

733.02

76—4

水泥生产 中的碱、氯、硫问题

(译文)

山东水泥工业设计室资料组

目 录

一、与窑废气的反应	
——挥发物质的循环过程，结壳和结圈	1
二、如何使碱不妨碍预热器的效率	33
三、粉尘循环对悬浮预热器内结壳 预分解和部分放风的影响	42
四、在悬浮预热器内减少碱和氯的循环	48
五、旁路系统的操作经验和设计要求	54
六、预热器窑内硫的情况	58
七、预热器的安全操作	64
八、在立波尔窑上除碱	74
九、减少立波尔窑内碱循环的措施	89
十、在回转窑的进口处进行预分解	96
十一、降低熟料中碱含量的有效方法	102

TQ172.16/
25

一、与窑废气的反应——挥发物

质的循环过程，结壳和结圈

F.W. Locher, S. Prung 和 D. Opitz

I、引言

在与生料逆向流动的水泥窑的气体中，除含有粉尘外，还含有碱、硫、氯和氟的化合物。它们从生料和燃料中挥发和分解出来，然后在窑废气中进一步反应而形成的，它们与生料反应，或者在窑的较冷区域，在预热器中，或在以后的烘干设备内沉降到生料上，形成所谓的“内部循环”。如果在收尘设备内从气体中分离后重新进入生料中去，就称为闭路的“外部循环”。如果它们随分离的粉尘弃去，或者随净化后的气体排掉，则外部循环受到破坏。

生料中的这些组分在循环过程中富集。因此，在水泥熟料中它们的浓度也提高了。在极限情况下，其数值可以从生料中含量按没有挥发损失计算出来。生料中这些组分的富化作用能够基本上改变生料在水泥窑内的状态，特别是它的粘性和熔融性，从而形成不希望有的结壳现象。此外，窑废气和固体生料之间的直接反应估计也能导致结壳和结圈现象。

窑废气本身，或者窑废气和生料之间的反应也能决定性地影响这些挥发性化合物的挥发量。在反应中生料停留的时间愈大，挥发量则愈少。

本文首先叙述碱、硫、氯和氟的化合物的循环过程，然后讨论这些物质的挥发问题，最后，讨论它们对窑操作的影响。

特别是它们对形成结壳和结圈的意义，以及减少或消除它们所需采取的措施。

II. 循环过程

I. 粉尘

窑废气中的粉尘量对于减少挥发性组分在窑和预热器中因捕集而在内部和外部循环中富集起着决定性的作用。回收气体旁路的方法来减少内部循环，即从窑废气中抽出一部分气体直接送到专用的收尘设备中去，可使挥发性组分免于进入预热器。在这部分气流中含有的已凝固的挥发性组分与窑灰一起分离下来并将它们弃去。破坏外部循环的方法是：将窑废气通过预热器烘干机或烘干磨后，使挥发性组分已在其中富集的粉尘分离下来，并将它们弃去。

这些措施的有效性，特别是关于这些措施的经济性。在很大程度上随粉尘中尘料量的增加而恶化。因为，在被分离的挥发性组分成为常量的情况下，被分离的总粉尘量增加了。因此，如果要抛弃所分离的粉尘的话，首先要了解在进入收尘设备以前的窑废气中的粉尘量和组成。同样，如果一定要采用旁路系统的话，首先要了解进入预热器以前窑废气的含尘量，这些是判定在内部或外部循环中进行捕集效果的标准。

西德的杜塞尔多夫水泥工业研究所对不同窑型进行的测定资料表明了带有旋风预热器和篦子预热器的窑废气中的粉尘量和组成，废气含尘量以单位熟料来表示。在带有旋风预热器的窑内，按照最高一级旋风筒熟料交换效率的不同为48-117克/吨熟料，在带有篦子预热器的窑内，按料球层透气率的不同为1-20克/吨熟料。

