抗开裂等突出特点，采用高活性贝利特硅酸盐水泥熟料配制生产的通用硅酸盐水泥（包括硅酸盐水泥PI/PII、普通硅酸盐水泥PO）、中热硅酸盐水泥PMH、核电工程用硅酸盐水泥PN、道路基层用缓凝硅酸盐水泥PRS等产品已经成功地应用于各类工业与民用建筑、核电、水电、公路铁路等工程领域。

尽管高活性贝利特硅酸盐水泥熟料和普通硅酸盐水泥熟料的矿物组成相同，但是水化放热特征、水化硬化机理、水化产物、化学外加剂适应性、矿物掺和料适应性、新拌水泥浆体及混凝土的流变性能、强度发展特征、抗开裂性能以及其它耐久性性能存在较大差别，不适用现行《硅酸盐水泥熟料》的产品标准。

为推动高活性贝利特硅酸盐水泥熟料及相应水泥产品的推广和应用，亟需制定适宜高活性贝利特硅酸盐水泥自身性能特点的新的产品标准，来指导企业的生产和销售。在北京建筑材料科学研究总院有限公司和唐山冀东水泥股份有限公司等单位的推荐下，2023年5月9日中国建筑材料联合会中建材联标发[2023]48号文《关于下达2023年第四批协会标准制定计划的通知》将高活性贝利特硅酸盐水泥熟料列入建材联合会协会标准计划，项目编号2023-53-xbjh。该项工作对于建材行业推广节能、低碳、环保的新型低碳水泥产品，推动水泥工业可持续发展，加快产业结构调整和优化升级，促进节能减排，积极应对气候变化，都具有重要的意义。

（二） 工作过程

本标准研究由北京建筑材料科学研究总院有限公司和唐山冀东水泥股份有限公司承担，为较好完成本标准研究工作，北京建筑材料科学研究总院有限公司于2023年5月底成立了标准制定专项工作组，就标准制定方案进行了专项研讨和评审，对《高活性贝利特硅酸盐水泥熟料》标准制定工作中的工作重点、任务分工、试验研究方案、进度安排和主要试验内容进行了详细的安排。2023年10月完成了验证试验、数据汇总和整理等所有既定的工作内

容，形成了标准初稿（草案），并于2023年11月召开了标准启动会，通过了建材联合会预评审，并对标准初稿重新进行了修订。

(三) 主要参加单位和工作组成员及其分工

主要参加单位：北京建筑材料科学研究总院有限公司，唐山冀东水泥股份有限公司，河北金隅鼎鑫水泥有限公司，平泉冀东水泥有限公司，陕西泾阳冀东（海德堡）水泥有限公司，郑州市王楼水泥工业有限公司。

参编人员11人，其中教授级高级工程师5人，高级工程师3人，助理工程师3人。

表1标准起草人及分工序号

No.	姓名	单位	职务职称	承担的工作
1	刘艳军	北京建筑材料科学研究总院有限公司	教高	主编，负责标准编制整体工作
2	魏卫东	唐山冀东水泥股份有限公司	教高	标准编制审核工作
3	孙越男	唐山冀东水泥股份有限公司	中级	标准编制审核工作
4	宋子新	唐山冀东水泥股份有限公司	教高	标准编制审核工作
5	姜雨生	唐山冀东水泥股份有限公司	副高	标准编制审核工作
6	韩康	北京建筑材料科学研究总院有限公司	副高	实验研究
7	刘爽	北京建筑材料科学研究总院有限公司	副高	实验研究
8	李润丰	北京建筑材料科学研究总院有限公司	副高	实验研究
9	赵宇翔	北京建筑材料科学研究总院有限公司	副高	实验研究
10	徐瑞来	北京建筑材料科学研究总院有限公司	初级	实验研究
11	韩韶辉	河北金隅鼎鑫水泥有限公司		
12	马军民	河北金隅鼎鑫水泥有限公司		
13	王利涛	河北金隅鼎鑫水泥有限公司		
14	殷翠玲	唐山冀东水泥有限公司二分公司		
15	张国民	平泉冀东水泥有限公司		
16	刘佳	平泉冀东水泥有限公司		
17	杨勇	陕西泾阳冀东(海德堡)水泥有限公司		
18	于斌	唐山冀东三友水泥有限公司		
19	韩伟	江津冀东水泥有限公司		
20	练礼财	北京金隅琉水环保科技有限公司		

二、 标准编制原则和主要内容

(一) 编制原则

目前国内外没有高活性贝利特硅酸盐水泥熟料标准,本标准的制定主要结合国内在新型低碳水泥熟料产品的最新研究进展,特别是在高水化活性贝利特硅酸盐水泥熟料研究取得重大突破的情况下,参考 GB/T 21372-2024《硅酸盐水泥熟料》标准和 GB 175-2023《通用硅酸盐水泥》标准提出的。虽然主要熟料矿物成分相同,但是,高活性贝利特硅酸盐水泥熟料中的硅酸二钙是在表面化学动力学质子驱动分解反应机理基础上,通过量子力学密度函数理论,模拟分析 C₂S 晶体电子云结构分布特征,创新提出采用离子掺杂理论和缺陷设计理论来提高水化活性和易磨性的新思路,通过优化高温热动力学条件和熟料率值,在新型干法水泥生产线上生产的以高水化活性的贝利特矿物为特征的绿色低碳硅酸盐水泥熟料。高活性贝利特硅酸盐水泥熟料中硅酸二钙含量提高,硅酸二钙和硅酸三钙总量提高,铝酸三钙含量降低,液相量降低,易磨性与普通熟料相当,具有与普通硅酸盐水泥熟料显著不同的物理、力学和耐久性能特征。因此,GB/T 21372-2024《硅酸盐水泥熟料》标准不能够完全适用于高活性贝利特硅酸盐水泥熟料,需要制定新的符合高活性贝利特硅酸盐水泥熟料矿物组成和性能特点的标准,本标准的编制原则是:

- (1) 充分体现标准技术要求的先进性、科学性和严谨性;
- (2) 为高活性贝利特硅酸盐水泥熟料产品质量的稳定性和安全性提供标准保障;
- (3) 有利于指导高活性贝利特硅酸盐水泥产品的推广应用。

(二) 标准文本框架

《高活性贝利特硅酸盐水泥熟料》标准的编写,按GB/T 1.1-2020《标准化工作导则第1部分:标准化文件的结构和起草规则》所要求的格式编写,结构与GB/T 21372-2024《硅酸盐水泥熟料》标准的基本一致,针对高活性贝利特硅酸盐水泥熟料的性能特点,对主要技术要求进行了相应规定。

(三) 标准主要内容

1 范围

无编制说明文字

2 规范性引用文件

无编制说明文字

3 术语和定义、分类

3.1 术语和定义

高活性贝利特矿物

根据本标准所涉及的专利技术,高活性贝利特矿物是指在表面化学和量子力学理论上,协同耦合离子掺杂、缺陷设计,高温热动力学条件优化以及熟料率值与矿物组成创新设计等系统集成技术,实现贝利特矿物晶体电子分布重构和多尺度晶体缺陷设计,使水化活性显著提升和易磨性明显改善的贝利特矿物。图 1 显示了 C_2S 晶体电子分布重构测试结果和多尺度缺陷设计显微形貌照片。图 2~图 4 显示了采用扫描电镜观察的硅酸二钙晶体表面多尺度微裂纹缺陷,采用背散射电子图像观察的硅酸二钙晶体内部微裂纹缺陷,以及采用透射电镜拍摄的硅酸二钙晶体内部的纳米尺度点、线、面、体积在内的各种缺陷。图 5 给出了不同 C_2S 含量的高活性贝利特硅酸盐水泥熟料与普通硅酸盐水泥熟料标准胶砂强度的对比。

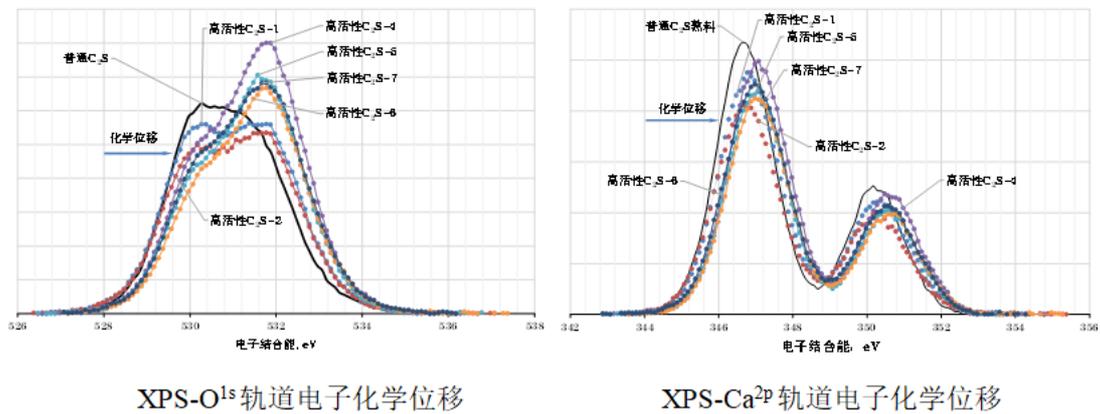


图 1 C_2S 晶体电子云分布重构

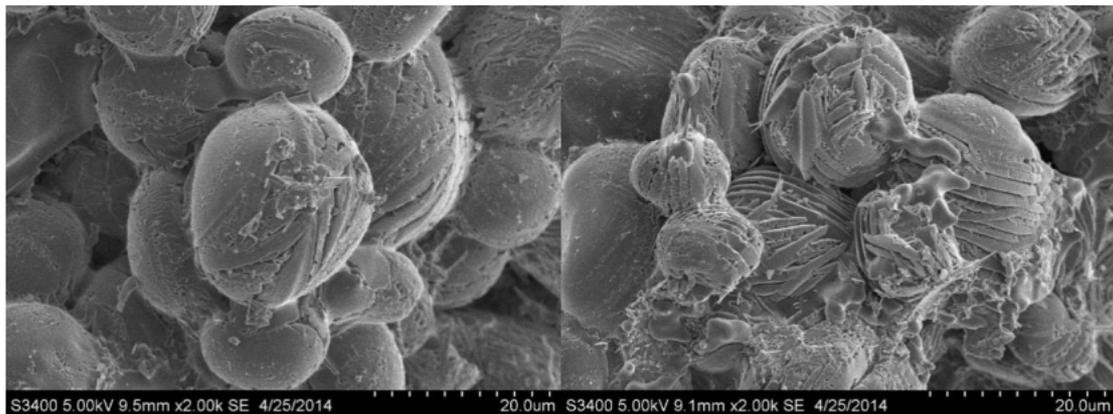


图 2 C_2S 晶体多尺度微裂纹缺陷设计(SEM 显微形貌)

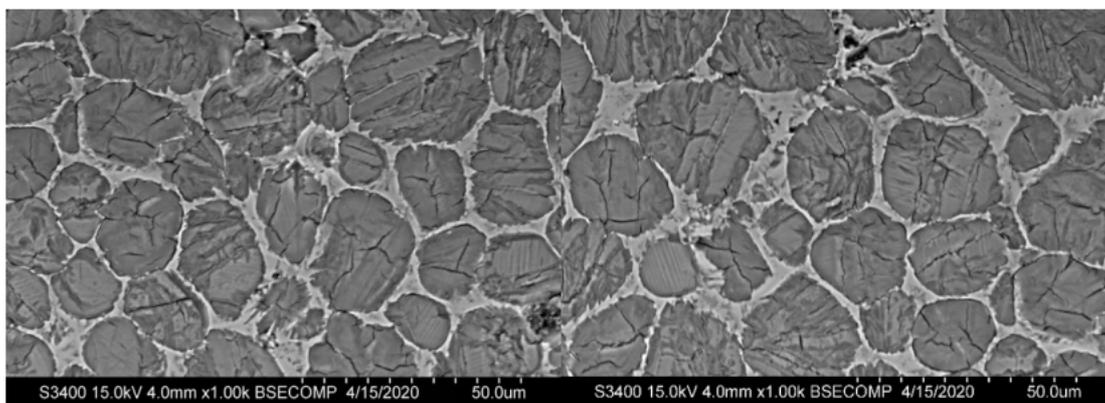


图3 C₂S 晶体多尺度微裂纹缺陷设计(BSE 显微形貌)

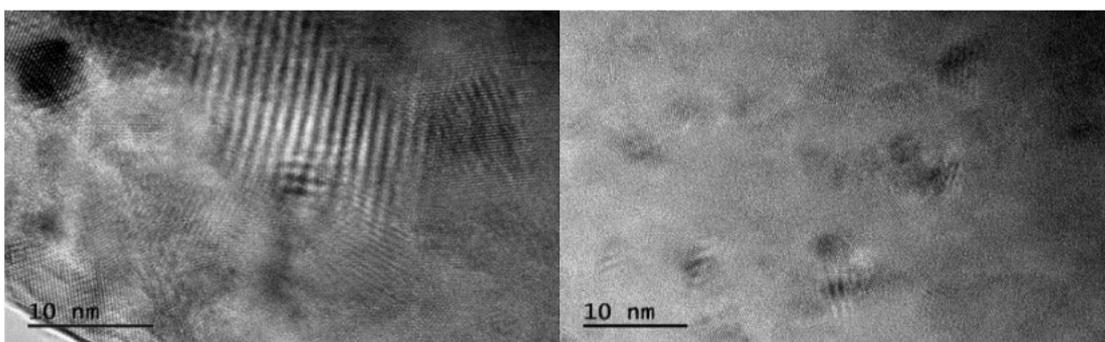


图4 C₂S 晶体多尺度化学与矿物掺杂缺陷设计(TEM 显微形貌)

