

使用美国热电公司 γ —射线分析仪及生料质量 控制系统（软件）技术经济分析初探

姚旭明、武新贤、王军梅、方婉、沈欣

前言

云浮天山水泥有限公司在广东省云浮市云安县兴建了一条 5000t/d 熟料生产线；由于使用赛默飞世尔科技（Thermo Scientific, 原 Thermo Electron） γ —射线分析仪及生料质量控制系统（软件），改变了自水泥工业诞生以来生料成分控制的思维定式，简化了新型干法水泥生料均化链，提高了产品质量，大幅度削减了基建投资和工厂运行费用，取得意想不到的技术效果和良好的经济效益。

现仅就该工艺线所用原料、所选检验仪器、技术效果、投资及运行情况作一简单分析。

1. 使用成分波动大的原料

采用化学成分波动较大和极大的两种低钙高硅灰岩(两种灰岩在生料中配比约为 92~96%)和炭质页岩、铁矿石四组分配料。

1.1 石灰质原料（两个矿点）

1.1.1 石山灰岩矿

矿床赋存在上泥盆统天子岭组上部地层(D₃t^c)中，为滨海~浅海相碳酸盐岩沉积矿床类型；地层岩性单一，为表面具有水平状差异溶蚀所成的“砂”质条带和满布刀砍纹的灰色、深灰色、局部浅灰或灰黑色薄层~中厚层状含炭质的碳酸盐岩。

矿石类型为含粉砂质灰岩和粉砂质灰岩。主要矿物成分为方解石，含量一般 88%~93%之间，次要成分为石英，含量一般在 5%~8%之间，还含有少量炭质，偶见细小黄铁矿和白色粗粒状石英分布在层面上。粉晶~细晶结构，薄层~中厚层状构造，局部厚层状构造（矿石表面层理清晰，新鲜面则不见层理）。

方解石晶粒多呈它形半自形晶，晶粒大小多在 0.02~0.05mm 之间，部分晶粒可达 0.1~0.2mm。石英基本呈分散状出现，局部富集成小团包状产出，其颗粒大小多在 0.02~0.03mm 之间，大者可在 0.1mm 左右。炭质多呈质点状或细芝麻点状散布，但也常相对富集成断续的线状，且略呈方向性排列，有时充填在缝合线或层理中。

石山矿矿石 CaO含量较低，SiO₂和fSiO₂含量相对较高；从而使石山灰岩既是生料中钙的一种来源，又可作为硅质校正料；其化学成分如表 1。

石山矿矿石化学成分 (%)

表 1

试样名称	L.O.I	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl ⁻	TOTAL	f-SiO ₂
矿岩总平均	37.89	11.72	0.96	0.85	47.01	0.76	0.154	0.021	0.17	0.0054	99.54	10.32

控制样段的化学成分经厚度加权法求得单工程平均化学成分、标准偏差等见表 2.1、

表 2.2。

钻孔数据 (加权) 统计

表 2.1

钻孔编号	ZK001		ZK002		ZK101		ZK102	
试样长度 M	140.84		68.52		88.85		99.75	
项目	CaO	SiO ₂	CaO	SiO ₂	CaO	SiO ₂	CaO	SiO ₂
平均 \bar{A}	46.21	12.04	45.08	14.21	47.41	10.98	47.18	10.41
标准偏差 S	1.47	2.64	1.37	2.42	1.27	1.81	1.06	1.26
SCaCO ₃ (%)	2.63		2.45		2.27		1.89	

刻槽数据 (加权) 统计

表 2.2

勘探线编号	KCO (0 线)		KC1 (1 线)		JK2 (2 线)		JK3 (3 线)	
试样长度 M	330.90		182.70		137.80		114.30	
项目	CaO	SiO ₂	CaO	SiO ₂	CaO	SiO ₂	CaO	SiO ₂
平均 \bar{A}	46.81	12.21	46.92	12.01	47.71	11.24	48.48	10.23
标准偏差 S	1.68	2.74	1.54	2.59	1.65	2.83	1.93	2.71
SCaCO ₃ (%)	3.00		2.75		2.95		3.45	

1.1.2 大岩山灰岩矿

矿床赋存于上泥盆统天子岭组中上部地层(D₃t^b、D₃t^c)中。主要为泥晶灰岩夹少量泥质灰岩和砂质灰岩；泥质灰岩主要夹在泥晶灰岩中，砂质灰岩主要在泥晶灰岩底部。

泥晶灰岩为灰、深灰色，中厚层局部厚层状构造，泥晶结构。矿物成分以方解石为主，占 95%~99%，含白云石 1%左右和石英 1%~2%及少量炭、泥质，微量黄铁矿及褐铁矿。方解石粒度一般小于 0.01mm，泥晶方解石中不均匀散布一些次棱角状~次圆状的陆屑石英，粒度 0.03~0.10mm。

