

# 高温高固气比条件下旋风预热器分级分离效率的研究

杨沛浩, 陈延信, 徐德龙

(西安建筑科技大学粉体工程研究所, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 在温度分别为 15 °C、200 °C、400 °C、600 °C、800 °C, 固气质量比分别为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5, 风速分别为 14 m/s、16 m/s、18 m/s、20 m/s、22 m/s、24 m/s 的不同条件下, 试验研究温度、固气比和风速对旋风预热器分级分离效率的影响, 结果表明: 物料颗粒直径  $d_p \leq 1 \mu\text{m}$  时, 分级分离效率很高; 临界粒径随着风速的提高而减小, 随着固气比的增加而减小; 临界粒径随着温度的升高逐渐增大, 400~600 °C 时达到高点, 随着温度的继续升高临界粒径反而变小。

**关键词:** 旋风预热器; 分级分离效率; 温度; 风速; 固气质量比

**中图分类号:** TQ172.6

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2015)05-0752-08

## Investigation into fractional collection efficiency of cyclone preheater at conditions of high temperature and high solid-gas mass ratio

YANG Peihao, CHEN Yanxin, XU Delong

(Institute of Powder Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** At different conditions such as temperature of 15 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C and 800 °C; solid-gas mass ratio of 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 and 2.5; gas velocity of 14 m/s, 16 m/s, 18 m/s, 20 m/s, 22 m/s and 24 m/s, the influences on fractional collection efficiency were studied. The results show that fractional collection efficiency is high for the particle diameter of less than  $1 \mu\text{m}$ ; critical size decreases with the increase of the gas velocity or the solid-gas mass ratio; critical size increases gradually with the increase of temperature; On reaching a maximum between 400 °C~600 °C it decreases gradually as temperature further increases.

**Key words:** cyclone preheater; fractional collection efficiency; temperature; gas velocity; solid-gas mass ratio

旋风筒自 1885 年 O. M. Morse 申请发明专利以来, 因其结构简单、造价低、维护管理方便、分离效率高、适应性强、可在高温下使用等特点, 广泛地应用于石油、化工、冶金、煤炭、电力、医药和水泥等行业。近年来, 随着水泥工业生产工艺的不断发展, 在新型干法水泥悬浮预热预分解技术中, 广泛采用旋风筒作为水泥生料粉的预热装置。旋风预热器工作的性能是广大研究者们普遍关注的问题, 研究主要集中在换热效率、分离效率、阻力损失三方面。关于总分离效率和分级分离效率, 众多的公司和研究者们展开了各式各样的研究。

中国石油大学罗晓兰<sup>[1]</sup>等人测定了常温、固定风速下、浓度在 0~3000 g/m<sup>3</sup> 范围内旋风筒总分离效率和分级分离效率随固气比的变化规律, 得出结论: 总分离效率和分级分离效率随固气比的增大而提高。巴西坎皮纳斯州立大学 Fabió Luís Fassani<sup>[2]</sup>等人测定了常温、三种风速下、固气比在 0~20 范围内总分离效率变化规律, 得出结论: 当固气比小

于 12 时, 总分离效率随固气比的增加而提高; 当固气比大于 12 时, 总分离效率随着固气比的增加而降低。南京化工大学陆雷<sup>[3]</sup>等人在常温、低固气比下探讨了分级分离效率, 并得出了分级分离效率和粒径之间的关系式。东南大学钱付平<sup>[4]</sup>、电力部热工研究院许世森<sup>[5]</sup>、西安交通大学习永发<sup>[6]</sup>等人研究了低固气比下、温度在 20~800 °C 范围内旋风筒分离性能, 得出结论: 随着温度的升高分离效率降低。中国石油大学李文琦<sup>[7]</sup>等人研究了低固气比下、温度在 20~600 °C 范围内旋风筒分离性能, 得出了同钱付平等同样的结论, 同时得到了高温下的鱼钩效应。西安建筑科技大学杨沛浩<sup>[8]</sup>等人基于水泥工况研究了温度在 20~800 °C、固气比在 0~2.5、风速在 14~24 m/s 范围内总分离效率的变化规律, 得出的结论是: 总分离效率随着入口风速的提高而提高, 但当风速大于 22 m/s 时趋于平缓并开始有下降趋势; 总分离效率随着固气比的增大而提高; 总分离效率随着温度的升高而降低。