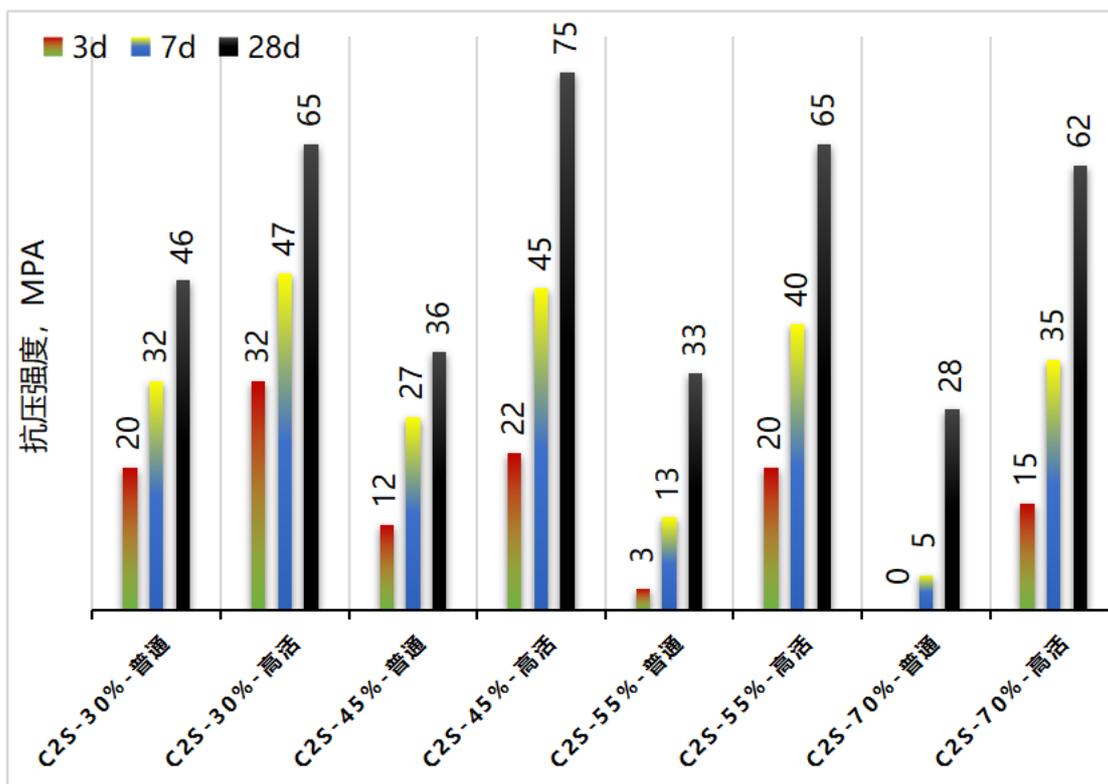


图5 高活性贝利特与普通水泥胶砂强度对比

从图 5 可以看出，相同硅酸二钙含量条件下，高活性贝利特硅酸盐水泥熟料 3d、7d、28d 强度普遍优于普通硅酸盐水泥熟料。

高活性贝利特硅酸盐水泥熟料

由主要含 CaO、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、SO₃ 的原料，按适当的比例磨成细粉，烧至部分熔融，得到的以高活性硅酸二钙、硅酸三钙、铁铝酸四钙和铝酸三钙为主要矿物成分的水硬性胶凝材料。

高活性贝利特硅酸盐水泥熟料（代号MBC），在北京建筑材料科学研究总院有限公司、唐山冀东水泥股份有限公司、河北金隅鼎鑫水泥有限公司、陕西泾阳冀东（海德堡）水泥有限公司、唐山冀东三友水泥有限公司、平泉冀东水泥有限公司、江津冀东水泥有限公司、北京金隅琉水环保科技有限公司、张家口金隅水泥有限公司等科研单位与企业联合攻关下，实现其综合材料性能指标等同或优于普通硅酸盐水泥熟料，同时具有优秀的节能、减排、低碳以及提高资源使用效率的特征，完全可以替代普通硅酸盐水泥熟料生产各类通用硅酸盐水泥产品，广泛用于各种工业与民用建筑、市政路桥、轨道交通、水电、核电、海工、油气、地热等工程领域。

4 分类

4.1 熟料分类

高活性贝利特硅酸盐水泥熟料按矿物组成、材料性能和用途分为五类：通用高活性贝利特硅酸盐水泥熟料、中抗硫酸盐高活性贝利特硅酸盐水泥熟料、高抗硫酸盐高活性贝利特硅酸盐水泥熟料、道路高活性贝利特硅酸盐水泥熟料、中热高活性贝利特硅酸盐水泥熟料和低热高活性贝利特硅酸盐水泥熟料等品种。

4.2 标识

高活性贝利特硅酸盐水泥熟料标识如表1所示。MBC-GU代表通用型（G-General Use），MBC-MH代表中热型（Medium Heat），MBC-LH代表低热型（Low Heat），MBC-PAV代表道路用（Pavement），MBC-MSR代表中抗硫酸盐（Medium Sulfate Resistant），MBC-HSR代表高抗硫酸盐（High Sulfate Resistant）。

表1 高活性贝利特硅酸盐水泥熟料分类

高活性贝利特硅酸盐水泥熟料(MBC)					
通用	中热	低热	道路	中抗硫酸盐	高抗硫酸盐
MBC-GU	MBC-MH	MBC-LH	MBC-PAV	MBC-MSR	MBC-HSR

5 要求

5.1 化学成分要求

5.1.1 基本化学成分要求

根据本标准所涉及专利技术制备的高活性贝利特硅酸盐水泥熟料的实际矿物成分与组成比例与采用Bogue's化学方程式计算的记过存在较大差异，本标准在确定高活性贝利特硅酸盐水泥熟料矿物成分和组成比例时采用XRD分析和Rietveld Refinement精修计算相结合的方法。生料配料时可以采用Bogue's化学方程式计算法计算矿物成分和熟料率值做参考。

高活性贝利特硅酸盐水泥熟料化学成分指标主要包含：其中f-CaO和SO₃指标与硅酸盐水泥熟料不同，其中f-CaO含量要求不大于1.0%，SO₃含量要求不大于3.0%；MgO含量和Cl⁻含量的控制，主要是借鉴了普通硅酸盐水泥熟料的标准，控制MgO含量主要是避免水泥在水化后期产生膨胀破坏作用，控制Cl⁻含量主要是避免引起水泥混凝土中的钢筋发生锈蚀，具体指标和GB/T 21372-2024《硅酸盐水泥熟料》标准中的有关内容一致，能够保障新品种水泥在水泥工程的质量安全。

表 2 各品种高活性贝利特硅酸盐水泥熟料基本化学成分要求（质量分数，%）

f-CaO	MgO ^a	烧失量	不溶物	SO ₃ ^b	氯离子	CaO/SiO ₂ 质量比
≤1.0	≤5.0	≤1.0	≤0.75	≤3.0	≤0.06	≥2.0

^a 当制成 PI 型硅酸盐水泥的压蒸安定性合格时，允许放宽到 6.0%。
^b 也可以由买卖双方商定。

5.1.2 特性化学成分要求

本标准对各品种高活性贝利特硅酸盐水泥熟料的特性化学成分给出了具体要求，应符合表3中的规定指标。与GB/T21372-2024不同的是，本标准对各品种高活性贝利特硅酸盐水泥熟料的硅酸三钙含量不做具体指标规定，但是对硅酸二钙含量给出了具体指标。同时，对除通用高活性贝利特硅酸盐水泥熟料之外的品种的铝酸三钙指标做了规定，对高抗和道路用高活性贝利特硅酸盐水泥熟料中铁铝酸四钙的含量做了界定。另外，要求硅酸盐矿物的总含量不小于70%。受掺杂和缺陷设计技术机理影响，理论化学反应计算法不适合用于计算以高活性贝利特矿物为特征的硅酸盐水泥熟料中的矿物成分比例，且随着高活性硅酸二钙比例提高，理论化学反应计算结果与实际组成比例相差越大，因此，各品种高活性贝利特硅酸盐水泥熟料矿物含量以通过X-射线衍射分析后，采用Rietveld Refinement精修定量分析确定为准，以理论化学计算结果为参考。对各品种高活性贝利特硅酸盐水泥熟料的碱含量不做强制性规定，但要求在销售时注明碱含量。

表 3 各品种高活性贝利特硅酸盐水泥熟料特性化学成分要求（质量分数，%）

品种	Na ₂ O+0.658K ₂ O ^a	3CaO·Al ₂ O ₃ ^b	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	2CaO·SiO ₂	3CaO·SiO ₂ +2CaO·SiO ₂
通用	---	---	---	≥25%	≥70%
中抗		≤4.0	---	≥35%	
高抗		≤3.0	≥15.0	≥40%	
道路		≤5.0	≥15.0	≥30%	
中热		≤4.0	---	≥40%	
低热		≤4.0	---	≥45%	
^a 销售时注明碱含量，或由买卖双方协商确定 ^b 3CaO·Al ₂ O ₃ ，4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃ ，3CaO·SiO ₂ 和2CaO·SiO ₂ 质量分数以XRD分析并采用Rietveld Refinement定量确定为准，以按下式计算为参考： 3CaO·Al ₂ O ₃ =2.6504Al ₂ O ₃ -1.6920Fe ₂ O ₃ 4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃ =3.0432Fe ₂ O ₃ 3CaO·SiO ₂ =4.07CaO-7.60SiO ₂ -6.72Al ₂ O ₃ -1.43Fe ₂ O ₃ -2.85SO ₃ -4.07f-CaO 2CaO·SiO ₂ =2.87SiO ₂ -0.75×3CaO·SiO ₂					

5.2 物理性能要求

各品种高活性贝利特硅酸盐水泥熟料的物理性能按照GB175中规定的程序制成PI型高活性贝利特硅酸盐水泥进行测试评价，水泥中SO₃含量不大于3.5%。

5.2.1 基本物理性能要求

5.2.1.1 凝结时间

高活性贝利特硅酸盐水泥熟料的凝结时间受硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙和铁铝酸四钙以及掺杂元素的综合影响，本标准对不同品种高活性贝利特硅酸盐水泥熟料的凝结时间做了相应的规定。

5.2.1.2 安定性

沸煮法合格。

5.2.1.3 强度

各品种高活性贝利特硅酸盐水泥熟料各龄期的强度应符合标准文本中表3的规定。与GB/T21372-2024《硅酸盐水泥熟料》不同的是，除了低热高活性贝利特硅酸盐水泥熟料设置42.5和52.5两个强度标号外，其他品种高活性贝利特硅酸盐水泥熟料设置52.5和62.5两个强度标号。同时，对3d、7d和28d抗压强度和抗折强度都提出了具体指标要求，是本标准的重要创新点之一。

5.2.2 特性物理要求

5.2.2.1 抗硫酸盐性能

与普通硅酸盐水泥熟料保持一致。

5.2.2.2 水化热

一般来说，厚度30cm以上的混凝土构件都可以称为大体积混凝土，温度梯度诱导开裂是影响混凝土结构安全性和耐久性的重要因素，因此，本标准对各品种高活性贝利特硅酸盐水泥熟料的3d、7d、28d水化热进行了界定，应符合表4的规定。研究表明，与同类硅酸盐水泥熟料相比，高活性贝利特硅酸盐水泥熟料兼具低水化热与高强度特征，对混凝土结构

控制温度诱导开裂、延长混凝土结构的使用寿命、降低基础设施碳排放非常有利，是本标准的重要创新点之一。

表4 各品种高活性贝利特硅酸盐水泥熟料的水化热指标

熟料类型	水化热/J/g		
	3d	7d	28d
通用高活性贝利特硅酸盐水泥熟料	≤270	≤320	≤400
通用硅酸盐水泥熟料-GB/T21372-2024	---	---	---
中抗硫酸盐高活性贝利特硅酸盐水泥熟料	≤240	≤300	≤360
中抗硅酸盐水泥熟料-GB/T21372-2024	---	---	---
高抗硫酸盐高活性贝利特硅酸盐水泥熟料	≤230	≤280	≤340
高抗硅酸盐水泥熟料-GB/T21372-2024	---	---	---
道路高活性贝利特硅酸盐水泥熟料	≤260	≤320	≤380
道路硅酸盐水泥熟料-GB/T21372-2024	---	---	---
中热高活性贝利特硅酸盐水泥熟料	≤220	≤270	≤340
中热硅酸盐水泥熟料-GB/T21372-2024	≤251	≤293	---
低热高活性贝利特硅酸盐水泥熟料	≤200	≤240	≤300
低热硅酸盐水泥熟料-GB/T21372-2024	≤230	≤260	≤310

5.2.2.3 放射性

内照射指数 I_{Ra} 应不大于1.0，外照射指数 I_r 应不大于1.0。

5.2.2.4 水溶性铬(IV)（选择性指标）

应符合GB 31893的要求，或由买卖双方协商确定。

5.2.2.5 重金属含量和可溶性重金属含量-选择性指标

应符合GB/T 30760的要求，或由买卖双方协商确定。

6 试验方法

6.1 化学分析试验方法

6.1.1 熟料样品制备

化学要求检验用水泥熟料应破碎、粉磨至全部通过 150 μ m 方孔筛的水泥熟料粉，并密封保存。

6.1.2 游离氧化钙、氧化镁、烧失量、不溶物、三氧化硫、氯离子、氧化钙、二氧化硅、三氧化二铝、三氧化铁、氧化钾和氧化钠含量测定

按 GB/T 176 的规定进行。

6.1.3 矿物组成的计算

矿物组成计算首选参照GB/T 40407-2021《硅酸盐水泥熟料矿相X射线衍射分析方法》，根据X-射线衍射分析方法与Rietveld Refinement定量精修相结合的方式确定。其次，以理论化学反应计算法为参考，分以下两种情况：