在帶有籠子預熱器的窯內，從中間除塵旋風筒內分離的粉塵量為5~18克/公斤熟料，在帶有內部裝置的濕法窯的廢氣中的粉塵量與帶旋風預熱器的窯相近似。這些粉塵的來源和組成都相差很大，按照S. Sprungl⁽¹⁾的研究，從帶有旋風預熱器的窯內出來的廢氣粉塵中揮發性組分的含量僅為1~2%；但在帶有籠子預熱器的窯內為22~78%。從中間除塵中分離出來的粉塵的相應含量，接近於后一數值。

對於用旁路系統來捕集內部循環的揮發性組分來說，進預熱器以前廢氣中的含塵量是很重要的。R. Frankenberg⁽²⁾為計林旋風預熱器的熱效率而求該值為500~1500克/公斤熟料。H. Ritzmann⁽³⁾在四台窯的最下一级雙旋風筒的排氣管道上進行測定給出，在除塵效率約90%的情況下，含塵量為800~1050克/公斤熟料，因而與Frankenberg的估計數字頗為一致。這些數字相當於廢氣含塵量為530~700克/標米³廢氣，如果單位廢氣量按1.5標米³/公斤熟料考慮的話，H. Herchenbach以及W. Bohn和U. Bosshard等人的論文中所敘述的在窯軸線上部喂料室進行的測定給出一個低得多的數值，在20~200克/標米³之間；或者以熟料表示，為30~300克/公斤熟料之間。按照Herchenbach的意見，高含塵量的數字只是由於生料在入窯以前就為廢氣所捕集，然後又一次被夾帶到廢氣管道中去造成的，經常會看到在進料溜子上形成結塊，并使生料流揚起。在帶有籠式預熱器的窯內所進行的類似的測定却不是這樣；但這是可以估計到的，因為生料成球以後，粉塵負荷率是較小的。

綜合上述可以認為，在帶有旋風預熱器的窯內，不僅在預熱器以前而且在以後的氣體含塵量都較大，因而在揮發性組分

的循环中进行捕集的效果也较差。但是，现有的测定数据和经验还不允许为安装一个气焊抽吸旁路系统提出普遍有效的准则。安装的地点是通过试验找出气体含尘量最低的地方。因此，在未来的研究中，首先要决定如何确定在窑的喂料端排气横截面上粉尘量和组成的分布情况。

2. 碱

中欧水泥生料的碱含量在不掺入窑灰时约为 K_2O : 0.5~2.0% (重量) 和 Na_2O : 0.05~0.6% (重量) 范围内。 Na_2O/K_2O 的重量比在 $\frac{1}{3}$ 和 $\frac{1}{10}$ 之间，这就是说， K_2O 含量较多。在其他国家，例如，在美国， Na_2O 含量与 K_2O 含量大致相等，或者还超过。

在原料中，碱主要存在于粘土矿物中，如云母和长石。其次是，在石灰石中一般含有盐类的形式，燃油也带入一些碱质。硬煤按其来源和灰分的不同，其碱含量 ($Na_2O + K_2O$) 一般在 0.8~4% (重量) 之间。

关于碱的加热挥发情况，无疑 K_2O 比 Na_2O 要容易挥发得多。按照 C. Goeo⁽⁴⁾ 的意见，云母，特别是云母类粘土矿物伊利石，其开始挥发的温度较长石为低。熔剂能防止碱蒸汽由熟料中逸出，因为它降低了球粒的多孔性，从而提高了扩散阻力。因此，一般用掺入易熔剂，如氧化铁，来阻止碱的挥发。此外，生料中的硫酸盐或其他硫化物以及窑废气中的二氧化硫都能降低碱的挥发性。

窑废气中含有水蒸汽能加强碱的挥发，因为可能形成碱的氢氧化物⁽⁵⁾ (温度超过 $1200^{\circ}C$ 时，蒸汽压力超过 200 毫米汞柱⁽⁶⁾)。根据这一点，K. Brauchtkauser⁽⁷⁾ 建议在减少冷却

