

● 波特兰水泥 与混合水泥 工艺

[印度] H.N.巴纳尔杰 著
徐秀芳 译

中国建筑工业出版社

波特兰水泥与混合水泥工艺

[印度] H. N. 巴纳尔杰 著

徐秀芳 译

中国建筑工业出版社

本书专门介绍水泥生产工艺，言简意赅，提纲挈领，内容实际。作者总结了多年的实践经验，反映了印度的水泥生产技术管理水平。本书不仅简明地介绍了水泥的品种、生产工艺以及波特兰水泥和混合水泥的性能，而且附有若干经验之谈的专题，如石灰石的质量控制，确定生料易烧性的新方法，配料计算的方法，水泥生产中的燃料效率，烧成带耐火砖衬损坏的原因，易烧性对水泥窑耐火砖衬的影响等，这些虽以附录形式列出，但却是很有参考价值的内容。

书中还从化工原理的角度阐述了水泥制造中的单元操作，也是其他书中少见的观点，颇有特色。本书是外文书中专论水泥生产工艺的唯一的一本书，对广大水泥厂的工程技术人员、管理人员以及领导干部均有参考价值，也可供大专院校的师生阅读。

Technology of Portland Cement and Blended Cements

H. N. Banerjea

Wheeler Publishing

First Edition 1980

* * *

波特兰水泥与混合水泥工艺

徐秀芳译

*

中国建筑工业出版社出版发行(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本: 787 × 1092 毫米 1/32 印张: 4½ 字数: 98 千字

1986年12月第一版 1986年12月第一次印刷

印数: 1 - 3,800册 定价: 0.72元

统一书号: 15040·5083

序 言

有关波特兰水泥和混合水泥化学的英文书有三、四种，但没有一本是论述水泥的制造方法，或从化学工程角度阐述生产过程或制造水泥所需的装置和设备的。有两种书介绍装置和设备，但未涉及水泥化学和工艺；还有两本书是阐述装置和设备设计的理论，一本专谈回转窑的操作。可是，这些书中却没有一本全面涉及水泥制造和工艺的。作者曾从事看火工、化学家、化学工程师的基层车间工作，用熟知的生产方法制造过各种水泥，并进行过必要的应用研究，积有四十年的经验，试图在书中尽可能涉及水泥化学和水泥生产工艺，相当广泛地阐述制造水泥的各种方法，以期对关注水泥生产和使用的读者有所裨益。本书简明扼要，必将会得到水泥厂管理生产的工程师、工艺师、工长、看火工长以及化验员的重视。期望本书对水泥厂的所有高级人士，无论是化学工程师、机械工程师、电气工程师、土木工程师、采矿工程师、地质工程师，还是生产管理人员和供销人员，也有参考价值。勿庸置言，本书对必须简要了解建筑水泥的生产和使用原理的化学工程和土木工程系的学生们也是极其有益的。

书中的一些课题也许不是对所有的读者均有参考价值，但对某些人士将会是饶有兴趣的，如单元操作、石灰石开采中的质量控制、生料配比的计算方法、煤的烘干、确定易烧性的方法、水泥生产中的燃料效率、耐火砖损坏的原因、易烧性对耐火砖的影响以及印度水泥的生产与价格，已作附录

列入书内。这些都是作者在不时阅读的论文的基础上修改而成的。

感谢印度水泥研究院和水泥联合有限公司为本书提供图片。还感谢我的老同事——水泥联合有限公司生产部的N. R. Hilloowala先生和J. V. Joshi先生,在本书编写过程中提供宝贵意见。

作者 于孟买

1980年1月1日

目 录

一、水泥的定义及品种	1
二、波特兰水泥化学	7
三、制造波特兰水泥的原料	14
四、原料的制备	18
五、煅烧	25
六、水泥粉磨	36
七、混合水泥	39
八、波特兰水泥和混合水泥的性能	42
附录A 水泥制造中的单元操作	48
附录B 制造波特兰水泥用的石灰石 的质量控制	70
附录C 配料计算的方法	77
附录D 波特兰水泥制造过程中煤的干燥	83
附录E 确定生料易烧性的新方法	88
附录F 波特兰水泥生产中的燃料效率	96
附录G 回转窑烧成带耐火砖衬损坏的原因	106
附录H 易烧性对水泥窑耐火砖衬的影响	110
附录I 印度水泥工业一瞥——过去、现在 及未来	120
附录J 印度水泥的生产与价格	130
参考书目	134

