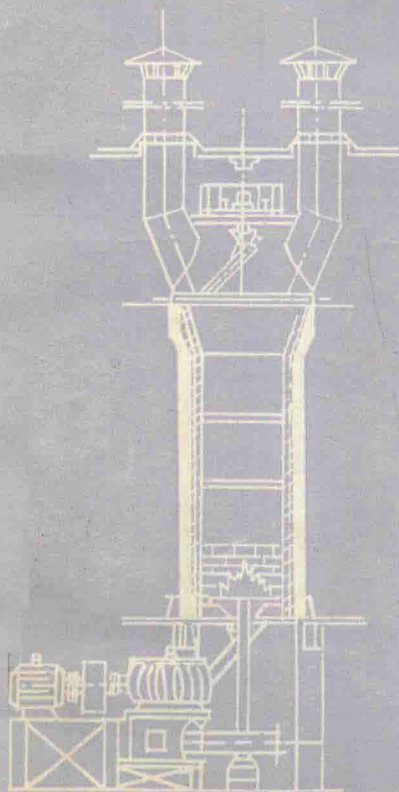


立窑水泥技术

下册



浙江省水泥协会编印

前 言

我国水泥工业迅速发展，水泥企业深化改革，“双增双节”运动正在深入展开，地方水泥厂迫切需要进一步提高技术水平、管理水平和企业的经济效益。为了适应这一新形势发展的需要，更好地为水泥行业服务，我协会组织有较高理论水平和实践经验的教授、工程师编写《立窑水泥技术》一书。他们参阅和收集了大量国内外立窑水泥技术资料以及技术革新和科研成果，并参考了国内其他行业适用于立窑生产的技术资料，如冶金行业的成球技术等。因此，本书内容丰富，理论与实践结合紧密，不仅适用于地方水泥企业，亦可作技术培训教材，对于大中型水泥厂、大专院校和科研单位也有参考价值。

《立窑水泥技术》原分上、中、下三册，现改为上、下两册。

上册主要内容为水泥原料与燃料、配料与配煤、生料均化、生料成球及煅烧原理与方法等，共六章；

下册主要内容为立窑结构、立窑操作、立窑工艺设计基本知识、工艺计算及热平衡、水泥生产质量控制及提高立窑生产水平的技术途径等。

原拟下册主要内容为原料破碎与烘干、生料制备及水泥粉磨等。现因纸价猛涨，印刷成本太高，暂不出版，待条件具备时再出单行本，特向读者致以歉意！

参加本书编写人员是：

编写：王大年、徐先宇、霍恩光、曹永珩同志。

主编：浙江省建材工业总公司工程师王大年同志。
责任编辑：《浙江水泥》总编曹永珩同志。
技术校对：《浙江水泥》编委孟镇菲同志。
技术设计：《浙江水泥》编辑部袁啸谷同志。

在本书编写过程中，受到水泥协会理事会的重视与支持，得到有关单位和个人的很多支持和帮助，特致谢意。由于我们水平所限，时间短促，书中缺点和错误在所难免，恳切希望读者提出批评指正。

1989年5月

《立窑水泥技术》

目 录

第七章 水泥熟料的低温烧成	(1)
第一节 掺用 CaF_2 和 CaSO_4 形成的化合物	(3)
一、在正常烧成条件下形成的主要矿物	(3)
二、低温烧成的早期研究成果	(6)
三、 $\text{CaO}-\text{C}_2\text{S}-\text{CaF}_2-\text{CaSO}_4$ 系统在不同温度下的相图	(10)
第二节 生料煅烧的物理化学反应和矿物生成过程	(12)
一、低温烧成的硅酸盐水泥熟料与普通硅酸盐水泥熟料化学成分的主要差异	(12)
二、全面考察 CaF_2 和 CaSO_4 作用应注意的问题	(15)
三、实例分析	(19)
第三节 低温烧成熟料的矿物组成和率值	(21)
一、低温烧成熟料的矿物	(21)
二、矿物的水化和强度	(21)
三、水泥熟料的化学组分	(23)
四、矿物组成的计算	(28)
五、 a 值计算	(28)
六、萤石、石膏参加量的选定	(29)

