

干燥焙烧一体式隧道窑窑内压力分布和变化特点及其应用探讨

叶琦贵（广西壮族自治区建材产品质量检验站，广西 南宁 530022）

摘要：通过对多个干燥焙烧一体式烧结砖隧道窑进行窑炉体系热平衡测试，收集了窑内各带温度和压力数据，分析了压力分布和变化特点，利用冷却带与干燥带之间存在的压力梯度，提出设置双层窑顶的窑炉设计方案，引导冷却带余热通过上下两层窑顶之间的空腔自行流动至干燥带内部对砖坯进行加热烘干，达到均匀快速干燥砖坯的目的。

关键词：干燥焙烧一体式隧道窑 窑内压力梯度 双层窑顶 余热利用 烘干效率

一、干燥焙烧一体式隧道窑特点

干燥焙烧一体式隧道窑是干燥室与焙烧窑共处于同一通道内，形成一体化直通式结构的隧道窑。和干燥室、焙烧窑分开并列布置比较，干燥焙烧一体式隧道窑可少建一条道，可减少窑车用量，减少窑炉建设用地以及缩短窑炉施工建造周期。另外，干燥焙烧一体式隧道窑砖坯进窑与成品砖出窑可以连贯进行，可减少窑车摆渡工序，减少工作人员数量。此外，通过对窑炉热平衡测试数据进行分析，干燥焙烧一体式隧道窑在窑体表面散热损失和烟气出窑热损失两方面的热量支出较小，其单位产品热耗较烘烧分体式等其它类型的隧道窑更小，热效率更高。但由于干燥焙烧一体式隧道窑采用哈风口排潮方式，干燥带内部始终处于负压状态，而且窑体较长，窑内压力和温度分布及变化较为复杂，预热带和干燥带内部上下层温度分层，容易积聚湿热气团，砖坯表面容易出现回潮及产生冷凝水，造成排烟排潮阻力较大，容易出现塌坯、炸坯、倒窑等生产故障。

由此可知，干燥焙烧一体式隧道窑优势突出，但缺点也很明显，如果从窑炉的结构等方面对其进行优化设计和改造，弥补其缺点和不足，那么，干燥焙烧一体式隧道窑将会发展成为一种生产效率和热效率更高的新型砖瓦隧道窑。

二、干燥焙烧一体式隧道窑窑内压力分布及变化特点

干燥焙烧一体式隧道窑一般在干燥带两侧设置排烟排潮烟道，烟道下部设置若干个哈风口，烟道上部靠近进窑端设置总出风口，同时在窑顶上砌筑辅助烟道，将总出风口与设置在

窑顶的排烟排潮风机连通，借助风机的抽力作用，冷却带的余热和焙烧带的高温烟气通过窑内通道流动至干燥带对砖坯进行干燥，而干燥砖坯后产生的烟气和潮气（统称废气），从干燥带两侧的哈风口进入排烟排潮烟道，再汇入总出风口，由风机抽排出窑外，见图 1。

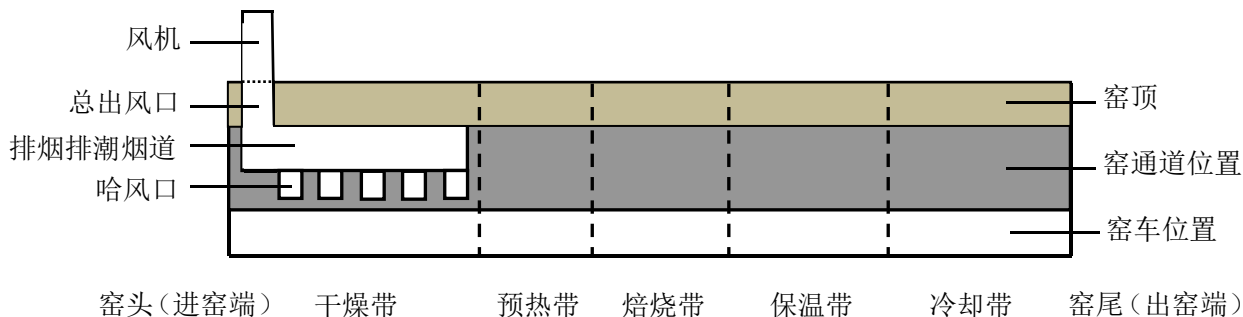


图 1 干燥焙烧一体式隧道窑结构（窑墙剖面）简图

由于废气被抽排出窑外，造成预热带及干燥带的气体密度变小，气压降低，在窑炉密封良好的情况下，预热带及干燥带处于负压状态。设置了哈风口的干燥带负压值较大，离哈风口较远的预热带负压值较小，负压值从干燥带到预热带由大逐渐减小。在保温带和冷却带，由于距离干燥带的哈风及风机较远，风机的抽力作用在此处已不明显，加上外界空气从窑尾源源不断地补充进窑通道内（经冷却带及保温带流向焙烧带），此处气体压力与窑外空气压力基本平衡，处于正压状态，且压力值从保温带到冷却带由低逐渐升高。而在焙烧带，靠近预热带的车位处于“微负压”状态，靠近保温带的车位处于“微正压”状态，焙烧带的中间位置，处于“零压”状态，零压位置一般为窑内焙烧温度的最高点。