泥质灰岩为灰、深灰、灰黑色，薄~中厚层状，泥晶结构。矿物成分以方解石为主，占 90%—96%，含 1%—4%石英及少量泥质、炭质和微量黄铁矿。泥晶方解石中不均匀散布次棱角状的陆屑石英，粒度 0.02~0.10mm，个别次生石英达 0.15mm。此类矿石多为 II 级品。

砂质灰岩为灰、深灰色，中厚层构造，泥粉晶结构。矿物成分以方解石为主，次为次棱角状的粉砂粒级陆屑石英，含量约 15%~28%。其特征是低CaO，而SiO₂含量较高，该类矿石类型的CaO含量一般达不到 II 级品。

全矿区矿石平均化学成分含量（根据样品厚度加权计算）如表 3。

大岩山矿矿石化学成分 (%) 表 3

L.O.I	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	TOTAL
39.51	5.81	1.55	0.77	49.15	1.37	0.44	0.03	1.15	99.77

控制样段的化学成分经厚度加权法求得单工程平均化学成分、标准偏差等见表 4.1、表 4.2。

钻孔数据 (加权) 统计 表 4.1

钻孔编号	ZK101		ZK102		ZK201		ZK202		ZK203	
试样总长度 M	150.21		24.5		90.39		109.80		77.00	
试样编号	1~44		1~7		1~25		1~39		1~25	
项目	CaO	SiO ₂	CaO	SiO ₂	CaO	SiO ₂	CaO	SiO ₂	CaO	SiO ₂
平均 \bar{A}	47.62	6.85	47.85	8.69	33.31	28.10	46.97	8.64	46.01	7.83
最大 max	53.89	22.43	52.88	17.12	51.93	46.40	53.56	45.05	53.21	18.25
最小 min	36.26	0.36	41.09	2.64	19.19	4.20	16.17	1.41	37.07	2.01
标准偏差 S	4.58	6.35	4.31	5.45			7.59	9.17	4.18	4.03
SCaCO ₃ (°)	8.18		7.70		暂不准备用, 不作统计。		13.55		7.46	
备注										

刻槽数据 (加权) 统计 表 4.2

勘探线编号	KC1 (1 线)		JK2 (2 线)	
试样总长度 M	105.00		192.30	
试样编号	1~33		1~66	
项目	CaO	SiO ₂	CaO	SiO ₂
平均 \bar{A}	46.97	8.45	48.82	6.10
最大 max	53.12	36.85	54.34	35.40
最小 min	18.97	0.90	13.79	1.03
标准偏差 S	6.13	6.68	6.29	6.61
SCaCO ₃ (°)	10.95		11.23	

石山和大岩山两种灰岩皆为低钙高硅属性,但从使用目的和管理方便考虑,依据它们之间的微小差异,把它们定名为“高钙低硅”与“低钙高硅”两种灰岩。

1.1.3 生产所用石灰石质量情况

生产所用石灰石质量情况

表 5

时间	2006 年	3 月		4 月		5 月		6 月		7 月		8 月		9 月		10 月	
矿名	项目	CaO	SiO ₂	CaO	SiO ₂	CaO	SiO ₂	CaO	SiO ₂	CaO	SiO ₂	CaO	SiO ₂	CaO	SiO ₂	CaO	SiO ₂
石山灰岩矿	统计数目, N	22		31		22		17		22		17		31		27	
	平均值, X	43.36	16.04	43.73	15.22	44.79	14.63	44.86	15.10	45.50	14.22	46.12	13.45	45.48	14.09	45.17	13.96
	最大, Max	45.08	19.55	45.66	22.13	46.28	16.43	46.36	16.63	46.66	16.01	52.26	18.08	48.16	21.34	48.48	19.30
	最小, Min	40.98	13.53	39.74	12.33	43.43	12.08	42.47	13.25	44.58	12.14	43.77	3.50	41.08	10.75	41.05	10.07
	标准偏差, S	0.93	1.38	1.14	1.77	0.76	1.09	0.93	1.20	0.52	0.99	1.49	2.48	1.66	2.20	1.67	2.28
	S _{CaCO3}	1.66		2.04		1.36		1.66		0.93		2.66		2.96		2.98	
大岩顶灰岩矿 1 [#] 采区	统计数目, N	18		29		6		16		11(彩营矿)		16		28		8	
	平均值, X	44.65	10.68	45.04	10.18	44.46	10.57	42.98	12.46	51.22	3.37	46.23	9.12	45.57	9.90	46.03	8.44
	最大, Max	48.46	15.35	48.92	18.42	49.47	13.88	47.22	18.27	54.51	5.53	50.33	12.88	49.06	15.77	49.79	12.18
	最小, Min	41.28	6.87	37.64	6.37	41.70	5.74	37.45	7.63	48.34	0.48	43.01	5.86	40.34	5.22	42.23	5.23
	标准偏差, S	2.19	2.35	2.50	2.95	2.92	3.11	3.07	3.25	1.97	1.70	2.05	2.07	2.31	2.63	2.41	2.45
	S _{CaCO3}	3.91		4.46		5.21		5.48		3.52		3.66		4.13		4.30	
大岩顶灰岩矿 2 [#] 采区	统计数目, N	12		24		9		4				20		30		8	
	平均值, X	45.97	9.10	44.79	9.60	42.44	12.77	47.28	6.08			47.34	6.58	44.70	10.06	44.63	10.51
	最大, Max	49.92	17.78	48.79	14.71	47.01	18.50	48.35	6.85			50.87	14.26	49.06	20.64	49.16	15.90
	最小, Min	38.64	5.12	40.06	5.01	36.86	6.82	45.70	5.23			39.82	4.44	36.94	5.92	39.23	4.82
	标准偏差, S	3.34	4.13	2.24	2.36	3.28	4.16	0.97	0.57			2.32	2.28	2.66	3.17	2.95	3.22
	S _{CaCO3}	5.96		4.00		5.86		1.73				4.14		4.75		5.27	

