

第六届国际水泥化学会议论文集 第三卷

水泥及其性能

DILIUJIEGUO JISHUINIHUAXUEHUTYI LUNWENJI

中国建筑工业出版社

第六届国际水泥化学会议论文集

第 三 卷

水 泥 及 其 性 能

建筑材料科学研究院水泥研究所 译

王家治 刘公诚 薛君玕 校

中国建筑工程出版社

《第六届国际水泥化学会议论文集》于1976年在莫斯科出版。
全集分三卷：第一卷《水泥熟料化学》，第二卷《水泥水化与硬化》（分一、二册），第三卷《水泥及其性能》。

本书为第三卷，译出了原书的10篇主要报告，选译了44篇补充报告。全书集中论述了高强和快硬波特兰水泥、矿渣和火山灰质波特兰水泥以及矾土水泥、膨胀水泥、装饰水泥等特种水泥的化学、技术性能和使用范围等。并叙述了利用工业副产品和废料生产水泥的方法，以及同时生产水泥和其它工业产品的综合生产方法。

本书可供从事水泥化学、工艺学以及邻近学科的研究人员，水泥工业与建筑业的科技人员和有关专业高等院校师生参考。

除署名者外，魏运铎、吴中伟也承担了本书的部分校阅工作。

ШЕСТОЙ
МЕЖДУНАРОДНЫЙ
КОНГРЕСС
ПО ХИМИИ
ЦЕМЕНТА
ТОМ III
ЦЕМЕНТЫ И ИХ СВОЙСТВА
МОСКВА·СТРОЙИЗДАТ·1976

* * *

第六届国际水泥化学会议论文集

第三卷

水泥及其性能

建筑材料科学研究院水泥研究所 译

王家治 刘公诚 薛君环 校

*

中国建筑工业出版社出版（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：850×1168毫米 1/32 印张：17 $\frac{1}{4}$ 字数：475 千字

1980年12月第一版 1980年12月第一次印刷

印数：1—2,420 册 定价：1.70元

统一书号：15040·3828

序 言

第六届国际水泥化学会议论文集第三卷所收之资料，论述了会议内容的第三部分——“水泥及其性能”。其中包括10篇主要报告、59篇补充报告及59篇讨论发言。收编的资料综述了目前正在生产并在建筑中获得广泛应用的特种水泥，以及某些具有特种技术性能的新品种水泥在理论和化学-工艺基础方面所取得的最新成就。

文集首先对生产高强水泥的物理-化学条件进行了广泛的论述，因为扩大高强水泥的生产正是当前许多国家发展水泥生产的主要动向之一。其次，文集详细评述了矿渣波特兰水泥及其变种以及粉煤灰水泥等。鉴于上述这些水泥具有一系列为普通波特兰水泥所不及的技术经济特点，许多国家对于研究与生产这些水泥兴趣日浓。本文集还报导了有关利用电炉磷渣生产水泥，以及粉煤灰对水泥某些建筑技术性能影响的最新资料。

本文集在刊载了有关矾土水泥的特点及技术性能的研究成果的同时，还收编了论述膨胀水泥的反应机理，以及影响其特殊性能的物理-化学因素等问题的科学论著，而膨胀水泥的生产目前正在许多国家获得迅速发展。其中还谈到了有关水泥产生膨胀和自应力过程的一些新的论点，并首次报导了生产膨胀水泥基本组分之一的方法的有关资料，以及对研制更为有效的膨胀和自应力水泥具有重要意义的许多其他资料。

在论述火山灰质水泥和火山灰混合材化学的资料中，刊载了火山灰组分与氧化钙反应机理的研究结果，并列举了其反应生成相的特性，提出了评价混合材火山灰活性方法的建议，并公布了有关火山灰质水泥及其性能与相似的某些其它水泥的建筑-技术性能的资料。

在论及油井水泥化学的资料中，总结了有关该种水泥物理-化学特点及其性能的试验结果，引述了有关该种水泥生产基础的科学研究，以便能更充分地满足石油工业及天然气工业日益增长的需要。