**收稿日期:** 2014-08-08 **修改稿日期:** 2015-10-22

**基金项目:** 国家科技支撑计划项目 (2012BAA08B01)

**作者简介:** 杨沛浩 (1970-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事材料科学与工程领域的研究。E-mail: yang\_peihao@163.com

综合国内外的研究成果, 普遍认为: 随着入口风速的提高而分离效率提高, 随着风速的降低而分离效率降低; 当固气比较低时, 随着固气比的增大分离效率提高, 当固气比增加到一定程度时, 随着固气比的增大分离效率降低, 至于转折点有不同的说法; 随着温度的提高, 分离效率下降。旋风筒的基本操作参数有三个: 风速、固气比、温度, 大多数研究者基于常温或低固气比下的研究, 高温且高固气比下的研究还未见有报道。旋风预热器在高温下运行, 固气比有提高的趋势, 因此对高温高固气比条件下旋风预热器的性能进行研究和探讨, 无论是对水泥工业还是其他领域的发展都将有重要的指导意义。总分离效率是旋风预热器的重要性能, 仅仅用总分离效率难以客观评价旋风预热器分离性能的优劣, 还必须对不同大小颗粒的分离效率即分级分离效率进行研究, 针对不同温度、不同风速、不同固气比条件下的分级分离效率进行了探索。

1 实验设置

1.1 实验流程及其装置

实验物料采用陕西泾阳声威水泥厂水泥生料粉, 中位粒径为  $16.77\text{ }\mu\text{m}$ , 水分含量  $0.9\%$ 。旋风预热器结构示意图见图 1, 结构尺寸见表 1, 实验流程及其装置见图 2。实验模型用不锈钢材 1Cr18Ni9Ti 制作而成, 热风炉内浇注耐火材料, 换热管和旋风预热器外敷  $100\text{ mm}$  厚矿棉保温层, 燃料为液化天然气。

1.2 实验测试内容

如图 2 所示, 试验系统各测试点 (A, B, C, D, E, F) 通过热电偶、差压变送器、压力变送器输出信

号( $1\sim5\text{ V}$  标准电压信号), 送入采集卡转换成数字信号, 采集系统按给定的要求采集各通道信号, 并传输到微机通过 Labview 软件实时显示和储存, 储存的数据可调用分析。

表 1 旋风预热器结构尺寸表  
Tab.1 Structure size of the cyclone preheater

名称	符号	比值
筒体直径	$D_0/D_0$	1.000
内筒直径	$D_c/D_0$	0.482
内筒插入深度	$S/D_0$	0.580
内筒露出长度	$h_0/D_0$	0.392
涡体高度	$h_1/D_0$	0.594
直筒高度	$h_2/D_0$	1.051
锥体高度	$h_3/D_0$	1.252
总高度	$H/D_0$	2.898
偏心距	$e/D_0$	0.062
蜗壳角度	$\alpha$	$55^\circ$
锥体角度	$\beta$	$19^\circ$

