

水泥生产工艺的优化研究

张志涛

河北省建筑材料工业设计研究院有限公司 河北石家庄 050000

摘要: 水泥作为现代建筑材料不可缺少的基础材料,优化它的生产工艺,不但直接影响着生产成本的下降与产品质量的提高,而且对于环境保护与能源利用效率也有着十分重要的意义。在中国经济快速发展、城镇化进程不断加快的背景下,水泥需求量也在逐年上升,水泥工业节能减排、实现可持续发展已成为当前急需解决的课题。所以对水泥生产工艺优化方法进行研究探索具有一定的理论与实际意义,文章就此展开了探讨。

关键词: 水泥; 生产工艺; 优化路径

引言

水泥制造过程是一个高能量消耗和高排放的活动,它高度依赖煤炭作为能源,并在这一过程中释放出大量有害的二氧化碳等物质,给环境带来了明显的负担。在全球追求双碳的背景下,水泥生产行业积极应对,以自主创新为手段,在技术方面做出革命性改变,努力减少能耗及温室气体排放。回顾我国水泥生产历史,自普兰特水泥生产时代以来,我国生产工艺由回转窑,机立窑,立波尔窑,悬浮预热器窑逐渐演变为新型干法工艺,表现出不断进步与工艺优化。但我国水泥生产无论从能效还是环保上都比发达国家还有很大提升。

一、水泥生产工艺概述

水泥生产工艺主要包括石灰石等原材料的开采与粉碎、原料的均化与配料、干法与湿法生产工艺的选择、熟料的煅烧、以及最后的水泥粉磨和包装等步骤。原料如石灰石、粘土及铁矿石经粉碎设备粉碎至适当细度后再均化,按照一定配比进行搅拌,经过精密配料控制使物料均一。干法生产工艺是将搅拌好的物料放入旋风预热器及分解炉中预热预分解,使得物料还未进入回转窑就已被部分地分解掉,从而有效地提高热效率。湿法生产工艺是通过将原材料研磨成浆状,以实现更均匀的混合和均化,虽然这种方法的能耗较高,但在某些条件下仍然具有优势。不论采用何种工艺,都是将原料经预处理后送入回转窑内,经1450℃左右高温煅烧而产生以硅酸三钙和硅酸二钙为主的产品、铝酸三钙与铁铝酸四钙及其它矿物混合制成水泥熟料。煅烧过程控制非常关键,它直接关系到水泥质量及能耗。在熟料冷却之后,与石膏和其他添加剂一同进行研磨,从而制得具有特定的细

度和比表面积的水泥产品,这些产品的比表面积通常介于300-400 m²/kg。最后通过包装设备将水泥装袋或散装后运至四面八方。整个生产工艺既要严格把控各个环节参数,又要通过高级自动化控制系统实时监控与调节,保证水泥质量稳定,提高生产效率。

二、水泥生产工艺流程分析

1. 生料制备

生料制备是水泥生产的首要步骤,涉及到石灰石、粘土、铁矿石等原材料的开采、粉碎和混合。石灰石通常含有约76-78%的碳酸钙,是主要的钙质原料;粘土和页岩提供必要的硅、铝和铁成分。开采后的石灰石通过颚式破碎机和锤式破碎机被粉碎至80毫米以下,然后通过球磨机或立磨机进一步粉磨至80微米以下的细粉状态。为了确保物料的均匀性和稳定性,粉磨后的生料会进入生料均化库,通过气动或机械搅拌,实现原料的充分混合和均化,确保CaO、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃等成分的比例稳定在标准范围内,通常要求生料的化学成分波动系数小于0.1%。

2. 燃料制备

燃料制备以煤,石油焦及其他燃料粉碎,烘干为主。煤炭作为主要的燃烧材料,需要经历破碎和研磨的过程,以确保其达到所需的粒度,而煤粉的粒度通常需要至少85%通过200目筛。现代水泥生产使用风扫煤磨等高效节能煤磨设备对煤粉进行研磨同时完成干燥。燃料制备在保证燃料完全燃烧的同时,需要对燃料中水分含量进行控制,通常控制在较低水分含量范围内,这样才能提高燃烧效率,降低NO_x、SO_x和其他有害气体排放量。高效燃料制备系统与窑内温度稳定性,能源利用效率等因素有着直接联系。

3. 熟料煅烧

熟料煅烧作为水泥生产过程中的一个核心环节，多在回转窑内完成。原材料在经过预热器和分解炉的初步处理后，被送入回转窑，在1450℃的高温条件下发生了一系列的化学反应，主要生成的是硅酸三钙（ C_3S ）和硅酸二钙（ C_2S ）、由铝酸三钙（ C_3A ）和铁铝酸四钙（ C_4AF ）等矿物质构成的水泥熟料。煅烧时，窑体内气体流速、物料流动速度都要严格控制，一般要求窑尾部温度控制在850℃–900℃之间，才能保证碳酸钙充分分解；窑头温度要求在1450℃左右才能保证矿物完全生成。熟料冷却后，经篦冷机快速冷却到100℃以下，使熟料保持活性，避免粉磨时再次结晶。

