

# 黄磷尾气烧制高活性石灰

董国丽<sup>1</sup> 李黎山<sup>1</sup> 万荣惠<sup>2</sup> 王翠翠<sup>1</sup> 何文豪<sup>1</sup>  
郜 焯<sup>1</sup> 王六生<sup>2</sup> 郜华萍<sup>1,\*</sup>

(1. 昆明理工大学环境科学与工程学院, 昆明 650500; 2. 云南江磷集团股份有限公司, 玉溪 652600)

**摘 要** 黄磷生产过程中产生的黄磷尾气富含高浓度 CO、H<sub>2</sub>, 是非常好的燃料。实验研究了应用黄磷尾气烧制石灰时, 黄磷尾气的杂质含量和燃烧特性对石灰活性度的影响。实验结果表明, 石灰活性度随着黄磷尾气杂质含量的降低而增大; 随着石灰窑燃烧梁的温度和黄磷尾气中 CO 含量的增加而增大, 在 CO 含量为 92% 时、空气过剩系数为 1.3 时, 石灰活性度达到《冶金石灰标准》(YB/T 042-2014) 普通冶金石灰一级标准。

**关键词** 黄磷尾气; 燃料; 石灰活性度

中图分类号 X701 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2016)09-5058-05 DOI 10.12030/j.cjee.201601140

## Yellow phosphorus tail gas firing highly active lime

DONG Guoli<sup>1</sup> LI Lishan<sup>1</sup> WAN Ronghui<sup>2</sup> WANG Cuicui<sup>1</sup> HE Wenhao<sup>1</sup>  
GAO Ye<sup>1</sup> WANG Liusheng<sup>2</sup> GAO Huaping<sup>1,\*</sup>

(1. Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Yunnan Jianglin Group Co. Ltd., Yuxi 652600, China)

**Abstract** Yellow phosphorus tail gas, created during the production of yellow phosphorus, contains high concentrations of CO and H<sub>2</sub>, and is a very good fuel. An experimental study examined the application of yellow phosphorus tail gas fired lime, the impact of impurity content, and combustion characteristics of yellow phosphorus tail gas on the activity of lime. The experimental results show that the lime activity increases with the decreased impurity content of yellow phosphorus tail gas. The lime activity increases with the temperature of the burning beam of the lime kiln and the content of CO in yellow phosphorus tail gas. When the content of CO was 92%, the excess air ratio was 1.3, and lime activity was up to the Standard of Metallurgical Lime (YB/T 042-2014), general metallurgical lime first class standard.

**Key words** yellow phosphorus tail gas; fuel; lime activity

目前, 国内煅烧活性石灰的方法主要有煤烧和气烧 2 种, 煤烧石灰窑的燃料主要有焦炭、无烟煤和粉煤。气烧石灰窑所用的燃料有焦炉煤气、高炉煤气、转炉煤气、天然气、电石炉煤气、及混合煤气<sup>[1]</sup>。与煤烧石灰窑相比, 气烧石灰窑具有窑内温度均匀, 煅烧出的石灰产品活性度高, 对周边的环境污染小, 所以气烧石灰窑的应用越来越广泛。气烧石灰窑所用的气体燃料在相同的条件下, 燃料燃烧的热值决定其能达到的火焰温度, 火焰温度应高于石灰煅烧所需温度。气体燃料火焰温度与石灰煅烧温度差值不低于 50~80℃。保持较大的温度差值有利于调节和控制石灰窑温度, 提高石灰的煅烧效率。