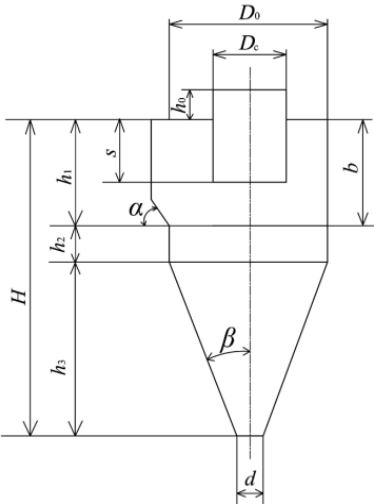


图 1 旋风预热器结构示意图  
Fig.1 Structure schematic diagram of the cyclone preheater

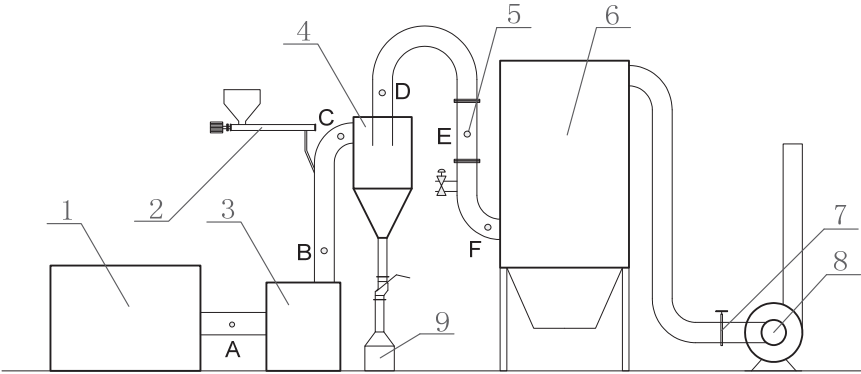


图 2 旋风预热器分级分离效率实验流程及其装置示意图  
Fig.2 The experimental process and equipment of the fractional collection efficiency of cyclone preheater  
1- Hot blast stove; 2- Feeder; 3- settling chamber; 4- Cyclone; 5- Orifice plate flow meter; 6-Dust collector; 7- Control Valve; 8- Fan; 9- Collecting Box

实验预设旋风预热器进出口平均温度分别为  $15\text{ }^\circ\text{C}$  (常温)、 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $800\text{ }^\circ\text{C}$ , 旋风预热器入口风速分别为  $14\text{ m/s}$ 、 $16\text{ m/s}$ 、 $18\text{ m/s}$ 、 $20\text{ m/s}$ 、 $22\text{ m/s}$ 、 $24\text{ m/s}$ , 旋风预热器入口固气质量

比分别为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5, 合计 150 个实验点, 每个实验点由不同温度、不同风速、不同固气质量比所构成。

## 2 实验结果及其分析

### 2.1 分析计算公式

分级分离效率

$$\eta_x = S_{ox}/S_{ix} \times 100\% = (S_o \cdot X_{dxo}/S_i \cdot X_{dxi}) \times 100\% \\ = \eta_{\text{总}} \cdot (X_{dxo}/X_{dxi}) \times 100\%.$$

式中:  $S_{ox}$  为旋风预热器捕集到的平均粒径为  $x$ , 粒径范围在  $\Delta x$  内的粉体颗粒质量;  $S_{ix}$  为进入旋风预热器的平均粒径为  $x$ , 粒径范围在  $\Delta x$  内的粉体颗粒质量;  $S_o$  为旋风预热器捕集到的粉体颗粒总质量;  $S_i$  为进入旋风预热器的粉体颗粒总质量;  $X_{dxo}$  为旋风预热器捕集到的平均粒径为  $x$ , 粒径范围在  $\Delta x$  内的粉体颗粒质量与旋风预热器捕集到的粉体颗粒总质量之比;  $X_{dxi}$  为进入旋风预热器的平均粒径为  $x$ , 粒径范围在  $\Delta x$  内的粉体颗粒质量与进入旋风预热器的粉体颗粒总质量之比。