当 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)/w(\text{Fe}_2\text{O}_3) > 0.64$ 时，硅酸三钙($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, C_3S)、硅酸二钙($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, C_2S)、铝酸三钙($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, C_3A)和铁铝酸四钙($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, C_4AF) 分别按公式(1)~公式(4)计算：

$$w(C_3S)=4.07w(CaO-f-CaO)-7.60w(SiO_2)-6.72w(Al_2O_3)-1.43w(Fe_2O_3)-2.85w(SO_3) \quad (1)$$

$$w(C_2S)=2.87w(SiO_2)-0.75w(C_3S)$$

(2)

$$w(C_3A)=2.65w(Al_2O_3)-1.69w(Fe_2O_3)$$

(3)

$$w(C_4AF)=3.04w(Fe_2O_3)$$

(4)

当 $w(Al_2O_3)/w(Fe_2O_3) < 0.64$ 时, 铝酸三钙($3CaO \cdot Al_2O_3$, C_3A)为零, 硅酸三钙($3CaO \cdot SiO_2$, C_3S)按公式(5)计算:

$$w(C_3S)=4.07w(CaO-f-CaO)-7.60w(SiO_2)-4.48w(Al_2O_3)-2.86w(Fe_2O_3)-2.85w(SO_3) \quad (5)$$

式中:

$w(C_3S)$ -----水泥熟料中硅酸三钙的含量(质量分数, %);

$w(C_2S)$ -----水泥熟料中硅酸二钙的含量(质量分数, %);

$w(C_3A)$ -----水泥熟料中铝酸三钙的含量(质量分数, %);

$w(C_4AF)$ -----水泥熟料中铁铝酸四钙的含量(质量分数, %);

$w(CaO)$ -----水泥熟料中氧化钙的含量(质量分数, %);

$w(SiO_2)$ -----水泥熟料中氧化硅的含量(质量分数, %);

$w(Al_2O_3)$ -----水泥熟料中三氧化二铝的含量(质量分数, %);

$w(Fe_2O_3)$ -----水泥熟料中二氧化二铁的含量(质量分数, %);

$w(SO_3)$ -----水泥熟料中三氧化硫的含量(质量分数, %);

$w(f-CaO)$ -----水泥熟料中游离氧化钙的含量(质量分数, %)。

6.2 物理性能试验方法

6.2.1 高活性贝利特硅酸盐水泥熟料的物理性能要求按照GB175规定的程序制成PI型高活性贝利特硅酸盐水泥来检验。

6.2.2 物理性能检验前, 先将待检验高活性贝利特硅酸盐水泥熟料破碎至全部通过5mm方孔筛, 然后与适量符合GB/T 5483 规定的天然二水石膏或硬石膏, 以及三异丙醇胺(化学纯, 掺量为十万分之三)在 $\Phi 500 \times 500$ mm标准试验小磨内粉磨制成PI型高活性贝利特硅酸盐水泥。制成PI型高活性贝利特硅酸盐水泥样品的细度应满足: 比表面积 350 ± 10 m²/kg, 且80 μ m方孔筛筛余 $\leq 4\%$; SO_3 含量(质量分数)应在2.5%~3.5%范围内(也可按双方约定)。所有试验(除28d强度外)应在制成水泥后10d内完成。

6.2.3 标准试验小磨球配数量为: $\Phi 70$ mm钢球9个、 $\Phi 60$ mm钢球24个、 $\Phi 50$ mm钢球37个、 $\Phi 40$ mm钢球43个, 质量合计约60kg; $\Phi 25$ mm \times 30mm钢锻374个, 质量合计约40kg; 研磨体总质量为100kg~105kg。当检查发现研磨体总质量低于95kg时, 应如前所述重新配球。为了尽量保证制成水泥的颗粒级配相近, 应3个月检查一次小磨的球配。

6.2.4 比表面积按GB/T 8074 进行。

6.2.5 筛余按GB/T 1345进行。

6.2.6 凝结时间、沸煮安定性按GB/T 1346进行。

6.2.7 压蒸安定性按GB/T 750 进行。

6.2.8 抗压强度按GB/T 17671进行。

6.2.9 抗硫酸盐性按GB/T 749 进行。

6.2.10 水化热按GB/T 12959进行。

6.3 放射性

按 GB6566 进行。其中，试验用样品为 6.2.1 制成的 PI 型硅酸盐水泥。

6.4 水溶性铬(VI)

按 GB31893 进行。其中，试验用样品为 6.2.1 制成的 PI 型硅酸盐水泥。

6.5 重金属含量和可浸出重金属含量

6.5.1 重金属含量

按照 GB/T30760 进行。其中，试验用样品为 6.1 制成的化学分析样品。

6.5.2 可浸出重金属含量

按照 GB/T30810 进行。其中，试验用样品为 6.2.1 制成的 PI 型硅酸盐水泥。

7 验收规则

7.1 编号及取样

高活性贝利特硅酸盐水泥熟料出厂时的编号和取样由双方合同约定。

高活性贝利特硅酸盐水泥熟料取样应有代表性，可连续取，亦可从20个以上不同部位取等量样品，总量至少30kg。具体取样方法由买卖双方商定。

7.2 检验

7.2.1 出厂检验

出厂检验项目为5.1、5.2 中各品种水泥熟料对应的所有技术要求。

7.2.2 型式检验

型式检验为第 5 章全部内容。有下列情况之一者，应进行型式检验：

- 新投产时；
- 原燃料有改变时；
- 生产工艺有较大改变时；
- 产品长期停产后，恢复生产时；
- 正常生产时，每半年进行一次。

7.3 合格判定

7.3.1 出厂检验

7.3.1.1 检验结果符合5.1、5.2 中所有技术要求的为合格品。

7.3.1.2 检验结果不符合5.1、5.2中任何一项技术要求的为不合格品。

7.3.2 型式检验

7.3.2.1 检验结果符合第5章全部技术要求的为合格品。

7.3.2.2 检验结果不符合第5章中任何一项技术要求的为不合格品。

7.4 检验报告

检验报告内容应包括高活性贝利特硅酸盐水泥熟料品种、出厂检验项目和型式检验项目中的放射性、水溶性铬(VI)、重金属含量和可浸出重金属含量及合同约定的其他技术要求。当用户需要时,生产者应在高活性贝利特硅酸盐水泥熟料发出之日起 10d 内寄发除 28d 强度以外的各项检验结果, 35d 内补报 28d 强度的检验结果。

8 交货和验收

交付时,高活性贝利特硅酸盐水泥熟料的质量验收可抽取高活性贝利特硅酸盐水泥熟料实物样品以其检验结果为依据,也可以生产厂出具的检验报告为依据。采取何种方法验收由买卖双方商定,并在合同或协议中注明。

以抽取高活性贝利特硅酸盐水泥熟料实物样品的检验结果为依据时,买卖双方应在发货前或交付地共同取样和签封。所取样品缩分为二等份,一份由卖方密封保存 40d,一份由买方按本文件规定的项目和 1 方法进行检验。

以生产厂的检验报告为验收依据时,在发货前或交付时买方(或委托卖方)在同编号高活性贝利特硅酸盐水泥熟料中抽取样品,双方共同签封后由卖方密封保存 90d。

发生争议时,买卖双方应将密封保存的高活性贝利特硅酸盐水泥熟料样品送双方认可的第三方检验检测机构进行检验。

9 运输与贮存

高活性贝利特硅酸盐水泥熟料在运输与贮存时不应受潮和混入杂物,不同品种和强度等级的其他水泥熟料在储运中应避免混杂。

(四) 主要试验(或验证)情况分析

本标准研究试验主要由北京建筑材料科学研究总院有限公司、唐山冀东水泥股份有限公司、河北金隅鼎鑫水泥有限公司、平泉冀东水泥有限公司、陕西泾阳冀东(海德堡)水泥有限公司、江津冀东水泥有限公司、唐山冀东水泥股份有限公司二分公司、唐山冀东三友水泥有限公司、北京金隅疏水环保科技有限公司、张家口金隅水泥有限公司、清华大学、武汉理工大学、南京工业大学、石家庄铁道大学完成,现已完成全部试验研究和论证工作,试验结果能够为标准的制定和技术要求的规定提供充足的论据,研究及试验验证主要包含以下几个

方面：

1 熟料化学成分

表1表明，高活性贝利特硅酸盐水泥熟料样品MgO含量范围为1.5%-3.0%，参照GB/T 21372-2024《硅酸盐水泥熟料》产品标准对MgO含量的限制，本标准规定高活性贝利特硅酸盐水泥熟料MgO质量分数小于等于5.0%，如果压蒸试验合格，则高活性贝利特硅酸盐水泥熟料中氧化镁的含量（质量分数）允许放宽至6.0%。表2表明，高活性贝利特硅酸盐水泥熟料样品SO₃含量范围为2.0%-2.75%，考虑到实际生产过程会有一些波动，本标准规定高活性贝利特硅酸盐水泥熟料SO₃质量分数小于等于3.0%。

表3表明，高活性贝利特硅酸盐水泥熟料样品Cl⁻含量范围为0.01%-0.04%，总体含量比较低，参照GB/T 21372-2008《硅酸盐水泥熟料》产品标准对Cl⁻含量的限制，本标准规定高活性贝利特硅酸盐水泥熟料Cl⁻质量分数小于等于0.06%，当有更低要求时，该指标由买卖双方确定，以满足不同需求。

2 高活性贝利特硅酸盐水泥熟料矿物成分

高活性贝利特硅酸盐水泥熟料的性能与主要熟料矿物成分与比例紧密相关。在X-射线衍射分析基础上，采用Rietveld Refinement精修定量计算程序对12次工业化生产试验得到的不同品种的高活性贝利特矿物含量介于30~80%之间的高活性贝利特硅酸盐水泥熟料的矿物组成分析结果如下表。

表1给出了河北金隅鼎鑫水泥有限公司生产的高活性贝利特硅酸盐水泥熟料的矿物组成。

表1 鼎鑫高活性贝利特硅酸盐水泥熟料矿物组成

熟料编号	主要熟料矿物组成							
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A-C	C ₃ A-O	C ₄ AF	f-CaO	f-MgO	K ₂ SO ₄
2023.3.18								
2:00	35.5	48.6	0.0	0.8	8.1	0.1	3.2	0.7
4:00	32.4	51.4	0.8	0.7	7.9	0.2	2.7	1.3
6:00	42.3	41.7	0.9	1.0	7.1	0.1	2.5	1.4
2023.3.18								
20:00	31.3	51.5	0.1	0.6	8.5	0.1	2.9	1.0
21:00	39.2	44.6	0.3	0.6	7.9	0.2	2.7	0.6
22:00	35.1	49.4	0.8	1.2	7.7	0.2	2.8	0.5
23:00	41.4	43.1	0.9	1.0	7.4	0.1	2.6	0.9
24:00:00	41.6	42.0	0.3	0.8	7.4	0.1	3.0	0.9
2023.3.19								
1:00	39.4	44.0	0.4	0.7	7.2	0.3	2.6	1.0
2:00	40.2	42.0	0.2	0.8	7.9	0.2	3.3	1.7

3:00	43.3	39.2	1.0	0.7	8.5	0.3	2.7	0.5
4:00	42.7	41.2	0.0	0.7	7.1	0.2	3.4	1.0
5:00	38.7	45.4	0.3	0.7	7.6	0.1	2.8	1.0
6:00	36.1	47.7	1.0	0.5	7.5	0.2	2.9	0.6
7:00	36.3	48.1	0.2	1.3	7.2	0.3	2.9	0.9
8:00	34.3	50.3	0.0	0.8	6.6	0.1	3.2	1.1

续表1

2023.3.19	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A-C	C ₃ A-O	C ₄ AF	f-CaO	f-MgO	K ₂ SO ₄
9:00	35.7	47.0	0.7	0.4	7.5	0.0	2.7	1.4
10:00	36.3	46.6	0.4	0.6	8.0	0.0	2.7	1.7
11:00	28.4	49.1	1.2	5.6	7.8	0.3	2.6	1.3
12:00	34.3	47.9	0.8	0.5	7.5	0.3	2.6	1.6
13:00	36.2	45.6	0.8	0.8	7.3	0.3	2.8	1.4
14:00	40.1	42.9	0.6	0.4	7.3	0.3	2.9	1.3
18:00	41.8	38.5	0.7	1.3	8.2	0.3	2.4	1.9
19:00	40.9	39.5	0.4	2.3	7.6	0.3	2.6	1.6
20:00	43.7	38.8	0.9	0.2	7.3	0.2	2.6	1.3
21:00	44.7	38.3	0.3	1.3	6.5	0.2	2.7	1.7
22:00	38.4	43.6	0.7	0.5	6.1	0.2	2.4	2.3
23:00	41.0	42.2	0.7	0.1	5.9	0.2	2.3	2.2
24:00:00	44.0	37.2	0.7	1.6	6.9	0.6	2.6	1.4

续表1

2023.3.20	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A-C	C ₃ A-O	C ₄ AF	f-CaO	f-MgO	K ₂ SO ₄
8:00	34.4	48.4	0.9	0.6	8.2	0.0	2.7	0.6
9:00	38.7	46.3	0.7	0.2	6.2	0.1	2.3	1.8
10:00	34.8	49.3	0.6	0.7	6.2	0.2	2.4	1.9
11:00	36.4	46.3	1.0	0.7	6.6	0.1	2.3	2.0
12:00	36.7	47.4	0.3	0.5	7.5	0.1	2.8	1.0
13:00	39.4	44.6	0.3	0.5	7.8	0.2	2.6	1.0
14:00	42.7	41.3	1.0	0.6	7.5	0.5	2.6	1.1
15:00	39.0	44.6	1.0	1.0	7.4	0.2	3.2	0.6
16:00	32.1	51.5	0.5	1.1	7.8	0.2	2.8	0.9
17:00	32.5	51.3	0.3	0.6	7.8	0.1	2.7	1.1
18:00	39.6	43.6	0.0	1.9	4.4	0.1	2.7	2.6
20:00	40.3	42.1	0.9	0.0	7.4	0.0	2.4	2.0