一、水泥的定义及品种

定义

水泥是一种能将两块或两块以上的别的物体连接或粘结成为整体的材料。建筑工业中用的水泥是一种磨细的粉体，掺水后能凝结并硬化，可以将不同的材料或构件粘结成具有机械强度的建筑结构。因此，水泥可用作砖或大小不同的固体颗粒（砌石）的胶结料，使之粘结成整体。本书只讨论建筑工业中用的水泥。建筑业是人类文明中最古老的工业之一。古时候就已经用某种胶凝材料来盖房子。本书只讨论以氧化钙为主要成分的现代胶凝材料。石灰及（或）石灰和粘土的混合物经煅烧或不经煅烧，用于砌筑砖石至少有一千年的历史，而且关于石灰砂浆的凝结和硬化的性能，学者不时地提出各种不同的理论。这些理论如何说明已经研制出的性能改善的水泥，本书因篇幅有限不能作详细的介绍。今天所谓的水泥远在一百五十年前就被研制或发明出来了。英国人J. 阿斯普丁（Joseph Aspdin）于1824年，首先获得了性能得到显著改善的、用于建筑中的胶凝材料的专利权，这种胶凝材料称之为“波特兰水泥”，是因为用他发明的水泥做的坚硬石块很象在英国发现的波特兰石。然而，在此前后，还有一些人也自称研制过类似的水泥，并致力于改善水泥的性能。这些人均采用各自的工艺方法。只是从十九世纪末叶以来，才采用我们今天所熟悉的波特兰水泥制造工艺。

水泥的品种

列入波特兰水泥品种内的各种水泥又称做“水硬性水泥”，因为这类水泥掺水后可以在水中凝结和硬化。这类水泥中最早的品种是水硬性石灰，这种石灰也是加水后能在水中凝结和硬化，而肥石灰却不能在水中硬化。水硬性水泥有许多种，现简要介绍如下⁽¹⁾。

(1)水硬性石灰 很不纯的石灰石在普通的土窑内煅烧，煅烧的石灰经冷却和水化或消解就得到水硬性石灰。石灰石内的粘土杂质可以高达25%，但这些粘土杂质应该均匀分布在石灰石内。粘土内含的二氧化硅、氧化铝和氧化铁在某种程度上与石灰石中的氧化钙化合生成硅酸盐和铝酸盐，这些盐类能使烧出的石灰具有水硬性。

(2)天然水泥 天然水泥也是煅烧不纯的石灰石制成的，但煅烧后经冷却、粉磨和包装。这种水泥的组成比水硬性石灰要求更严格一些，在生产过程中也需要更好地加以控制。但是，目前水硬性石灰和天然水泥的用途已大大减少了。

(3)波特兰水泥 这种水泥系将石灰石和粘土混合的生料粉磨，而后在很高的温度下煅烧成熟料，经冷却并粉磨成细粉。其主要成分是氧化钙、二氧化硅、氧化铝和氧化铁、在粉磨熟料时要加一些石膏。波特兰水泥共分成七种（后面将阐述），但各种水泥的制造方法实际上都是相同的，所不同的只是在化学组成上，因而各有不同的性能。各类波特兰水泥的化学组成的范围列于表1、表2、表3。

波特兰水泥的主要组成是：硅酸三钙 (C_3S)、硅酸二钙 (C_2S)、铝酸三钙 (C_3A) 和铁铝酸四钙 (C_4AF)。这些组成的含量不同就能得到不同品种的水泥，各有不同的性能。波特兰水泥类中这些组成的范围列入表2（在水泥工艺学中

表 1

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	碱
19 ~ 25 %	2 ~ 8 %	0.326 %	60 ~ 65 %	1 ~ 6 %	1 ~ 3 %	0.5 ~ 1.5 %