续表

时间	2006年	11月		12月		2007年1月		2月		3月		4月		5月		6月	
矿名	项目	CaO	SiO ₂	CaO	SiO ₂	CaO	SiO ₂	CaO	SiO ₂	CaO	SiO ₂	CaO	SiO ₂	CaO	SiO ₂	CaO	SiO ₂
石山灰岩矿	统计数目, N	22		27		24											
	平均值, X	47.40	10.86	47.65	10.94	47.31	11.74										
	最大, Max	49.03	15.78	49.20	14.23	48.94	15.39										
	最小, Min	45.21	8.64	45.38	8.26	44.77	9.02										
	标准偏差, S	1.02	2.02	0.91	1.56	1.06	1.80										
	S _{CaCO3}	1.82		1.625		1.89											
大岩顶灰岩矿1 [#] 采区	统计数目, N	15		20		22											
	平均值, X	46.27	9.00	47.02	7.55	47.38	7.04										
	最大, Max	52.24	14.87	49.75	13.03	51.06	13.15										
	最小, Min	41.12	3.20	42.46	4.12	42.69	3.34										
	标准偏差, S	3.15	2.91	1.75	1.97	2.31	2.79										
	S _{CaCO3}	5.63		3.125		4.125											
大岩顶灰岩矿2 [#] 采区	统计数目, N	15		22		20											
	平均值, X	45.41	9.33	46.23	8.36	45.72	8.87										
	最大, Max	51.46	24.59	50.01	13.22	48.69	14.31										
	最小, Min	32.43	4.22	42.22	4.00	39.31	3.81										
	标准偏差, S	4.56	4.95	1.90	2.33	2.32	2.82										
	S _{CaCO3}	8.14		3.39		4.14											

1.2 硅铝质原料（页岩）

斗板坪页岩矿床赋存在三叠——侏罗系小坪群（(T3r—J1)^a）中，主要由深灰、灰黑色炭质页岩及灰白色泥岩组成。其物理特性如下：

①.深灰、灰黑色炭质页岩

矿物成分以粘土质矿物为主，粉砂之次，含炭质和少量铁质；炭质多沿层面分布。为泥质结构，页片状构造，单片厚度多在 0.5~1.5cm 之间。

②.灰白色泥岩

矿物成分绝大多数为粘土矿物，含少量的粉砂及铁质，泥质结构，片状、块状构造。矿石具有较好的粘性和可塑性。该种矿石主要分布于矿床上部，数量有限。

上述二种矿石类型均以低硅高铝为特征，是我公司生料配方中十分合适的矿石类型。

炭质页岩化学成分(%) 表 6

	L.O.I	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl ⁻	TOTAL	SM	AM
最高	12.03	63.04	31.58	12.20	0.32	0.92	2.91	0.29	1.79	0.0093		1.95	10.10
最低	4.99	46.78	22.22	1.00	0.26	0.29	1.98	0.11	0.02	0.0019		1.20	2.01
平均	10.48	51.95	25.67	7.43	0.29	0.74	2.32	0.19	0.98	0.0069	100.05	1.58	5.15

1.3 铁矿石

化学成分一般如下：

铁矿石一般化学成分(%) 表 7

L.O.I	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	TOTAL
9.13	39.43	3.08	45.60	0.47	0.25	0.20	0.14	1.72	100.02