空气量的情况下，在熟料冷却机内喷水，使入窑二次空气润湿以提高窑废气的水蒸汽含量。

此外，在生料中掺入氯化物也可以促进碱的挥发^(8, 9, 10)，因为它在生料中形成氯化碱，当温度超过 1000°C 时，在熟料煅烧中形成的所有碱化合物中它具有最大的蒸汽压力⁽¹⁾。此外，根据Gibbs提出的氯化碱的自由形成热⁽¹¹⁾可标出温度超过 1200°C 时分解作用大为强化。

从生料中逸出的蒸汽状态的碱化合物以已分解的和未分解的形式存在于热窑气中。已分解的碱在窑的较冷区域，在氧化条件下，与同时存在于窑废气中的 SO_2 、 CO_2 和 Cl^- 化合形成硫酸碱、碳酸碱和氯化碱。硫酸碱在高温下形成较快，因为它的形成热较碳酸碱和氯化碱大，而分解压力则较低⁽¹²⁾。因此，如果 SO_2 实际不再存在，以及气体温度降到 1200°C 以下时，碳酸碱和氯化碱才形成。

在窑内温度较低的区域，碱化合物的蒸汽主要凝结在较冷的生料上，首先是硫酸碱，温度再低时是碳酸碱，最后是氯化碱。但是，凝结区域是不同的，如果窑内的温度分布变化的话。因此，用局部取样试验只能掌握不完全的情况。由于凝结使碱盐局部富集并形成碱盐的熔融体，它使生料颗粒粘结从而产生结壳现象。这种凝结最容易出现的地方是窑喂料端附近，旋风预热器的最低一级，以及篦子预热器的热室。

凝结在生料上的碱化合物重新进入窑内，并由此形成内部循环^(4, 15)。因为硫酸盐较难挥发，它在烧成带内实际不再挥发，并随熟料出窑。但是，较易挥发的碳酸碱和氯化碱则重新挥发，并再一次进入内部循环。闭路外部循环形成的碱是：它

随窑灰离开窑，在收尘器内分离，混入生料中再一次喂入窑内。

按照 P. Weber⁽¹⁴⁾ 的意见，从生料中挥发的碱量可以从窑喂料端生料中碱含量和熟料碱含量算出。Weber 提出内部循环的大小可用“循环因数”来表示，它是窑喂料端生料的碱含量与喂入预热器前入窑生料的碱含量的重量比。根据 P. Weber⁽¹⁴⁾ 以及 V. J. Viktorov 和 B. V. Volkovskij⁽¹⁵⁾ 等人的测定，在带有旋风预热器的窑上，它在 1.5 ~ 3.1 之间；而在带有篦子预热器的窑上在 1.0 ~ 1.8 之间。因此，在带有旋风预热器的窑上的内部循环平均大于带有篦子预热器的窑。

但是，这些结论并不能直接证明是正确的。用循环因数只考虑了随窑废气离开回转窑并在预热器内凝结到生料上的碱量，从而使生料的含碱量提高了。因此，循环因数只代表窑与预热器之间的循环，但不代表回转窑内的循环，而后者对于结壳和结圈是重要的。这里给出的是在相同基础上窑喂料端生料中的碱含量与熟料中碱含量之差，但不是蒸发碱的总量。在烧成带挥发的碱在离窑以前就又沉降到生料上，它并不影响窑喂料端生料的碱含量。

S. Sprung⁽¹⁶⁾ 的平衡测定提供了碱循环的进一步资料。他同时研究了 11 台带旋风预热器的窑和 10 台带篦子预热器的窑。在这些研究中表明：熟料碱量大大超过了与熟料中的硫酸合成硫酸碱的碱量，并且熟料中实际不含有碳酸碱和氧化碱。没有化合成硫酸碱的碱量在烧结温度下是熟料塔融体的组成部分，因而它不能与窑废气中的有关组分化合，从而也是不挥发的。将这些在熟料中不化合成硫酸碱的碱量从入窑生料所含总碱量中减去，就得出能够与窑废气中有关组分化合的碱量。这些化合反应无疑占主要地位，但并不只是在气流中进行，也直接在生料上或生料中进行，因而这个数值表示能挥发的碱量的上限。