### 2.2 实验结果及其分析

在不同的实验点下对从取料器所获取的物料进行粒度分析, 与原料粒度分布做对比, 根据分级分离效率的计算公式计算出分级分离效率并作图, 见图 3-图 8。

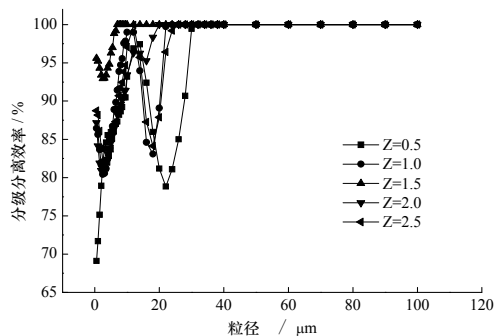


图3 15°C-14m/s 下的分级分离效率

Fig.3 Fractional collection efficiency under 15°C-14m/s

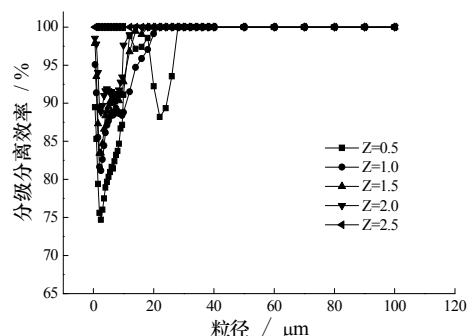


图4 15°C-16m/s 下的分级分离效率

Fig.4 Fractional collection efficiency under 15°C-16m/s

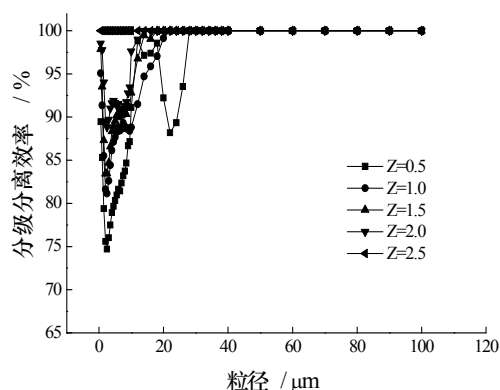


图5 15°C-18m/s 下的分级分离效率

Fig.5 Fractional collection efficiency under 15°C-18m/s

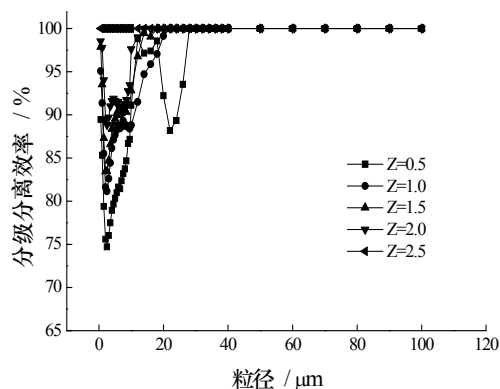


图6 15°C-20m/s 下的分级分离效率

Fig.6 Fractional collection efficiency under 15°C-20m/s

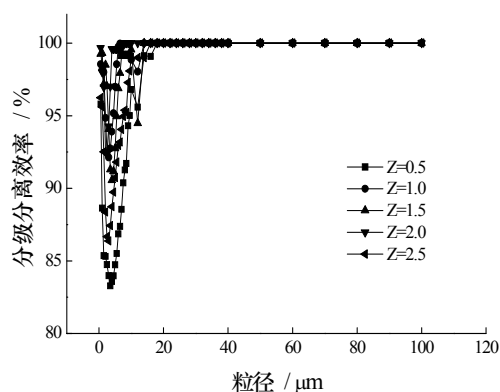


图7 15°C-22m/s 下的分级分离效率

Fig.7 Fractional collection efficiency under 15°C-22m/s

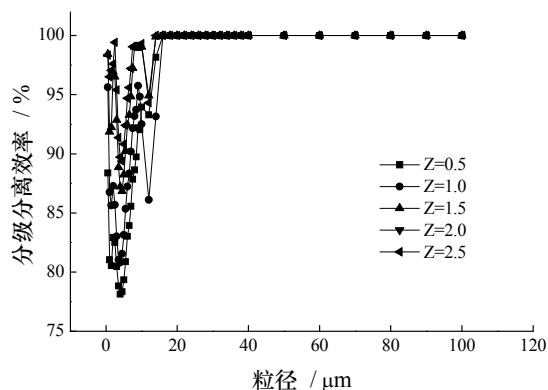


图8 15°C-24m/s 下的分级分离效率

Fig.8 Fractional collection efficiency under 15°C-24m/s

如图3-图8所示: 在常温15℃时, 不同风速下, 粒径 $dp \leq 3\mu\text{m}$ 时, 粒径越小分级分离效率越高, 随着粒径的增大分级分离效率逐渐降低, 粒径在 $3\mu\text{m}$ 附近分级分离效率达到低点, 其后随着粒径的增大, 分级分离效率又逐渐增大. 在常温15℃时, 不同风速下,  $dp \geq 30\mu\text{m}$ 时生料被100%收集. 临界粒径随着风速的提高逐渐从 $30\mu\text{m}$ 减小到 $20\mu\text{m}$ . 在常温15℃时, 同一风速下, 临界粒径随着固气比的增加逐渐减小. 总之, 临界粒径随着入口风速的提高而减小, 随着固气比的增大而减小, 这也就是旋风筒总分离效率随着入口风速的提高而增大, 随着固气比的增加而增大的原因.