第四节	低温烧成时熟料形成和性能	(30)
一、	低温烧成熟料的强度	(31)
二、	低温烧成熟料中的过渡相	(34)
三、	早强矿物对水泥性能的影响	(47)
四、	低温烧成熟料中含铝矿物的形成和相互关系	(54)
五、	F_2 、 SO_3 对硅酸盐水泥熟料凝结的影响	(58)
第五节	低温烧成熟料的配料计算	(65)
第六节	低温烧成熟料的生产工艺	(69)
一、	生产工艺流程	(73)
二、	原、燃料	(73)
三、	生料的制备	(73)
四、	熟料的煅烧	(74)
第八章	立窑的结构	(88)
第一节	立窑的类型及卸料装置的结构	(88)
一、	普通立窑	(88)
二、	机械立窑	(90)
第二节	立窑的窑体结构	(104)
一、	窑身	(104)
二、	立窑的筒体	(106)
第三节	窑罩及加料装置	(115)
第四节	卸料密封装置	(118)
一、	密封装置的作用	(118)
二、	三道闸门密封装置	(118)
三、	料封密封装置	(119)
第五节	立窑的鼓风机	(133)

一、立窑的通风特点及气流运动·····	(133)
二、立窑的鼓风方式及风管敷设·····	(136)
三、鼓风机·····	(139)
第六节 排烟与除尘·····	(159)
一、烟气的排放·····	(159)
二、立窑烟气的除尘·····	(161)
第九章 立窑操作 ·····	(173)
第一节 烘窑与点火·····	(179)
一、烘窑·····	(179)
二、点火·····	(181)
第二节 煅烧操作方法·····	(184)
一、明火操作·····	(184)
二、暗火操作·····	(185)
第三节 正常煅烧操作·····	(186)
一、加料与卸料·····	(186)
二、判断底火·····	(189)
三、稳定底火·····	(192)
四、停窑操作·····	(196)
五、开窑操作·····	(197)
第四节 不正常情况的处理·····	(197)
一、中间火深·····	(197)
二、偏火·····	(199)
三、垮边(或称塌边)、塌窑·····	(206)
四、龛火·····	(208)
五、炼边、结圈·····	(210)
六、架窑·····	(212)
第五节 立窑喷火事故的预防·····	(213)

一、喷火事故产生的原因·····	(214)
二、喷火事故的预防·····	(215)
第十章 水泥生产的质量控制·····	(218)
第一节 质量控制点的确定与控制图表·····	(220)
第二节 原料、燃料的质量控制·····	(226)
一、石灰石的质量控制·····	(226)
二、粘土质原料的质量控制·····	(229)
三、铁质原料的质量控制·····	(230)
四、石膏及萤石的质量控制·····	(230)
五、燃料的质量控制·····	(231)
六、混合材的质量控制·····	(233)
第三节 生料的质量控制·····	(238)
一、入磨物料配比的质量控制·····	(238)
二、出磨生料的质量控制·····	(239)
三、生料成分波动的原因及调整方法·····	(245)
四、入窑生料的质量控制·····	(249)
第四节 几种配料调整方法的比较·····	(253)
一、单调整石灰石的方法·····	(255)
二、单调整粘土的方法·····	(260)
三、同时调整石灰石和粘土的方法·····	(263)
四、对三种不同调整方法的比较·····	(264)
第五节 配煤及成球质量的控制·····	(269)
一、生料的配煤·····	(269)
二、生料成球的质量控制·····	(273)
第六节 熟料的质量控制·····	(275)
一、控制项目·····	(275)
二、立窑熟料质量分析·····	(281)

三、影响熟料质量波动的因素及调整方法···	(286)
四、熟料的储存和使用·····	(291)
第七节 出磨水泥的质量控制·····	(292)
一、控制项目·····	(293)
二、制定出磨水泥质量控制指标的依据·····	(297)
三、出磨水泥的管理·····	(300)
第八节 出厂水泥的质量控制·····	(300)
一、决定水泥出厂的依据·····	(301)
二、出厂水泥的均化·····	(304)
三、水泥包装的质量要求·····	(305)
四、散装水泥的质量控制·····	(308)
五、水泥出厂手续·····	(309)
六、水泥出厂后的服务及质量事故的处理···	(310)
第十一章 工艺计算及热平衡 ·····	(313)
第一节 立窑的工艺计算·····	(313)
一、风量·····	(313)
二、风压·····	(314)
三、立窑的扩大口·····	(315)
四、立窑的直径和高度·····	(317)
五、立窑的生产能力·····	(318)
第二节 热工测定的目的及项目·····	(319)
一、热工测定的目的和方法·····	(319)
二、热平衡体系·····	(320)
三、热平衡测量方案·····	(321)
第三节 立窑的热工测定·····	(324)
一、烟气部分的测量·····	(324)
二、窑面部分的测量·····	(331)