如果把在循环中作为硫酸盐进入的碱的总量（它在通过烧成带时实际不再挥发）扣除窑废气粉尘中和在中间气体粉尘中以及在旁路粉尘中所含的碱，就得出可以在平衡中形成内部循环的最高的碱量。但是，如果生料中含有氯化碱，它将在烧成带重新挥发，从而使碱循环大致按照与氯量相当的碱量加大。在氯含量高的情况下应该特别注意这一点，结果是它将不断提高氯循环（节 II - 4）。

用这个方法对 11 台带旋风预热器和 10 台带篦子预热器的窑所确定的数值列入表 1 中。在研究中，这些数值是根据可靠的测定，有代表性的取样，以及非常准确的化学分析而获得的数据，以便在任何情况，相应的物料平衡的差额不超过平衡总量的 10%。

表 1 生料的碱和窑废气之间的反应程度以及内部碱循环的大小

	碱 量 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$), 计算成 K_2O			
	与窑废气的组分化合		在内部循环中, 最高值	
	克/公斤 熟料	生料中碱量 % (重量)	克/公斤 熟料	生料中碱量 % (重量)
11 台旋风预热器窑	4.7 ~ 17.3	38 ~ 79	3.9 ~ 16.2	33 ~ 74
10 台篦子预热器窑	7.5 ~ 18.4	34 ~ 95	2.6 ~ 14.8	11 ~ 88

从表 1 的数值可以看出，两种窑型在生料的碱和窑废气组分之间的反应程度和内部循环的大小上都没有什么差别。这就是说，两种窑型在回转窑烧成带的碱挥发和预热器的“碱回收能力”上基本没有差别。但是，篦子预热器的料层透气率愈好，内部循环愈小。

在外部循环方面则有基本差别。这就是说，从窑系统排出的碱量差别较大。表 2 列出了两种窑型碱平衡的数据对比情况，在熟料中化合的碱量平均约为 14 和 15 克/公斤熟料，大致相等。

但是，在带篦子预热器的窑内由原料带入的碱平均较高，因而在平衡总量中所占的分量较低。在两种窑系统中，电收尘粉尘带出的碱量平均为 0.9 或 1.3 克/公斤熟料，大致相等。但是，带生料旋风预热器的窑的粉尘量为 48 ~ 117 克/公斤熟料，而带篦子预热器的窑为 1 ~ 20 克/公斤熟料。此外，在篦子预热器中还有可能将中间收尘粉尘排出使碱量进一步降低平均 1 克/公斤熟料。P. Weber⁽¹⁴⁾ 也给出了类似的数值；如果平衡差额相当大，就没有必要去计算这一项排出粉尘。关于旁路系统的效果，在迄今所研究的两台带篦子预热器的窑上大于一台带旋风预热器的窑。但是，迄今所研究的窑的数值还不足以作出最后的结论。在 H. Phlefeldt 的一篇论文中包含了有关这一方面的最新数据。

表 2 水泥熟料和窑灰中的碱

		碱 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)，计算成 K_2O			
		克/公斤熟料		占平衡总量的 %	
		极限值	平均值	极限值	平均值
11 台带旋风预热器的窑	熟料	8.3 ~ 20.5	13.8	88 ~ 95	93
	电收尘粉尘, 48 ~ 117 克/公斤熟料	0.5 ~ 2.2	0.9	4 ~ 9	6
	旁路粉尘 (16 窑), 1 克/公斤熟料	(0.2)		(1)	
10 台带篦子预热器的窑	熟料	11.4 ~ 20.5	15.3	64 ~ 93	82
	电收尘粉尘, 1 ~ 20 克/公斤熟料	0.2 ~ 0.3	1.3	1 ~ 19	7
	中间收尘粉尘, 5 ~ 18 克/公斤熟料	0.3 ~ 2.9	1.0	2 ~ 9	4
	旁路粉尘 (26 窑), 平均 11 克/公斤熟料	2.3 ~ 6.9	4.6	10 ~ 21	15