三、干燥焙烧一体式隧道窑窑内压力和温度实测值

笔者从事隧道窑体系热平衡测试工作多年，在广西区内对几百家砖瓦企业开展隧道窑体系热平衡测试工作过程中，接触到多个干燥焙烧一体式隧道窑，对其窑炉结构进行较为深入的观察研究，并使用专业的检测仪器设备采集了大量研究数据。在对这些干燥焙烧一体式隧道窑体系进行测试时，用数字微压计从窑顶开孔处测量窑通道各带的窑内压力区间值，测得干燥带压力区间约为 $-1200\text{Pa}\sim-500\text{Pa}$ ，预热带压力区间约为 $-500\text{Pa}\sim-100\text{Pa}$ ，焙烧带压力区间约为 $-100\text{Pa}\sim+100\text{Pa}$ ，保温带压力区间约为 $+100\text{Pa}\sim+500\text{Pa}$ ，冷却带压力区间约为 $+500\text{Pa}\sim+1200\text{Pa}$ 。再用红外线测温仪测量窑通道各带的窑内温度区间值，测得干燥带温度区间约为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ （常温） $\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，预热带温度区间约为 $400\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，焙烧带温度区间约为 $800\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，保温带温度区间约为 $800\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，冷却带温度区间约为 $600\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，见图 2。

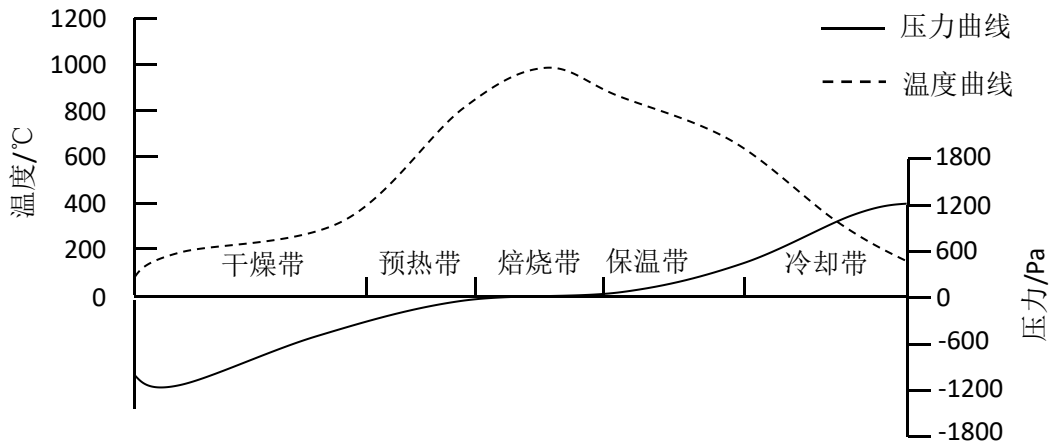


图 2 隧道窑窑内压力和温度曲线图

四、改进窑顶结构——采用双层窑顶设计方案打通余热输送通道

由前面的分析并结合图 1 和图 2 可知，干燥焙烧一体式隧道窑的冷却带处于正压状态，干燥带处于负压状态，这样的压力分布及变化规律，使得窑内从冷却带到干燥带之间形成了压力梯度。根据这一特点，为了使压力梯度转化为余热输送的动力，笔者提出了设置双层窑顶的窑炉改进方案，即建造两层窑顶，两层窑顶之间的空腔形成热风输送通道，让冷却带的正压余热自主流动到处于负压力状态的干燥带内部，从而引导大量的余热进入干燥带内部对砖坯进行烘干，减少上下层温差，同时稀释上层的湿热气团并避免出现冷凝水，减小排烟排潮阻力，让余热更高效地用于干燥带内部砖坯的加热烘干。双层窑顶窑炉工程结构方案见图 3。

