

# 干燥室气氛对干燥裂纹和干燥室泛白的影响

【摘要】文章描述了引起干燥裂纹和干燥泛白的原因,并给出了避免这些缺陷的方法。在干燥过程中,在临界温度以下降低干燥速度,增加湿坯温度,是适当的避免干燥裂纹和干燥泛白的措施,当然这也取决于原材料的性能。

## 1 引言及问题的提出

在干燥湿坯体期间,不希望出现干燥裂纹和干燥泛白,因为这两种缺陷对质量是有影响的。在有装饰性的清水墙砖、铺路砖、屋面瓦的生产中特别不希望出现干燥泛白。

在各种砖产品中应当避免干燥裂缝。干燥裂纹的危险和干燥泛白的出现在很大程度上和干燥条件有关。通过干燥室的合理管理,这两种缺陷是能够防止的。

## 2 砖坯的干燥

在干燥过程中要脱去为了成型的需要而加入到原材料中的搅拌水,热空气使用来作为干燥介质。在干燥过程中需要能量来蒸发湿砖坯中的水分。在干燥过程中,热空气蒸发水分的同时也被冷却。

在干燥期间出现的收缩过程可能导致干燥裂纹的出现,图 1 表示了砖坯在干燥过程中收缩现象的特征,在干燥的起始阶段,砖坯中所有的颗粒在整个表面上都被水包围着,随着水分的释放排出,砖坯中的粘土颗粒相互靠近,同时则出现体积收缩。在第一收缩阶段,湿坯体体积减少的量是与排出水的体积一样大。随着干燥过程的进行,坯体中颗粒相互靠的更近,最终直到颗粒之间相互接触,紧靠在一起。收缩更进一步的继续出现,但其收缩的速度变慢(收缩继续以较慢的速度进一步发展),此时失去的水分,在坯体中局部形成了微孔,这一阶段被描述成为第二收缩阶段。在干燥的最后阶段,收缩就已达到了最后阶段(不再出现收

缩)。进一步的干燥,就会扩大其坯体中的微孔体积,砖坯总的体积保持不变(干燥阶段中划分、加速、等速、最后等阶段)。

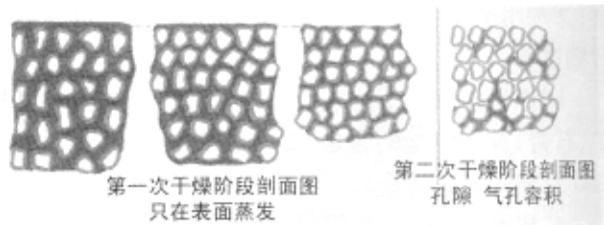


图 1 干燥过程中的收缩现象

在干燥开始阶段,水分的蒸发仅是在湿砖坯的表面上(第一干燥阶段)。这一过程中水分的蒸发与在自由水表面上的蒸发是同样的。蒸发水分的量取决于干燥空气的温度、湿度以及干燥空气的速度。具有均匀的外部干燥条件时,干燥速度是恒定的。在坯体内部水分的传递是通过毛细管力。如果这种毛细管力不再能够满足将坯体内部水分带到坯体表面的要求(需求)时,此时蒸发就进入到了坯体的内部。干燥过程处于这一点时,第二干燥阶段就开始了(但这与第二收缩阶段不是对应的关系)。随着干燥过程的进行,干燥的速度开始下降和降低。在第三干燥阶段,坯体表现出了吸潮的特性。干燥的坯体要达到与外部气候条件相适应的平衡含水量。

对湿砖坯的干燥来说,第一干燥阶段是特别重要的。在第一干燥阶段中坯体中水分的 60% 要在此阶

段排出。能够影响产品质量的收缩也发生在这一阶段,干燥裂纹不是由收缩作用本身引起的,而是由于在坯体中的收缩差引起的(或是在坯体中的不均匀收缩引起的)。随着干燥过程的改变,在干燥的坯体中会出现不同含水量的情况,见图 2。