三、窑内部分的测量·····	(335)
四、窑下部分的测量·····	(339)
五、物理、化验分析部分的测定·····	(341)
第四节 机立窑的热平衡计算·····	(345)
一、单项计算·····	(345)
二、全窑物料平衡·····	(349)
三、全窑热平衡·····	(350)
第五节 机立窑热平衡计算实例·····	(358)
一、测量项目与采样周期·····	(358)
二、立窑系统设备情况·····	(360)
三、热工测量数据情况汇总·····	(362)
四、物料平衡计算·····	(366)
五、热平衡计算·····	(367)
六、综合分析意见·····	(367)
第六节 主要技术指标对比分析·····	(369)
一、产量·····	(369)
二、质量·····	(370)
三、热耗·····	(370)
四、入窑物料·····	(370)
五、过剩空气系数 α ·····	(371)
六、立窑断面风速和窑内料层阻力·····	(371)
七、鼓风机放风率和卸料装置的漏风率·····	(371)
八、窑面各点料球含煤量·····	(371)
第十二章 水泥厂工艺设计基本知识 ·····	(372)
第一节 工厂总图布置·····	(372)
一、工厂总平面图的设计内容和设计步骤·····	(373)
二、工厂总平面图的设计要求·····	(376)

三、厂内运输·····	(378)
四、立窑水泥厂总平面图布置实例·····	(380)
第二节 工艺设计原则、程序和工艺平衡计算·····	(384)
一、工艺设计的基本原则和程序·····	(384)
二、工艺平衡计算·····	(389)
第三节 车间的工艺布置·····	(403)
一、厂房布置·····	(404)
二、设备布置·····	(407)
三、立窑车间的工艺布置·····	(409)
四、立窑水泥厂的主要配套设备和技术经济 指标·····	(412)
第十三章 提高立窑生产水平的技术途径·····	(417)
第一节 当前立窑生产中存在的问题·····	(417)
一、熟料质量不稳定不均匀·····	(417)
二、熟料游离石灰高, 水泥安定性周期长·····	(418)
三、能耗仍较高, 潜力还很大·····	(418)
四、工艺装备落后, 劳动生产率低·····	(419)
五、生产控制手段落后, 人员素质和操作水 平低·····	(419)
六、粉尘污染严重·····	(419)
第二节 重视原、燃料的预均化·····	(420)
一、搭配预均化法·····	(421)
二、平铺切取预均化法·····	(421)
三、仓式预均化法·····	(422)
四、组状预均化圆库·····	(425)
五、倒库预均化·····	(425)
六、大直径石灰石库方案·····	(426)

第三节	狠抓生料质量·····	(428)
第四节	大力推广复合矿化剂 合理选择熟料率 值·····	(429)
一、	选择合适的生料成分·····	(429)
二、	矿化剂掺量要准确均匀·····	(429)
三、	要注意熟料成分的 CaF_2/SO_3 比以及 $\text{CaF}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比的控制 ·····	(430)
四、	及时测定和控制 CaF_2 和 SO_3 含量·····	(430)
五、	立窑的煅烧操作要适应快烧急冷的要 求·····	(430)
第五节	合理与准确配煤·····	(430)
一、	立窑对燃料的要求·····	(430)
二、	配煤方式·····	(431)
三、	煤的颗粒大小的影响·····	(432)
四、	配煤量·····	(433)
五、	配煤工艺·····	(434)
第六节	预加水成球·····	(435)
一、	预加水成球工艺特点·····	(436)
二、	预加水成球的优点·····	(436)
三、	预加水成球系统的工艺流程·····	(437)
四、	预加水成球过程·····	(440)
五、	微机自动控制系统·····	(442)
六、	注意的问题·····	(442)
第七节	改造立窑扩大窑径·····	(445)
一、	适当扩大窑径·····	(445)
二、	选择适当的扩大口角度·····	(449)
三、	加强窑体保温·····	(451)

