

工艺与设备

热法磷酸燃磷塔的节能改造 与传热特性研究

刘宝庆 蒋家羚

(浙江大学化工机械研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对热法磷酸生产中一方面要求外部供热,另一方面又浪费自身燃烧热的现状,提出了利用汽包和燃磷塔回收余热的新工艺,设计了具有膜式水冷壁的新型燃磷塔,使每燃烧 1 t 黄磷能副产 0.5 MPa 蒸汽 5.96 t。借助数值模拟的方法,分析了燃磷量、过剩空气系数及结构型式等对燃磷塔传热特性的影响。

关键词:磷酸;节能;技术改造;传热特性

中图分类号:TQ126.316

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2003)08-0038-04

Energy conservation and heat transfer characteristics of phosphorus reactor

LIU Bao-qing, JIANG Jia-ling

(Institute of Chemical Machinery Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Because of the self-contradiction of the wasting of combustion heat and the demanding for exterior heat supply in phosphoric acid production, a new phosphorus reactor with circular water wall was designed, which could recover waste heat to produce 5.96 tons of superheated steam (0.5MPa) with one ton of yellow phosphorus with the help of drum. The effects of the phosphorus mass flow rate, excess-air coefficient and structural style on heat transfer characteristics were also analyzed by the numerical simulation.

Key words: phosphoric acid; energy conservation; reformation; heat transfer characteristics

磷酸是一种重要的化工原料和中间体,可用于制造磷肥及各种磷酸盐,依据其生产工艺的不同可分为湿法磷酸和热法磷酸^[1]。利用强酸(如硫酸、硝酸、盐酸等)与磷矿石的分解、置换反应所得到的磷酸称为湿法磷酸。由于湿法磷酸浓度低,杂质多,主要用于农业生产资料——磷肥的生产。相比之下,热法磷酸在浓度和杂质含量方面都具有明显优势,一些高技术产业所需的磷酸盐,特别是高附加值的精细磷酸盐产品(如食品级、医药级、高纯磷酸等)通常都使用质量分数高达 99% 的热法磷酸来生产。

1 热法磷酸生产工艺与装备现状

热法磷酸的生产主要包括矿石冶炼、黄磷燃烧及五氧化二磷的水化 3 个独立的工艺流程^[2,3]。其

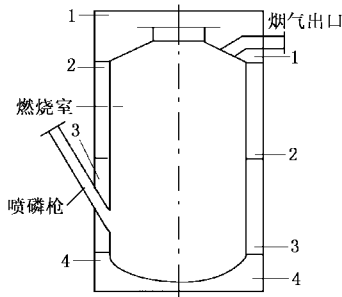
中黄磷燃烧流程中,固态黄磷首先在熔磷槽中被 0.2~0.5 MPa 的蒸汽加热熔化至液态,然后熔融磷经喷嘴雾化,与由空气吸入管进入的空气充分混合,在燃烧室剧烈燃烧生成 P₂O₅ 烟气。黄磷燃烧可产生大量热能,在无任何冷却的情况下,即使空气过剩系数达 1.5,混合烟气温度仍高达 1 800℃ 以上。另外高温磷蒸汽及其聚合物对燃烧塔、换热器等生产设备具有极强的腐蚀性,且这种腐蚀性随温度升高而加剧。工艺上为防止这种腐蚀与破坏,通常都使用大量稀磷酸或冷却水使燃烧塔和换热器壁面的温度控制在 80℃ 以下,这部分由水或磷酸带走的低品位热能难以进一步利用。同时为保证黄磷的流动及雾化燃烧,必须使其处于液相状态,因此需配置专用燃煤锅炉来供给蒸汽;此外为了冷却循环水或磷酸,

收稿日期:2003-06-09

作者简介:刘宝庆(1978-),男,博士研究生;蒋家羚,男,1943年生,教授,博导,主要从事节能型单元设备的设计开发及金属材料的断裂疲劳研究。

还必须配备风机、泵、换热器等一系列装置。这种一方面要求外部供热,另一方面又浪费自身燃烧热的现象是目前热法磷酸生产中普遍存在的问题。因此从节能和环保的角度考虑,有必要对现有工艺进行改进,改进的关键在于能否设计出具有余热回收功效的新型燃磷塔。

燃磷塔是热法磷酸生产的核心设备,它提供了磷氧化反应的场所。目前在用的燃磷塔的典型结构如图1所示,其周壁布置了上下2个水冷夹套,以降低燃磷塔内高温烟气的温度,减小腐蚀。由于夹套进口水温约为35~40℃,出口水温约为50~55℃,因此这样低温的余热在工业上很难再利用。