气体燃料中焦炉煤气的主要成分为氢气和甲烷, 体积分数分别为 60% 和 25%, 热值为  $1.5 \times 10^4 \sim 2.5 \times 10^4 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 。高炉煤气中所含 CO 浓度为 30% 左右, 热值为  $3.34 \times 10^3 \sim 4.18 \times 10^3 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 。转炉煤气浓度较高炉煤气要高, CO 含量为 70%~85%, 热值为  $8.37 \times 10^3 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$  左右。与其他气体燃料相比, 黄磷尾气 CO 含量最高, CO 体积分数为 85%~92%, 发热值为  $1.05 \times 10^4 \sim 1.1 \times 10^4 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ , 是一种优良的气体燃料, 研究中通过应用黄磷尾气替代燃煤烧制石灰石<sup>[2]</sup>, 以得到高活性石灰。课题组前期实验表明, 黄磷尾气的燃烧温度最高可达到 920℃ 左右, 火焰长度、宽度约为 250 mm、

基金项目: 国际科技合作与交流专项(2014DFA91000)

收稿日期: 2016-01-19; 修订日期: 2016-02-20

作者简介: 董国丽(1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 环境材料。E-mail: 1226558410@qq.com

\* 通讯联系人, E-mail: ynkmgph@hotmail.com

30 mm,热辐射面积广。燃点约为 630 ℃,燃烧速度约为  $380 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[3]</sup>;CO 与氧气混合燃烧时,会放出大量的热。黄磷尾气作为燃料,可以实现废气的资源化循环利用。目前,黄磷尾气资源化利用的方式有直接做燃料使用,合成磷酸盐及合成碳一化工产品<sup>[4-5]</sup>。黄磷尾气作为生产原料时,对其净化深度要求高;作为燃料使用时对其净化程度要求低。对于中小企业黄磷尾气直接作为燃料是较好的利用途径之一。黄磷尾气作为燃料利用的主要方式<sup>[6]</sup>有:1)作为热水锅炉燃气生产水蒸汽供给生产用气<sup>[7]</sup>;2)作为矿石原料烘烤的燃料;3)作为热源自备发电和生产磷酸盐产品。理论上石灰石的分解温度在 800 ~ 1 000 ℃,在石灰窑实际生产中,石灰实际烧成温度为 900 ℃,炉窑温度为 1 000 ℃左右,黄磷尾气满足石灰窑对气体燃料热值的要求。在具备一定条件时,可以用于石灰窑烧制石灰石。云南磷矿资源丰富,对冶金活性石灰的需求量大,应用黄磷尾气煅烧活性石灰实现尾气的资源化利用,所生产的石灰达到炼钢要求,同时可以为企业节约煤能源,减轻尾气排空对环境造成的污染。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 原料

石灰的生产原料为石灰石,本实验中  $\text{CaCO}_3$  (石灰石)的成分:CaO 含量 54.49%,MgO 含量 0.5%, $\text{SiO}_2$  含量 0.16%,粒度 40 ~ 60 mm,产地:通海里山,取样时间:2015 年 3 月 10 日。

#### 1.1.2 燃料

黄磷电炉生产黄磷所产生的黄磷尾气中主要成分为 CO,其热值约为  $1.1 \times 10^4 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ ,是优良的燃料。其组成:体积分数分别为 85% ~ 95%,2% ~ 4%,0.1% ~ 0.5%,0.2% ~ 1.2% 的 CO、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{CH}_4$ ;浓度含量分别为 7 000 ~ 13 000,1 600 ~ 2 500,30 ~ 50,400 ~ 800 和  $0.4 \sim 0.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  的  $\text{H}_2\text{S}$ 、COS、 $\text{CS}_2$ 、 $\text{PH}_3$ 、F。

### 1.2 黄磷尾气烧制高活性石灰实验设备

水环式真空泵,洗气塔(Q235A,  $\phi 1\ 200 \text{ mm}$ ,  $H = 10 \text{ m}$ ),气柜(Q235A,  $V = 5\ 000 \text{ m}^3$ ),加压风机(流量  $140\ 000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ),换热器,石灰竖窑( $\phi\ 7\ 500$ ,  $H = 22 \text{ m}$ ),冷却风机(流量  $17\ 500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ),助燃风机(流量  $33\ 500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ),脉冲袋式除尘器(过滤面积  $1\ 200 \text{ m}^2$ ,风量  $75\ 000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ,过滤风速  $0.85 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ )。控制燃气和空气流量