续表1

2023.3.22	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A-C	C ₃ A-O	C ₄ AF	f-CaO	f-MgO	K ₂ SO ₄
13:00	40.6	44.0	0.7	0.6	6.8	0.1	2.5	1.5
14:00	38.7	44.7	0.0	1.1	6.7	0.3	2.6	1.5

15:00	34.4	46.9	0.7	1.2	7.2	0.3	2.2	2.3
16:00	35.1	46.8	0.8	0.5	7.3	0.2	2.5	1.7
17:00	36.1	46.9	0.6	0.7	7.2	0.0	2.6	1.5
18:00	38.8	43.9	0.5	0.6	6.9	0.5	2.7	1.7
19:00	41.4	41.4	0.9	0.5	7.0	0.4	2.3	1.7
20:00	39.4	43.5	0.6	0.4	7.4	0.2	2.5	1.6
21:00	43.2	39.5	0.5	0.6	6.9	0.4	2.5	1.9
22:00	50.7	33.9	0.1	0.6	7.1	0.4	2.3	1.4
23:00	45.4	38.3	0.7	0.5	6.1	0.3	2.3	1.8
0:00	37.1	46.0	0.6	1.1	7.1	0.2	2.4	1.5
1:00	39.0	38.3	8.1	0.7	6.9	0.2	2.3	1.4
2:00	40.2	42.7	0.6	0.8	6.4	0.2	2.6	1.5
3:00	52.1	30.0	0.8	0.9	6.3	0.4	2.5	1.6
4:00	57.3	25.9	0.7	1.0	5.3	0.4	3.2	1.4
5:00	61.1	19.8	0.4	1.3	6.4	0.3	3.0	2.1
6:00	37.9	38.5	0.7	0.6	6.9	4.2	3.0	2.4
10:00	40.4	42.5	0.1	0.7	7.5	0.9	2.5	1.9
11:00	59.9	20.8	0.8	0.8	6.4	0.4	3.0	1.9
12:00	25.4	54.8	1.2	0.8	7.7	0.1	2.9	1.9
13:00	28.5	53.0	0.4	0.8	8.1	0.1	2.8	1.6
14:00	40.7	43.0	1.5	0.6	6.2	0.1	1.5	1.8
15:00	34.7	46.6	0.9	0.5	8.0	0.3	2.5	1.8

续表1

2023.3.23	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A-C	C ₃ A-O	C ₄ AF	f-CaO	f-MgO	K ₂ SO ₄
10:00	41.1	40.8	0.5	0.4	7.6	0.8	2.4	2.4
11:00	28.0	52.4	0.8	0.8	7.5	0.8	2.6	2.0
12:00	24.8	54.8	1.1	0.3	8.4	0.1	2.9	1.8
13:00	30.1	55.2	0.4	0.6	7.6	0.1	3.0	0.7
14:00	39.4	44.0	0.8	0.5	6.7	0.2	2.6	1.3
15:00	37.2	46.3	0.6	0.7	6.9	0.2	2.8	1.3
16:00	47.0	36.7	0.3	0.6	6.2	0.3	2.7	1.6
17:00	45.8	37.2	0.5	0.7	6.2	0.3	2.6	1.6
18:00	42.6	39.2	0.9	0.6	7.6	0.2	2.9	1.3
19:00	39.3	42.6	0.4	1.0	7.4	0.4	2.7	1.5
20:00	36.5	46.5	0.5	1.1	7.1	0.2	2.9	1.4

表2和表3分别给出了平泉冀东水泥有限公司2023年6月和11月生产的高活性贝利特硅酸盐水泥熟料矿物组成。

表2 平泉23年6月高活性贝利特硅酸盐水泥熟料矿物组成

No.	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A-O	C ₃ A-C	C ₄ AF	f-CaO	f-MgO	K ₂ SO ₄
1	50.1	30.6	1.4	0.6	8.3	0.1	2.5	1.5
2	45.8	36.8	1.2	0.6	8.0	0.0	2.4	1.4
3	49.7	38.7	1.2	0.0	8.2	0.1	2.2	1.2
4	43.4	38.5	0.7	0.7	9.0	0.2	2.2	1.4
5	42.1	39.5	1.0	0.1	9.5	0.0	2.3	1.4
6	36.0	44.1	1.2	0.8	10.0	0.1	2.2	1.5
7	37.1	42.6	1.0	0.7	9.9	0.0	2.3	1.8
8	40.9	40.2	1.1	0.6	9.2	0.2	2.1	1.7
9	37.7	43.0	0.0	1.2	9.4	0.6	2.1	1.5
10	34.2	47.0	1.3	0.5	9.0	0.0	2.2	1.0
11	33.4	47.2	1.2	0.9	9.1	0.1	2.0	1.5
12	35.6	44.7	0.9	1.1	8.9	0.0	2.1	1.6
13	40.3	41.8	1.2	0.4	8.6	0.2	2.1	1.6
14	41.5	39.8	1.3	0.4	8.5	0.1	2.1	1.7
15	42.5	39.2	1.0	0.4	9.1	0.2	2.0	1.7
16	45.1	37.0	1.4	0.0	7.8	0.1	2.1	1.7
17	43.6	37.5	1.1	0.0	9.1	1.1	1.8	1.6
18	44.9	35.9	1.3	0.6	9.0	0.2	1.9	1.6
19	43.8	36.4	1.5	0.3	9.0	0.1	2.2	1.3
20	41.8	39.2	1.2	0.5	9.6	0.1	2.2	1.3
21	41.7	39.5	1.3	0.4	9.4	0.2	2.4	1.5
22	42.4	39.0	1.3	0.2	9.4	0.1	2.2	1.8
23	41.0	39.5	1.3	0.5	9.4	0.1	2.2	1.7
24	46.4	34.6	1.4	0.4	9.2	0.1	2.1	1.6
25	45.8	36.2	1.3	0.0	8.9	0.1	2.1	1.8

续表2

26	44.4	36.6	1.2	0.4	8.9	0.6	2.1	1.8
27	47.6	35.0	1.2	0.0	8.4	0.2	2.0	1.7
28	44.2	38.3	1.0	0.8	8.1	0.0	2.0	1.8
29	43.1	39.5	1.3	0.0	9.0	0.0	2.0	1.6
30	44.4	37.3	1.4	0.4	9.1	0.1	2.2	1.6
31	41.3	40.0	1.3	0.6	8.9	0.2	1.9	1.6
32	42.6	39.8	1.2	0.6	9.2	0.2	2.0	1.2
33	44.4	36.9	1.3	0.4	8.9	0.4	2.1	1.6
34	42.7	39.4	1.1	0.7	8.4	0.1	1.9	1.5
35	43.7	37.7	1.5	0.0	9.0	0.0	2.2	1.5
36	42.4	39.5	1.0	0.3	9.4	0.1	2.2	1.3
37	42.0	39.9	1.6	0.0	9.3	0.1	2.3	1.3
38	47.8	33.7	1.3	0.4	8.6	0.2	2.1	1.5

39	48.5	33.8	1.1	0.6	9.1	0.0	2.1	1.4
40	45.2	36.0	1.2	0.8	8.8	0.1	1.9	1.6
41	45.9	35.3	1.2	0.3	9.4	1.0	2.0	1.6
42	44.2	37.4	1.2	0.0	9.0	0.0	2.1	1.5
43	44.3	36.7	1.1	0.3	9.4	0.0	2.0	1.6
44	44.7	35.7	1.1	0.5	9.5	0.0	1.9	1.7
45	44.5	36.3	1.1	0.5	9.6	0.4	1.9	1.6
46	45.0	35.7	1.2	0.3	9.7	0.2	2.0	1.6
47	46.8	33.8	1.2	0.8	9.3	0.1	1.8	1.7
48	45.1	35.7	1.3	0.6	9.4	0.4	2.0	1.6
49	45.4	34.9	1.1	0.0	9.8	0.2	1.9	1.6
50	44.1	35.8	1.2	0.4	9.5	0.0	1.5	1.4
51	43.0	37.8	1.4	0.4	9.7	0.1	1.9	1.5
52	41.4	39.8	1.3	0.0	10.4	0.0	2.2	1.3
53	42.8	38.9	1.5	0.0	9.7	0.0	2.1	1.2
54	44.1	36.3	1.2	0.3	9.8	0.6	2.2	1.3
55	55.3	24.9	1.4	0.0	9.5	0.1	2.4	1.6
56	52.3	27.2	1.5	0.8	9.0	0.5	2.4	1.6
57	50.6	28.2	1.5	0.9	9.6	0.0	2.5	1.8
58	49.5	31.4	1.3	0.0	9.2	0.0	2.5	1.6
59	53.5	26.7	1.6	0.5	9.1	0.0	2.7	1.4
60	53.9	26.5	1.6	0.1	9.2	0.3	2.6	1.5

表3 平泉23年11月高活性贝利特硅酸盐水泥熟料矿物组成

No.	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A-C	C ₃ A-O	C ₄ AF	f-CaO	f-MgO	K ₂ SO ₄
D1-1	38.5	32.9	0.7	1.5	7.7	0.1	2.5	2.7
D1-2	38.7	31.8	1.1	2.2	7	0.3	2.5	2.2
D1-3	39.3	31.8	0.5	2.1	7.5	0.1	2.3	2.9
D2-1	38.7	33	1.1	2.3	6.5	0.1	1.9	2.7
D2-2	39.2	32.2	0.5	1.9	7.3	0	2.5	2.8
D2-3	37.3	33.2	0.8	2	5.7	0.1	2.4	4
D3-1	38.2	29.5	5	1.7	7	0.2	2.1	2.9
D3-2	37.7	32.6	0.4	1.4	7.3	0.4	1.9	3.7
D3-3	38.8	31.1	1	1.7	7.6	0.1	2.1	3.6
D4-1	38.3	32.8	0.5	1.8	7.8	0.1	2.4	3
D4-2	39	32.2	0.4	2	6.8	0.1	2.3	3.4
D4-3	38.5	32.9	0.4	1.7	7.2	0.1	2.4	3.1
D5-1	39	32.2	0.2	2.1	6.8	0.2	2.4	2.7
D5-2	38.1	33.6	0.9	1.6	7.5	0.1	2	3
D5-3	38.2	32.6	0.1	1.8	7.5	0.1	2.2	3.6
D6-1	38.1	32.7	0.5	1.9	7.6	0.1	2.9	3.1

D6-2	38.1	32.9	0.7	1.8	7.8	0.2	2.1	3.2
D6-3	39.3	31.9	0.6	1.7	7.4	0.3	2.5	3.3
D7-1	38.9	33.6	0.3	1.7	7.5	0.2	2.3	2.6
D7-2	39.3	32.6	0.4	2.2	6.5	0.1	2.2	3.2
D7-3	38.2	32.9	1	1.8	7.4	0.2	2.3	3
D8-1	38.6	33.1	0.2	2.1	6.8	0.2	2.1	3.4
D8-2	40.1	32.2	0.2	2	6.2	0.2	2.3	3.3
D8-3	38.8	33.3	0.2	1.7	7.5	0.2	2.3	2.7
D9-1	38.7	32.5	0.7	1.7	7.5	0.2	2.5	2.6
D9-2	39.3	31.5	0.3	2.2	7.3	0.1	2.4	3.6
D9-3	39.5	32.4	0.9	2	7.3	0.1	2.5	2.4
D10-1	39.4	32.5	0.3	1.6	7.3	0.1	2.2	3.7
D10-2	39.1	32.3	0.4	1.6	7.4	0.2	2.5	3.5
D10-3	38.3	31.7	0.4	1.7	7.3	0.3	2.3	3.9
11	38.9	31.9	0.8	1.9	7.4	0.1	2.3	3.3
12	39.6	32.3	0.4	2.1	6.6	0.2	2.2	3.2

表4给出了张家口金隅水泥有限公司2014年3月生产的高活性贝利特硅酸盐水泥熟料矿物组成。

表4 张金高活性贝利特硅酸盐水泥熟料矿物组成

No.	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A-C	C ₃ A-O	C ₄ AF	f-MgO	f-CaO	K ₂ SO ₄
1	29.6	53.1	0.4	1.3	6.1	2.6	0.2	1.1
2	27.0	56.2	1.4	1.9	5.3	2.8	0.1	2.2
3	13.1	70.1	0.1	2.0	5.7	2.8	0.1	1.8
4	13.4	69.5	0.7	2.0	5.8	2.7	0.0	2.3
5	16.0	69.5	0.0	1.8	5.9	2.6	0.1	1.8
6	17.0	67.4	0.3	1.4	6.6	2.4	0.1	1.5
7	15.4	69.0	0.3	1.4	6.3	2.5	0.2	1.8
8	12.8	71.8	0.2	1.2	6.4	2.5	0.0	2.0
9	14.0	70.1	0.3	1.6	6.3	2.6	0.0	1.3
10	19.0	63.5	0.0	1.7	4.9	2.3	0.3	0.7
11	11.7	71.5	1.0	1.4	6.1	2.9	0.0	1.8
12	11.1	73.9	0.1	1.0	5.9	2.8	0.0	1.9
13	17.3	66.2	0.6	1.8	5.5	2.7	0.0	1.7
14	24.3	59.8	0.2	1.7	5.6	3.0	0.2	1.6
15	29.6	52.8	0.3	1.8	5.3	2.8	0.2	1.7
16	35.7	48.3	0.4	1.0	6.0	2.9	0.1	1.5
17	32.0	52.8	0.8	0.9	6.1	2.9	0.1	1.3