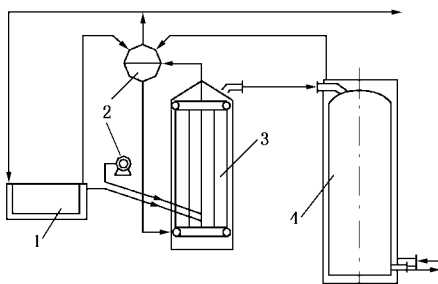


注:图中数字表示循环水对应进出口

图1 常规燃磷塔结构简图

2 燃磷塔的节能改造

在热法磷酸的生产过程中,如果能将回收磷的燃烧热用于固态黄磷的熔化,实现能源的优化利用,将具有很现实的工程意义。因此在考虑现有工艺布局的前提下,笔者提出了一种更合理的热法磷酸生产工艺,流程如图2所示。该工艺借助汽包和燃磷塔来回收余热,生产过热蒸汽,一方面可以独立解决自身所需热量,省掉专用燃煤锅炉,减少设备投资;另一方面还可为其他化工生产提供部分蒸汽,既节省能源,又减少了冷却水用量,达到节能、降耗、增利的效果。

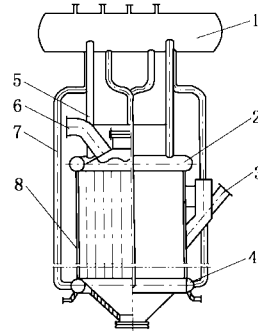


1—熔磷槽;2—汽包;3—燃磷塔;4—水合塔

图2 改进的热法磷酸工艺流程图

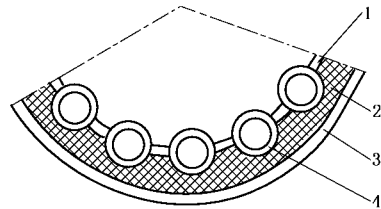
2.1 新型燃磷塔的结构

从节能与环保的角度考虑,对图1所示的燃磷塔进行了改造,所得新型燃磷塔的结构参见图3、图4。其燃烧室周壁布置有相应数量的抗磷酸腐蚀的不锈钢管,这些管束与连于各管之间的强化换热翅片围成一个具有中空腔的环形膜式水冷壁。水冷壁两端分别布有上下集箱和封头,周壁外侧设有保温层,共同构成封闭壳体,完成磷的燃烧与热量回收。



1—汽包;2—上集箱;3—喷磷枪;4—下集箱;5—上升管;
6—烟气出口;7—下降管;8—水冷壁

图3 新型燃磷塔示意图



1—翅片;2—保温层;3—外壳体;4—换热管

图4 水冷壁横截面的局部剖视图

同常规燃磷塔比较,新型燃磷塔具有以下特点:

(1)新塔的燃烧室与老塔形状相同,体积相近;燃磷塔结构及燃烧器与燃烧室的相对安装位置不变。因此新塔能保证完成磷的燃烧,并产生足量的 P_2O_5 烟气;

(2)将水冷夹套换成膜式水冷壁后,实现了对热法磷酸生产过程的余热回收,有效热利用率可大大提高;

(3)整个燃磷塔重量可由裙座支撑或用钢架悬吊。工作时炉体的热膨胀可向上或向下自由伸展;集汽管两端与汽包及上集箱的连接,下降管两端与汽包及下集箱的连接都设计有弯头,可作为热补偿器,自动补偿各部件的热膨胀量之差。

2.2 工作原理

液态单质磷与助燃空气在压缩空气的作用下,

经喷磷枪接口管自动进入燃磷塔燃烧,在生成五氧化二磷的同时释放出大量热能。这些热能以辐射换热方式被设置于膜式水冷壁的循环水吸收。上升管内的水因吸收热量而汽化,形成汽水混合的两相流体,它的密度要比位于同一水平面的下降管内的水密度小,这种密度差形成了水在汽包—下降管—下集箱—上升管—上集箱—导汽管—汽包之间自然循环的驱动力。燃磷塔回收余热生产的蒸汽最后在汽包内经汽水分离后排出。

2.3 改造效果分析

燃磷量为 240 kg/h 的新型燃磷塔于 2001 年投入运行,目前设备状况良好,无腐蚀、无泄漏、无爆管等现象发生。新型燃磷塔的运行工况及改造前后的性能比较见表 1、表 2。