的 LZB-15 气体质量流量计,自制专利燃烧器,用于燃烧室内温度测量的 WRN-B 型热电偶。

### 1.3 高活性冶金石灰要求

冶金石灰标准(YB/T 042-2014)<sup>[8]</sup>中对普通冶金石灰中一级品对石灰各组分的要求为:CaO  $\geq 90\%$ ,MgO  $< 5\%$ , $\text{SiO}_2 \leq 2.5\%$ ,S  $\leq 0.040\%$ ,活性度  $\geq 320 \text{ mL}$ ;镁质冶金石灰一级品:CaO  $\geq 91\%$ ,MgO  $\geq 5\%$ , $\text{SiO}_2 \leq 2.5\%$ ,S  $\leq 0.050\%$ ,活性度  $\geq 280 \text{ mL}$ 。

### 1.4 实验方法

#### 1.4.1 黄磷尾气净化工艺

从黄磷炉排出的尾气除了主要成分为 CO 外,还含有无机硫、有机硫和原料粉尘等其他杂质。一般情况下尾气中总硫量为 0.8% ~ 8.0%,总磷量为  $0.5 \sim 1.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。黄磷尾气中的杂质成分会对燃烧设备造成腐蚀<sup>[9]</sup>,因此利用之前需要对其进行净化处理。常用的黄磷尾气净化方法<sup>[10-11]</sup>有:吸收法(水洗法、水洗 + 碱洗法)、变温变压吸附法和催化氧化法。本研究通过水环式真空泵把黄磷尾气输送至洗气塔后,采用课题组邵华萍等人专利《黄磷尾气燃气净化方法及其装置》(200910094045.9)<sup>[12]</sup>中的催化氧化法和碱洗法,去除黄磷尾气中的  $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{PH}_3$ 、 $\text{AsH}_3$ 、氟化物、部分砷化物和磷、硫氧化物,经净化后的黄磷尾气达到燃气设备对燃料的要求后输送至气柜贮存。

#### 1.4.2 黄磷尾气烧制高活性石灰工艺

气柜中的黄磷尾气通过加压风机调压后,由调节流量调节控制阀调控进入燃烧器的黄磷尾气流量,通过调节质量流量调节阀控制空气流量大小,设定空气过剩系数为 0.8 ~ 1.5。黄磷尾气和空气在控制好流量后,通过管道引入石灰窑内送入尾气换热器换热后输送至石灰窑的煅烧带(上、下燃烧梁)进行燃烧。同时将粒度为 40 ~ 60 mm 的石灰石原料输送至石灰窑贮料带,石灰下落至预热带经干燥升温逐步下落至煅烧带,由上下燃烧梁加热至 800 ~ 1 200 ℃煅烧分解得到石灰,再逐步下落到冷却带由冷却风冷却至 90 ~ 120 ℃,经计量出灰至窑下储灰斗最后得到石灰成品。石灰煅烧时间为 36 ~ 48 h。燃烧后的尾气经过脉冲袋式除尘器除尘后排空。

#### 1.4.3 黄磷尾气燃烧特性测定

本研究中黄磷尾气的燃烧特性测定,采用专利“一种含高浓度尾气燃烧特性检测装置及其方法”(201110300822.8)<sup>[13]</sup>,实验中采用 WRN-B 型热电偶对石灰窑燃烧梁的温度进行测定。热电偶的探头通过温度数据采集孔进入石灰窑内部,测量石灰窑

内的燃烧温度。探头距离燃烧室底部高度 300 mm, 与燃烧室中心距离为 20 mm。

#### 1.4.4 石灰活性度的测定

石灰的活性度参照《冶金石灰物理检验方法标准》(YB/T 105-2005) 的标准进行测定。

#### 1.4.5 CaO、MgO 含量的测定

石灰中 CaO、MgO 含量的测定参照《石灰石及白云石化学分析方法》(GB/T 3286.1-2012) 中的方法进行测定。本实验中采用络合滴定法(EDTA)滴定 CaO 和 MgO 含量<sup>[14]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 黄磷尾气的杂质含量对石灰活性度的影响