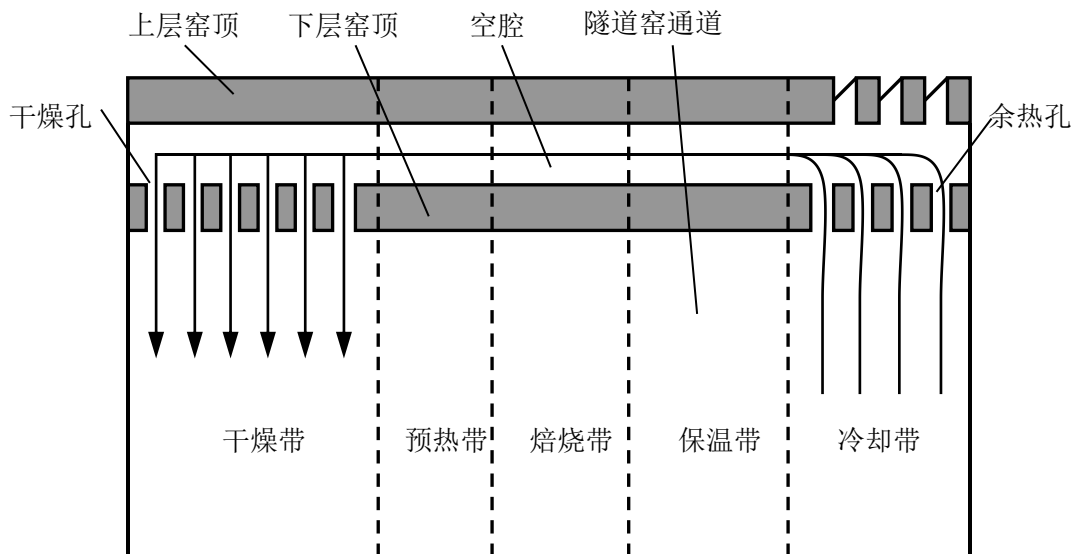


图 3 干燥焙烧一体式隧道窑双层窑顶结构剖面图

由于在窑顶位置设置了上下两层窑顶，形成了从窑头到窑尾之间的窑顶空腔（空腔的两头为密封状态），这一空腔将冷却带、保温带、焙烧带、预热带和干燥带窑顶的空间连通，如果下层窑顶在冷却带开设类似投煤孔的孔洞（称为余热孔），让冷却带的余热得以进入空腔，同时在干燥带的下层窑顶也开设孔洞（称为干燥孔），让空腔内的余热得以进入干燥带内部，这样，两层窑顶之间的空腔在空间上连通了隧道窑的冷却带和干燥带。由前面论述可知，干燥焙烧一体式隧道窑从冷却带到干燥带之间存在压力梯度，那么，当窑顶空腔连通了隧道窑冷却带和干燥带的情况下，空腔内部也同时存在从冷却带到干燥带的压力梯度，于是，冷却带中处于正压状态的余热从余热孔进入空腔，形成热风，在压力梯度的作用下产生动力，自主流向干燥带，并在干燥带处于负压状态的情况下，从干燥孔进入干燥带内部，分散流动至砖坯之间的缝隙，对砖坯进行加热烘干。干燥焙烧一体式隧道窑双层窑顶设计方案正是利用这一原理，将冷却带的余热源源不断地输送到干燥带。

五、采用双层窑顶设计方案的作用和意义

（一）提高余热利用效率和砖坯烘干效率

在隧道窑内，砖坯经焙烧后，从保温带出来的烧结砖温度还很高，通常可达到 $100\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，储存有大量的热量，如果没有合适的利用途径，将会随着烧结砖的出窑而流失到窑外，白白地浪费掉。通过设置双层窑顶，从设计上改变窑顶结构，使窑顶内部形成空腔，同时通过开设余热孔（还可以在上层窑顶开设调节孔以调节余热温度）和干燥孔，打通了冷却带余热输送到干燥带的通道，余热通过压力梯度的作用，源源不断地流动到干燥带，再通过合理设置干燥带下层干燥孔的数量和位置，引导热风均匀分散地流动到干燥带内部的任何空间位置，特别是距离窑墙两侧哈风口较远的中间位置。得益于大量热风的引入及其在干燥带内部的均匀分布和流通，干燥带内部的砖坯始终处于高温气体介质的气氛中，保证了所有砖坯都得到均匀受热，砖坯内部的液态水迅速转变为气态水，气态水又伴随大量快速流动的热风从砖坯之间的缝隙流向哈风口排出窑外，不但减小了排烟排潮阻力，而且干燥带内的砖坯还将得到快速有效地烘干。采用双层窑顶设计方案，冷却带的大量余热得以用于砖坯加热烘干，从而全面高效地提高余热利用效率和砖坯烘干效率。

（二）节能降耗

干燥焙烧一体式隧道窑设置双层窑顶，通过两层窑顶之间的空腔，巧妙地将窑内压力梯度转化为余热输送的动力，引导冷却带余热自行流动至干燥带内部对砖坯进行烘干，由于余热流动是自主进行的，不需要单独配套抽风机做功，利用余热的同时不另外消耗电能，在提高了余热利用效率的同时，也降低了隧道窑的能源消耗。