表 1 新型燃磷塔的运行工况

运行参数	数值
燃料种类	云南产混合磷
燃磷量/kg·h ⁻¹	240
空气流量/kg·h ⁻¹	1937
换热面积/m ²	38
过剩空气系数	1.44

表 2 燃磷塔改造前后性能参数比较表

性能参数	改造前	改造后
P ₂ O ₅ 烟/气产量/kg·h ⁻¹	549	549
壁面温度/℃	80	200
壁面平均热流/kW·m ⁻²	26.78	27.86
烟/气出口温度/℃	810	780
产汽量/t	0	5.96
余热利用率/%	0	65.2

注:表中蒸汽压力为 0.5 MPa。

从表 2 可以看出,改造后的新型燃磷塔不仅能保证磷酸的原有生产能力和品质,而且能副产高温、高压蒸汽,除满足自身生产所需,还可为其他化工生产提供过剩蒸汽。由于采用新型燃磷塔的新工艺省掉了专用燃煤锅炉,一方面降低了设备投资,另一方面每燃烧 1 t 混合磷可节省标准煤 560 kg 和冷却水 400 t,相当于每生产 1 t 质量分数为 85% 的磷酸可降低生产成本 97.37 元,经济效益明显。此外,改造后的新型燃磷塔壁面温度相对较高,这对避免 P₂O₅ 烟气与空气中的水蒸汽在壁面形成酸膜大有裨益,另由于新塔周壁采用等离子陶瓷喷涂,提高了耐高

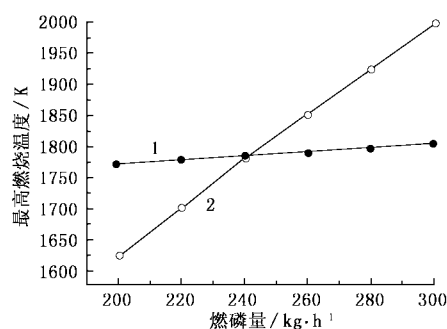
温腐蚀的能力。

3 新型燃磷塔的传热特性

为实现燃磷塔操作参数的合理匹配,获得最大的余热回收率,有必要分析各参数对其传热特性的影响,具体体现在对理论燃烧温度和烟气排放温度的影响上,前者是表征高温烟气放热潜能的重要参数,后者是衡量出口烟气品质的重要指标。

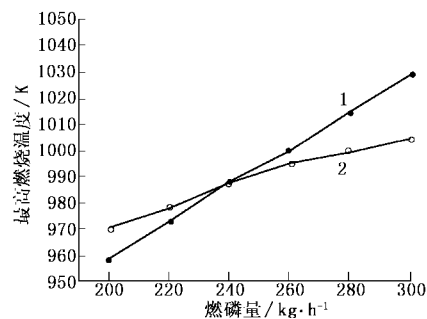
3.1 燃磷量对传热特性的影响

磷的燃烧是一个典型的连锁反应,其总反应式可表示为: $P_4 + 5O_2 \longrightarrow 2P_2O_5$ 。当喷磷量与空气量处于不同比例时,可以得到不同的磷氧化物^[4]。因此在空气量一定时,为保证磷的完全氧化,必须喷入足量熔融磷。其中在空气量或过剩空气系数不变($\alpha > 1$)情况下,燃磷量对最高燃烧温度和烟气排放温度的影响,可通过计算及数值模拟^[5]得到,见图 5、图 6。



1—过剩空气系数不变;2—空气流量不变

图 5 燃磷量对最高燃烧温度的影响



1—过剩空气系数不变;2—空气流量不变

图 6 燃磷量对烟气排放温度的影响

从图 5 可以看出,在过剩空气系数或空气量不变情况下,最高燃烧温度随燃磷量的增加呈单调递增趋势。所不同的是前者工况下的最高燃烧温度增加幅度和增长速率均明显低于后者。同样从图 6 可

以看出,在过剩空气系数或空气量不变情况下,烟气排放温度随燃磷量增加也呈单调递增趋势,且第一种工况下的烟气排放温度增加幅度更大。这主要是由于空气过剩系数不变时,随燃磷量的增加,最高燃烧温度增加很小,而辐射换热随辐射温度升高而增大,使得辐射换热量增加很少,因此烟气排放温度增加幅度较大。