四、卸料篦子的改进·····	(454)
第八节 鼓风系统的改进·····	(457)
一、放风方式·····	(457)
二、改进放风管·····	(457)
三、循环风和放风用电动双联蝶阀控制·····	(458)
四、为了及时调整偏火设置高腰风·····	(461)
五、防治噪音·····	(462)
六、适当调整鼓风机电动机·····	(463)
第九节 仪表控制和闭门操作·····	(465)
一、机立窑的仪表控制·····	(465)
二、微机控制, 闭门操作·····	(470)
第十节 降低热耗的途径·····	(480)
一、立窑的热耗状况·····	(480)
二、降低化学不完全燃烧热损失·····	(481)
三、降低机械不完全燃烧热损失·····	(489)
四、减少其他方面热损失·····	(491)

第七章 水泥熟料的低温烧成

水泥生产是耗能甚多的工业部门之一，其中煅烧熟料约占综合能耗的65%。因此，从节能求增产来确定煅烧问题，是一个全世界普遍关切的问题。

分解技术，是新的熟料烧成技术，是水泥工业上一项引人注目的重大变革，它是在带旋风予热器的回转窑上装上分解炉。在分解炉中的 CaCO_3 分解率提高到80—90%左右，使单位熟料产量高达200—400 t/h。单位熟料热耗下降到3349 KJ/kg (800 kcal/kg)熟料，总的热效率达到55%以上，把 CaCO_3 分解移到窑外，这部份熟料热耗为1800~2051 KJ/kg (430~490 kcal/kg)熟料，即有一半热在窑外供给，回转窑的热工负荷减轻了一半，故生产能力成倍增长。窑的单位容积产量较一般干法、半干法回转窑提高一倍，达到130—150 kg/m³时。但是，此项窑外分解技术，没有改变原材料的物理化学性质，没有降低烧成温度，如果加上旋风筒内表面积或容积，则设备单位面积或容积产量，也并没有大的变化和提

高。理论分析表明，创造高效的煅烧方法，不仅从改进热工设备方面去找，而更重要的要使这个过程的物理化学参数接近最佳值，保证物理化学反应和新矿物形成过程能高速进行。为此，人们作出重大的努力，企图在硅酸盐水泥范畴以外，即在较大程度上去改变水泥的原料和组成，以求降低烧成温度，节约能耗。例如美国加州大学 P. K. Mehta 的高铁水泥的研究，印度学者 V. N. V. Viswanathan 的波色尔水泥的研究，苏联学者 U. B. KPAB eHK 的快硬硫铝酸盐

贝利特水泥的研究,日本福水敏宏的早强水泥的研究,我们建材院、同济大学关于硫铝酸盐水泥和超早强水泥的研究,建材院关于双快抢修水泥、双快型砂水泥的研究,等等,都属于这一类型。这类水泥有一个共同的特点,除使用石灰石以外,还要使用像铝钒土一类的高铝的原料,要使用较多的萤石和石膏,烧成的熟料,除同硅酸盐水泥熟料一样的一些矿物以外,主要生成 $C_{11}A_7 \cdot CaF_2$ 和 $C_4A_3\bar{S}$, 并依靠 $C_{11}A_7 \cdot CaF_2$ 和 $C_4A_3\bar{S}$ 这两种矿物,以获得快凝快硬的特性。这类水泥都有不同程度的弱点,又必须使用高铝原料,使发展和推广受到限制。