1.4 无烟煤

使用越南进口无烟煤。

无烟煤工业分析(%) 表 8

Mad	Vad	Aad	FCad	Qnet.ad(Kcal/Kg)
0.43	6.80	29.86	62.90	5372.53

煤灰化学成分(%) 表 9

L.O.I	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	TOTAL	SM	AM
—	58.59	26.28	6.82	0.70	2.63	1.00	0.50	0.20	96.72	1.77	3.85

2. 预分解窑经典生料控制方法

水泥工业的发展史是一个不断寻求提高产品质量、降低消耗的过程；质量起着决定性作用。生料成分均匀对熟料质量有直接影响，我国制定的“窑外分解窑工艺管理规程”要求入窑生料 $S_{CaCO_3} \leq 0.20\%$ ，这实质上接近化学分析的误差要求（对于生料CaO分析误差要求：同一试验室是 0.25%，不同试验室为 0.40%）；每增加 1%的CaCO₃，C₃S约增加 13%，C₂S约减少 11.5%。

2.1 “均化链” 构成

预分解窑生料制备是靠“均化链”实现质量均匀的。所谓“均化链”，就是把均化功能分摊给生料制备各个工艺环节。一个完整的生料均化系统包含四个缺一不可的环节，即：原料矿山的搭配开采与运输、原料的预均化与储存、生料磨的配料控制与调节、入窑生料的均化与储存。这四个环节互相连接而组成一条生料均化链，成为保证入窑生料成分的均匀性和稳定性的必要条件；每步功能明确：预均化堆场储存和均化块状物料，均化系数 $H=5-10$ ，一般出堆场石灰石标准偏差 $S_{CaCO_3} \leq 1.0\%$ ；QCX质量控制系统在多种原料入磨的条件下，保证出磨生料标准偏差不大于入磨原料标准偏差，即出磨生料保证 $S_{CaCO_3} \leq 1.0\%$ ；生料均化库利用边风的重力均化作用和中心风的空气搅拌作用最终完成生料均化，均化系数 $H=5-10$ ，即满足入窑生料 $CaCO_3$ 的标准偏差 $S_{CaCO_3} \leq 0.20\%$ 的要求。生料制备系统各环节均化作用比例大致如表 10。

均化系统功能配置 表 10

单元环节名称	平均均化周期 (h) *	CaCO ₃ 标准偏差		均化效果 S ₁ /S ₂	完成均化工作量比例 (%)
		进料S ₁ (%)	出料S ₂ (%)		
矿山	96~168		2~10		≤10
预均化堆场	2~8	2~10	1~3	3~6	35~40
生料磨	1~10	1~3	1~3	1~2	0~15
生料均化库	0.5~4	1~3	0.1~0.4	4~15	40

*为各环节生料（原料）达到出料（标准偏差）目标值所需要的运作时间。

生料均化系统的技术经济意义主要体现在：消耗较少的电耗，使入窑生料达到技术要求。

2.2 预均化堆场建堆工艺要求

在研究生料均化链构成时，首先考虑的是石灰石储存方式；单一灰岩矿 $S_{CaCO_3} \geq 3$ 即可考虑设预均化堆场。上述石山、大岩山两矿点地质数据统计结果表明：石山矿平均地质品位 $CaO=45.05-48.48\%$ ， $SiO_2=10.23-14.21\%$ ，考虑到采矿 2~4%的贫化率，预计采出品位 $CaO \approx 44-46\%$ 、偏低；计算 $S_{CaCO_3}=1.89-3.45$ ，不算太大，但 $SSiO_2=1.26-2.83$ ，变异系数 $CV_{SiO_2}=12.13-26.49\%$ ，波动较大。大岩山矿地质品位平均 $CaO=46.01-48.82\%$ ，考虑到采矿的贫化率，预计采出品位 $CaO \approx 45-47\%$ ；计算 $S_{CaCO_3}=7.46-13.55$ ，变化程度之剧烈实属罕见；大岩山矿石品位比石山高得有限，之所以采用仅因其硅含量相对较低。像这样单一矿山生产即需要均化，对这两个矿山，一般设计单位无疑必采用预均化堆场。

两个灰岩矿的石灰石共同进预均化堆场均化，相当预配料。这需要两种灰岩单独破碎、分别储存；同时要求矿石进堆场的工艺实施具有可控定量送料、系统取样设备、快速分析仪器、反馈控制送料配比手段；像国外普遍采用的大型取样站配以 X—荧光分析仪或 γ —射线分析仪及堆场质量控制系统（软件）即属此类；只有这样才能保证出堆场物料成分基本稳定。具体可按预均化堆场可容物料量的多少分 5~10 段进行控制，如对每堆 50000t 储量的长形预均化堆场，每段相应料量约 5000~10000t；经规范取样分析，获得该段的进料成分信息，并由控制程序自动计算出下段进堆物料配比及数量；控制的逻辑是通过改变进堆物料配比，不断消除料堆已有的物料成分与目标值的偏差，最终使整个料堆成分达到或接近目标值。表