3.2 过剩空气系数对传热特性的影响

磷的氧化反应只有在一定浓度的氧气中才能进行,当过剩空气系数偏小时,磷会发生不完全氧化,只能得到低价磷氧化物。因此,热法磷酸生产中一般都选用过剩空气系数在1.8以上。但在燃磷量一定的情况下,高的过剩空气系数对燃磷塔的传热并不能起到强化作用。借助数值模拟的方法,分析固定燃磷量下最高燃烧温度、烟气排放温度与过剩空气系数的关系见图7、图8。

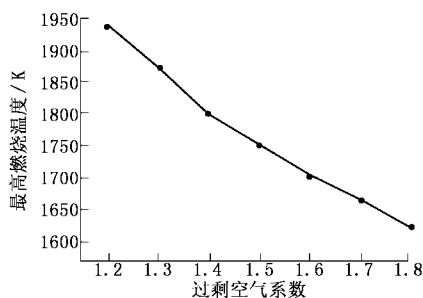


图7 过剩空气系统对最高燃烧温度的影响

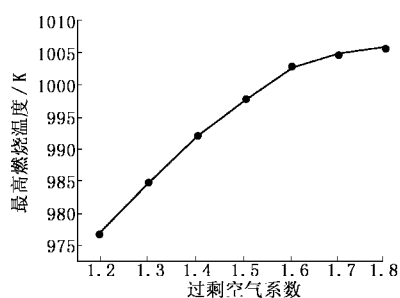


图8 过剩空气系统对烟气排放温度的影响

从图中可以看出燃磷塔的最高燃烧温度随过剩空气系数的增加呈线性下降趋势,烟气排放温度则随过剩空气系数的增大而递增。其原因在于喷磷量不变时,磷燃烧放热量也不变,因此随过剩空气系数的增大,最高燃烧温度会下降,进而导致辐射放热量减小,烟气排放温度升高。基于上面的分析可知,在保证磷完全氧化的情况下,采用较小的过剩空气系

数即低氧燃烧对燃磷塔的传热是有利的。

3.3 其他因素对燃磷塔传热特性的影响

燃磷塔的结构型式、空气预热温度等对其传热特性也有一定程度的影响。

结构上的影响主要体现在2个方面:一是改变传热面积;二是通过结构变化来改变燃烧室内的温度场分布。其中前者可通过对水冷壁进行管内管外强化或者改变燃烧室形状来实现,这对大型燃磷塔的传热影响尤为明显。此外结构上可通过改变燃烧器布置的数量和相对位置来改变燃烧室内的火焰形状、稳定性、最高温度区,进而影响整个燃磷塔的传热效果^[6]。

空气经预热后引入燃磷塔,可以强化磷的着火燃烧过程,减少不完全燃烧的热损失,且在含氧量不变的情况下能增强火焰稳定性,改善传热效果。

4 结论

(1)提出一种能实现能量优化利用的热法磷酸生产工艺,该工艺借助汽包和燃磷塔来回收余热,生产过热蒸汽,既能独立解决自身所需热量,省掉专用燃煤锅炉,减少设备投资,又可为其他化工生产提供部分蒸汽,达到节能、降耗、增利的效果;

(2)设计了具有回收余热功效的新型燃磷塔,它由膜式水冷壁、上下集箱、上下封头、喷磷枪及底部支撑系统组成,并通过下降管、导汽管与汽包相连,不仅能保证磷酸生产的正常进行,同时每燃烧1 t黄磷可副产0.5 MPa水蒸气5.96 t;

(3)燃磷量、过剩空气系数及结构型式是影响燃磷塔传热特性的主要因素。一般在空气过剩系数或空气量不变时,最高燃烧温度和烟气排放温度随燃磷量增加均呈单调递增趋势;而在燃磷量一定时,过剩空气系数越大,最高燃烧温度越低,烟气排放温度越高。

参考文献

- [1] 江善襄主编.磷酸、磷肥和复混肥料[M].北京:化学工业出版社,1999.
- [2] 林彭年.[J].氮肥设计,1990,(4):15-17.
- [3] 蔡孝载,章守陶.[J].磷肥与复肥,1995,10(3):9-13.
- [4] 王永琪.[J].陕西化工,1992,(3):4-8.
- [5] 徐进明,宋耀礼,张冠忠,等.[J].工程热物理论,2001,22(4):453-456.
- [6] 李志海,张钰辉,等.[J].热能动力工程,2001,16(1):83-85. ■