硅酸盐水泥是最普遍最主要的水泥品种,对硅酸盐水泥组成或者稍加改变以后,用矿化剂来促进低温烧成,是一种化学活化方法。例如阿利尼特水泥,就是这一类水泥。这是苏联科学家研究的,他们掺用 $CaCl_2$, 使熟料烧成温度下降到 $1000 \sim 1100^\circ C$, 可以节能30%,但在工艺上尚有很多困难难以解决,目前,行之有效的主要是掺加萤石和石膏复合矿化剂。很多年以来,水泥厂曾普遍使用萤石作矿化剂,以提高质量,并获得一定的效果。1966年和1968年W. Gutt对 CaF_2 的作用机理作了研究,发现 CaF_2 与 C_3S 形成复盐 $3(C_3S) \cdot CaF_2$, CaF_2 与 C_2S 形成复盐 $2(C_2S) \cdot CaF_2$, CaF_2 又能置换 $C_{12}A_7$ 中的 CaO 而形成 $C_{11}A_7 \cdot CaF_2$, $2(C_2S) \cdot CaF_2$ 在 $1040^\circ C$ 分解出 C_2S , $3(C_2S) \cdot CaF_2$ 在 $1170^\circ C$ 分解出 C_3S , 而 $C_{11}A_7 \cdot CaF_2$ 本身是水硬性矿物。1968年S. Akaiwa研究了 $3(C_3S) \cdot CaF_2$, 认为组成应为 $11CaO \cdot 4SiO_2 \cdot CaF_2$ 。1979年C. Gilioli又确定组成为 $19CaO \cdot 7SiO_2 \cdot 2CaF_2$, 我国建材院等近来的研究,亦证实此点。与此同时,对 $C_{11}A_7 \cdot CaF_2$ 和 $C_4A_3\bar{S}$ 亦进行了广泛的研究工作,弄清了一些基本规

律。这些研究证明, C_3S 、 $C_{11}A_7 \cdot CaF_2$ 和 $C_4A_3\bar{S}$ 等熟料矿物, 都可以在 $1200^\circ C$ 左右形成, 从而为低温烧成熟料, 提供了主要的理论基础。后来 Copeland 等研制了一种阿利特——氟铝酸钙型水泥, 其中主要矿物 C_3S 为 60%, $C_{11}A_7 \cdot CaF_2$ 为 20%; 在美国等一些国家, 还发展了在硅酸盐水泥中掺加一些 $C_{11}A_7 \cdot CaF_2$, 共同粉磨而获得的水泥, 称“PSC 水泥”, 日本亦发展了含氟的水泥。我国进行 CaF_2 和 $CaSO_4$ 复合矿化剂研究的单位, 有华南工学院、建材研究院、同济大学、河南建材研究所、山东建材研究所及浙江大学等。在机理研究和生产技术研究方面, 都取得了重要进展。低温烧成的硅酸盐水泥熟料, 对硅酸盐水泥组成, 仅稍作改变, 掺用的萤石和石膏为量不多, 生产工艺变动甚少。原料可以不用价昂的铝钒土, 相反, 可以引用大量的粉煤灰、煤渣、煤矸石等, 还可以采用一些劣质煤, 既作为燃料, 又作为原料, 烧成温度为 $1300^\circ C$, 降低 $150-200^\circ C$ 之多, 热耗可以降低 $10-20\%$, 产量可以提高 10% 以上, 水泥标号亦有显著提高。

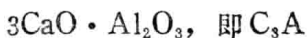
掺用萤石和石膏复合矿化剂的低温烧成水泥熟料新技术, 在一些立窑水泥厂和回转窑水泥厂创造条件, 推广应用和提高, 可以获得更为明显的经济效益, 是一项很有生命力的新技术, 在此, 结合近年来国内的一些研究成果, 着重介绍和讨论这一技术的有关理论问题和应用情况, 为使推动这一技术得到更广泛的应用, 并发挥它更大的作用。

第一节 在 $CaO-Al_2O_3-SiO_2-Fe_2O_3$ 系统中 掺用 CaF_2 和 $CaSO_4$ 形成的化合物

一、 $CaO-Al_2O_3-SiO_2-Fe_2O_3$ 系统, 在正常烧成条件下形

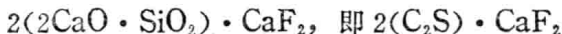
成的主要矿物

$\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{Fe}_2\text{O}_3$ 系统, 在正常的 1450°C 的烧成条件下, 主要形成以下矿物,



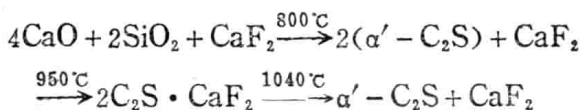
这是大家所熟知的, 近十数年来, 随着新的测试技术的迅速发展, 逐步发现在上述系统中掺加 CaF_2 和 CaSO_4 以后, 形成一些重要的新矿物或过渡性新矿物。