11 为一大型预配料堆场控制调整成分实例。

长形预均化堆场预配料分层堆料化学成分报出单举例 表 11
第五层堆料结果报出单

序号	重量 t	L. O. I	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	CL ⁻	KH	SM	AM	SR
1	50000	36.72	12.07	1.73	1.34	44.74	1.35	0.99	0.12	0.57	0.009	1.225	3.93	1.29	6.98
2	20000	36.70	12.00	1.70	1.30	44.70	1.30	1.00	0.10	0.60	0.009	1.233	4.00	1.31	7.06
3	5000	36.57	12.33	1.77	1.37	44.54	1.35	1.01	0.12	0.56	0.009	1.191	3.93	1.29	6.97
4	25000	36.67	12.07	1.71	1.31	44.67	1.31	1.00	0.10	0.59	0.009	1.225	4.00	1.31	7.06
5	25000	36.77	12.07	1.75	1.37	44.81	1.39	0.98	0.14	0.55	0.009	1.226	3.87	1.28	6.90

第六层堆料结果报出单

序号	重量 t	L. O. I	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	CL ⁻	KH	SM	AM	SR
1	50000	36.72	12.07	1.73	1.34	44.74	1.35	0.99	0.12	0.57	0.009	1.225	3.93	1.29	6.98
2	25000	36.67	12.07	1.71	1.31	44.67	1.31	1.00	0.10	0.59	0.009	1.225	4.00	1.31	7.06
3	5000	36.95	11.69	1.69	1.29	45.03	1.35	0.96	0.12	0.59	0.009	1.277	3.92	1.31	6.92
4	30000	36.72	12.00	1.71	1.31	44.73	1.32	0.99	0.11	0.59	0.009	1.234	3.97	1.31	7.02
5	20000	36.72	12.17	1.76	1.38	44.76	1.40	0.98	0.14	0.54	0.009	1.214	3.88	1.27	6.91

第七层堆料结果报出单

序号	重量 t	L. O. I	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	CL ⁻	KH	SM	AM	SR
1	50000	36.72	12.07	1.73	1.34	44.74	1.35	0.99	0.12	0.57	0.009	1.225	3.93	1.29	6.98
2	30000	36.72	12.00	1.71	1.31	44.73	1.32	0.99	0.11	0.59	0.009	1.234	3.97	1.31	7.02
3	5000	36.10	11.44	1.65	1.26	45.22	1.34	0.94	0.13	0.61	0.009	1.313	3.93	1.31	6.93
4	35000	36.77	11.92	1.70	1.30	44.80	1.32	0.99	0.11	0.59	0.009	1.245	3.97	1.31	7.01
5	15000	36.59	12.41	1.80	1.43	44.60	1.42	1.00	0.14	0.51	0.009	1.199	3.84	1.26	6.89

第八层堆料结果报出单

序号	重量 t	L. O. I	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	CL ⁻	KH	SM	AM	SR
1	50000	36.72	12.07	1.73	1.34	44.74	1.35	0.99	0.12	0.57	0.009	1.225	3.93	1.29	6.98
2	35000	36.77	11.92	1.70	1.30	44.80	1.32	0.99	0.11	0.59	0.009	1.245	3.97	1.31	7.01
3	5000	36.35	12.71	1.82	1.42	44.25	1.36	1.04	0.12	0.53	0.009	1.145	3.92	1.28	6.98
4	40000	36.72	12.02	1.72	1.32	44.73	1.32	0.99	0.11	0.59	0.009	1.231	3.95	1.30	6.99
5	10000	36.72	12.27	1.79	1.43	44.78	1.45	0.98	0.16	0.51	0.009	1.203	3.81	1.25	6.85

序号说明：

- 1—单堆最终料堆总重及预配料物料化学成分目标值；
- 2—本单元（料层）堆料前堆场已堆物料量及化学成分；
- 3—本单元（料层）堆料量及物料化学成分；
- 4—本单元（料层）堆料后堆场已堆物料量及化学成分；
- 5—本料堆需再堆物料量及物料化学成分控制目标值。