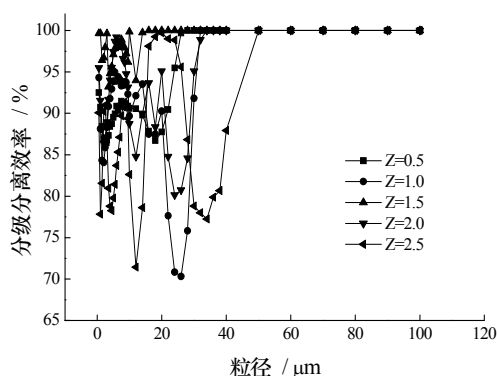


图9 200℃-14m/s 下的分级分离效率  
Fig.9 Fractional collection efficiency under 200℃-14m/s

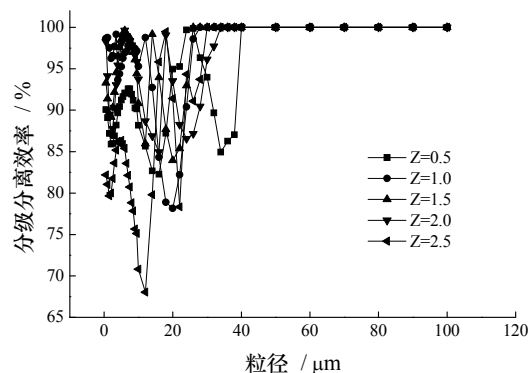


图10 200℃-16m/s 下的分级分离效率  
Fig.10 Fractional collection efficiency under 200℃-16m/s

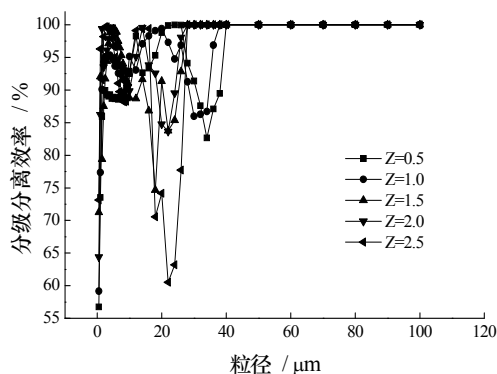


图11 200℃-18m/s 下的分级分离效率  
Fig.11 Fractional collection efficiency under 200℃-18m/s

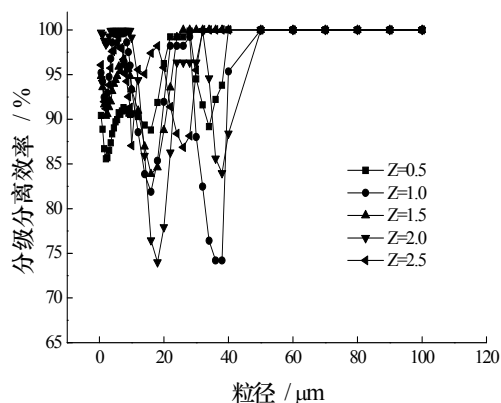


图12 200℃-20m/s 下的分级分离效率  
Fig.12 Fractional collection efficiency under 200℃-20m/s

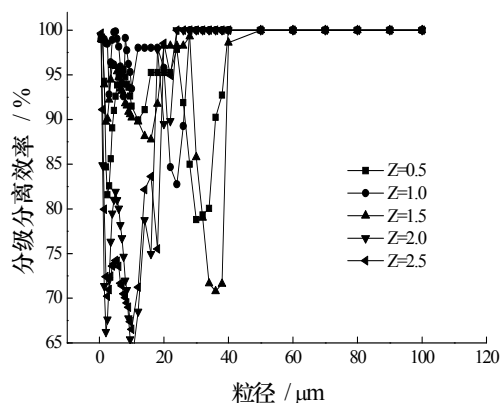


图13 200℃-22m/s 下的分级分离效率  
Fig.13 Fractional collection efficiency under 200℃-22m/s

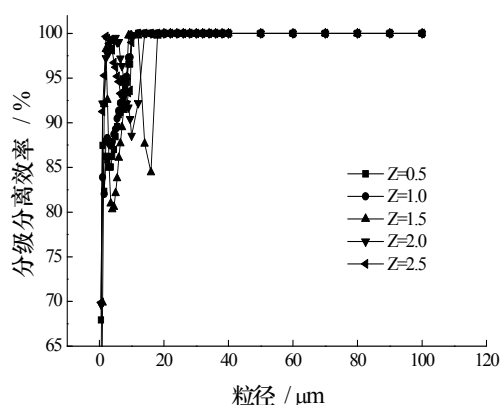


图14 200℃-24m/s 下的分级分离效率  
Fig.14 Fractional collection efficiency under 200℃-24m/s