从黄磷电炉产生的电炉尾气中杂质  $H_2S$  的含量为  $7\,000 \sim 13\,000\text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $PH_3$  的含量为  $400 \sim 800\text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $CS_2$  的含量为  $30 \sim 50\text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , COS 的含量为  $1\,600 \sim 2\,500\text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。采用专利《黄磷尾气燃气净化方法及其装置》对黄磷尾气进行净化处理后,  $H_2S$  的含量为  $20 \sim 150\text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $PH_3$  的含量为  $1 \sim 30\text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $CS_2$  的含量为  $1 \sim 5\text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , COS 的含量为  $20 \sim 50\text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

黄磷尾气中  $H_2S$ 、COS、 $CS_2$ 、 $PH_3$  含量对石灰活性度的影响如图 1 所示。

由图 1 可以看出,随着黄磷尾气中杂质( $H_2S$ 、COS、 $CS_2$ 、 $PH_3$ )含量增大,石灰活性度降低。在所含杂质  $CS_2$ 、 $PH_3$ 、COS、 $H_2S$  中,  $CS_2$  对石灰活性度的影响最显著,  $PH_3$  次之,  $H_2S$  对石灰的活性度影响最小。出现这种现象的主要原因是黄磷尾气中的杂质  $CS_2$ 、 $H_2S$ 、 $SO_2$ 、 $PH_3$  等会与烧成的活性石灰中的 CaO

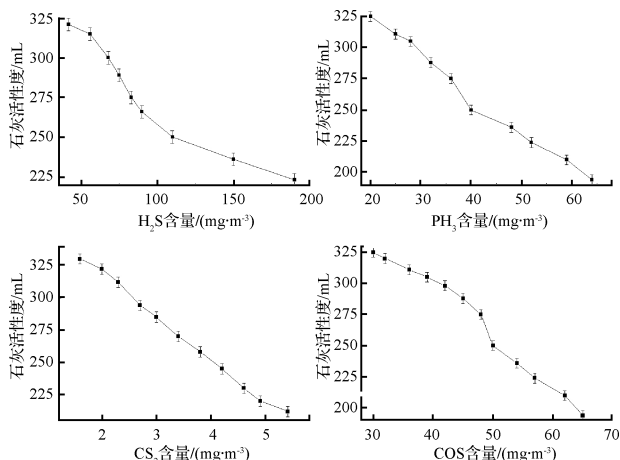
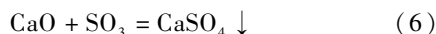
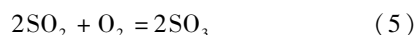
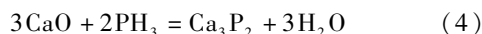
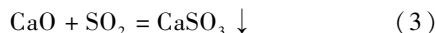
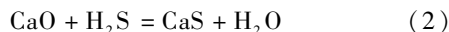
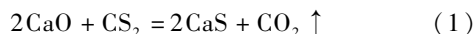


图1 黄磷尾气的杂质含量对石灰活性度的影响

Fig. 1 Impurity content of yellow phosphorus tail gas to the influence of lime activity

反应,生成硫化钙( $CaS$ )、亚硫酸钙( $CaSO_3$ )、磷化钙( $Ca_3P_2$ )等含钙化合物。在氧含量高的情况下,  $SO_2$  易被氧化为  $SO_3$ , 所生成的  $SO_3$  会与  $CaO$  反应生成硫酸钙( $CaSO_4$ )。其反应原理<sup>[15]</sup>如下:



反应式(1)、(2)中生成的  $CaS$ , 式(3)生成的  $CaSO_3$ , 式(4)生成的  $Ca_3P_2$ , 式(6)生成的  $CaSO_4$  等化合物会导致石灰颗粒间黏结, 堵塞颗粒表面细孔, 这些化合物不仅会降低石灰活性, 还会堵塞分解所产生的  $CO_2$  逸出的通道, 导致石灰分解不完全, 石灰形成生烧, 使得石灰的活性度下降, 影响石灰质量。

由图 1 得出, 杂质含量与冶金石灰活性度关系为, 在杂质含量  $H_2S < 45\text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $COS < 23\text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $CS_2 < 2.1\text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $PH_3 < 32\text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时, 石灰活性度达到普通冶金石灰中一级标准( $\geq 320\text{ mL}$ ); 在杂质含量  $H_2S < 80\text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $COS < 34\text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $CS_2 < 3.2\text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $PH_3 < 47\text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时, 石灰活性度达到镁质冶金石灰一级标准( $\geq 280\text{ mL}$ )。

### 2.2 黄磷尾气燃烧特性对石灰活性度的影响

气体燃料的组成、空气过剩系数( $\alpha$ )及空气与燃气的混合程度影响燃料的燃烧温度<sup>[16-17]</sup>。气烧石灰窑中空气过剩系数  $\alpha$  的大小决定窑内燃烧反应的温度。实验通过选取不同的燃烧梁温度( $450 \sim 570\text{ }^\circ\text{C}$ )、不同的 CO 含量( $75\% \sim 95\%$ )和不同的空气过剩系数( $\alpha = 0.8 \sim 1.5$ ), 得出燃烧梁温度、CO 含量、空气过剩系数及煅烧温度对石灰活性度的影响。实验结果见图 2 ~ 图 4。

图 2 是石灰窑燃烧梁温度对石灰活性度的影响。

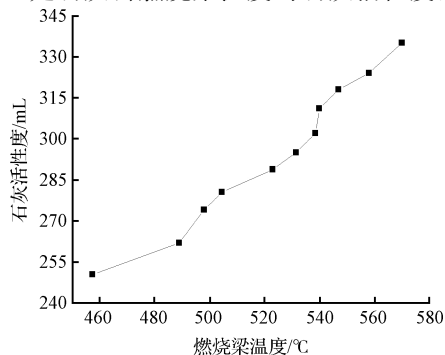


图2 燃烧梁的温度对石灰活性度的影响

Fig. 2 Effect of temperature of the combustion beam on the activity of lime

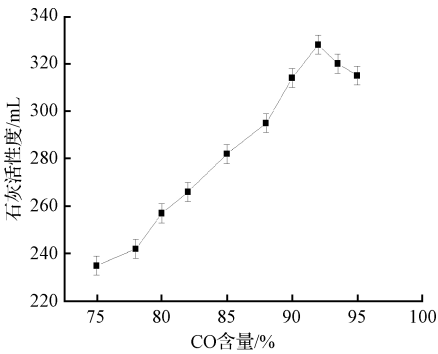


图3 黄磷尾气中CO含量对石灰活性度的影响  
Fig. 3 Effect of yellow phosphorus tail gas of CO content on the influence of lime activity

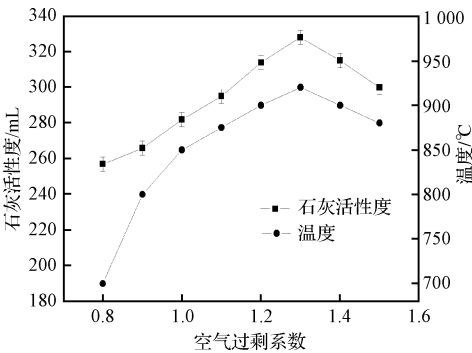


图4 空气过剩系数、燃烧温度与石灰活性度的关系  
Fig. 4 Relationship of excess air coefficient, combustion temperature and lime activity