表 2

C_2S	C_3S	C_3A	C_4AF
20 ~ 60 %	20 ~ 60 %	0 ~ 16 %	1 ~ 16 %

将氧化钙 CaO 简写为C，二氧化硅 SiO_2 为S，氧化铝 Al_2O_3 为A，氧化铁 Fe_2O_3 为F，氧化镁为M。

(a) 普通波特兰水泥(OPC): 这种水泥的三天、七天和二十八天的强度相当高, 宜用于各种现代的土建工程(波特兰水泥标准中的具体规定见第8章)。

(b) 中热波特兰水泥(MHPC): 波特兰水泥和水后, 水化时产生大量的热量, 不适用于大体积混凝土工程, 因此所有的普通波特兰水泥均不适宜用于大体积混凝土工程。改变水泥的某些化学组成, 就能使水化热降低, 这种水泥就叫做中热水泥。这种水泥还比普通波特兰水泥更具有抗硫酸盐性。

(c) 快硬水泥(RHC或HESC): (a)节内谈到, 普通波特兰水泥三天、七天和廿八天强度能达到所要求的数值, 但有时要求水泥在24小时内的强度达到普通波特兰水泥的三天强度, 这种水泥就叫做快硬水泥或高早强水泥。这种水泥不能与快凝波特兰水泥相混淆, 快凝水泥是凝结和硬化比普通波特兰水泥更快一些, 也就是说在几分钟之内凝结和硬化, 但所达到的极限强度并不高。而快硬水泥的凝结时间却与普

通波特兰水泥的相同。

(d) 低热波特兰水泥 (LHC): 上述三种水泥的水化热均相当高。体积更大的混凝土工程如大坝、桥墩等, 必须用水化热相当低的水泥才能减小混凝土工程日后产生裂缝的危险。为此, 在水泥粉磨时掺一些火山灰质材料或粒状高炉矿渣, 或改变化学组成来降低水化热。因此, 对低热波特兰水泥的化学组成作了改动, 使其水化热比规定的波特兰水泥的最高值要低一些。

(e) 抗硫酸盐水泥 (SRC): 用上述各种波特兰水泥制成的混凝土及其构筑物与含硫酸盐的土壤及水长期接触, 其强度均会有一定程度的损坏。对这种强度损坏的原因已经进行过研究, 并确认所用的水泥中 C_3A 大于 5% 时, 在硫酸盐环境中易于毁坏。因此, C_3A 小于 5% 的波特兰水泥具有较高的抗硫酸盐性, 称之为抗硫酸盐水泥。

(f) 油井水泥 (OWC): 油井水泥用于 4000 米或 4000 米以上的深井, 在钻井之后将这种水泥混凝土注入井内形成加固圈。那样深的油井内的温度高达 100°C 以上。波特兰水泥浆用泵注入油井内, 在这么高的温度下会立即凝结, 从而妨碍水泥的灌浆操作。因此, 用于高温深井的水泥应该是在高温深井底部于 90 分钟到 120 分钟之内不会凝结的, 但在水泥浆注完之后能于 24 小时内凝结和硬化, 并能达到 $100\text{kg}/\text{cm}^2$ 或 $100\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上的抗压强度。改变波特兰水泥的组成, 使铝酸三钙的含量降到小于 3%, 水泥的凝结时间就能加以控制或改变, 这种水泥就叫做油井水泥。当然, 油井水泥类中还有若干品种, 这些水泥都是为用于油井底部的特殊情况而设计的。

(g) 白水泥 (WC): 波特兰水泥是浅灰色的。颜色是由于水泥中的氧化铁形成的复合物所产生的。如果水泥中 Fe_2O_3

的含量减少到小于0.4%，则水泥的颜色就成为白色。水泥生料中 Fe_2O_3 能有助于改善水泥熟料的煅烧情况。白水泥中 Fe_2O_3 含量低就会使煅烧困难，况且白水泥熟料内的 Fe_2O_3 即使微量，也会使水泥带色。因此为了除去 Fe_2O_3 ，对熟料必须加以适当的“条件控制”。“条件控制”的工艺过程，所有的白水泥厂家均保守秘密。值得注意的是，专门制造的白水泥也具有普通波特兰水泥的各种物理性能，而且能用于普通波特兰水泥适用的各种工程中，但是白水泥的价格很高，一般只用于装饰工程中。