表5给出了北京金隅琉水环保技术有限公司2017年5月生产的高活性贝利特硅酸盐水泥熟料矿物组成。

表5 硫水高活性贝利特硅酸盐水泥熟料矿物组成

No.	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A-C	C ₃ A-O	C ₄ AF	f-MgO	f-CaO	K ₂ SO ₄
5.24-22	39.8	42.0	0.5	2.2	9.2	1.7	0.1	2.3
5.25-00	38.2	42.6	0.5	2.5	9.1	1.7	0.1	2.2
5.25-02	32.8	48.9	0.5	1.9	8.4	2.3	0.1	1.9
5.25-04	22.6	58.0	0.3	1.5	9.3	1.9	0.2	2.3
5.25-06	35.3	46.9	0.6	2.0	9.1	1.6	0.2	1.4
5.25-08	38.0	43.0	0.5	1.7	8.8	0.8	0.3	2.8
5.25-10	48.2	33.9	0.3	2.3	8.2	0.6	0.1	2.3
5.25-12	41.6	40.8	1.1	2.1	8.7	0.7	0.2	2.5
5.25-14	36.1	42.5	0.0	3.5	8.7	1.8	2.0	2.1
5.25-16	35.1	45.5	0.4	2.4	8.2	1.6	0.1	1.5
5.26-2	43.4	37.1	0.0	2.8	7.6	1.4	0.6	3.1
5.26-4	38.1	44.3	0.6	2.1	7.4	1.3	0.1	2.1
5.26-6	35.9	44.5	0.6	1.9	8.3	1.4	0.2	2.0
5.26-8	37.8	44.3	0.7	2.0	7.7	1.3	0.1	3.1
5.26-10	40.7	39.0	0.9	2.8	8.8	1.3	0.2	3.0
5.26-12	37.7	43.5	0.0	2.8	8.1	1.9	2.1	1.6
5.26-14	34.2	38.4	0.6	3.7	6.1	2.6	7.7	2.7
5.26-20	29.3	53.9	0.4	1.5	7.9	1.8	0.1	1.6
5.26-22	31.3	52.7	0.3	1.6	8.0	1.6	0.1	1.5
5.27-00	18.8	62.7	1.1	2.4	7.7	1.0	0.1	1.6
5.27-02	19.8	62.3	1.1	1.6	8.9	0.9	0.2	1.9
5.27-04	24.1	60.6	0.9	1.6	7.5	0.6	0.1	2.2
5.27-06	22.8	60.6	0.8	1.7	8.1	1.1	0.1	2.4
5.27-08	26.6	49.7	0.0	1.9	7.4	1.4	0.3	0.7
5.27-10	22.0	64.0	0.3	1.2	8.5	1.6	0.0	1.2
5.27-12	16.3	67.2	0.2	1.5	8.2	1.6	0.1	2.0
5.27-14	8.0	72.7	0.0	1.6	8.6	1.3	0.2	3.0
5.27-16	3.2	77.8	0.4	1.6	7.7	1.3	0.1	1.5
5.27-18	3.9	78.6	0.6	1.7	7.5	0.9	0.1	1.0
5.27-20	2.5	79.4	0.8	2.8	6.2	1.0	0.1	2.1
5.27-22	4.2	78.1	0.5	1.8	7.5	0.8	0.2	1.0
5.28-00	1.3	82.3	0.0	2.2	6.2	0.8	0.3	1.2
5.28-02	34.3	38.2	0.7	1.8	7.2	1.5	0.5	1.9

3 水化热测试结果

在高活性贝利特硅酸盐水泥熟料实验室研究和工业化生产试验研究过程中,对该熟料体系的水化放热特征进行了系统的测试。图6分别给出了不同贝利特矿物含量的高活性贝利特硅酸盐水泥熟料的水化热特征曲线。从水化热流曲线可以看出:与基准水泥相比,高活性贝

利特硅酸盐水泥熟料的水化热流特征为：第二个水化放热峰明显推迟，也就是说诱导期延长，且随着硅酸二钙含量增加诱导期延长更显著；28d累积水化热测试结果显示，高活性贝利特硅酸盐水泥熟料在1d，3d，7d，以及28d的水化热明显低于基准水泥，且随着硅酸二钙含量提高，各龄期水化热降低的越显著。因此，在相同比表面积时（ $350\pm 10\text{m}^2/\text{kg}$ 左右），与基准水泥相比，低水化热是高活性贝利特硅酸盐水泥熟料的显著特征，在控制混凝土开裂方面发挥非常显著的作用，因此将水化热定为高活性贝利特硅酸盐水泥熟料的重要性能指标之一。

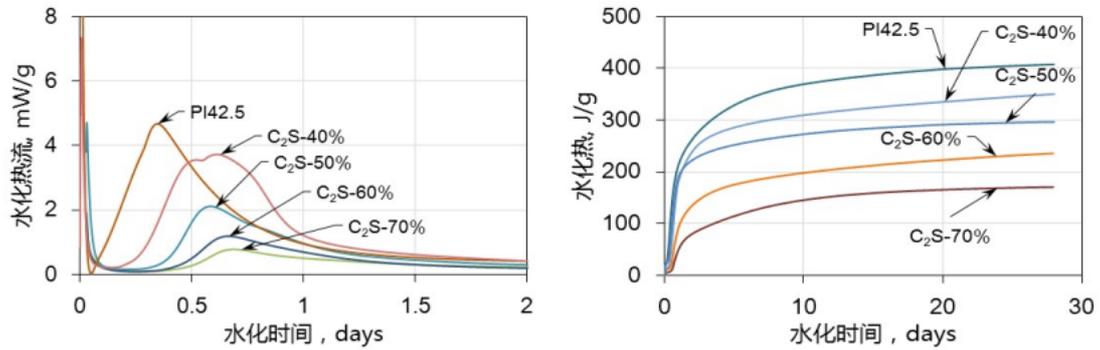


图6 不同贝利特矿物含量的高活性贝利特硅酸盐水泥熟料的水化放热特征曲线

4 物化性能

4.1 凝结时间、标稠与安定性

如水泥的安定性不合格将导致工程结构的破坏，造成严重的工程质量事故，因此安定性作为水泥的常规检验项目之一。表10的验证试验结果表明，高活性贝利特硅酸盐水泥熟料沸煮法安定性全部合格。高活性贝利特硅酸盐水泥熟料的安定性采用沸煮法。

表 10 高活性贝利特硅酸盐水泥熟料物化性能试验结果

样品名称	标稠 (%)	凝结时间 (min)		安定性 (沸煮法)
		初凝	终凝	
1	26.6	224	290	合格
2	26.0	268	335	合格
3	26.2	231	293	合格
4	26.6	198	262	合格
5	26.8	230	298	合格
6	26.4	230	296	合格
7	26.6	275	345	合格
8	25.8	254	314	合格
9	26.2	310	373	合格
10	25.8	254	314	合格
11	26.2	310	373	合格
12	26.6	224	290	合格
13	26.0	268	335	合格

14	26.2	231	293	合格
15	26.6	198	262	合格
16	26.8	230	298	合格
17	26.6	275	345	合格
18	26.4	249	314	合格
19	24.6	227	282	合格
20	24.3	204	254	合格
21	24.5	209	272	合格
22	24.5	213	269	合格
23	24.4	203	258	合格
24	24.5	190	281	合格
25	23.8	360	431	合格
26	24.0	200	253	合格
27	24.1	254	314	合格
28	23.9	163	226	合格
29	24.3	244	352	合格
30	24.2	347	446	合格
31	24.1	272	346	合格
32	24.6	288	381	合格
33	24.5	312	397	合格
34	24.5	342	429	合格
35	24.5	278	353	合格
36	23.6	311	393	合格
37	24.6	155	240	合格
38	24.2	188	260	合格
39	24.5	200	260	合格
40	24.4	181	253	合格
41	24.6	155	240	合格
42	24.2	188	260	合格
43	24.5	200	260	合格
44	24.4	181	253	合格
45	23.6	172	217	合格
46	24.3	194	265	合格
47	24.3	267	338	合格
48	24.5	241	301	合格
49	24.4	234	301	合格
50	23.9	203	271	合格
51	24.1	254	310	合格
52	24.0	267	353	合格
53	23.8	253	331	合格
54	24.0	258	331	合格
55	23.4	198	260	合格
56	23.9	267	340	合格

57	24.0	236	302	合格
58	23.9	170	224	合格
59	23.9	148	201	合格
60	24.0	238	299	合格
61	23.9	247	306	合格
62	23.6	302	283	合格
63	23.6	272	354	合格
64	23.7	263	339	合格
65	24.0	260	350	合格

根据GB/T 750-1992《水泥压蒸安定性试验方法》，当普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥的压蒸膨胀率不大于0.50%，硅酸盐水泥压蒸膨胀率不大于0.80%时，为体积安定性合格，反之为不合格。图7给出了11个高活性贝利特硅酸盐水泥样品的压蒸安定性测试结果。从图7可以看出，高活性贝利特硅酸盐水泥压蒸安定性全部合格。

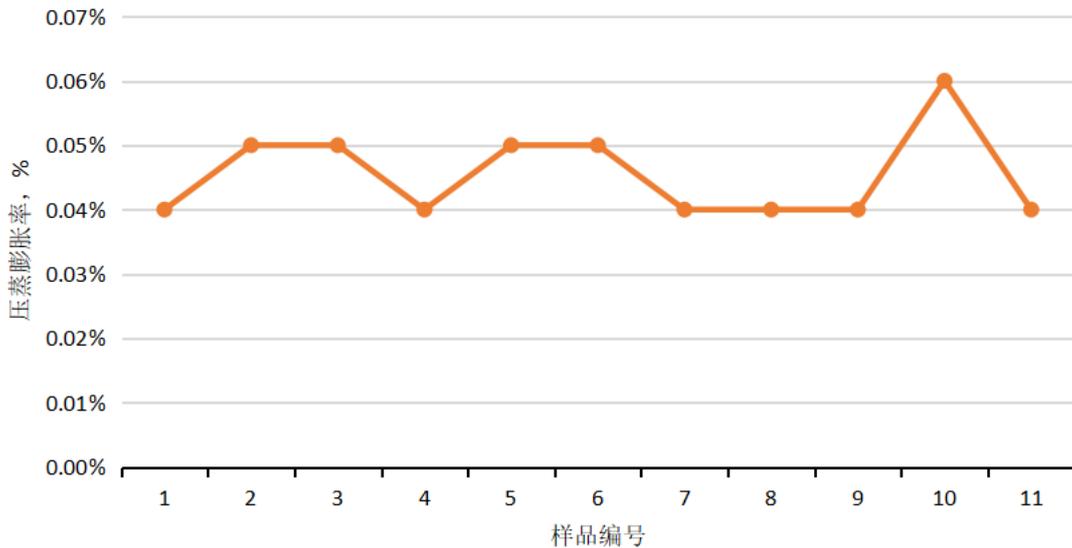


图7 高活性贝利特硅酸盐水泥压蒸安定性测试结果

4.2 强度

研究团队对 C_2S 含量介于 30%~75%之间的高活性贝利特硅酸盐水泥熟料进行了系统研究。图 8 给出了在 2500t/d 新型干法水泥生产线上生产的 C_2S 含量 35%左右的高活性贝利特硅酸盐水泥熟料的标准胶砂强度测试结果。从图 8 可以看出：工业化生产的 C_2S 含量 35%左右的高活性贝利特硅酸盐水泥熟料，3d 抗压强度 30MPa 以上，28d 抗压强度 60MPa 以上，60d 强度 75MPa 左右。

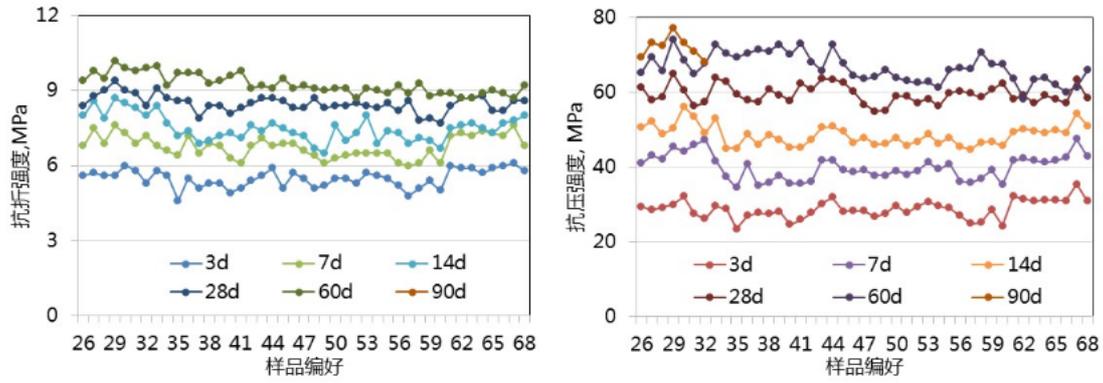


图 8 C₂S 含量 35%左右的高活性贝利特硅酸盐水泥熟料强度

图 9 给出了在 3000t/d 新型干法水泥生产线上生产的 C₂S 含量 45%左右的高活性贝利特硅酸盐水泥熟料的标准胶砂强度测试结果。从图 9 可以看出：工业化生产的 C₂S 含量 45%左右的高活性贝利特硅酸盐水泥熟料，3d 平均抗压强度 22MPa 以上，28d 平均抗压强度 75MPa 以上，60d 平均抗压强度 90MPa 左右。