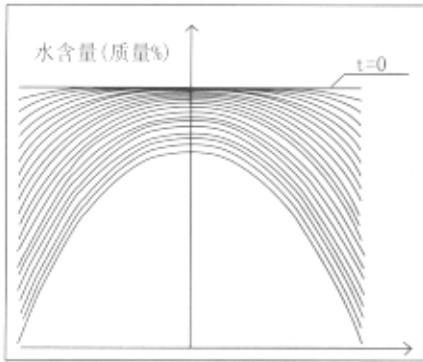


图 2 在第一干燥阶段水分分布剖面

图 2 表示了砖坯在两边有空气流动时含水量分布的状态,图中表示了在第一干燥阶段出现的砖坯中水分分布的剖面状态。在干燥的起始点,即时间  $t = 0$  时,在湿坯体中的水分分布是均匀的。随着干燥的进行,一个近似抛物线的水分分布剖面出现在干燥的生砖坯中。在湿砖坯的内部比外部区域上有更高的含水量。这就意味着在湿砖坯外部的收缩比内部的收缩发展得快,而外部坯体中的颗粒尽力地向一起靠近(收缩),但是坯体内部阻止了外部这种向一起收缩靠近的作用,因此,在坯体内部出现了压应力,而在坯体外部出现了拉应力。砖坯对拉应力敏感比压应力的多得多。如果这类应力变的足够大时,坯体中的结合力不能完全抵御这种应力时,坯体就会出现裂纹,见图 3。因此,为了避免干燥裂纹,在坯体中重要的是要使温度差尽可能的小。

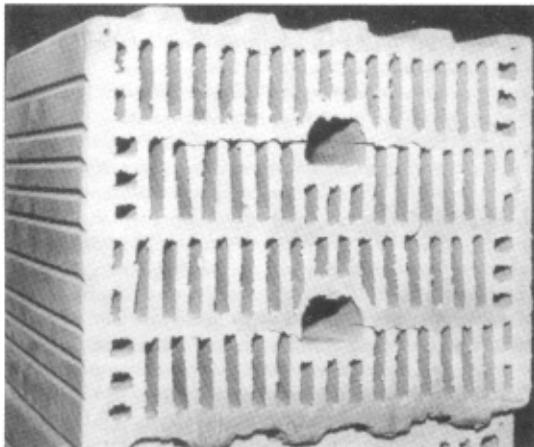


图 3 在砖坯上的干燥裂纹

### 3 减少干燥裂纹的敏感性

由于毛细管力的存在,随着坯体表面上水分的蒸发,会从湿坯体的内部再重新传递出来。可根据下列公式来描述毛细管水的传递:

$$\dot{m}_w = -k \cdot \rho \cdot \frac{dy}{dz} \dots\dots\dots (1)$$

式中  $\dot{m}_w$ —干燥速度;  
 $k$ —湿传导系数;  
 $\rho$ —干燥物质的密度;  
 $dy/dz$ —湿度梯度。

湿度梯度  $dy/dz$  易于引起干燥裂纹的形成。从上述公式(1)可以看到:降低干燥速度就能减少干燥裂纹形成的危险性。当湿传导系数增加时,也可以减少裂纹的危险性。

在干燥的第一阶段,干燥的速度仅仅取决于干燥的外部条件,也就是取决于干燥介质的热传递的质量,同时也取决于湿砖坯的几何形状。干燥速度可由下列公式计算:

$$\dot{m}_w = \frac{\alpha}{\gamma} \cdot (\varphi_L - \varphi_R) \dots\dots\dots (2)$$

式中  $\alpha$ —热传递系数;  
 $(\varphi_L - \varphi_R)$ —干湿球温度差;  
 $\gamma$ —水的蒸发焓。

一方面可由降低热传递系数  $\alpha$  来减慢干燥速度,而另一方面也可由降低干湿球温度差( $\varphi_C - \varphi_R$ )来减慢干燥速度。热传递系数随着空气的流动速度而变化。空气流动速度越低,热传递系数的值就越小。干湿球温度差( $\varphi_C - \varphi_R$ )是干燥空气温度与湿砖坯温度之间的差,并可在干燥室的环境中测得。