对于建筑中有效的装饰材料——白色水泥与彩色水泥——的特殊化学问题，论文结合某些物理化学条件进行了探讨，这些物理化学条件可使水泥在达到既定强度的情况下生产出白度系数高的白色水泥，并采用在生料中掺以微量着色剂烧制的熟料制得各种耐风化的彩色水泥。

本文集继而又论述了聚合物水泥材料的物理-化学、制造工艺和技术性能的研究成果。文章第一次把水泥的硬化过程和为了提高混凝土的强度与耐久性在浸渍过程中所用的有机单体的聚合过程结合起来进行了全面的探讨，进而提出了在这一领域中有关今后研究方向的设想。最后，文集还收编了论述水泥化学领域中颇有发展前途之一的课题，即利用其他工业副产品来生产水泥以及论述同时生产水泥和其他工业产品的综合生产工艺的资料。

目 录

序言

主 要 报 告

一、快硬与高强波特兰水泥 1

补 充 报 告

(一) 高强水泥的性能与颗粒组成的关系 29

(二) 高强和快硬水泥的生产 33

(三) 用一种熟料生产快硬与高强水泥的工艺 36

(四) 用电熔硫铝酸盐熟料生产高强混凝土 41

(五) 特种超快硬水泥在5°C下的水化 50

主 要 报 告

二、矿渣波特兰水泥 62

补 充 报 告

(一) 在高氧化铝矿渣水化时 MgO 的作用 87

(二) 在水泥生产中掺用含磷、氟物质 92

(三) 细磨矿渣玻璃体在湿热条件下的硬化 98

(四) 钡锰含量高的高炉粒状矿渣的胶凝性能 105

主 要 报 告

三、粉煤灰水泥 111

补 充 报 告

(一) 粉煤灰水泥的水化过程与耐久性 135

(二) 含粉煤灰水泥砂浆的抗硫酸盐性 145

(三) 页岩灰水泥 151

(四) 灰渣玻璃体在页岩灰水硬活性中的作用 158

(五) 粉煤灰配料生产熟料 163

(六) 利用粉煤灰提高矾土水泥的长期强度 168

主 要 报 告

四、矾土水泥 175

补 充 报 告

(一) $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ 系统相图特性的探讨	195
(二) 矾土水泥矿物与水作用的机理	200
(三) 水化铝酸钙在碱金属氢氧化物溶液中的介稳平衡	206
(四) 矾土水泥混凝土强度倒缩的预测	212
(五) 水化矾土水泥中六水铝酸钙的碳化机理	216
(六) 矾土-贝利特水泥	225
(七) 特种高铁水泥	228

主 要 报 告

五、膨胀水泥	233
--------------	-----

补 充 报 告

(一) 水泥膨胀的物理化学过程	258
(二) CaSO_4 在阿利特- CaO-CaSO_4 -中间物质系水泥膨胀 剂中的作用	271
(三) 膨胀水泥的自应力	276
(四) 膨胀水泥水硬化时物理化学过程的研究	281
(五) 明矾石无收缩、膨胀和自应力水泥	285
(六) 掺用 $\text{CaO-CaSO}_4-4\text{CaO}\cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot \text{SO}_3$ 系统外加剂的 膨胀砂浆和混凝土的早期硬化性能	290
(七) 硬化膨胀水泥的徐变特性	301
(八) 用电炉法生产膨胀水泥熟料	306
(九) 水泥膨胀及其测定方法	311

主 要 报 告

六、火山灰混合材及混合水泥的化学	319
------------------------	-----

补 充 报 告

(一) 影响火山灰物料与石灰反应的因素	349
---------------------------	-----

主 要 报 告

七、油井水泥	361
--------------	-----

补 充 报 告

(一) 用于高温井的油井水泥	382
(二) 水泥在水热条件下的长期硬化	392
(三) 油井水泥在高矿化侵蚀介质中的硬化	402

主 要 报 告

八、白色和彩色水泥化学	405
-------------------	-----

补 充 报 告

(一) 白色熟料形成机理	430
(二) 彩色熟料水泥	441

主 要 报 告

九、水泥-聚合物材料	448
------------------	-----

补 充 报 告

(一) 聚合物水泥的水化硬化	480
(二) 聚合物外加剂在水泥硬化过程中的作用	486
(三) 憎水外加剂对波特兰水泥水化的影响	490
(四) 聚合物分散体改性水泥浆的耐久性	498
(五) 塑料在已水化波特兰水泥中的稳定性	505
(六) 掺茛烷基芳香焦油和热解焦油产物的聚合物 水泥混合物	509
(七) 估算聚合物水泥砂浆抗压强度的公式	513
(八) 以有机硅聚合物为主的水泥	520