4. 水泥粉磨

水泥粉磨，就是把熟料和适量石膏等混合材一起粉磨，制成粉末状水泥成品。粉磨设备通常使用管磨机或立式磨机，要求磨细后的水泥比表面积在300–400 m²/kg之间，以确保其早期和后期的强度发展。添加的石膏（熟料的重量中，大约有3–5%是由其组成的）主要用于调节水泥的凝结时间，防止假凝。在粉磨时，采用闭路系统循环粉磨的方式，从而有效地提高粉磨效率及产品质量。同时现代水泥厂大多配有高效选粉机及动态风选装置来控制水泥成品细度及粒度分布并保证其性能稳定。

5. 包装与运输

水泥包装及运输牵涉到成品水泥的贮存、称量及包装等环节。水泥一般以散装、袋装的形式出售。散装水泥采用气力输送系统直装罐车的方式适用于大型工程；袋装水泥是通过自动化包装机进行精确包装的，通常每一袋的重量为50公斤，以便于在市场上进行零售活动。包装时，一定要严格控制水泥计量精度及包装密封性，以免运输及贮存时潮湿结块。为了保证运输效率、降低成本，当代水泥厂普遍装备了自动化立体仓库、智能物流系统等设备，以达到水泥成品出库快、配送准确的目的。

三、水泥生产工艺优化的关键技术

1. 原料制备工艺优化

水泥生产中原料制备工艺优化的目的是提高生产效率，降低成本，降低对环境的影响。首先，原料的选择对优化至关重要，要选用质地均一，化学成分比较稳定的石灰石、粘土、铁矿石及煤，可保证生料制备时组分均一，降低生料磨能耗。为了确保煅烧过程中熟料的高质量，石灰石中的CaO含量必须超过52%，而MgO的含量则应低于2%。其次是配料优化方面，通过使用科学的配料模型精确地计算出各配料的最佳配比来保证生料

成分稳定均匀，现代配料控制系统采用X射线荧光分析（XRF）和在线自动控制系统，对原料成分进行实时监控和调整，以减少生料制备过程中的人为误差，配料过程中，SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃等主要成分的含量需要严格控制在合理范围内，确保其比率适宜，通常SiO₂含量在20–24%，Al₂O₃在4–7%，Fe₂O₃在2–4%。另外，物料的破碎及预均化技术在优化过程中也具有重要意义，使用立式辊磨机或者高压辊磨机等高效破碎设备可明显提高破碎效率并降低粉尘排放量。预均化堆场采用多层堆积、分层取料，保证物料均匀、生料制备稳定、生产效率高。总体来看，优化原料制备工艺既能提高生产效率、降低能耗，又能减小环境影响、促进水泥生产绿色化进程。

2. 生料制备工艺优化

生料制备工艺优化在水泥生产中起着至关重要的作用，通过改进磨机效率、预均化技术和生料成分控制，可以显著提升生产效率和产品质量。磨机效率的提高是生料制备优化的核心之一，采用高效立磨（Vertical Roller Mill, VRM）替代传统的球磨机，不仅能显著减少能耗，而且由于其更高的粉磨效率和更低的粉尘排放，能有效提高生料细度和均匀性。立磨的比表面积控制在300–350 m²/kg，保证了生料在煅烧过程中的良好反应活性。

预均化技术的应用极大地提高了原料的均匀性，采用连续式均化库和在线元素分析仪（如X射线荧光分析仪）对原料成分进行实时监测和调整，确保各成分的均匀分布。通过多层堆积和分层取料，预均化技术能够将原料波动控制在最小范围内，从而保证生料化学成分的稳定性，确保SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃等关键成分的比例适宜。预均化后的生料，其SiO₂含量通常控制在20–24%，Al₂O₃在4–7%，Fe₂O₃在2–4%，这些成分的精确控制对于后续的煅烧过程至关重要。

此外，现代生料制备工艺还注重通过添加适量的矿化剂如CaF₂和Fe₂O₃来降低煅烧温度，减少热耗，提高熟料的液相量，从而改善烧成反应的速率和熟料的矿物组成。这不仅能够降低能耗和生产成本，还能提高熟料质量和水泥的最终性能。通过对磨机效率、预均化技术和生料成分控制的全面优化，生料制备工艺在提升生产效率、降低能耗和提高产品质量方面取得了显著成效，为水泥生产的可持续发展奠定了坚实基础。

3. 熟料煅烧工艺优化

熟料煅烧工艺优化对水泥生产具有非常关键的意义，它通过完善窑系统，提高燃料利用效率及准确控制煅烧

温度与时间等措施来实现,可明显提高生产效率,降低能耗,提高熟料质量。窑系统优化涉及到回转窑工艺改进及辅助设备更新,现代高效回转窑利用先进预热器及预分解炉系统显着提高热交换效率及熟料产量。五、六级旋风预热器系统及三代预分解炉可有效地利用窑尾废气热量使生料温度快速上升到900–1000℃,达到部分分解、显著降低回转窑热负荷及燃料消耗。