(4)混合波特兰水泥 某些天然的或人造的无机化合物，与波特兰水泥熟料（或石灰）混合磨细，便可制成具有胶凝性能、更适合某种作业的水泥。这些天然的或人造的无机化合物有：

- (a)火山灰；
- (b)矿渣；
- (c)石灰石、砂岩等。

波特兰水泥掺入上述混合材之一，就可得到具有特殊性能的不同品种的水泥。这些水泥就叫做混合波特兰水泥。

(a)高炉矿渣波特兰水泥(PBFSC)：炼铁高炉排出的，在空气中慢慢冷却的高炉矿渣，磨细后并没有胶凝性质，但快冷或淬冷后再粉磨，就具有胶凝性质。淬冷过程叫做粒化，淬冷的矿渣叫做粒状高炉矿渣。粒状矿渣与石灰或波特兰水泥熟料混合并粉磨制成的产品叫做矿渣水泥。其中最简单的是矿渣石灰水泥，这种水泥用得很少。最普通的矿渣水泥是“高炉矿渣波特兰水泥”(PBFSC)，这种水泥可以含25%到65%的矿渣，其余是掺有5%到6%石膏的波特兰水泥熟料。矿渣波特兰水泥具有普通波特兰水泥的各种物理性能，有些

性能还超过后者，它的水化热低得多，抗硫酸盐性也更好一些。还有一种矿渣水泥叫做“超硫酸盐水泥”(SSC)，其矿渣、无水石膏和熟料按70:15:15的比例粉磨。这种水泥的抗硫酸盐性超过高炉矿渣波特兰水泥或抗硫酸盐水泥。其他工业的粒状炉渣现在也能用于制造矿渣波特兰水泥 (P S C)。

(b)火山灰波特兰水泥(PPC):火山灰是一种天然的或人工的粘土物质，与石灰或熟料粉磨后，掺水就会生成具有胶凝性质的化合物。具有很高的反应活性的火山灰或粉煤灰，与波特兰水泥熟料混合，掺以5%到6%的石膏粉磨而得的水泥叫做火山灰波特兰水泥。这种水泥的火山灰或粉煤灰的含量不得大于25%。它的水化热很低，抗硫酸盐性也相当好。它具有普通波特兰水泥的各种物理性能，但收缩较小，能用于普通波特兰水泥适用的各种工程中。

(c)砌筑水泥(MC):所有上述各种水泥与砂和水混合后就可制成砂浆，这种砂浆有些干硬，不能很好地保住水分。在铺砌和粘结砖的砌筑作业和抹灰作业中最好用一种能配制塑性较好的砂浆的水泥。这种水泥叫做砌筑水泥，是用波特兰水泥熟料与石灰石、砂石或粒状炉渣按1:1的比例粉磨而成的，还须掺一些水硬性石灰或塑化剂使之有更好的塑性。

上述各种水泥在严格的技术标准中均有规定，水泥产品必须遵守每种水泥规定的各项条款。

“印度水泥的生产与价格”说明可见附录1。

二、波特兰水泥化学

1. 石灰质原料如碳酸钙或硫酸钙与硅酸铝如粘土或红土, 按一定的配比混合磨细, 经煅烧成熟料, 而后再冷却并掺一定量的石膏磨成细粉, 即制成波特兰水泥。波特兰水泥好象是很普通的材料, 但是说每种水泥都是精细的化学药品, 也不能说不恰当, 在制造任何种波特兰水泥时都必须留心, 就象制造精细化学药品时一样小心。事实上, 在水泥制造过程中至少包括三十个化工单元操作, 关于这些单元操作的说明见附录A。各种波特兰水泥都是用石灰石制造的, 只有极少数的几个厂是用副产品碳酸钙泥渣或石膏或无水石膏作为主要原料的。波特兰水泥熟料(除白水泥和油井水泥熟料外)的氧化物组成和矿物组成的范围列入表3内。

表 3

氧化物组成		矿物组成	
SiO ₂	22 ± 1%	C ₁ AF	11 ± 4%
Al ₂ O ₃	5 ± 2%	C ₃ A	9 ± 4%
Fe ₂ O ₃	3 ± 2.5%	C ₃ S	40 ± 10%
CaO	64 ± 2%	C ₂ S	35 ± 10%
MgO	3 ± 2%	游离石灰	1 ± 1%
碱	0.8 ± 0.3%		
SO ₃	0.5 ± 0.2%		