主 要 报 告

十、水泥的综合生产方法	526
-------------------	-----

一、快硬与高强波特兰水泥

И.В.柯拉夫钦科^①

王 家 治 译

高强和快硬水泥的生产，始终受到很大的重视[1、2]。

在混凝土施工中采用快硬水泥的优越性，首先是缩短工期和提高劳动生产率，均已为用户所重视。因此，快硬与高强水泥的生产不断增长[3]。目前，该两种水泥在不同国家中的产量已占水泥总产量的1.5~6%不等。高强水泥的质量也大为提高。现代水泥的1天强度，已达三十年代水泥的3天强度，7天强度已达三十年代水泥的28天强度[4、5]。然而，水泥石尚未达到其理论强度值，据文献[6、7]所载，其理论强度值为2400~3400公斤/厘米²。

现在，工业发达国家已积累了生产快硬和高强水泥的丰富经验。

苏联从1940年开始试制了几批高强水泥，1951年由水泥设计研究院在布罗采恩水泥厂、1952年由南方水泥设计研究院在别尔高罗德水泥厂又试制过。到1955年，苏联水泥工业已掌握了快硬水泥的生产。

近年来，装配式钢筋混凝土工业的发展和建筑施工的工业化，进一步推动了有关提高水泥强度和研究高强水泥生产工艺方面的工作。我们同水泥厂人员密切合作进行了许多研究工作，旨在科学地拟定出试制特快硬水泥和高强水泥的稳定的工艺参数和工业试生产流程，并组织工业生产。

如所周知，影响水泥强度的许多因素是相互联系的，我们的

^① 苏联 全苏水泥工业科学研究院。

任务是要把这些相关性尽可能地研究清楚。并阐明每一因素对提高水泥活性的作用。因此，结合各个水泥厂的具体情况选定生产高强或快硬水泥的合理途径，是一项相当复杂的科学技术难题，通常，是需要预先加以研究的。

原料的成分和性能对制备生料的工艺参数的影响 生料的制备应能保证入窑生料化学成分的稳定，使生料不论在固相反应或烧结状态下均能保持较高的反应能力，并使物料在窑内保持最好的物理状态，从而能有效地吸收热量。

在生产快硬和高强水泥时，我们首先着眼于制备反应活性高的生料。为此，了解生料中的各种氧化物是以何种矿物形态存在的是很重要的。例如，石英颗粒超过30微米便会大大降低生料的反应能力[8、9]，而当二氧化硅是以粗粒的硅酸二钙[10]或硅灰石[11]的形态存在时，煅烧生料便可不掺用熔剂。许多文献[12~14]和专利[15~17]都强调了二氧化硅矿物形态的意义。

蒙脱石型的粘土易为水所浸软、比面积高、不含或很少含有砂子、长石和赭石等杂质，对生产高强和快硬水泥最为适宜。而在为生产优质水泥选择石灰石组分时，诸如该组分的浸水性、易磨性对最终决定其在生料中的分散性和反应能力等均具有特别重要意义。有些水泥厂是采用泥灰岩的。粘土和石灰石颗粒之间的紧密接触直至相互渗透，使这种生料具有极高的反应能力。

我们通过研究证明，水泥厂通常所采用的生料粉磨细度，并不能完全消除其化学成分的宏观不均匀性，尤其是与生料颗粒结构有关的微观不均匀性。因此，原料的物理化学特点，会影响生料的反应活性。