如图9-图14所示: 在200℃时, 不同风速下, 粒径 $dp \leq 3\mu\text{m}$ 时, 粒径越小分级分离效率越高, 随着粒径的增大分级分离效率逐渐降低, 粒径在 $3\mu\text{m}$ 附近分级分离效率达到低点, 其后随着粒径的增大, 分级分离效率又逐渐增大, 粒径在 $12\mu\text{m}$ 和 $32\mu\text{m}$ 左右时出现两次低点. 在200℃时, 不同风速下, 粒径 $dp \geq 50\mu\text{m}$ 时生料被100%收集. 临界粒径随着风速的提高逐渐减小, 随着固气比的增大逐渐减小.

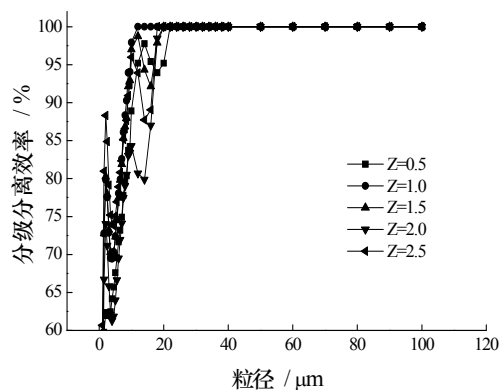


图 15 400°C-14m/s 下的分级分离效率

Fig.15 Fractional collection efficiency under 400°C-14m/s

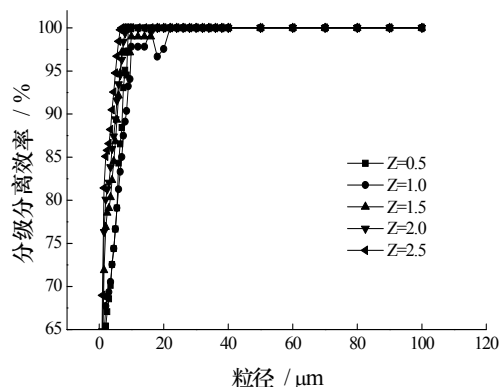


图 16 400°C-16m/s 下的分级分离效率

Fig.16 Fractional collection efficiency under 400°C-16m/s

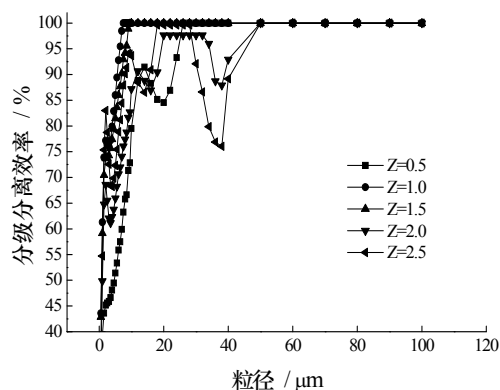


图 17 400°C-18m/s 下的分级分离效率

Fig.17 Fractional collection efficiency under 400°C-18m/s

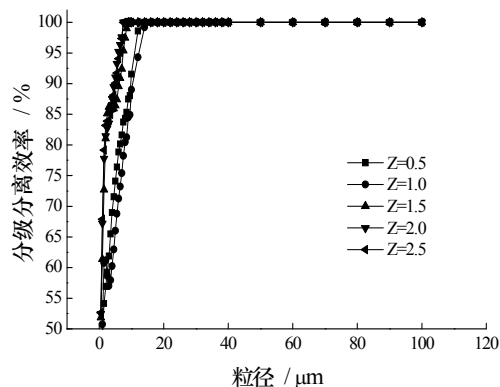


图 18 400°C-20m/s 下的分级分离效率

Fig.18 Fractional collection efficiency under 400°C-20m/s

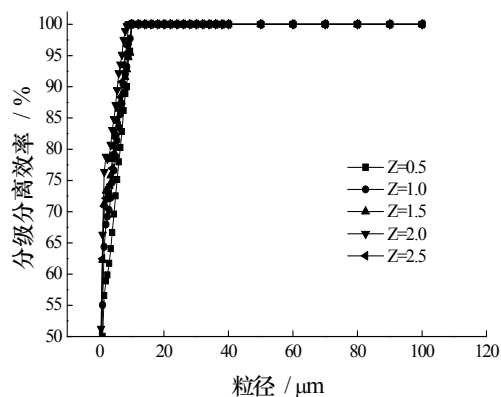


图 19 400°C-22m/s 下的分级分离效率

Fig.19 Fractional collection efficiency under 400°C-22m/s

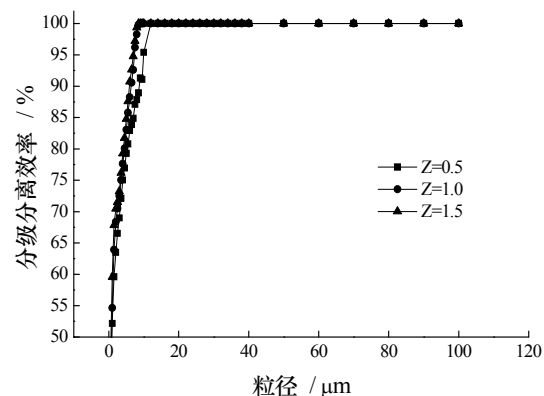


图 20 400°C-24m/s 下的分级分离效率

Fig.20 Fractional collection efficiency under 400°C-24m/s

如图 15-图 20 所示: 在 400 °C 时, 不同风速下, 粒径  $dp \leq 2 \mu\text{m}$  时, 粒径越小分级分离效率越高, 随着粒径的增大分级分离效率逐渐降低, 粒径在 2~3  $\mu\text{m}$  附近分级分离效率达到低点, 其后随着粒径的增大, 分级分离效率又逐渐增大. 在 400 °C 时, 不同风速下, 当粒径  $dp \geq 50 \mu\text{m}$  时生料被 100 % 收集. 临界粒径随着风速的提高逐渐减小, 随着固气比的增加逐渐减小.