通过优化燃烧器设计、准确控制空气和燃料比例,采用替代燃料来提高燃料利用效率。现代的高效燃烧器,例如多通道燃烧器,能够高效地燃烧煤粉、油、天然气等多种燃料,减少未燃烧物质的排放,从而提高燃料的热值利用率。燃料充分燃烧在降低二氧化碳、氮氧化物排放量的同时,也明显降低燃料成本。通过调节燃烧器角度及喷射速度来保证燃料和空气最佳混合比达到均匀燃烧并进一步提高煅烧效率。

为了确保熟料的高质量,精确地控制煅烧的温度和持续时间是至关重要的。回转窑的温度应维持在1450–1500℃之间,并确保有足够的煅烧时间,这样可以确保熟料中的C₃S(硅酸三钙)的含量达到最优水平。采用在线温度监测与自动控制系统可实时调节窑内温度及煅烧时间以保证熟料矿物组成及烧成质量。合适的煅烧时间及温度控制既可以降低过烧或者欠烧,又可以改善熟料强度及水泥早期强度。总体上看,窑系统技术升级,燃料利用效率提高,温度与时间控制准确等措施对熟料煅烧工艺进行优化正在促进生产效率提高、在降低能耗、提高熟料质量上起到关键性作用,促进水泥生产绿色化、高效化。

4.水泥粉磨工艺优化

水泥粉磨工艺优化对于提高生产效率,降低能耗,促进水泥质量提升具有至关重要的意义。

一是优化粉磨系统,其核心是使用高效粉磨设备,优化工艺参数。立式辊磨机(VRM)和辊压机的使用能显著地提升研磨效率,与传统的球磨机相比,VRM的能量消耗减少了大约30%,同时还具有更高的研磨精度和均匀性控制能力。VRM系统通过调节辊压力及磨盘转速可使水泥比表面积保持在350–400 m²/kg范围内,保证水泥颗粒合适粒度分布有利于改善早期强度及长期性能。

二是优化粉磨工艺参数,包括粉磨时间及磨内物料流速的合理调控,利用动态选粉机等高效分级设备可将细粉与粗粉进行高效分离,从而提高了选粉效率并降低了过粉磨。动态选粉机具有超过80%的分级效率,这使

得成品水泥的颗粒分布变得更为合理,从而有助于提升水泥的强度和持久性。

三是添加剂的应用,通过在粉磨过程中加入如三乙醇胺(TEA)和乙二醇等适量助磨剂来实现的,能明显提高磨机粉磨效率,改善水泥流动性。助磨剂可在水泥颗粒上形成一层吸附膜,使颗粒之间凝聚力下降,磨机内摩擦力减小,使磨机产量增加,水泥比表面积增大。助磨剂的用量一般被限制在水泥的重量的0.03–0.1%范围内,具体的用量需要根据原材料的特性和生产工艺条件来进行适当的调整。

四是利用闭路粉磨系统实现磨内物料循环利用,可进一步提高粉磨效率及水泥质量。闭路系统采用循环风机与选粉机相配合对物料进行循环粉磨,对成品水泥进行分级,从而提高系统整体效率及稳定性。

总的来看,采用高效粉磨设备,优化工艺参数,合理利用添加剂等措施对水泥粉磨工艺进行综合优化,生产效率显着提升、减少能耗和促进水泥品质提高,对水泥生产可持续发展起到强有力支撑作用。

结束语

综上所述,本研究经过对水泥生产工艺进行深入研究和优化后,效果明显。首先,通过对原料配比、研磨技术等方面进行改进,在增强水泥强度、耐久性的前提下有效地降低生产成本。其次,通过引进先进控制系统、优化生产流程等措施明显提高生产效率、降低能耗与排放、达到绿色生产。最后,通过不断地优化与创新生产工艺,在提高产品质量的同时,也提高企业在市场中的竞争力。在今后的发展过程中,不断致力于水泥生产工艺优化和革新,促进产业可持续发展。

参考文献

- [1] F.W.Locher. 水泥的制造与使用[M]. 汪澜, 译. 北京: 中国建材工业出版社, 2017.
- [2] 汪澜. 水泥预烧成技术研发与示范应用[R]. 中国建材集团, 2013.
- [3] 汪澜. 绿氢煅烧水泥熟料关键技术初探[J]. 中国水泥, 2022(4): 46–48.
- [4] 张文春. 水泥生产污染控制及低碳环保发展思路探索[J]. 建材与装饰, 2019(22): 168–169.
- [5] 杨青武. 浅析水泥生产工艺的节能技术[J]. 建材与装饰, 2018(19): 189.