然而,一般说不希望降低干燥的速度,也可由增加湿传导系数来减少干燥裂纹出现的危险性。在湿砖坯中的湿传导率越高,在湿砖坯水分分布的局部差异就越小,因此,由不均匀收缩状态引起的内应力也就越小。湿传导系数是对湿砖坯中毛细管系统水迁移率的一种度量:

$$K(y, T) = \frac{\sigma(T)}{\eta(T)} \cdot f(y) \dots\dots\dots (3)$$

式中  $\sigma$ —表面张力;  
 $\eta$ —水的动力粘度;  
 $y$ —含水量。

湿传导系数是与随温度而变化的表面张力  $\sigma$  成正比,而与同样随温度而变化的水的动力粘度  $\eta$  成反比。此外,这也取决于坯体含水量  $y$ 。因为随着温度的增加,水的动力粘度会急剧降低,虽然表面张力有轻微的下

降,但表面张力和动力粘度的商却在增加(见图 4)。

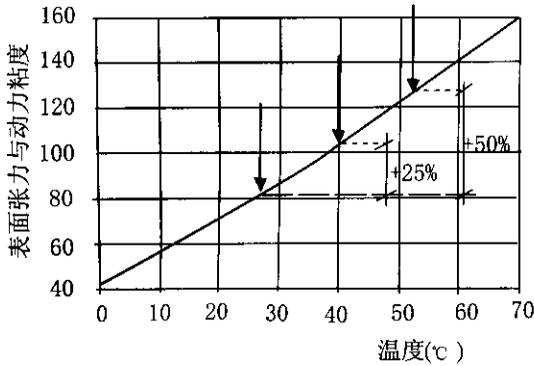


图 4 随着温度的增加表面张力与动力粘度的商在上升

因为随着温度的上升,湿传导率可得到显著的增长。其结果是通过毛细管系统水的迁移速度得到了改善,在湿砖坯内部形成了含水量更好的平衡状态。因而,在干燥过程中湿砖坯的温度越高,就能降低坯体内的内应力,所以也就可以降低干燥裂纹的危险性。

实例:在第一干燥阶段,湿砖坯的温度相当于在干燥环境下的冷却极限温度。冷却极限温度在 25°C 时被认为是非常低的,但尽管如此在许多砖厂中仍在使用着。此时表面张力和动力粘度的商是在 78 以内,当把冷却极限温度提高到 39°C 时,这一商增加到了 105,相当于增加了约 25%。因此,湿传导率也增加了 25%,将冷却极限温度从 25°C 增加到 52°C 时,湿传导率竟达到了 50% 的增量。水的迁移速度也得到了显著的改善,所以就可达到较低的干燥裂纹的敏感性。

由于有较高的温度,干燥的第一阶段也会被延伸,但不是必须要这样做,而宁愿使干燥的产品有着较低的平均含水量,在干燥产品中越低的平均含水量,出现的湿度梯度就越小,那么就可以达到水分不传递到砖坯的表面,也可被完全干燥。

然而通过较高的湿砖坯温度来减少干燥裂纹的敏感性的方法在应用上要有所限制。在干燥的第一阶段增加湿砖坯的温度,仅在限定的范围内可带来好处,因为最大温度是取决于所用的原材料。如果湿砖坯的最大温度超过一定限度,干燥裂纹的危险性会增加,虽然说此时在湿砖坯中水分的移动得到了进一步的改善,以及对坯体内水分的平衡有着有益的影响。根据经验看,这也许是由于随着温度的提高,砖坯的强度在降低。如果湿砖坯的温度选择的过高,砖坯就有着较低强度,形成裂纹的趋向会更快。例如,在清水墙砖的生产线上进行过下列测定:用冷却极限温度为在 50°C 时,第一条裂纹出现的时间比在 40°C 时出现的第一条裂纹的时间要提前 37%。在个别情况下,随着坯体温度的提高,由