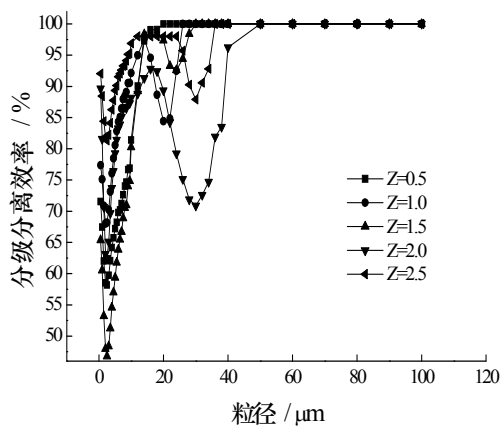


图 21 600°C-14m/s 下的分级分离效率

Fig.21 Fractional collection efficiency under 600°C-14m/s

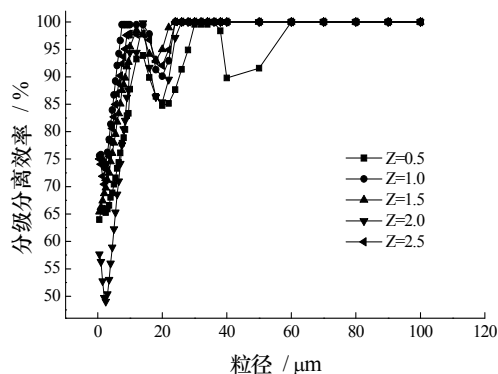


图 22 600°C-16m/s 下的分级分离效率

Fig.22 Fractional collection efficiency under 600°C-16m/s

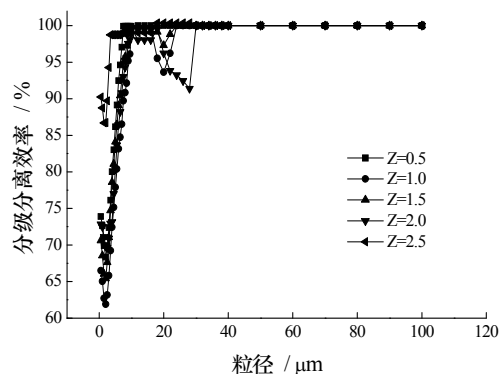


图 23 600°C-18m/s 下的分级分离效率

Fig.23 Fractional collection efficiency under 600°C-18m/s

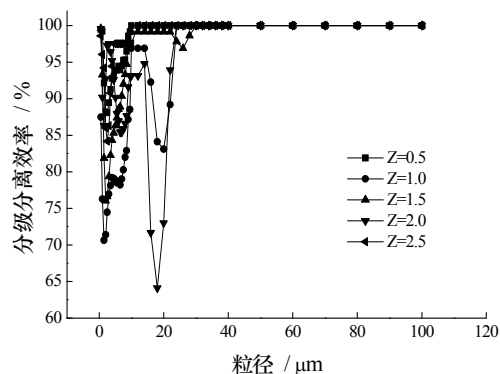


图 24 600°C-20m/s 下的分级分离效率

Fig.24 Fractional collection efficiency under 600°C-20m/s

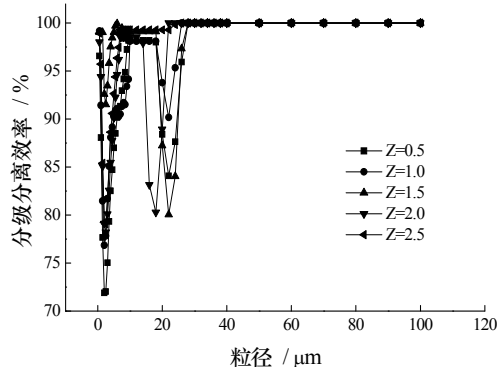


图 25 600°C-22m/s 下的分级分离效率

Fig.25 Fractional collection efficiency under 600°C-22m/s