3. 硫

在水泥原料中硫主要作为硫酸盐和硫化物而存在，在燃料中也作为有机物而存在。在 1000°C 以上并在过剩空气下加热时，它形成 SO_2 并随窑废气逸出。

在节 II - 2 中已提到的研究中，对 21 个西德水泥厂的生料

(部份含有回收粉尘)测定的含硫量为0.5~11克/公斤熟料。在采用含硫特别高的燃油时,由燃料带入的硫最高可达6克/公斤熟料。天然煤气(沼气,在某些所研究的工厂用作燃料)中不含硫。根据对水泥的质量要求,有时需要掺入硫酸钙以提高生料中的硫含量。

在燃烧中形成的 SO_2 首先与挥发出来的碱化合,但也与生料中以固体形式存在的碱化合成硫酸碱。从S. Sprung⁽¹⁶⁾的研究以及H. Ritzmann⁽¹⁷⁾的测定中可以认为,在有氧存在的条件下, SO_2 除能与生料中的 $CaCO_3$ 化合外,也能与煅烧中生成的 CaO 化合成硫酸钙。按照B. Lünser和H. Hohmann⁽¹⁸⁾的研究,与 $CaCO_3$ 的反应也能在干燥的生料球以及特别是烘干磨内进行;在后者中,粉磨过程能不断生成新的有反应能力的表面。这些也曾在H. 畑野的论文中以及在H. Hohmann和H. Huckauf^(19,20)发表的文章中提到。水蒸汽的促进作用也起着重要的作用^(16,19,20)。在窑、预热器和烘干磨中,通过 SO_2 与碱、 CaO 和 $CaCO_3$ 的反应而产生硫循环。

在碱过剩的情况下,内部硫循环首先产生于与碱的反应,实际上主要在回转窑内进行。这样生成的硫酸碱在窑内主要仍以蒸汽形式存在,但也部分地在预热器内沉降到生料上去,重新进入窑和烧成带并随熟料出窑。 SO_2 与 CaO 的反应主要在窑内进行;与 $CaCO_3$ 的反应是在预热器内,特别是在烘干设备或蒸发冷却器内进行。这样形成的硫酸钙在烧成带内又一次分解而形成 SO_2 。在窑废气中 SO_2 含量较高的情况下,如果生料的碱含量不足,由于总的带入的硫量都将化合成硫酸盐^{*},形成的硫酸钙或其他硫酸盐化合物在通过烧成带时也可能不分解。

^{*}原文为“硫酸碱”,已改正。——译注。

关于外部硫循环的大小，以及关于它的可能性及其影响等，在表3中列出了对21台窑研究的结果。它表明在10台带有篦子预热器的窑中，尽管电收尘和中间气体收尘的粉尘量均较小，但硫量大于带旋风预热器的窑。前者平均为2.0克/公斤熟料，后者平均为0.6克/公斤熟料。

表3 在熟料和窑灰中的硫放出SO₂量

		化合硫，算成SO ₂				窑废气中的SO ₂	
		克/公斤熟料		平衡总量的%		毫克/标米 ³	平衡总量的%
		板限值	平均值	板限值	平均值		
11台带旋风预热器 的窑	熟料	2.9~13.4	6.7	67~94	84	在预热器后面的窑 气中	
	电收尘粉尘, 48~117克/公斤熟料	0~1.8	0.8	1~13	7	0~1200	0~22
	旁路粉尘(1台窑) 0.5克/公斤熟料			[0.5]		在烘干磨或冷却塔 的净化气体中	
10台带篦子 预热器 的窑	熟料	2.1~12.6	7.7	38~89	70	在净化气体中	0~140
	电收尘粉尘, 1~20克/公斤熟料	0.2~2.2	1.1	2~28	11		
	中间粉尘, 5~8克/公斤熟料	0.2~1.4	0.9	2~14	9		
	旁路粉尘(二台窑) 平均11 "	1.4~2.2	1.8	24~25	25		