预均化堆场本身价格昂贵，占地面积大，加上必要的料堆取样、分析、控制配料设施与设备，基建投入会增加很多。

2.3 生料均化库

新建厂皆采用连续式均化库或多料流式均化库：连续式均化库的典型代表是德国克劳地厄斯彼得斯(Claudius Peters)公司研制混合室库和后来经改进的均化室库；多料流式均化库包括德国 IBAU 中心室均化库、丹麦史密斯公司控制流均化库 (FLS CF (Controlled Flow) 库)、德国伯力姆公司多股流式均化库(MF 库)以及国内南京院 NC 型多料流式均化库、天津院 TP 型多料流式均化库等。这些库不再考虑对库内生料成分再做临时性校正或调整，而是由生料磨控制系统使出磨（入库）生料成分的波动幅度尽量减小。因此要使出库生料的成分合格，必须使入库生料成分围绕着控制指标波动；其次要保证在一定时间间隔内，使入库生料的平均成分达到或接近控制指标，这一时间间隔称为均化库的允许波动周期，它取决于

库的内部结构和均化能力，一般为 4~6 个小时。采用这种库，必须严格按库的允许波动周期来控制出磨生料成分，即要严格磨头配料控制。

上述库工作原理有相似之处，如 TP 型多料流式均化库特点如下：

①. 库顶采用溢流式生料分配器。溢流式生料分配器分为内筒与外筒，内筒壁开有多个圆形孔洞，在外筒底部较高处开有 6 个出料口，用以向空气输送斜槽分配生料，以便将生料水平铺入库中。

②. 库内底部设置大型圆锥结构，使土建结构更加合理；混合搅拌室设在库外，减少库内充气面积。

③. 库壁与圆锥体之间的环形空间分 6 个卸料大区，12 个充气小区，每个充气小区向卸料口倾斜，斜面上装设充气箱，各区轮流充气；在卸料区上部设置减压锥，以降低卸料区压力。

④. 当某区充气时，上部形成漏斗流，同时切割多层生料，库内生料流同时有径向混合作用。

⑤. 由库中心的两个对称卸料口卸料。出库生料可经手动、气动、电动流量控制阀将生料输送到计量小仓；小仓集混料、称量、喂料于一体。这个带称重传感器的小仓，由内外筒组成；内筒壁开有孔洞，根据通管原理，进入计量仓外筒的生料与内筒生料会产生交换，并在内仓经搅拌后卸出。

⑥. 经标定，TP 库均化充气电耗为 0.25 kWh/t 生料，入窑生料 $S_{CaO} \leq 0.25\%$ ，均化系数 $H=3\sim 5$ ，生料卸空率可高达 98~99%。

均化库在整个“均化链”中是薄弱环节，其承担的均化工作量比例最大，但因触及设备、管路量大，受外界影响因素多，故要求设计阶段正确选择库型、施工阶段保证质量，日常生产中必须重视经常性的维护和定期检修，只有这样均化库才能发挥应有的效果。

2.4 传统生料均化链缺憾

企业管理与员工素质制约着均化链的建立、健全与运作，现实国内一些企业均化链并不完善，主要表现如下：

①. 复杂的原料矿山由于地质工作投入不够或技术能力所限，建立不起矿化模型，采矿无序，搭配不合理。

②. 进预均化堆场物料配矿机制不健全，难于实现预配料或预配料效果不佳。

③. QCX 质量控制系统完整、有实效投入的企业并不多；大多只把 X 荧光分析仪当作“分析仪”，而没使用控制软件；更有甚者，由于没有采取有效措施，消除影响 X 荧光分析仪分析准确度的矿物效应和颗粒效应，认为 X 荧光分析仪分析不准，而丢弃不再使用。

④. 均化库的设计、安装、维护与管理有时不到位，故起不到理想的均化效果。

3. γ —射线分析仪的使用推出生料质量控制新概念

3.1 引进 γ —射线分析仪及生料质量控制系统(软件)——是新方案得以实现的决定因素

百年水泥工业, 生料质量控制始终依靠的是磨尾取样分析、磨头调整配比的模式; 由此创造出多种旨在降低样品与总体质量偏离的“取样理论”及弥补由于长周期滞后(约 1 小时)出现调整不确的“模糊控制”。

美国热电公司研究开发的中子活化瞬发 γ -射线分析技术 1983 年问世, 这种方法可瞬间准确地分析块状物料成分。该公司随后研制出 γ —射线分析仪及生料质量控制系统(软件), 并成功地用于水泥厂生料制备。该系统一经投入就显示出独特的优势:

①. 首先其不破坏试样; 对立磨勉强能承受的 200mm 大块物料照测无误, 彻底克服了水泥企业惯用的 X—荧光分析仪固有的颗粒效应和矿物效应对分析准确度的影响;

②. 生产所用全部原料均载于皮带经其测试, 这使任何“取样理论”都相形见绌;

③. 生料质量控制系统(软件)能以分钟间隔完成调整入磨原料配比工作, 使出磨生料成分波动程度达到“行颁”入窑生料控制水平, 一举变传统后馈控制为前馈控制, 解决了水泥企业生料控制的百年痼疾。