(1) $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{CaF}_2$ 系统, 有二个三元化合物:

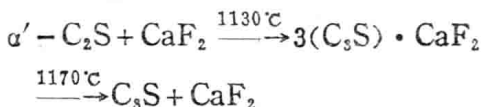


$3(3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2) \cdot \text{CaF}_2$, 即 $3(\text{C}_3\text{S}) \cdot \text{CaF}_2$, 后来进一步的研究, 确认它的实际组成为 $19\text{CaO} \cdot 7\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaF}_2$, 即 $\text{C}_{19}\text{S}_7 \cdot 2\text{CaF}_2$ 。

$2(\text{C}_2\text{S})\text{CaF}_2$ 在 950°C 开始形成, 1040°C 分解

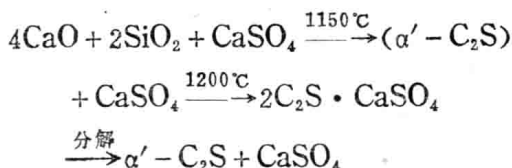


$3(\text{C}_3\text{S}) \cdot \text{CaF}_2$, 亦即 $\text{C}_{19}\text{S}_7 \cdot 2\text{CaF}_2$, 1130°C 开始形成, 1170°C 分解。



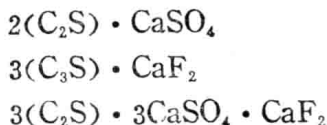
$1190 \sim 1200^\circ\text{C}$ 不一致熔融, 析出 C_3S_{ss} 、 C_2S 和液相, 这实际上使 C_3S 在水泥熟料中的形成温度下降了 $150 \sim 200^\circ\text{C}$ 。

(2) $\text{CaO}=\text{SiO}_2=\text{CaSO}_4$ 系统, 有一个三元化合物: $2\text{C}_2\text{S} \cdot \text{CaSO}_4$ 。



分解温度 1300°C (建材院)或 1298°C (Gutt)或 1289°C (须藤仪一)。此一矿物,水硬性甚差。

(3) $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{CaF}_2-\text{CaSO}_4$ 系统,有三个化合物:



其中 $3(\text{C}_2\text{S}) \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot \text{CaF}_2$, 950°C 开始形成, 1270°C 一致融熔, 1350°C 分解,析出 C_2S 。实验证明 $3(\text{C}_2\text{S}) \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot \text{CaF}_2$ 无水硬性。

(4) $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaF}_2$ 系统,有一个化合物: $\text{C}_{11}\text{A}_7 \cdot \text{CaF}_2$ 1100°C 以前出现, 1450°C 分解为 C_3A 、 CaF_2 和 CA 。

(5) $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaSO}_4$ 系统,有一化合物: $3(\text{CA}) \cdot \text{CaSO}_4$, 即 $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$, 1000°C 形成, 1350°C 分解为 C_3A 和 CaSO_4 。

除此之外,还有二个有限固溶体 $\text{C}_2\text{S}_{\text{ss}}$ 和 $\text{C}_3\text{S}_{\text{ss}}$ 。 $\text{C}_2\text{S}_{\text{ss}}$ 为 C_2S 0.983, CaSO_4 0.017, 即 C_2S 中固溶 CaSO_4 含量为1.35%、 $\text{C}_3\text{S}_{\text{ss}}$ 为 C_3S 0.957, CaF_2 0.043, 相当于 C_3S 中固溶 CaF_2 1.5%。

上面的叙述,可以看到,在 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{Fe}_2\text{O}_3$ 系统中,掺加 CaF_2 和 CaSO_4 以后,形成了一些具有水硬性的矿物,也可能形成某些无水硬性或水硬性甚弱的矿物,同时形成了一些过渡性矿物,如 $\text{C}_{10}\text{S}_7 \cdot 2\text{CaF}_2$, 它促成了 C_3S 在较低温度下形成,又如 $2(\text{C}_2\text{S}) \cdot \text{CaF}_2$, 促成了 C_2S 在更低温