表3最后两栏的数值给出了气态SO₂放出量的几小时的测定值。由此可以看出,在带有旋风预热器的窑的废气中SO₂含量可达1200毫克/标米³。但是,如果废气用于烘干原料或在蒸发冷却塔中通过增湿以改善收尘的话,该值降低到最大为140毫克/标米³。这一点与迄今所报导的实验室和操作测定的结果是相对应的^(16,19,20) (也可参阅H·烟野的文章)。其中结果一致,即在带旋风预热器窑的废气中所含SO₂可在以后的烘干磨内与生料化合到只有很少的残余。

在碱过量的情况下，窑废气中 SO_2 浓度降低的尺度，首先决定于与生料中的碱起反应。分配到废气中作为 SO_2 的硫量最多只能是带入窑的硫量的一部分，它是由于反应进行不完全而没有能化合成硫酸碱的形式。为了获得这个分量有多大的资料，图1中表示了所研究的窑的生料中转变成硫酸碱的碱量与从入窑生料和燃料中来的入窑总硫量的关系，以克分/公斤熟料表示。喂入窑的硫量全部转变为硫酸碱是以硫量与碱量的相等克分子量为标志，在图1中用一根虚线来表示。测点与这根直线的偏离是很小的。它意味着，全部硫实际上化合成硫酸碱。

测定结果的统计分析得出了一个直线关系，其相关系数为0.96。但是，所得出的相应的回归直线偏离了全部转变的那根直线（虚线）。这种偏离主要是当入窑硫量超过0.1克分/公斤熟料或8克 SO_3 /公斤熟料的那些测点处。从偏离可以看出，较高的硫量不再能完全化合成硫酸碱，或者由于在窑内停留时间不足，或者是碱的过量不够大。

根据进入硫量和可利用的碱量之间的这些关系，可以估计在改变原料和燃料组成的情况下对 SO_2 排出量的影响，以及在新窑中在最不利的情況下估计废气中的 SO_2 量。从图1的统计方法不能肯定进入硫量化合成硫酸碱的分量。图2表示了1.4和2.0标米³/公斤熟料之间不同单位废气量时计算的废气中 SO_2 含量与进窑量的关系。因此，废气中预计的 SO_2 浓度只能根据由原料和燃料带入的硫量来估计。但是，它应以反应所需的碱始终有可用的过量为前提，而西德原料实际总是这种情况。从图2得出的主要结论是，如果总的进入硫量提高到0.1克分/公斤熟料或8克分/公斤熟料的话，采用高硫燃料一般将影响 SO_2 的排出量。

图 1

图 2

4. 氯化物

西德水泥工业生料中的氯含量一般约在0.01和0.1%（重量）之间，只要生料中不含窑灰的话。但是，在矿床中它也可能有很大波动，其数值可超过0.3%（重量）。燃料油和沼气只含非常少或不含氯化物。煤的氯含量一般在0.01和0.1%（重量）之间；但是，按照G. Musgnung⁽²¹⁾的意见，对高灰分煤该值可高达0.4%（重量）。

在生料加热和燃料燃烧中释放出来的氯化物可以与生料中的碱或者与挥发后进入窑废气中的碱化合成氯化碱。在高温下蒸汽态的氯化碱在冷却时凝结到生料上，主要在窑的喂料端附近或在预热器内；因为在约800°C时，它的蒸汽压接近等于零。水泥工业研究所在8台带旋风预热器的窑和7台带篦子预热器的窑上就这个循环过程中氯化物的情况提出了研究报告。表4列出了主要结果。它表明，进入窑内的氯化物的10~53%，平均21~26%，随熟料离去。这相当于以熟料表示的氯量平均约为0.1克/千克熟料。在带篦子预热器的窑上，尽管粉尘量少得多，粉尘含有的氯量较带旋风预热器的窑约大一倍。因此，用排除高氯粉尘来减少外部氯循环只有在带篦子预热器的窑上才是有效的。关于旁路系统，在带旋风预热器的窑上为窑废气的5~7%；在带篦子预热器的窑上15%，对两种窑型都能显著减少氯循环。