优点极其突出, 但当时昂贵的价格限制了它的推广。随着时间的推移, 这套系统性能不断改善, 2003 年已推出第五代产品, 在迈过初始阶段的高价期后, 这项技术在美国得到迅速推广, 21 世纪初亦出现在我国的水泥企业, 同时价格在不断降低, 已逼近原价的三分之一。经多次技术交流和调查研究后我公司决定订购 CBX1 型 γ —射线分析仪及生料质量控制系统(软件)。 γ —射线分析仪具有较好的对物料分析的准确度和精确度(见验收篇); 出磨生料能达到表 12 所示水准, 基本满足入窑要求。

出磨生料保证率值波动范围

表 12

熟料率值	保证标准偏差 (σ)	期望(有望达到)标准偏差 (σ)
LSF	3	2
SM	0.15	0.1
IM	0.18	0.1

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}$$

式中 n —样品数, 此处为 30

x_i — n 个分析值中的一个分析值

$$\mu = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \text{ —平均分析值}$$

伴随着 γ —射线分析仪的引进, 生产工艺线相应作了下述精简。

3.2 圆库储存石灰石

所用两种石灰石分别入 $\phi 18 \times 40m$ 储存、配料圆库, 两库总储量近两万 t, 满足工厂近三天的用量。人们有这样的疑问——不设预均化堆场能满足生料磨对入磨物料的均质要求吗?

我们从控制周期与物料量的关系来分析：传统预均化堆场单堆储存 6~10 天物料量，一般磨机一小时调整一次配比，料堆即保证 144~240 小时(周期)矿石成分稳定，对于 5000t/d 的生产线，相当 46000~77000t 储量。若 1 分钟调整一次入磨原料配比，相同周期(144~240)堆场保证矿石成分稳定的时间段缩短为 2.4~4.0 小时；对于 5000t/d 的生产线，这段时间的原料充其量为 900~1500t；我公司又是使用两种灰岩，大致比例为 2:1，石山矿成分稳定，用量大；大岩顶矿 300~500t 的矿石，对于沉积岩来说，只要进厂控制好一些，这 500t 矿石成分变化不会很大。

3.3 减少生料均化库容积和充气量的尝试

由于设计滞后于研究，我公司只能采用南京院为 5000t/d 生产线配套定型的 $\phi 22.5 \times 62\text{mNGF}$ 均化库，但果断地把库高由 62m 降到 50m，有效储量由 2400t 降到 1600t，储期两天。传统设计的均化库库容多为 3 天的用量，一般磨机一小时调整一次配比，“3 天用量”在满库条件下也就是 72 层；于是出现“小库能保证入窑生料成分稳定吗？”这样的疑问。

我公司 ATOX50 立磨产量 450t/h，传统一小时调整一次时库中每层料厚约 755 mm (生料堆积密度为 1.50~1.75t/m³)，六层即为 4530mm，很难保持库内良好的充气状态，对如此厚的料层在边风作用下有序切割重力均化，这即是“均化库难以均化”的根本原因；采用 γ -射线分析仪后 1 分钟调整一次生料配比，一小时库内即可“铺”60 层，每层料厚度为 13 mm，很薄；六分钟一个调整周期料层亦仅为 78mm 厚，一吹即透，便于均化。

华夏夫斯基指出，生料成分的周期性波动是若干不同频率、不同振幅的正弦波叠加的结果，可按周期性函数的傅立叶级数展开，并提出以进出生料均化库物料成分波动振幅的比值 ε 来评价均化能力，即：

$$\begin{aligned} \varepsilon &= k \cdot A_1 / A_2 \\ &= k \cdot \sqrt{1 + V^2} = \kappa \cdot \sqrt{1 + (2\pi FT_R)^2} \end{aligned}$$

式中：

A_1 、 A_2 —均化库进出料成分波动振幅；

K —系数；

V —无因次量， $V = 2\pi FT_R$ ；

F —成分的波动频率，即单位时间围绕目标值波动的次数；

T_R —生料在库内平均停留时间。

该方程式确定了均化能力、波动频率和停留时间三者的关系。由此可见，在相同的气力混合条件下，入窑生料成分波动的频次越多，或生料在库内停留的时间越长，其均化效果越好。显然，延长生料在库内的停留时间必须增大库的有效容积，加大基建投资，这是不希望的；因此，控制和提高生料成分波动的频次是最为经济有效的途径，这点我们做到了。在 γ -射线分析仪投入运行后，库底卸料充气箱、中央混合室和搅拌仓充气已弱化，我公司停开一台罗茨风机，生料均匀性却得到提高。

现时磨的机械故障已很少，其运转率直逼窑系统；生料磨能力太大，运转率过低，势必造成生料库中“回灰层”过厚，“回灰”与生料成分相比，化学成分有大小不一的偏差，这对煅烧不利。但考虑国内电价避峰就谷的因素，没有把库的容积减得更小。