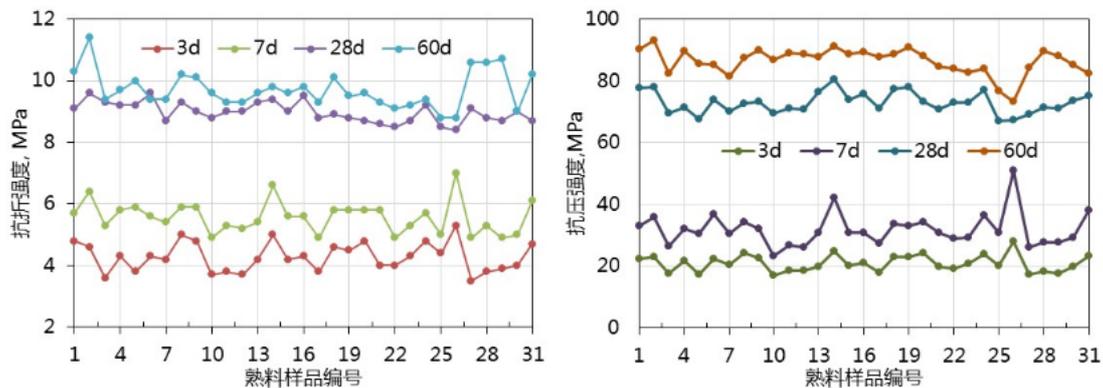


图 9 C₂S 含量 45%左右的高活性贝利特硅酸盐水泥熟料强度

图 10 给出了在 1000t/d 新型干法水泥生产线上生产的 C₂S 含量 50~65%的高活性贝利特硅酸盐水泥熟料的标准胶砂强度测试结果。从图 10 可以看出：C₂S 含量介于 50~60%之间，3d 强度介于 25~35MPa 之间，28d 强度介于 60~65MPa 之间。

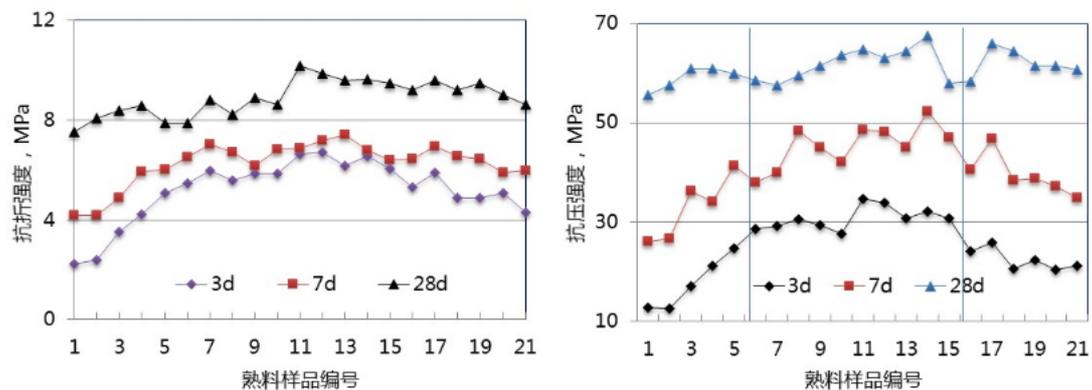


图 10 C₂S 含量 50~65%的高活性贝利特硅酸盐水泥熟料强度

图 11 给出了在 1000t/d 新型干法水泥生产线上生产的 C₂S 含量 70%以上的高活性贝利特硅酸盐水泥熟料的标准胶砂强度测试结果。从图 11 可以看出：C₂S 含量超过 70%时，3d 抗压强度 15MPa 以上，7d 抗压强度 30MPa 左右，28d 抗压强度 60MPa 左右。

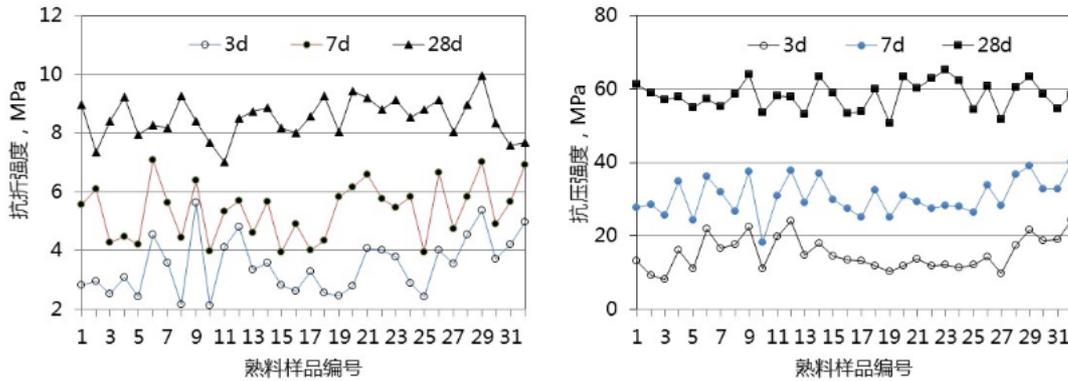


图 11 C₂S 含量超过 70%的高活性贝利特硅酸盐水泥熟料强度

本标准考虑到高活性贝利特硅酸盐水泥熟料未来作为一种可以规模化或完全替代普通硅酸盐水泥熟料的一种具有普遍推广和使用价值的绿色低碳硅酸盐水泥熟料，强度指标制定参考普通硅酸盐水泥熟料，将通用高活性贝利特硅酸盐水泥熟料、中抗硫酸盐高活性贝利特硅酸盐水泥熟料、高抗硫酸盐高活性贝利特硅酸盐水泥熟料、道路高活性贝利特硅酸盐水泥熟料按强度、中热高活性贝利特硅酸盐水泥熟料等级划分为 MBC 52.5、MBC 62.5 两个等级，将低热高活性贝利特硅酸盐水泥熟料划分为 MBC 42.5 和 MBC 52.5 两个强度等级。

4.3 细度

细度对高活性贝利特硅酸盐水泥熟料的物理性能有一定的影响，具体研究结果见表 11-14。高活性贝利特硅酸盐水泥熟料在粉磨过程中有糊球现象，即使在比表面积相同的情况下，严重影响 45 微米和 80 微米筛余量，以及水泥颗粒分布特征，因此，高活性贝利特水泥熟料粉磨后的细度采用颗粒分布、筛余和比表面积三种方法表征。为了评价高活性贝利特水泥的颗粒分布，需制定标准样品。

评价高活性贝利特硅酸盐水泥物理、力学、耐久性能时，比表面积在控制在 $350\pm 10\text{m}^2/\text{kg}$ 范围内，45 微米筛余不小于 5%，80 微米筛余不大于 4%，颗粒分布需要与标准样品的颗粒分布具有一致性，具体参数由 $d(0.1)$ ， $d(0.5)$ 和 $d(0.9)$ 以及 RRSB 分布的分布宽度和特征粒径两个参数界定。

表 11 细度对高活性贝利特水泥强度的影响

No.	筛余		比表面积 m ² /kg	扩展度 mm	抗折强度, MPa						抗压强度, MPa					
	80mm	45mm			3d	7d	14d	28d	56d	91d	3d	7d	14d	28d	56d	91d
#1	0.0%	20.0%	327.6	195×200	7.03	7.84	5.82	8.64	9.22	9.12	39.8	46.1	51.5	58.6	64.9	68.1
	0.0%	15.0%	319.9	175×175	6.64	7.12	5.43	8.56	8.91	9.18	38.5	49.4	64.9	68.2	69.2	71.2
	0.0%	1.4%	303.0	180×180	6.74	7.53	8.21	8.33	8.14	8.36	35.2	47.6	54.6	61.2	64.7	70.2
	0.0%	8.0%	294.5	180×180	6.51	7.44	5.64	7.73	8.92	9.04	36.7	47.4	61.2	63.0	70.8	69.7
	0.0%	7.0%	285.6	175×175	6.62	5.92	8.32	8.14	7.54	8.32	40.4	50.3	59.3	67.5	68.8	69.9
	0.0%	9.0%	307.6	180×180	6.81	6.54	7.93	8.06	7.64	7.94	39.3	51.7	58.5	65.9	69.0	69.4
	0.0%	6.0%	291.4	180×185	6.38	5.73	7.28	7.62	8.24	8.38	40.2	52.1	59.5	66.2	68.1	69.7
#2	0.0%	13.0%	380.7	170×170	5.62	7.42	4.82	7.83	8.32	9.1	30.9	40.6	49.8	52.2	60.3	63.9
	0.0%	11.0%	313.7	160×160	5.32	4.97	7.76	8.22	8.93	8.96	31.1	41.1	53.0	54.0	69.6	72.1
	0.0%	9.0%	302.9	170×170	5.34	5.83	7.38	8.09	9.12	8.92	33.9	43.5	51.3	59.3	67.8	69.5
	0.0%	9.0%	303.9	170×170	5.52	5.37	7.72	7.94	8.35	8.43	30.6	40.7	48.5	60.8	65.3	70.0
	0.0%	8.0%	299.9	165×170	5.41	5.90	6.64	7.42	9.34	9.30	29.8	41.1	52.9	57.9	67.4	72.4
	0.0%	8.0%	292.5	165×165	5.32	6.23	6.84	7.78	8.12	8.36	30.8	38.4	52.3	62.6	72.3	71.5
	0.0%	6.0%	308.1	165×170	4.88	6.18	7.07	7.12	7.64	7.83	28.2	38.6	50.7	56.5	66.2	74.3

表 12 细度对标准胶砂性能的影响

粉磨时间	标稠	筛余, %		比表面积	凝结时间		抗折强度, MPa						抗压强度, MPa					
		45mm	80mm		初凝	终凝	3d	7d	14d	28d	56d	91d	3d	7d	14d	28d	56d	91d
24min	0.255	17	0	275.6	3h55min	5h3min	5.9	7.6		9.0	8.3	9.5	32.4	47.0		67.1	72.3	74.2
27min	0.255	16	0	299.3	3h38min	4h57min	6.8	7.1		8.9	8.2	8.7	34.2	46.2		64.2	74.2	74.0
30min	0.255	15	0	318.5	3h12min	4h6min	6.5	6.8		8.9	8.1	8.9	34.8	48.1		62.5	73	73.1
33min	0.255	12	0	360.1	4h00min	5h19min	6.8	7.1		9.3	8.7	8.7	34.9	47.3		67.1	75.8	73.5

4.4抗硫酸盐侵蚀

中抗和高抗硫酸盐高活性贝利特硅酸盐水泥熟料的 14d 线膨胀率分别不大于 0.06%和 0.04%。从表 15 和表 16 实测结果可以看出，高活性贝利特硅酸盐水泥的 14d 线膨胀系数可以达到中抗硫酸盐和高抗硫酸盐性能。

表 15 高活性贝利特硅酸盐水泥熟料 14d 线膨胀率测试结果

熟料	C ₂ S 含量, %	编号	L0	L14d	P14d,%	中抗, %	高抗, %
平泉 2023 年 6 月 第 1 批	33.7	1	-3.4720	-3.3910	0.0324		
		2	-2.7320	-2.7150	0.0068		
		3	-1.6830	-1.6540	0.0116		
		4	-3.1850	-3.1240	0.0244	≤0.06	≤0.04
		5	-1.9590	-1.9100	0.0196		
平泉 2023 年 6 月 第 2 批	42.1	6	-2.2190	-2.0700	0.0596		
		7	-2.5430	-2.4260	0.0468		
		8	-2.9030	-2.7080	0.0780		
		9	-2.7400	-2.6340	0.0424	≤0.06	≤0.04
		10	-2.8160	-2.7740	0.0168		
		11	-2.0550	-2.0370	0.0072		
鼎鑫 2023 年 3 月	48.9	12	-2.3040	-2.3500	-0.0184		
		13	-2.0540	-2.0570	-0.0012		
		14	-2.0270	-1.9660	0.0244		
		15	-2.0730	-2.0120	0.0244	≤0.06	≤0.04
		16	-1.6370	-1.5490	0.0352		
		17	-1.6210	-1.6330	-0.0048		
鼎鑫 2024 年	35~50	18			0.046		
		19			0.051		
		20			0.035		
		21			0.041		
		22			0.038		
		23			0.055		
		24			0.034		
		25			0.039		
		26			0.032		
		27			0.052		
		28			0.036		
		29			0.055		
		30			0.046		
		31			0.055		
		32			0.056		

	33			0.043		
	34			0.042		
	35			0.070		
	36			0.070		
	37			0.056		
	38			0.040		
	39			0.06		
	40			0.044		
	41			0.041		
	42			0.061		
	43			0.042		
	44			0.04		

表 16 鼎鑫工厂测试结果

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	14d 线膨胀率
37.586	34.39836	6.7781	10.9744	0.060
				0.044
				0.041
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	0.061
27.83	45.20	6.03	11.13	0.042
				0.040