于坯体强度的损失而使干燥裂纹的敏感性增加。然而,只要根据所用原材料选择的温度在临界温度的范围之内,干燥裂纹的敏感性总是随着冷却极限温度的提高在降低,见图 5。

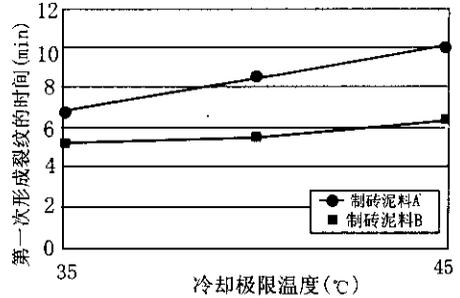


图 5 在不同冷却极限温度下的干燥坯体 A 和坯体 B

从图 5 能够看到,当冷却极限温度从 35°C 增加到 45°C 时,第一条裂纹形成的时间对坯体 A 讲增加了约 43%,对坯体 B 仍增加了 20%。

#### 4 干燥室泛白的现象

有关对砖产品外观上出现干燥室泛白的缺陷屡遭抱怨,这种现象是由硫酸钙引起的。硫酸钙可以矿物—石膏的形式存在于原材料中。然而,硫酸钙更频繁的出现形式是由于黄铁矿的分解而形成的硫酸钙。黄铁矿是常出现在砖瓦原材料中典型的伴生矿物。

在干燥过程中,硫酸钙随着水一起被迁移到坯体的表面。水分蒸发后硫酸钙再次结晶,附着于坯体表面上。这种沉积盐以白色的斑点显现出来,但常常在干燥后的坯体上用肉眼几乎看不出来。在其后的烧结过程中,这种硫酸盐会与坯体中的硅酸起反应,并形成硅酸钙,白色的表层就显露出来。在成品表面发现的白色的硅酸钙就是干燥室形成的泛白。

硅酸钙在水中很难溶解,其化学性质非常稳定,实际上没有方法可将其清除。图 6 给出了两种砖面的照片,表示了干燥室泛白的不同程度。

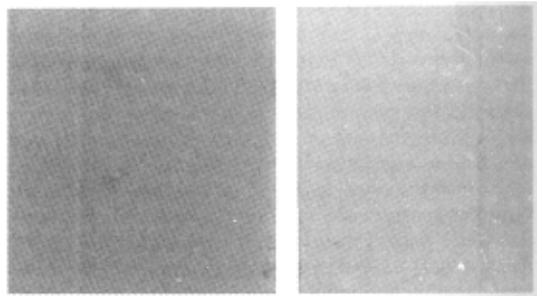


图 6 在砖表面上的干燥室泛白

#### 5 通过干燥环境的调节减少干燥室泛白

根据目前已有的模型,引起干燥室泛白的出现过程,能够做出如下的解释(见图 7)。

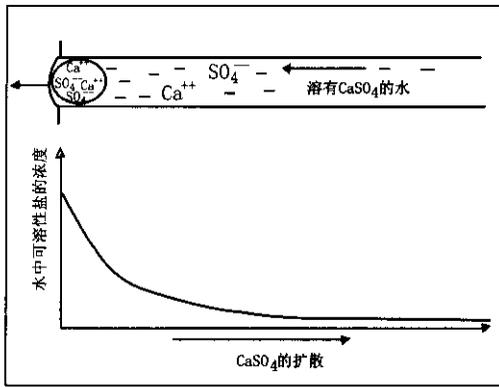


图 7 在浓度梯度方向上的扩散

在图 7 的上部,有一个湿砖坯中有水充满的毛细管的图,随着水通过毛细管向砖坯表面的流动,在水中已溶解的硫酸钙也向砖坯的表面移动。此时水分蒸发盐离子仍然保留在溶液中。其结果是在砖坯表面附近硫酸钙离子堵塞了毛细管,此时建立了离子的浓度梯度,在图 7 的下部可以看见。这种离子的浓度梯度相对于水移动的方向讲,影响着硫酸钙在减少浓度的方向上流动(即减少了随着水向坯体表面的移动——译注)。与相对方向上水的移动比较,越强的扩散流动,在砖坯表面形成的晶化硫酸钙层就越小,因而可观察到的表面失色的程度也就越小。