所测定的石灰活性,是经过煅烧石灰石 36 h 后得出的。随着燃烧梁温度的增大,石灰活性度增加。当燃烧梁温度大于 550 ℃ 时,石灰活性度达到普通冶金石灰中一级标准(≥320 mL),这是由于随着温度的增加,石灰石煅烧越充分。但由于燃烧梁需要通过导热油冷却,因此燃烧梁温度需控制在 560 ℃ 左右。

图 3 是黄磷尾气中 CO 含量对石灰活性度的影响。从图 3 可以看出,在 CO 含量为 75% ~ 90% 之间,石灰活性度随着 CO 含量的增加而增大,在 CO 含量为 92% 时活性度最大,此时石灰活性度为 335 mL。当 CO 含量超过 92% 后,石灰活性度反而降低。在 CO 含量为 90% ~ 94% 时,所烧制的石灰活性度达到普通冶金石灰中一级标准(≥320 mL)。出现这种现象的原因是在煅烧石灰所需热量范围内,随着黄磷尾气中 CO 含量的增大,燃料的热值随之增大,使得石灰窑内的煅烧温度升高石灰煅烧完全,所以活性度增大;当 CO 含量过高,使得石灰窑内煅烧温度过高,石灰过烧导致石灰活性度降低。

图 4 是空气过剩系数对石灰活性度的影响。从图 4 可以看出,在空气过剩系数  $\alpha \leq 1.3$  时,燃烧温

度和石灰活性度随着  $\alpha$  的增大而增大; $\alpha = 1.3$  时,燃烧温度最大,石灰活性度高达 328 mL;当  $\alpha > 1.3$  时,随着空气过剩系数  $\alpha$  的增大,燃烧温度和石灰活性度反而降低。这是由于随着空气过剩系数增加,黄磷尾气燃烧越充分,窑内煅烧温度增加石灰石煅烧完全;在  $\alpha > 1.3$  时,空气过剩系数过大在燃烧过程中产生过多的燃烧烟气,烟气排放带走了大量的燃烧热,导致石灰窑的热利用效率降低,同时在空气过剩系数较大时,燃烧热力学特性发生变化,黄磷尾气的燃烧不能达到最佳效果。黄磷尾气煅烧石灰的最佳空气过剩系数为 1.3,经测定石灰活性度为 328 mL,CaO 含量为 92%,MgO 含量为 3.1%。普通冶金石灰中一级标准(≥320 mL)。

由图 2 ~ 图 4 得出燃烧梁温度、CO 含量、空气过剩系数、煅烧温度与冶金石灰活性度关系为:当燃烧梁温度 ≥ 550 ℃,CO 含量为 90% ~ 94%,空气过剩系数为 1.3,煅烧温度为 920 ℃ 时,石灰活性度达到普通冶金石灰中一级标准(≥320 mL);当燃烧梁温度 ≥ 504 ℃,CO 含量 ≥ 80%,空气过剩系数 ≥ 1,煅烧温度 ≥ 850 ℃ 时,石灰活性度达到镁质冶金石灰一级标准(≥280 mL)。

2.3 利用黄磷尾气烧制高活性石灰的效益

2.3.1 经济效益

以黄磷尾气作为燃料烧制石灰石 500 t · d<sup>-1</sup>,生产设备每年运行 230 d 为例,消耗黄磷尾气量约为 300 m<sup>3</sup> · t<sup>-1</sup>灰,净化黄磷尾气的价格约 0.10 元 · m<sup>-3</sup>,则利用黄磷尾气烧制石灰的燃料成本为 30 元 · t<sup>-1</sup>灰;使用焦炭烧制石灰石时,消耗焦炭量约为 150 kg · t<sup>-1</sup>灰,焦炭价格约 1 200 元 · t<sup>-1</sup>,则利用焦炭烧制石灰的成本价为 180 元 · t<sup>-1</sup>灰。黄磷尾气烧制石灰的耗电约为 50 kWh · t<sup>-1</sup>灰,焦炭烧制石灰的耗电量约 30 kWh · t<sup>-1</sup>灰,每度电以 1.0 元计算,利用焦炭烧制石灰较黄磷尾气烧制石灰节约 20 元 · t<sup>-1</sup>灰。利用黄磷尾气烧制石灰可降低动力燃料费约 130 元 · t<sup>-1</sup>灰,黄磷企业每年生产黄磷 11.5 万 t,则利用黄磷尾气烧制高活性石灰每年可为企业增加经济效益 1 400 万元以上。