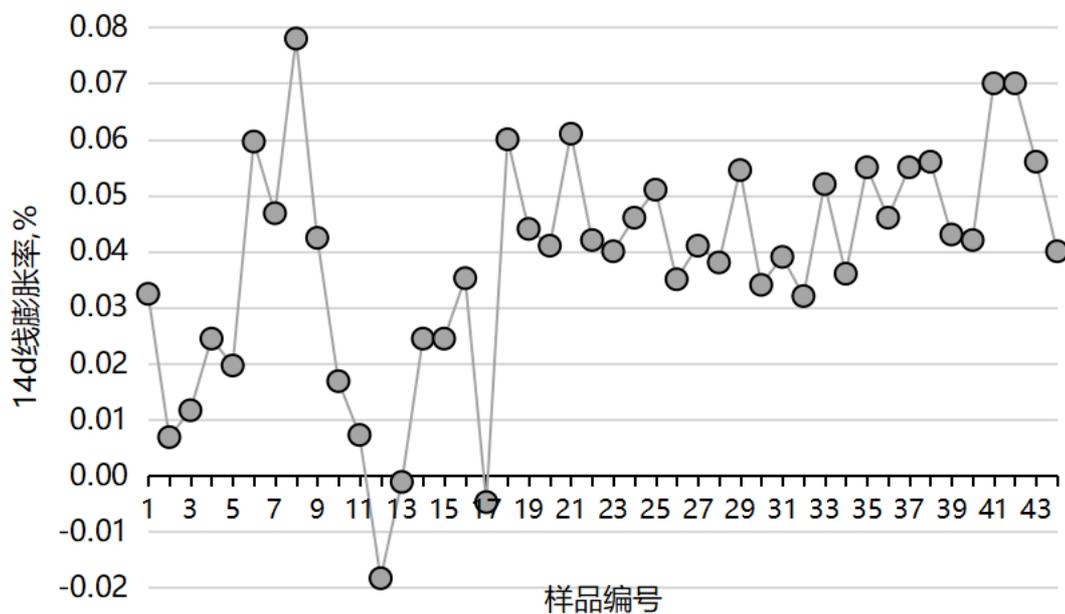


图 12 高活性贝利特硅酸盐水泥熟料样品 14d 线膨胀率测试结果

(五) 高活性贝利特硅酸盐水泥混凝土性能

水泥作为混凝土的原材料，对混凝土的性能有重要影响，本标准研制过程中开展了大量的高活性贝利特硅酸盐水泥混凝土试验，为高活性贝利特硅酸盐水泥熟料制备的各品种高活性贝利特硅酸盐水泥产品的工程应用提供支撑。

采用高活性贝利特硅酸盐水泥熟料生产的各品种高活性贝利特硅酸盐水泥配制的C15~C00强度等级混凝土相比普通硅酸盐水泥混凝土具有更好的工作性和工作性经时保持能力，同时具有较高的抗压强度、抗折强度、轴心抗压强度、弹性模量，尤其在高强度等级的混凝土中，强度优势更明显，轴心抗压强度和抗压强度比值较大。高活性贝利特硅酸盐水泥混凝土具有更好的抗渗性、抗氯离子渗透性能、抗硫酸盐侵蚀和抗冻融性能，抗碳化性能，抗开裂性能，收缩与徐变小，碱骨料反应膨胀低，是打造绿色低碳基础设施的优秀胶凝材料。

表17 高活性贝利特硅酸盐水泥配制的C30-C100强度等级混凝土的配合比, kg/m³

标号	水胶比	总胶材	水	水泥	粉煤灰	矿粉	硅灰	石粉	外加剂	河砂	石子
C30	0.46	360	166	180	70	90	0	20	6	904	1020
C40	0.40	400	159	234	70	70	0	26	7	906	1000
C50	0.32	500	158	288	90	90	0	32	8	870	944
C60	0.28	560	158	324	80	80	40	36	9	836	912
C70	0.26	600	156	360	100	60	40	40	10	814	938
C80	0.24	640	156	396	100	60	40	44	12	781	895
C90	0.24	630	153	430	90	60	50	0	14	784	885
C100	0.20	670	136	450	90	70	60	0	16	819	875



图 13 新拌高活性贝利特水泥混凝土工作性测试

表 17 给出了采用硅酸二钙含量 70%左右的高活性贝利特硅酸盐水泥配制的 C30~C100 强度等级混凝土的配合比，为了和普通水泥混凝土进行对比，不同强度等级的高活性贝利特

水泥混凝土的水泥用量、掺合料用量以及胶凝材料总量与普通水泥混凝土相同。图 13 为新拌高活性贝利特水泥混凝土工作性测试过程。图 14 为新拌混凝土塌落度损失测试结果。从图 14 可以看出：新拌混凝土在两个小时内的塌落损失非常小，并保持了相当好的流动性能。



初始

1 小时

2 小时

塌落度 270mm/流动度 720mm

塌落度 275mm/流动度 620mm

塌落度 265mm/流动度 585mm

图 14 新拌高活性贝利特水泥混凝土工作性损失测试

表18显示了C30~C100强度等级混凝土3d、7d、14d、28d、56d、91d、180d的抗压强度测试结果。从图3可以看出：除了C30混凝土因外加剂掺量很低导致塌落度较小之外，其它标号的混凝土的工作性都表现出高塌落度、大流动度特点。所有强度等级的混凝土的早期强度都能满足传统施工进度要求，28天抗压强度都超出了设计强度指标。另外，C30强度等级的混凝土28天抗压强度达到了C40混凝土的强度设计要求；C40混凝土达到了C50混凝土的强度设计要求；C50混凝土达到了C60混凝土的强度设计要求；C60混凝土达到了C70混凝土的强度设计要求；C70混凝土达到了C80混凝土的强度设计要求。因此，以每个标号单方混凝土市场价格增加20元计算，相同配合比的单方高活性贝利特水泥混凝土可以比普通混凝土多创造20元的利润，经济效益显著。

表 18 高活性贝利特水泥混凝土物理力学性能测试结果

强度等级	塌落度,mm	扩展度,mm	抗压强度,MPa					
			3d	7d	14d	28d	56d	91d
C30	175	450×460	20.5	32.4	40.5	49.7	55.3	62.5
C40	215	480×480	20.7	33.6	40.6	55.9	60.1	64.4
C50	255	590×580	27.4	40.1	50.8	65.1	71.1	77.2
C60	255	650×630	35.5	53.5	62.4	79.9	87.5	95.0
C70	275	670×660	34.4	55.6	66.6	88.2	92.0	95.7
C80	280	690×710	38.1	58.4	76.8	89.2	90.1	94.3
C90	270	730×720	37.1	56.9	74.4	97.8	102.4	107.0

C100	275	740×730	35.8	57.9	77.7	101.4	103.7	106.0
------	-----	---------	------	------	------	-------	-------	-------

表19给出了采用平泉冀东水泥厂生产的高活性贝利特硅酸盐水泥熟料(C₂S~35%)生产的PO52.5高活性贝利特硅酸盐水泥配制的C30~C90强度等级混凝土的配合比。表20给出了1d、3d、7d、14d、28d、56d和99d七个龄期的强度测试结果。从表19可以看出，PO52.5高活性贝利特硅酸盐水泥混凝土具有很好的早期强度，完全满足现代混凝土施工进度要求；28d强度全部超过相应的设计指标，且长龄期强度保持强劲增长。

表19 C30~C90强度等级高活性贝利特硅酸盐水泥（PO52.5）混凝土配合比，kg/m³

No.	W/B	总胶材	水	水泥	粉煤灰	矿粉	硅灰	PCEster	PCEther	河砂	石子
C30	0.47	360	169	200	80	80		0.89		818	1083
C40	0.42	390	164	240	70	80		1.19		809	1083
C50	0.33	480	158	280	100	100		1.63		788	1028
C60	0.29	530	154	320	80	80	50	1.49	4.46	755	1009
C70	0.26	580	151	370	80	80	50	2.97	2.08	737	991
C80	0.25	600	150	420	60	60	60	2.97	3.27	744	972
C90	0.21	680	143	480	60	60	80	2.97	3.86	719	936

表20 C30~C90强度等级高活性贝利特硅酸盐水泥（PO52.5）混凝土强度，MPa

No.	1d	3d	7d	14d	28d	56d	99d
C30	8.3	18.1	27.9	36.4	42.2	47.7	54.4
C40	11.3	23.4	35.0	44.9	49.7	56.6	61.3
C50	18.9	35.7	49.2	56.9	62.8	71.5	76.5
C60	25.2	45.8	59.7	72.8	73.8	91.4	96.5
C70	28.7	48.7	61.8	73.7	76.9	87.8	96.0
C80	31.6	53.5	67.4	80.2	92.8	95.2	104.9
C90	42.8	61.4	77.9	89.1	95.3	104.2	120.6

表21给出了采用河北金隅鼎鑫水泥厂生产的高活性贝利特硅酸盐水泥熟料(C₂S~47%)生产的PI52.5高活性贝利特硅酸盐水泥制备的C30~C100强度等级混凝土的配合比。表22给出了标准养护条件下1d、3d、7d、14d、28d、56d、91d、180d、360d九个龄期的强度测试结果。从表22可以看出，PI52.5高活性贝利特硅酸盐水泥混凝土具有很好的早期强度，完全满足现代混凝土施工进度要求；28d强度全部超过相应的设计指标，且长龄期强度保持强劲增长。

表21 C30~C100强度等级高活性贝利特硅酸盐水泥（PI52.5）混凝土配合比，kg/m³

No.	W/B	水	高贝 PI	粉煤灰	矿粉	硅灰	减水剂-1	减水剂-2	河砂	白云岩
C30	0.47	169	180	100	80	0	0.00	0.72	818	1077
C40	0.42	164	230	80	80	0	0.00	1.15	812	1077
C50	0.33	158	260	110	110	0	1.43	0.86	789	1023

C60	0.29	154	300	90	90	50	2.14	1.43	759	1005
C70	0.26	151	350	90	90	50	2.86	1.43	740	987
C80	0.25	150	400	70	70	60	2.86	1.15	744	969
C90	0.21	143	450	80	80	70	4.86	0.86	720	933
C100	0.18	126	500	60	60	80	5.71	2.00	733	951

表22 C30~C90强度等级高活性贝利特硅酸盐水泥（PI52.5）混凝土强度，MPa

No.	1d	3d	7d	14d	28d	56d	91d	180d	360d
C30	6.6	20.7	32.9	40.8	49.3	51.4	54.2	58.2	64.8
C40	11.5	23.3	41.8	51.7	58.8	63.5	65.4	71.3	75.2
C50	16.8	45.1	56.8	64.4	72.2	74.6	75.0	83.0	84.2
C60	20.3	47.4	58.3	68.8	72.5	73.6	74.1	77.5	90.8
C70	29.1	58.7	66.7	73.4	80.3	83.6	87.0	97.4	103.0
C80	32.7	59.6	74.3	83.1	87.4	89.3	87.5	95.6	101.2
C90	53.1	71.8	87.7	98.9	104.4	105.3	107.9	110.6	112.8
C100	60.4	79.1	99.4	110.5	115.1	114.1	118.7	128.9	139.6

表23给出了采用河北金隅鼎鑫水泥厂生产的高活性贝利特硅酸盐水泥熟料(C₂S~47%)生产的PO52.5高活性贝利特硅酸盐水泥制备的C30~C100强度等级混凝土的配合比。表24给出了标准养护条件下1d、3d、7d、14d、28d、56d、91d、180d、360d九个龄期的强度测试结果。从表24可以看出，PO52.5高活性贝利特硅酸盐水泥混凝土具有很好的早期强度，完全满足现代混凝土施工进度要求；28d强度全部超过相应的设计指标，且长龄期强度保持强劲增长。

表23 C30~C100强度等级高活性贝利特硅酸盐水泥（PO52.5）混凝土配合比，kg/m³

No.	W/B	水	高贝 PO425	粉煤灰	矿粉	硅灰	HRWR-1	HRWR-2	河砂	白云岩
C30	0.47	169	200	80	80		0.000	1.418	818	1083
C40	0.42	164	240	70	80		0.000	1.891	809	1083
C50	0.33	158	280	100	100		0.000	3.151	788	1028
C60	0.29	154	320	80	80	50	1.891	1.261	755	1009
C70	0.26	151	370	80	80	50	2.206	1.891	737	991
C80	0.25	150	420	60	60	60	2.521	1.891	744	972
C90	0.21	143	480	60	60	80	2.836	3.624	719	936
C100	0.19	133	520	50	50	80	5.357	5.042	715	954

表24 C30~C100强度等级高活性贝利特硅酸盐水泥（PO52.5）混凝土强度，MPa

No.	3d	7d	14d	28d	56d	91d	180d	360d
C30	21.7	36.3	46.3	55.2	59.0	62.9	70.7	74.0
C40	27.4	41.4	54.3	62.0	68.6	71.8	79.2	79.9
C50	39.6	48.8	69.0	77.0	80.3	87.4	89.2	94.2

C60	41.5	59.0	71.8	83.3	86.3	91.5	94.6	98.0
C70	45.9	64.8	76.8	88.2	89.8	91.2	94.1	98.4
C80	50.9	68.4	78.7	91.0	91.9	93.4	98.0	105.0
C90	64.0	79.1	92.4	97.3	105.3	106.2	114.0	112.1
C100	73.7	91.5	99.7	103.9	111.0	114.6	117.2	125.2

三、 产业化情况、推广应用论证和预期达到的经济效果等情况

北京金隅集团以高活性贝利特硅酸盐水泥规模化量产为目标，以京津冀为核心，打造辐射东北、华北、西北、西南广大区域的绿色低碳通用硅酸盐水泥产品体系；以高活性贝利特水泥为基础，开发高附加值下游产品，包括核电工程、水电工程、海洋工程、油气工程、低热工程等专用水泥。

目前，高活性贝利特水泥已经广泛用于各类工业与民用基础设施建设工程领域。例如，在河北金隅鼎鑫水泥有限公司矿山重载卡车道路工程项目应用结果显示：在空气温度 41℃，地表温度 60℃ 左右，无任何夏季高温施工措施条件下，实现高活性贝利特水泥混凝土路面裂纹数量为零，而普通水泥混凝土路面贯穿裂纹数量为 25 条。一年后，高活性贝利特水泥混凝土路面仍然没有裂纹，而普通水泥混凝土路面已经开裂很严重。同时，高活性贝利特水泥混凝土路面展示了优秀耐磨性能，而普通水泥混凝土路面已经大面积露出骨料。