2. 在工厂内生产的熟料的合理化学组成取决于原料和所用燃料的种类。石灰质原料可用石灰石、白垩、钙质海砂、贝

壳、珊瑚或碳酸钙副产品；粘土质原料可用粘土、页岩或红土，有时还须往生料中掺很少量的铁矿或砂岩以校正化学组成，使之符合要求。印度一般用煤作燃料。必须记住，煤中的灰分有一部分在煅烧时会掺到水泥生料中去的，因此在设计生料配比时应该考虑到灰分的化学组成。

3. 波特兰水泥熟料的配料计算举例如下。熟料必须具有下列矿物组成：

生料或熟料内常含极少量的碱和SO₃，可以忽略不计。

C ₁ AF	10%
C ₃ A	10%
C ₃ S	47%
C ₂ S	28%
MgO	4%
fCaO	1%
100%	

这种熟料的氧化物组成可按下述式子计算：

$$(1) \text{Fe}_2\text{O}_3 = C_4\text{AF} \times 0.326 = 10 \times 0.326 = 3.26\%$$

$$(2) \text{Al}_2\text{O}_3 = C_3\text{A} \times 0.377 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \times 0.64 = 10 \times 0.377 + 3.26 \times 0.64 = 3.77 + 2.09 = 5.86\%$$

$$(3) \text{CaO} = C_3\text{S} \times 0.737 + C_2\text{S} \times 0.651 + C_3\text{A} \times 0.621 + C_1\text{AF} \times 0.456 + f\text{CaO} = 47 \times 0.737 + 28 \times 0.651 + 10 \times 0.621 + 10 \times 0.456 = 34.65 + 18.23 + 6.21 + 4.56 + 1.0 = 64.65\%$$

$$(4) \text{SiO}_2 = C_3\text{S} \times 0.26 + C_2\text{S} \times 0.35 = 47 \times 0.26 + 28 \times 0.35 = 22.02$$

计算出的氧化物组成和重新计算得出的矿物组成列入表5内。

表 5

SiO ₂	22.02	fCaO	1.0
Al ₂ O ₃	5.86	MgO	4.0
Fe ₂ O ₃	3.24	C ₁ AF	10.0
CaO	64.65	C ₃ A	10.0
MgO	4.00	C ₃ S	47.7
		C ₂ S	27.1
	99.79		99.8

SiO₂ / (Al₂O₃ + Fe₂O₃) 2.41 (硅酸率)

Al₂O₃ / Fe₂O₃ 1.80 (铝氧率)

L.S.F. 0.91 (石灰饱和系数)**

S.S.F. 0.87 (硅饱和系数)***

**L. S. F. 是由下式⁽⁶⁾ 计算出来的

$$L S F = \frac{CaO}{2.8SiO_2 + 1.2Al_2O_3 + 0.65Fe_2O_3}$$

***S.S.F.是由下式⁽⁷⁾ 计算得出的

$$S S F = \frac{CaO - (1.65Al_2O_3 + 0.35Fe_2O_3)}{2.8SiO_2} \quad (\text{金德公式})$$