2.3.2 环境效益

焦炭的含硫约为 1%,硫转化率约为 85%,其减排量见表 1。

| 表 1 污染物的减排量                     |       |      |                      |
|---------------------------------|-------|------|----------------------|
| Table 1 Emissions of pollutants |       |      | kg · t <sup>-1</sup> |
| 燃料                              | 硫化物   | 氮化物  | 粉尘                   |
| 煤                               | 17.27 | 2.59 | 0.557                |
| 黄磷尾气                            | 3.04  | 0.03 | 0.005                |

利用黄磷尾气替代燃煤烧制石灰,硫化物的减排量约为  $1\ 600\ \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ ,氮化物的减排量约为  $300\ \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ ,粉尘的减排量约为  $63\ \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。利用黄磷尾气替代燃煤烧制石灰石可为企业带来可观的经济效益,同时可以减少硫化物、氮化物及粉尘的排放,减轻对周边环境造成的污染。

### 3 结 论

1)黄磷尾气中的杂质( $\text{COS}$ 、 $\text{CS}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{PH}_3$ )在  $\text{H}_2\text{S} < 190\ \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $\text{COS} < 64\ \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $\text{CS}_2 < 5.4\ \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $\text{PH}_3 < 65\ \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$  范围内,石灰活性度随着杂质含量的增大而降低,因此利用黄磷尾气烧制石灰石之前需要对其进行净化,以提高石灰的活性度。

2)随着燃烧梁温度的增大,石灰活性度增加;经净化后的黄磷尾气在  $\text{CO}$  含量为  $75\% \sim 92\%$  时,石灰活性度随着  $\text{CO}$  含量的增加而增大, $\text{CO}$  含量为  $92\%$  时石灰活性度最大为  $335\ \text{mL}$ ;在空气过剩系数  $\alpha = 1.3$  时,燃烧温度最大,石灰活性度高达  $328\ \text{mL}$ 。所以利用黄磷尾气替代燃煤烧制高活性石灰时空气过剩系数控制在  $1.3$  为宜。