中广核固安冷杀菌项目建设 2 套 10MeV/2mA 电子直线加速器屏蔽体，其设计突出特点为：墙体 A 厚度 2.60m，长度 14m，高度 6m 与 1.6m 厚顶板一体化浇筑；墙体 B 厚度 1.5m，长度 45m，高度 6m 与 1.6m 厚顶板一体化浇筑，采用 C30 强度等级高活性贝利特水泥混凝土。两个月后，现场观察没有一条裂缝。

北京中建八局华海清科集成电路高端装备研发与产业化项目，C40P12 高活性贝利特水泥混凝土在以长-高-厚为特征的墙体施工工程中的应用。其中，墙体 A 厚度 50cm，长度 40m，高 2m；墙体 B 厚度 50cm，长 60m，高 2m，与 30cm 厚顶板一体化浇筑。C40P12 冬施混凝土配合比为：水：水泥：粉煤灰：矿粉：砂子：石子：外加剂=165:297:69:65:762:1054:8.6；C40P12 冬施混凝土 7d 强度 37.2MPa，裂纹数量降低 92%，且为无害裂纹。

C40 强度等级高活性贝利特水泥混凝土在北京轨道交通地铁 6 号线以长-高-厚为特征的墙体施工工程中应用。其中，墙体厚度 80cm，长度 398m，高 5m，墙体顶板一体化浇筑，混凝土施工量约 1000 方。新拌混凝土具有很好的流动性和稳定性，2 小时无塌落度经时损失，强度达到设计要求，抗开裂性能显著优于同条件下的普通水泥混凝土和掺加钙镁膨胀剂的普通水泥混凝土，降低了单方混凝土成本和修补成本。

远景零碳技术（赤峰）有限公司 152 万吨/年零碳氢氨项目（一期）采用 C50 P8 高活性贝利特水泥混凝土在滑模混凝土施工工程中应用。滑模泵送施工混凝土量 1.4 万立方米，使

用 P042.5 高活性贝利特水泥约 4000 吨。按施工要求新拌混凝土 15 小时无工作性损失，实测混凝土强度和抗渗等级超过设计要求。

另外，高活性贝利特硅酸盐水泥及混凝土已经在大兴机场跑道工程，北京副中心管廊工程，京张高铁八达岭隧道工程，咸阳机场跑道工程等大型重点工程领域以及普通工业与民用建筑领域得到越来越广泛的应用。

高活性贝利特水泥不仅具有高强度特征，而且具有水化热更低、抗裂性更强、耐久性更好、碳足迹更小等特点，可以完全替代普通硅酸盐水泥用于生产低碳足迹的高性能混凝土，用于建设各种使用环境条件下的低碳基础设施工程。

高活性贝利特水泥产业化推广实施后，具有非常可观的经济效益、社会效益和生态效益。与生产普通水泥熟料相比，以年产 7.5 亿吨高活性贝利特硅酸盐水泥熟料计算，可以减少标准煤用量高达 1170 万吨，节约成本 187 亿元；降低碳排放高达 7500 万吨，节约 44 亿元；处置钢渣等固废 1.13 亿吨，节约处置费用 17 亿元；使用低品位石灰石约 8.5 亿吨，节约成本 255 亿元；综合节约成本高达 503 亿元。

金隅集团通过打造以高活性贝利特水泥为基础的绿色低碳水泥及混凝土产业链，践行“宜业尚品、造福人类”行业发展目标，引领中国水泥与混凝土行业实现从“灰色”向“绿色”的范式转换，助力实现国家“双碳”战略目标。

随着高活性贝利特硅酸盐水泥熟料标准的制定和实施，水泥生产量和使用量将会有迅速的发展。高活性贝利特硅酸盐水泥熟料可以规模化或完全替代普通硅酸盐水泥熟料用于生产各种类型通用硅酸盐水泥产品和特种硅酸盐水泥产品，广泛用于各种工业与民用建筑、市政路桥、轨道交通、水电、核电、海工、油气、地热等工程领域，使用价值和使用效果远远大于普通硅酸盐水泥，其推广应用对行业和社会发展具有显著的促进作用。

表 25 高活性贝利特硅酸盐水泥熟料产能分布

落地企业	生产线规模
河北金隅鼎鑫水泥有限公司	2500t/d
平泉冀东水泥有限公司	3200t/d
江津冀东水泥有限责任公司	3200t/d
陕西冀东海德堡（泾阳）水泥有限公司	5000t/d
唐山冀东水泥三友有限公司	2500t/d
唐山冀东水泥有限公司二分厂	5000t/d
产能合计	约 1000 万吨高活性贝利特熟料。

四、 采用国际标准和国外先进标准情况，与国际、国外同

类标准水平的对比情况,国内外关键指标对比分析与测试的国外样品、样机的相关数据对比情况

目前国内外尚无高活性贝利特硅酸盐水泥熟料标准。

五、 本标准与现行的相关法律、法规、规章及相关标准（包括强制性标准）是否具有一致性

经过广泛调研和多方征求意见,本标准符合现行的相关法律、法规、规章和相关标准的要求。

目前国内外还未有高活性贝利特硅酸盐水泥熟料的相应标准。经过与国内其他标准的比较(见表26, 27, 28),本标准根据高活性贝利特硅酸盐水泥熟料的特性,在各品种高活性贝利特硅酸盐水泥熟料特殊化学成分要求和计算方法、f-CaO含量、碱含量、三氧化硫(质量分数)含量、水泥样品制备、细度控制、凝结时间、水化热、抗硫酸盐性能、强度标号、抗压与抗折强度指标等方面做出了新的规定,体现出本标准的技术先进性。

表 26 本标准与 GB/T21372-2024《硅酸盐水泥熟料》标准对比情况

项目	GB/T 21372《硅酸盐水泥熟料》	本团体标准	备注
熟料品种分类	无“高活性贝利特硅酸盐水泥熟料”	六个以高活性贝利特矿物为特征的硅酸盐水泥熟料品种	
特殊化学成分要求	不同品种的硅酸盐水泥熟料规定硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙和铁铝酸四钙含量以及硅酸钙总含量(≥66%)。	不同品种的高活性贝利特硅酸盐水泥熟料规定硅酸二钙、铝酸三钙和铁铝酸四钙含量以及硅酸钙总含量(≥70%)，没有规定硅酸三钙含量。	
矿物组成计算方法	理论化学反应计算	以 X-射线衍射分析结合 Rietveld Refinement 定量精修为主，以理论化学计算为辅。	
f-CaO	≤1.5%	≤1.0%	
三氧化硫含量	SO ₃ ≤1.5%	2.0%≤SO ₃ ≤3.0%	
碱含量	≤0.6% 或由供需方协商	不规定，但销售时要标注或由供需方协商	
样品制备要求	熟料破碎后全部通过 5mm 方孔筛，水泥样品 SO ₃ 含量(质量分数)应在 2.0%~2.5%范围内。	熟料破碎后全部通过 5mm 方孔筛，粉磨过程中添加三异丙醇胺分散剂(化学纯，掺量为十万分之三)，水泥样品 SO ₃ 含量(质量分数)应在 2.5%~3.5%范围内。	
凝结时间	初凝不小于 45min，终凝不大于 390min	对各品种高活性贝利特硅酸盐水泥做了具体规定。	
安定性	沸煮法合格	沸煮法合格	
抗压强度	通用硅酸盐水泥熟料分为 42.5 和 52.5 两个标号； 低碱和道路硅酸盐水泥熟料分为 42.5 和 52.5 两个标号； 中热/低热/中抗/高抗硅酸盐水泥熟料只有 42.5 一个标号。	通用高活性贝利特硅酸盐水泥熟料分为 52.5 和 62.5 两个标号； 道路高活性贝利特硅酸盐水泥熟料分为 52.5 和 62.5 两个标号； 中热/中抗/高抗高活性贝利特硅酸盐水泥熟料分为 52.5 和 62.5 两个标号； 低热高活性贝利特硅酸盐水泥熟料分为 42.5 和 52.5 两个标号。	见各龄期强度对比表
抗折强度	无要求	对 3d、7d、28d 抗折强度都有要求	
细度	80 微米筛余不大于 4% 以比表面积评价，350±10m ² /kg	80 微米筛余不大于 4% 以比表面积评价，350±10m ² /kg	

水化热	只规定了中热硅酸盐水泥熟料和低热硅酸盐水泥熟料 3d 和 7d 的水化热；其中：中热硅酸盐水泥熟料 3d 水化热 $\leq 253\text{J/g}$ ，7d 水化热 $\leq 291\text{J/g}$ ；低热硅酸盐水泥熟料 3d 水化热 $\leq 240\text{J/g}$ ，7d 水化热 $\leq 260\text{J/g}$ 。	规定各品种高活性贝利特硅酸盐水泥熟料 3d、7d 和 28d 的水化热；其中：中热高活性贝利特硅酸盐水泥熟料和低热高活性贝利特硅酸盐水泥熟料 3d 和 7d 水化热都显著低于中热和低热硅酸盐水泥熟料的指标。	
抗硫酸盐	中抗硫酸盐高活性贝利特硅酸盐水泥熟料 14d 线膨胀率应不大于 0.06；高抗硫酸盐高活性贝利特硅酸盐水泥熟料 14d 线膨胀率应不大于 0.04。	无变化	

表 27 高活性贝利特硅酸盐水泥熟料与 GB/T21372-2024 《硅酸盐水泥熟料》强度指标对比

熟料类型	强度等级	抗折强度/MPa			抗压强度/MPa		
		3d	7d	28d	3d	7d	28d
通用高活性贝利特硅酸盐水泥熟料	52.5	≥ 3.5	≥ 5.5	≥ 8.0	≥ 22.0	≥ 35.0	≥ 52.5
	62.5	≥ 4.0	≥ 6.0	≥ 8.5	≥ 25.0	≥ 40.0	≥ 62.5
通用硅酸盐水泥熟料	42.5	---	---	---	≥ 22.0	---	≥ 42.5
	52.5	---	---	---	≥ 27.0	---	≥ 52.5
中抗硫酸盐高活性贝利特硅酸盐水泥熟料	52.5	≥ 3.0	≥ 5.0	≥ 8.0	≥ 20.0	≥ 30.0	≥ 52.5
	62.5	≥ 3.5	≥ 5.5	≥ 8.5	≥ 25.0	≥ 35.0	≥ 62.5
高抗硫酸盐高活性贝利特硅酸盐水泥熟料	52.5	≥ 3.0	≥ 5.0	≥ 8.5	≥ 15.0	≥ 30.0	≥ 52.5
	62.5	≥ 3.5	≥ 5.5	≥ 9.0	≥ 20.0	≥ 35.0	≥ 62.5
抗硫酸盐硅酸盐水泥熟料	42.5	---	---	---	≥ 15.0	---	≥ 42.5
道路高活性贝利特硅酸盐水泥熟料	52.5	≥ 3.5	≥ 6.0	≥ 8.5	≥ 20.0	≥ 35.0	≥ 52.5
	62.5	≥ 4.0	≥ 6.5	≥ 9.0	≥ 25.0	≥ 40.0	≥ 62.5
道路硅酸盐水泥熟料	42.5	---	---	---	≥ 20.0	---	≥ 42.5
	52.5	---	---	---	≥ 25.0	---	≥ 52.5
中热高活性贝利特硅酸盐水泥熟料	52.5	≥ 3.5	≥ 5.5	≥ 8.0	≥ 15.0	≥ 30.0	≥ 52.5

	62.5	≥4.0	≥6.0	≥8.5	≥20.0	≥35.0	≥62.5
中热硅酸盐水泥熟料	42.5	---	---	---	≥12.0	---	≥42.5
低热高活性贝利特硅酸盐水泥熟料	42.5	≥2.5	≥5.0	≥8.0	≥12.0	≥25.0	≥42.5
	52.5	≥3.0	≥5.5	≥8.5	≥15.0	≥30.0	≥52.5
低热硅酸盐水泥熟料	42.5	---	---	---	---	---	≥42.5

表28 各品种高活性贝利特硅酸盐水泥熟料与GB21372-2024《硅酸盐水泥熟料》的水化热指标对比

熟料类型	水化热/J/g		
	3d	7d	28d
通用高活性贝利特硅酸盐水泥熟料	≤270	≤320	≤400
通用硅酸盐水泥熟料	---	---	---
中抗硫酸盐高活性贝利特硅酸盐水泥熟料	≤240	≤300	≤360
中抗硫酸盐硅酸盐水泥熟料	---	---	---
高抗硫酸盐高活性贝利特硅酸盐水泥熟料	≤230	≤280	≤340
高抗硫酸盐硅酸盐水泥熟料	---	---	---
道路高活性贝利特硅酸盐水泥熟料	≤260	≤320	≤380
道路硅酸盐水泥熟料	---	---	---
中热高活性贝利特硅酸盐水泥熟料	≤220	≤270	≤340
中热硅酸盐水泥熟料	≤253	≤291	---
低热高活性贝利特硅酸盐水泥熟料	≤200	≤240	≤300
低热硅酸盐水泥熟料	≤240	≤260	---

六、 重大分歧意见的处理经过和依据

无

七、 标准性质的建议说明

由于目前高活性贝利特硅酸盐水泥已经处于规模化生产和推广应用期,生产和使用数量将很快达到年产熟料3000万吨以上规模,建议本标准为强制性标准。

八、 贯彻标准的要求和措施建议（包括组织措施、技术措施、过渡办法、实施日期等）

本标准颁布后,建议由标准主要起草单位和建材行业主管部门共同组织相关生产、研究、检验等单位开展标准宣贯工作。

九、 废止现行相关标准的建议

无

十、 其它应予以说明的事项

无