熟料的矿物组成可由氧化物组成按下述方法计算出来⁽⁵⁾。

$$(1) C_4AF = 3.04 \times Fe_2O_3$$

$$C_4AF \text{ 中的 } CaO = 1.4 \times Fe_2O_3 \quad (a)$$

$$C_4AF \text{ 中的 } Al_2O_3 = 0.64 \times Fe_2O_3 \quad (b)$$

$$(2) C_3A = 2.65 (Al_2O_3 - 0.65Fe_2O_3)$$

$$C_3A \text{ 中的 } CaO = 1.65 (Al_2O_3 - 0.64Fe_2O_3) \quad (c)$$

生成C₃S和C₂S用的石灰

$$= CaO - [(a) + (c) + \text{游CaO}] \quad (d)$$

$$(3) C_3S = 4.07 \times (d) - 7.6SiO_2$$

$$(4) C_2S = 8.6SiO_2 - 3.07 \times (d)$$

这种熟料是制造普通波特兰水泥的理想熟料。

4. 现在简要讨论波特兰水泥化学。

(a) 硅酸三钙 (C_3S) 是使波特兰水泥具有强度的主要矿物, 它使水泥早强高, 而 C_2S 使后期强度高。但是潜在的 C_3S 含量很高的熟料, 在目前工业上所采用的常见煅烧设备内是很难煅烧的。所以在普通波特兰水泥中 C_3S 的含量最好保持在40%到50%之内, C_2S 在25%到35%。快硬水泥和油井水泥中的 C_3S 必须大于50%, 约在50%到60%, 才能得到高的早强。欲使生料很好地煅烧成熟料, 必须加一些熔剂, Al_2O_3 和 Fe_2O_3 起着熔剂作用。煅烧时, 生料中 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 首先生成 C_1AF , 余下的 Al_2O_3 生成 C_3A 。因此, 普通波特兰水泥熟料中 C_1AF 和 C_3A 各有10%左右就足以起着熔剂作用。 C_3S 和 C_3A 在水化时产生较多的热量, 水泥中 C_3A 的含量较高, 就会使水泥的抗硫酸盐能力差。所以, 中热波特兰水泥中的 C_3S 含量要保持在比较低的数值, C_3A 的含量应低于8%。在抗硫酸盐水泥中 C_3S 的含量可保持与普通波特兰水泥一样高, 但 C_3A 必须低于5%。在低热水泥内 C_3S 和 C_3A 必须尽可能地低, C_3S 应在30%左右, C_3A 在6%左右。在油井水泥内, 正如前面所述的, C_3S 含量应大于50%, 而 C_3A 的含量应低于3%, 最好接近于0%; 但 $C_1AF + 2C_3A$ 的含量应低于20%。白水泥内的 Fe_2O_3 必须小于0.4%。

(b) 由此可见, 制造上述任何品种的水泥, 首先必需确定水泥的矿物组成, 由矿物组成可以计算出氧化物组成, 在前面已经阐明。由氧化物组成计算矿物组成的方法, 上面也已列出。在氧化物组成中还列出了硅酸率 (SiO_2/R_2O_3)、铝

氧率($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$)、L.S.F和S.S.F, 这些率值对生料的易烧性有很大的影响。正确设计的由CaO、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和MgO组成的生料, 在煅烧过程中所有的 Fe_2O_3 和部分 Al_2O_3 首先与CaO化合生成 C_4AF ; 余下的 Al_2O_3 于是又与部分CaO化合生成 C_3A ; C_4AF 和 C_3A 对生成硅酸盐起着熔剂作用。而后生料中含的全部 SiO_2 就和部分CaO化合生成 C_2S , 还有一些CaO留下来未化合。这部分未化合的CaO又和已经生成的部分 C_2S 化合生成 C_3S ——所希望的最终产物⁽⁸⁾。正确设计的生料在合适的煅烧条件下, 在熟料内应该是没有游离CaO留下来的, 但在实际生产中总有0.5%到2.0%的游离CaO留下来未能化合。能说明 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 与CaO化合的潜在能力的L.S.F. 的重要性即在于此。波特兰水泥的L.S.F. 应该在0.66和1.02之间, 值越高, 达到极限值, 越好。假如熟料的L.S.F. 值可能接近1.0, 则很难煅烧出满意的熟料, 尤其是在印度水泥工业可获得的煤品种的情况下更是如此。因此, L.S.F. 最好保持在0.9左右。硅酸率($\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$)是熟料中熔剂含量的一个量度, 其值越低(达极限值), 越好煅烧, 应该保持在2.0和3.0之间。所讨论的熟料(表5)的硅酸率在2.41是理想的。这个率值和铝氧率($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$)的重要性在研究煅烧操作时将作进一步讨论。水泥生料中必定会有MgO, 因而也必然含于水泥中。MgO一般说来不与水泥的矿物化合, 但它起着一些熔剂作用, 而另一方面它又有不好的作用, 即MgO在很高温度煅烧时能形成难烧的方镁石晶体, 熟料中的这些方镁石晶体水化很慢, 能持续若干年, 而且在水化时体积膨胀。所以, 如果熟料中MgO含量大于标准规定的最高值, 则熟料水化时的安定性不良。印度波特兰水泥标准中规定MgO的最大值为6%, 以