采用泥灰岩或白垩与粘土混合料的水泥厂，在其一般粉磨和细粉磨的生料中，大小不同颗粒中的氧化物含量列于表1-1。表列数据的分析结果表明，采用泥灰岩生料时，大小不同的颗粒在化学成分上并无出入，而在其它复合组分的生料中，不同颗粒的化学成分相差很大。难磨的石英粒子夹杂物，主要夹杂在大于15微米的颗粒中，其中兹多尔布诺夫斯克厂生料中的石英是均匀地

生料中各种颗粒的化学成分(%)

表 1-1

工厂	材料	氧化物	各 种 颗 粒, 微 米							
			大于60		40~60		15~40		0.5~15	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
“十月”	泥灰岩	CaO	42.6	42.14	42.56	42.1	39.58	38.8	43.42	41.9
		SiO ₂	14.2	12.2	13.86	13.6	12.8	13	13	13.6
		Al ₂ O ₃	4.7	3.16	3.52	3.16	2.96	3.26	3.35	3.48
		Fe ₂ O ₃	5.32	4.34	5.86	5.55	6.81	5.65	3.76	2.4
布良斯克	白 垩 与粘土	CaO	24.26	31.28	27.66	45.97	27.66	34.9	44.26	48.8
		SiO ₂	33.7	32.13	12.17	9.33	19.6	15.33	10	12.86
		Al ₂ O ₃	2.78	2.81	2.13	3.26	2.31	3.26	3.08	3.98
		Fe ₂ O ₃	6.76	7.72	6.1	2.58	8.32	6.4	2.14	2.33
兹多尔布诺夫斯克	硬白垩 与 亚 粘 土	CaO	35.06	34.05	35.07	37	33.07	32.76	45.57	46.8
		SiO ₂	21.81	24.7	21.41	24.7	21.41	25.39	9.1	9.6
		Al ₂ O ₃	3.51	2.78	2.68	4.12	3.2	4.1	5.1	3.52
		Fe ₂ O ₃	4.32	4.85	4.87	6.58	5.73	5.64	2.09	2.08

注：生料编号为 4、6、8、10 者，系全部通过 №008 (80 微米) 筛；生料编号为 5、7、9、11 者，筛余为 5.5%。

分布在粗颗粒中，而在布良斯克厂的生料中，则是集中在大于 60 微米的颗粒中。这对物料煅烧时的固相反应起着重要作用。

生料的分散度对其反应能力的影响 水泥生料的反应能力同它的粉磨细度有着直接关系[18~20]。我们的研究结果表明，细磨生料形成熟料的温度，比粗磨生料低约 50°C。其原因在于固相反应对于顺利完成烧结过程具有重要意义。在固相反应时，不断向 SiO₂ 晶格中扩散的氧化钙是一种“表复”组分 (CaO 向 SiO₂ 中的扩散，比 SiO₂ 向 CaO 中的扩散快 3~4 倍)。反应物的颗粒尺寸对这种反应速度的影响，是同较快的表面反应量与“表复”料颗粒向被“表复”颗粒内部较慢的扩散量之间的比值有关。表面反应的数量是随着颗粒尺寸的减小而增加。即使存在少量的粗颗粒，也会大大降低经过表面反应之后的熟料形成速度。

对用泥灰岩、粘土和白垩配制的生料而言，不同粒径的 SiO₂

在生料中的分布状况，是决定生料反应能力的参数。只是在生料中存在坚硬的粗晶石灰石时，石灰石的分散特点才具有比硅酸盐更为重要的意义。由粗颗粒的方晶石形成的氧化钙晶体，在1100~1200°C内是不参与反应的，并开始变大，而减小其与 Al_2O_3 和 SiO_2 的反应能力，这会影响石灰总的吸收速度[21、14、22]。

我们对各种水泥所用生料的反应能力做了分析，结果(表1-2)表明，生料的反应能力是分散度的函数，同时，正如相关的系数值所表明，随着小于15微米颗粒含量的增加和大于60微米颗粒含量的减少，石灰的吸收速度，以及熟料中阿利特的含量便有所增加。

前述的研究结果[14]已经证明，可以采用杨氏 (В.Яндер)