在实际试验中表明:在干燥室泛白和干燥的速度及冷却极限温度之间存在着很大的依附关系。可由降低干燥速度和提高冷却极限温度来减少表面的失色。在干燥的第一阶段,干燥速度与干湿球温度差和传热系统成正比,这同时也取决于干燥室内空气的流动速度,见图 8。

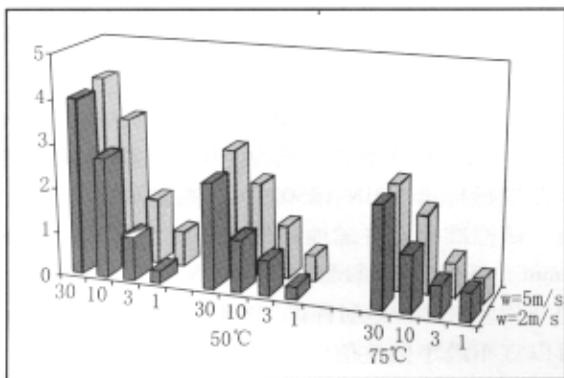


图 8 干燥环境对干燥室泛白的影响

在图 8 中可以看到,改变干燥环境对干燥室泛白有着非常显著的影响。表面失色程度用数值表示可分为 0~10 之间,干燥室泛白的强度为 0 时,是指没有泛白;为 10 时是指整个表面上均是白色。当泛白的强度大于 4 时,整个制品表面就成为不能容认的白色失色层。

可以看到,当干燥气流的速度为 2m/s,冷却极限温度为 35°C,干湿球温度差为 30K 时,在砖产品上有较浓的白色,其表面失色值为 4。在同样的气流速度和冷却极限温度下,而仅将干湿球温度差调整为 1K 时,实际上就没有出现表面失色。如果干燥速度不降低,将冷却极限温度从 35°C 提高到 55°C 时,表面失色就能够从 4 降到 2。

借助于上述的扩散过程模型,在此基础上就可以解释不同的干燥条件可形成不同强度的干燥室泛白的现象。特别是在较高的温度下可达到较高的扩散流动,因为温度的增加,使分子的活动性提高,也因为相应迁移过程的速度增大。这就解释了湿砖坯温度的升高,而导致了失色的降低。此外,低的干燥速度使扩散过程改善,即水向坯体表面迁移有着低的流动速度,因而导致了在坯体表面上结晶沉淀的减少,也就减少了在坯体表面上干燥室泛白的形成。

### 6 结论

由于收缩过程是发生在干燥过程中,在坯体中出现机械应力可导致干燥裂纹。干燥裂纹形成的实质原因不是收缩,而是收缩差。收缩差的出现是由于在干燥过程中局部含水量的变化。

湿传导率越高,在湿坯中含水量的局部差异也就越小,从而使不同收缩状态引发的应力也越小。随着温度的增加,湿传导率也在上升,较高的湿砖坯温度在干燥期间能够减少内部应力,因而裂纹的危险性也随之降低。然而,这一应用的坯体温度是取决于原材料性能的限制。当湿砖坯的温度更高时,开裂的敏感性增加,虽是因为湿传导率增加而使坯体中的湿平衡有了进一步的改善。其原因可能是在温度增加后,湿砖坯的强度降低,因而坯体仅能够承受起很小的应力。也可由降低干燥速度的方法来减少开裂的敏感性,但实际上在大多数情况下是不希望这样做。

降低干燥速度,提高湿砖坯温度也可以减少由于干燥室泛白造成的表面失色。随着坯体表面水分的蒸发,来自湿砖坯内部的,含在水中的硫酸钙也随着水在流动,溶解在水中的硫酸钙在毛细管中建立起了浓度梯度。在相对的水的流动方向上,这种浓度梯度影响着溶解的硫酸钙的扩散。扩散流动越强,在坯体表面上硫酸钙的结晶沉淀就越少。随着坯体温度的提高,扩散流动可直接进入坯体的内部,由于更大的分子活动使平衡过程得到了增强。也因为较低的水分流动速度,也就是较低的干燥速度,改善了浓度平衡关系,同时也减少了干燥室泛白。

(李密芳编译)

收稿日期 2003-7-20