4. 新方案技术经济分析

4.1 工艺效果

4.1.1 生料化学成分均匀程度

我公司生料制备系统安装 γ 一射线分析仪后，很快通过仪器静态分析重复性、静态分析精密度、动态分析精密度及生料质量控制系统（软件）考核，实际生产出磨生料三率值的标准偏差达到 $S_{KH}=0.01$ 、 $S_{SM}=0.07$ 、 $S_{AM}=0.04$ （详见 2007 年中国水泥第*期验收报告），甚至超过行颁入窑生料三率值控制标准（ $S_{KH}\leq 0.02$ 、 $S_{SM}\leq 0.1$ 、 $S_{AM}\leq 0.1$ ）要求，实现了热电公司承诺的期望值指标，为稳定生产提供了原料保障。

4.1.2 熟料物理性能

当前回转窑产量稳定在 5700~6000t/d，运转率高达 95%，熟料质量相应也有提高。

γ 一射线分析仪使用前熟料质量变化情况 表 13

项 目		标准稠度 用水量 (%)	凝结时间 (min)		抗折强度 (MPa)			抗压强度 (MPa)		
			初凝	终凝	1 天	3 天	28 天	1 天	3 天	28 天
γ 一射线分析仪 使用前	平均值, X	23.80	126	155	3.8	6.0	9.5	16.3	32.4	58.2
	标准偏差, S	0.41			0.30	0.28	0.51	1.40	2.19	1.25
γ 一射线分析仪 使用后	平均值, X	23.60	127	180	3.9	6.5	9.9	16.8	34.2	61.3
	标准偏差, S	0.11			0.28	0.30	0.32	1.01	1.64	1.10

4.2 经济效益

4.2.1 减少基建投资

使用 γ 一射线分析仪及生料质量控制系统方案与传统使用预均化堆场方案投资比较如表 14。

使用 γ 一射线分析仪方案与传统使用预均化堆场方案投资比较 表 14

编号	γ 一射线分析仪方案		传统使用预均化堆场方案		
	项目	资金(万元)	项目	资金(万元)	备注
1	2- ϕ 18 \times 42m 石灰石库	2 \times 290=580	2- ϕ 5m 碎石配料仓	2 \times 40=80	块状物料配料
2	γ -射线分析仪	400	ϕ 80m 圆形预均化堆场	1193	溧阳厂竣工价
3			预均化堆场占地 30 亩	30	一般地价
4			ϕ 10m 混合石灰石库	70	配料站储存库
5			ϕ 5m 高钙校正库	40	配料站储存库
6			X-荧光仪	80	
合计		980		1493	
备注	包括 γ -射线分析仪、放射源、质量控制系统软件购置及国内外相关进出口权申请、仪器运输、出入关检验、环保验收手续办理等费用，总计 400 万元。		不包括预配料所需取样站基建投资、设备购置或采用 γ -射线分析仪进行混料控制的硬件、软件及相应手续费用的支出。		

4.2.2 减少运行费用

预均化堆场堆取料机装机总容量约 300KW，以 0.5 作业率、年工作 320 天计，则少耗电约为：

$$Q_d=0.5 \times 300 \times 24 \times 320=1152000\text{KWh};$$

生料均化库库底减少一台 45KW 罗茨风机，少耗电为：

$$Q_L=45 \times 24 \times 320=345600\text{KWh};$$

总节约电量：

$$Q_Z=1152000+345600=1497600\text{KWh}。$$

以广东平均电价 0.7 元/KWh 计，年减少运行费用约为：

$$\text{RMB}=0.7 \times 1497600=1048320 \text{ 元}$$

运行费用减少幅度与企业规模相关，规模越大减少费用数额越多。

5. 展望

γ 射线分析仪及生料质量控制系统（软件）的使用，使出磨生料成分均匀程度达到入窑要求，这种“一步到位”的控制方法简化了系统控制，适合当前国内管理模式和思维方法。在生产工艺方面必将促使物料均化、储存方式变化——现时广泛采用的“均化链”有被弱化或取代的趋势，预均化堆场已不再也无须承载以往均化重责，只要原料能供应上，占地面积很大、设备费用很高的预均化堆场就可取消，这样既减少企业占地面积又降低基建投资，其次是避免了这一段的运行电耗；生料均化库往往不堪重负，均化效果好的不多，在使用 γ 射线分析仪及生料质量控制系统（软件）后，库起到的只是缓冲作用，均化功能大幅度减少，库的容积和电耗可降低，一种新的生料均化理念正待完善；适宜这种新工艺的生料库机理和规格要求的研究已提到日程，未来采用小型库、甚至取消这一环节也不是没有可能；新一轮技术革新开始了，这是不争的事实。