不同分散度的工业生料的反应能力

表 1-2

工 厂	生料 编号	比 表 面积， 厘米 ² /克	不同粒度颗粒的 含 量， %				在1300°C 下的煅烧 时间，分	在 煅 烧 料 中 的 含 量， %			
			<15 微米	>60 微米	>80 微米	>200 微米		fCaO	阿利特	贝利特	中间物
“十月”	1	4270	31.1	19.4	11	2.5	15	2.89	55	15~20	20~25
	2	7160	32	19	9.6	2	15	2.43	—	—	—
	3	7510	32.7	18.4	7.3	0.9	15	2.21	—	—	—
	4	8360	33.3	16.2	5.7	0.45	15	1.91	55~60	15~20	25
	5	8360	39.3	10.4	3.6	0	15	1.35	—	—	—
	7	9060	46.4	7	0.5	0	15	0.9	60	10~15	25
布 良 斯 克	36	11960	60.5	12	5.5	1.6	20	3.06	50	25	25
	37	13200	69.2	7.5	2.9	0.5	—	2.74	50~55	15~20	25
	38	13220	76.1	4	0	0	—	0.94	50~55	20	25
兹多尔 布 诺 斯 克	42	9100	66.4	7.2	5	0.9	45	1.96	50	20	25
	43	9620	67.4	5.8	2.3	0.5	45	1.25	55	20	25
	44	9770	74.3	4.5	0	0	45	0.69	55	20	25
“布尔 什维 克”	115	—	70.3	14.4	8.8	1.8	10	2.51	50~55	20~25	25
	116	—	81.3	11	2.5	0.5	10	1.64	—	—	—
	117	—	—	—	0.3	0	10	0.46	50	25	25

方程式[23]对影响生料反应能力的下述因素，如原料的物理化学性质、生料的分散度、煅烧温度和时间等，进行积分计算：

$$z^2 = K\tau$$

式中 $z = 1 - \sqrt{1 - x}$ ——限制扩散速度的料层厚度（小数）

（ x ——新生成相的重量含量）；

K ——与扩散系数成正比的系数；

τ ——反应持续时间。

显然，采用这个方程式只有相对的意义，因为它把煅烧时的复杂过程从简列式了。不过，对象判断水泥原料质量之类的工艺目的还是适用的[9、14]。利用杨氏方程式对不同水泥厂原料反应能力的计算结果列于表1-3。

根据 K 值，可以判断出不同生料所应含有的合理的颗粒组成。由于各个生产厂所用生料组分的物理化学性质不同，每种颗粒的反应程度亦将各异。例如“十月”厂原料中0~40微米颗粒的反应能力与兹多尔布诺夫斯克厂的0~15微米颗粒一样，因此，每个厂所用生料中0~15微米颗粒的最佳含量应根据原料的反应能力来确定。

视石灰石和硅酸盐组分的矿物形态而异，不同形态的石灰石和硅酸盐的分散细度，都将会对熟料的形成速度产生不同的影响[24、25]。

熟料最佳矿物组成的设计 优质水泥熟料矿物组成的设计，应能在烧成和粉磨设备具有最经济的作业条件下，使水泥石获得所要求的强度增进率。

文献[26~28]指出，纯矿物 C_3S 的绝对强度在各龄期都是最高，而 C_3S 与 C_3A 复合矿物的强度增进率最好。 C_2S 硬化最慢。许多研究者认为硅酸三钙的影响很大，而建议通过尽量增加熟料组成中的阿利特含量来生产高强水泥。还有人认为，为要加速硬化过程还须增加熟料中铝酸三钙的含量。