此外，隧道窑焙烧带内部砖坯焙烧所形成的高温作用，往往会在窑顶表面产生高温现象，

有了双层窑顶后，下层窑顶表面的高温热量将全部被回收，并汇入空腔内的余热中。空腔不仅起到输送余热的作用，同时也收集了下层窑顶散失的热量，还可以增加余热的温度，提高了热风干燥砖坯的能力。另外，由于采用保温棉铺设的上下两层窑顶的存在，隧道窑通道内部以及空腔内部的热量难以通过保温层传递到上层窑顶表面，最大限度地降低了窑顶表面特别是焙烧带表面的温度和散热量。从窑炉热平衡表面散热的角度分析，由于窑体表面温度降低了，通过窑体表面散热损失的热量就会减少，从而减少了热量的支出，降低了热耗，提高了热效率，达到节能减排降耗的目的。

该方案将隧道窑冷却带的大量余热充分回收利用，同时降低窑顶表面散热量，减少热量的损失，还降低了电能消耗，起到实实在在的节能降耗的作用。

（三）改善工作环境，提高窑顶工作场所的舒适性

由于余热输送全部在上下两层窑顶之间的空腔内完成，免除了在窑顶上设置余热输送管道或安装抽风机等设施，减少了窑炉施工建设的工序。窑顶上不出现任何管道或设备，形成一个平整的窑顶平面，在外观上给人以简洁平整的感觉，也给窑炉焙烧操作提供一个无障碍的工作面。同时由于上层窑顶能够起到良好的保温隔热作用，窑顶工作面上将不会出现高温闷热的现象，窑顶成为一个清爽舒适的工作场所。

（四）提高干燥焙烧一体式隧道窑生产效率

由于双层窑顶装置极大地提高余热利用和砖坯烘干效率，可以有效减少或避免出现塌坯、炸坯、倒窑等事故的发生，砖坯烘干速度提高了，那么，砖坯的预热、焙烧等环节的速度也会随之提高，砖坯进窑和成品砖出窑速度也会同步提高，从而提高生产效率。

（五）扩大干燥焙烧一体式隧道窑原料适用范围

由于干燥焙烧一体式隧道窑窑体较长，窑内压力和温度分布及变化较为复杂，干燥带内部温度分层，排烟排潮阻力较大，以及容易出现塌坯、炸坯、倒窑等问题，受到这些问题的制约，干燥焙烧一体式隧道窑必须保持稳定的热工焙烧制度和稳定的原料性能，才能尽可能避免以上问题的出现，才能达到连续稳定生产的目的，因而对焙烧过程的控制与管理以及原料的选择和加工提出更高的要求，这不仅制约了其原料的适用范围，也使其原料适用性较差。如果采用双层窑顶设计方案，以上难题则迎刃而解，可彻底解决干燥焙烧一体式隧道窑砖坯干燥的技术难题，那么，干燥焙烧一体式隧道窑原料适应性较差的问题也将随之解决，不必担心原料制成砖坯后在窑内干燥带出现的各种技术难题，从而可以选择页岩、煤矸石、尾矿、淤泥、城市建筑渣土等更多种类的原料生产烧结砖，扩大原料的适用范围。

（六）推动干燥焙烧一体式隧道窑向更大断面方向发展

本文开头谈到，干燥焙烧一体式隧道窑优势突出，但缺点也很明显。如果采用双层窑顶

设计方案，从窑炉的结构等方面对其进行优化设计和改造，解决了干燥焙烧一体式隧道窑余热利用和砖坯干燥的技术难题，同时扩大了原料适用范围，弥补了其缺点和不足，干燥焙烧一体式隧道窑将会成为一种生产效率和热效率更高的新型砖瓦隧道窑。那么，今后我们可以将大断面和烘烧一体式两方面优势结合起来，推动干燥焙烧一体式隧道窑向更大断面方向发展。

参考文献：

- 1.刘麟瑞、林彬荫.工业窑炉用耐火材料手册[M].北京：冶金工业出版社，2001：592-595.
- 2.赵周民、许淑玲.新型墙体材料工业节能环保型隧道窑的设计[J].砖瓦，2005（7）：23-26.
- 3.陈静.砖瓦干燥窑的设计及应用[J].砖瓦，2019（9）：52-57.

作者简介：

叶琦贵，男，工程师，毕业于广西大学无机非金属材料工程专业，毕业后进入广西壮族自治区建材产品质量检验站工作至今，主要从事墙材产品质量检测及烧结砖隧道窑热平衡测试工作。