在这些研究中得出了一个特征性的情况，即几乎在所有情况下随熟料和粉尘排出的氯量比随原料和燃料带入窑的氯量要少得多。在平衡表支出项下的这一差额由于数量很大不能认为是分析误差。因此，可以认为这些氯量保持窑内，并且由于连续吸入氯化物而不断加大循环，它使氯化物富集并且由于结壳和结圈而造成操作困难。

5. 氯化物

氧化物是水泥窑内参与循环过程的另一挥发性组分，但是它一般不造成什么困难。生料中氧化物的含量在0.02和0.07% (重量) 之间，煤最高含0.02，燃料油最高含0.002% (重量) 氧化物。

表4. 熟料和窑灰中的氧化物

		氧化物 (g)			
		克/公斤熟料		平衡总量的%	
		极限值	平均值	极限值	平均值
8台带旋风 预热器的 窑	熟料	0.040~0.239	0.100	14~33	26
	电收尘粉尘 48~117克/公斤熟料	0.008~0.235	0.088	6~52	14
	旁路粉尘 (1台窑) 0.5克/公斤熟料 [0.097]			[15]	
7台带篦子 预热器的 窑	熟料	0.080~0.110	0.087	10~53	21
	电收尘粉尘 1~20克/公斤熟料	0.042~0.362	0.170	9~53	32
	中间粉尘 54.8克/公斤熟料	0.017~0.093	0.050	4~21	10
	旁路粉尘 (1台窑) 1.1克/公斤熟料	[0.110]		[28]	

S. Sprung 和 H. M. v. Leebach⁽²²⁾ 在11台带有旋风和篦子预热器的窑上进行的研究指出，88~98% 入窑氧化物的量随熟料离去。这样排出的氧化物量是如此之大，以致内部氧循环不致引起氧化物富集困难。其余的氧量则存在于粉尘中。随粉尘离窑的氧化物愈多，也就是说与外部粉尘循环的大小相联系的外部氧循环愈大，随熟料离去的以平衡总量表示的氧化物量的百分数也愈低。图3表示了这一情况。它表明，在熟料中化合的氧化物分量随粉尘量的增加成直线降低。由此可以得出结论，即水泥窑中的氧化物固定化合成固体物质，因而不会放出气态的氧化合物。

6. 减少循环过程的措施

减少粉尘和挥发性化合物的循环主要是为了减少使窑产量

降低的堵塞和结圈现象的出现的。在许多情况下它也能改善熟料和水泥的质量。

图3

按照 H. Heichenbach 的论文中的资料，改善窑喂料端附近的流动条件可以减少粉尘循环。特别是更换损坏了的耐火材料和消除结壳现象能够实现这一点，它们都能使生料在喂入过程中产生扬尘。旁路系统也有改善的作用，因为抽出的挥发性组分可以较少地为粉尘所稀释。此外，减少预热器内粉尘循环还能提高窑的产量，从而降低热耗和电耗⁽²⁵⁾（同时参阅 H. Heichenbach 的论文）

碱、硫和氯循环的大小主要与原料中相应的含量有关，但一般说来只在非常窄的范围内变化。用在外部循环中捕集并排除富集了的粉尘的方法只有在粉尘量小且所含被排除的组分含量高时在经济上才是可行的。一般只有在带篦子预热器的窑上有这种情况。从平衡研究得出，在这种窑中分离并除去粉尘量最高有 20~25 克/公斤熟料。平均可排除喂入量的：碱 11%，硫 20% 和氯化物 42%。如果预热篦子上料层透气率好的话，这