鉴于高强和快硬水泥熟料中的阿利特含量要比普通波特兰水泥熟料高，我们根据自己的研究结果认为，若采用普通原料即使

表 1-3 熟料形成速度相对常数的计算

工 厂	生 料 编 号	粉磨细度, №008 筛 余, %	不同粒度颗粒的 含 量, %		煅 烧 时 间, 分	熟料中游 离石灰的 含量, %	$x = \frac{\text{CaO} - \text{CaO}_{\text{熟}}}{\text{CaO}}$	$K = \frac{(1 - \sqrt[3]{1 - x})^2}{x}$	K 相对
			<15微米	>60微米					
“十月”	1	11	31.1	19.4		2.89	0.945	0.0256	100
	4	5.7	33.3	16.2	15	1.91	0.955	0.0276	108
	7	0.5	46.4	7		0.9	0.98	0.0353	138
布良斯克	36	5.5	60.5	12		3.06	0.93	0.017	67
	37	2.9	69.2	7.5	20	2.74	0.94	0.0186	73
	38	0	76.1	4		0.94	0.98	0.0265	103
兹多尔布 诺夫斯克	42	5	66.4	7.2		1.96	0.955	0.0092	36
	43	2.3	67.4	5.8	45	1.25	0.97	0.0105	41
	44	0	74.3	4.5		0.69	0.985	0.0126	49
“布尔什 维克”	115	8.8	70.3	14.4		2.51	0.942	0.0375	146
	116	2.5	—	—	10	1.64	0.962	0.044	172
	117	0.3	—	—		0.46	0.989	0.0602	235

阿利特含量超过65~70%，也不再能提高水泥的强度，反而会增加形成熟料的困难。

为要在采用普通原料的情况下增加阿利特的含量，就必须大大提高生料的分散度[8]以及采用矿化剂[29]和其物质组成经过专门选定的生料来提高其反应能力。苏联、波兰、西班牙和新西兰有一种反应能力非常好的原料，利用这种原料便可没有多大困难地生产出阿利特含量高达75~80%的熟料，熟料中硅酸盐矿物的总含量约为85~90%。这种水泥具有很多优点，特别是强度高和需水量小。但是，采用其它原料便生产不出这种水泥。

与阿利特不同， C_3A 主要是提高水泥的早期强度[26、27、30]。提高熟料铝酸盐相中的 C_3A 的含量，对生产快硬水泥特别有利。但是，鉴于饱和系数高和 C_3A 含量高的液相粘度很高，会给生料煅烧带来困难，我们认为即使为了生产快硬水泥也不宜使 C_3A 的含量超过8%。

许多文献已曾证明，含有足够量的铁铝酸钙（25%）[31、32]和少量 C_3A 的熟料，也可制得高标号水泥。在阿利特含量和粉磨细度较高的情况下，这种水泥的强度不仅后期高，早期也高。我们在布良斯克厂利用 C_3S 为72%、 C_2S 为4%和 C_4AF 为21%，以及根本没有 C_3A 的熟料生产了700公斤/厘米²的高强水泥。其他一些研究者也获得了类似的结果。

熟料的煅烧过程 若把主要是在链条带里进行的干燥和成球的纯物理过程暂置之不论，则回转窑的其余部分可以分为三个带：初期固相反应带、烧结带和熟料冷却带。当水分由矿物的晶格中析出时，晶格或则收缩，并在诸如氢氧化物、含水碳酸盐等物质中完全重新组合，或则表面上仍将保持类似原生矿物的晶格，而在其内部结构中却形成了气孔和空洞。水泥生料中的粘土矿物脱水时就会进行这一过程。

粘土矿物在其脱水过程中，能够提高自身的活性，并获得化学反应，特别是与石灰石反应的能力。在750~900°C时，石灰石中的 $CaCO_3$ 便会分解为 CaO 和 CO_2 。这个分解速度视温度、碳

酸钙结构和杂质，以及 CO_2 的分压而异。碳酸钙的分解分两个阶段进行：其一为动力学阶段，其进展速度决定于 CaO 晶核的浓度及其形成能量，其二为扩散阶段，其进展速度取决于每一原始组分颗粒上 CaO 薄膜的厚度及其渗透性[33、35]。因此，对碳酸钙的分解速度采用了两个不同的常数。