利用黄磷尾气替代燃煤烧制石灰石可降低石灰的生产成本,为企业带来良好的经济效益和环境效益。

### 参 考 文 献

- [1] 习小诚. 回转窑焙烧优质活性冶金石灰的质量研究. 西安: 西安建筑科技大学硕士学位论文, **2013**  
XI Xiaocheng. The research on high quality of active lime roasted in rotary kiln. Xi'an: Master Dissertation of Xi'an University of Architecture and Technology, **2013**(in Chinese)
- [2] 胡学琼, 宁平, 郜华萍, 等. 黄磷尾气作为替代燃料用于石灰窑煅烧工艺. 无机盐工业, **2013**, 45(12): 38-40  
HU Xueqiong, NING Ping, GAO Huaping, et al. Yellow phosphorus tail gas as alternative fuel for lime kiln calcining process. Inorganic Chemicals Industry, **2013**, 45(12): 38-40(in Chinese)
- [3] ZHOU Zhou, GAO Huaping. Experimental study on combustion characteristic of yellow phosphorus tail gas. Energy Procedia, **2012**, 16: 763-768
- [4] 陈善继. 黄磷尾气的回收利用. 无机盐工业, **2008**, 40(2): 51-53  
CHEN Shanji. Recovery and utilization of yellow phosphorus tail gas. Inorganic Chemicals Industry, **2008**, 40(2): 51-53(in Chinese)
- [5] 宁平, 王学谦, 陈梁. 黄磷尾气净化制甲醇. 中国工程科学, **2005**, 7(S1): 415-418  
NING Ping, WANG Xueqian, CHEN Liang. Methanol production by purified yellow phosphorus tail gas. Engineering Science, **2005**, 7(S1): 415-418(in Chinese)
- [6] 周洲. 黄磷尾气燃烧特性初步研究. 昆明: 昆明理工大学硕士学位论文, **2012**  
ZHOU Zhou. Preliminary study on combustion characteristics of yellow phosphorus tail gas. Kunming: Master Dissertation of Kunming University of Science and Technology, **2012**(in Chinese)
- [7] 刘河云. 黄磷尾气用于烧锅炉及其效果. 磷肥与复肥, **2013**, 28(1): 76  
LIU Heyun. Yellow phosphorus tail gas is used for burning boilers and their effects. Phosphate & Compound Fertilizer, **2013**, 28(1): 76(in Chinese)
- [8] 中华人民共和国工业和信息化部. YB/T 042-2014 冶金石灰. 北京: 冶金工业出版社, **2014**
- [9] GAO Huaping, NING Ping, WU Chaofeng, et al. Corrosion of different materials in combustion chamber of yellow phosphorus tail gas in industrial boiler. Journal of Wuhan University of Technology-Mater, **2010**, 25(1): 53-57
- [10] 侯永胜, 王学谦, 张洁, 等. 黄磷尾气净化及综合利用技术进展. 昆明理工大学学报(自然科学版), **2012**, 37(1): 73-77  
HOU Yongsheng, WANG Xueqian, ZHANG Jie, et al. Technical progress of purification and comprehensive utilization of yellow phosphorus tail gas. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), **2012**, 37(1): 73-77(in Chinese)
- [11] 吴鹏. 黄磷尾气净化方法的探讨. 新疆有色金属, **2011**, 34(S2): 97-99  
WU Peng. The discussion of yellow phosphorus tail gas purification method. Xinjiang Nonferrous Metals, **2011**, 34(S2): 97-99(in Chinese)
- [12] 郜华萍, 宁平, 殷在飞, 等. 黄磷尾气燃气净化方法及其装置: CN101474531A. **2009-07-08**
- [13] 郜华萍, 周洲, 郜华, 等. 一种含高浓度  $\text{CO}$  尾气燃烧特性检测装置及其方法: CN102393403A. **2012-03-28**
- [14] 王永惠, 王旭宏, 史东良. 石灰石中  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$  含量的分析方法探讨. 山西科技, **2003**(4): 75-76  
WANG Yonghui, WANG Xuhong, SHI Dongliang. Probe into the methods for analyzing the contents of  $\text{CaO}$  and  $\text{MgO}$  in limestone. Shanxi Science and Technology, **2003**(4): 75-76(in Chinese)
- [15] 韩金寿. 石灰石在煤基还原窑中的脱硫作用. 四川冶金, **1992**(4): 20-22  
HAN Jinshou. Limestone desulfurization in coal base reduction furnace. Sichuan Metallurgical, **1992**(4): 20-22(in Chinese)
- [16] 李剑, 赵浩文, 李长荣. 影响炼钢用石灰活性的因素分析. 冶金丛刊, **2012**(3): 1-3  
LI Jian, ZHAO Haowen, LI Changrong. Influencing factors analysis on activeness of lime for steelmaking. Metallurgical Collections, **2012**(3): 1-3(in Chinese)
- [17] 乐可襄, 董元箴, 王世俊, 等. 石灰石煅烧活性石灰的实验研究. 安徽工业大学学报, **2001**, 18(2): 101-103  
YUE Kexiang, DONG Yuanchi, WANG Shijun, et al. Experimental study on calcining active lime from the limestone. Journal of Anhui University of Technology, **2001**, 18(2): 101-103(in Chinese)