观察结果表明，生料的石灰饱和系数每降低百分之一，碳酸钙分解的起始温度可降低 $2 \sim 10^\circ\text{C}$ 。对于生产高强水泥的工艺而言，由活性石灰石配制的生料，其碳酸钙分解的起始温度比较低，这是具有重要意义的，因为在这种情况下，某些粘土矿物的脱水和碳酸钙分解的温度范围已部分相吻合。根据海德瓦尔 (Hedvall) 定律，温度范围的这种相互接近，可以加速各组分的反应过程，并提高生料的反应能力。IO·M·布特和 B·B·吉马舍夫及其同事们在煅烧水泥生料时，曾指出过这种效应[34]。我们在煅烧“布尔什维克”厂的水泥生料时，亦曾发现这种效应（表1-3）。

根据差热曲线计算所得之碳酸盐分解的反应级数列于表1-4，由表列数据可见，在采用硬质和结构完善的碳酸钙配制的生料中，若碳酸盐分解反应起始得晚，则该种分解反应便进行得特别

生料煅烧时碳酸盐分解过程的特点

表 1-4

生 料	细度, №008 号筛筛余, %	温 度, $^\circ\text{C}$			吸热峰分 布指数 I	反应级数 n
		起始效应	最大效应	終了效应		
用兹多尔布诺夫斯克厂亚拉拉特矿石灰石和粘土配制的生料	62	870	890	1000	0.19	0.56
	0	825	870	980	0.15	0.49
兹多尔布诺夫斯克厂工业生料	5	830	925	1020	0.27	0.66
	0	830	910	1000	0.07	0.33
布良斯克厂工业生料	6	780	895	1025	0.32	0.71
	0	775	890	1010	0.13	0.46

快。因此，石灰很快析出，来不及化合便再结晶而钝化。同时，这种生料中的游离石灰的粒径也很不均匀，此后，这将会导致贝利特分两次形成。而在采用活性方解石的生料中，碳酸钙分解过程起始得早，而且分解时间比较长，所得石灰晶体的粒径均匀，而来不及再结晶；在这种情况下，它将与 SiO_2 化合一次形成贝利特。

我们在制定高强和快硬水泥的生产工艺时，曾采用综合热分析（测定电导性和失重）、岩相分析和X-射线分析方法对生料煅烧过程进行了仔细的研究。M·Φ·切布科夫和B·A·皮雅切夫在五十年代时曾提出一种假说，认为在许多情况下，在煅烧过程中物料中的相界面会形成一种初期熔融体，它将加速在较低温度下的煅烧过程。我们通过测定加热状态下生料的电导率，证实了这一假说。业已明确，在氧化介质中煅烧水泥生料时，在相当于粘土矿物分解的温度范围内，即 $680\sim 700^\circ\text{C}$ 时便出现了约为 10^{-7} 欧姆 $\cdot$ 厘米 $^{-1}$ 的电导率。提高生料的分散度，可使该温度降低 $50\sim 100^\circ\text{C}$ 。调整硅酸率和饱和系数对改变这一温度影响不大，从而可以认为起始的电导率与粘土矿物脱水时氢离子在粘土矿物层间的迁移有关。迁移之后剩下的粘土矿物晶格的骨架，将析出碱土金属的阳离子，很容易在方解石表面扩散[36]。

在方解石开始分解($800\sim 890^\circ\text{C}$)以后，主要载电体是 Ca^{2+} ，如所周知， Ca^{2+} 的存在，将会大大降低表面相中碱土金属阳离子的流动性。这一点已为我们的研究结果所证实。业已证明，采用低碱原料 ($\text{R}_2\text{O}\leq 0.3\%$) 时，出现上述电导率的温度，是与生料石灰石中方解石分解时的吸热效应的温度相适应的（差 $20\sim 30^\circ\text{C}$ ），因此，在 $850\sim 1280^\circ\text{C}$ 温度内，方解石的阳离子应为主要载电体。自然，这不排除 Al^{3+} 、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 阳离子参与导电。

基于上述研究结果可以认为，水泥生料的电导性具有阳离子的性质，而当生料中含有碱分时，液相在 680°C 左右便可形成，掺用矿化剂可使液相在 $580\sim 600^\circ\text{C}$ 时形成，若采用低碱原料并不掺用矿化剂时，则液相在方解石的分解温度 $750\sim 950^\circ\text{C}$ 时形成。