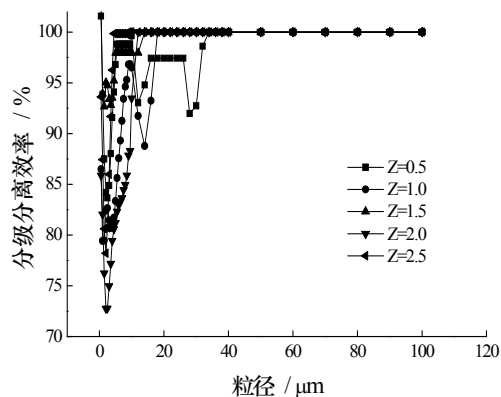


图 26 600°C-24m/s 下的分级分离效率

Fig.26 Fractional collection efficiency under 600°C-24m/s

如图 21-图 26 所示: 在 600 °C 时, 不同风速下, 粒径  $dp \leq 3\mu\text{m}$  时, 粒径越小分级分离效率越高, 随着粒径的增大分级分离效率逐渐降低. 粒径在  $3\mu\text{m}$  附近分级分离效率达到低点, 其后随着粒径的增大, 分级分离效率又逐渐增大, 在  $dp=20\mu\text{m}$  左右出现一次低点. 当粒径  $dp \geq 50\mu\text{m}$  时生料被 100 % 收集. 临界粒径随着风速的提高逐渐减小, 随着固气比的增加逐渐减小.

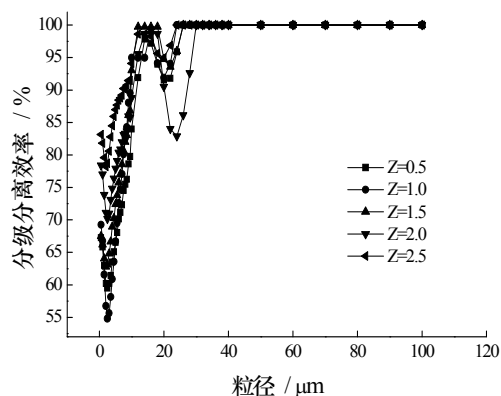


图 27 800°C-14m/s 下的分级分离效率

Fig.27 Fractional collection efficiency under 800°C-14m/s

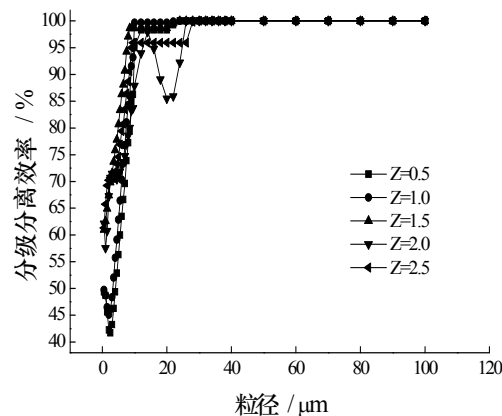


图 28 800°C-16m/s 下的分级分离效率

Fig.28 Fractional collection efficiency under 800°C-16m/s

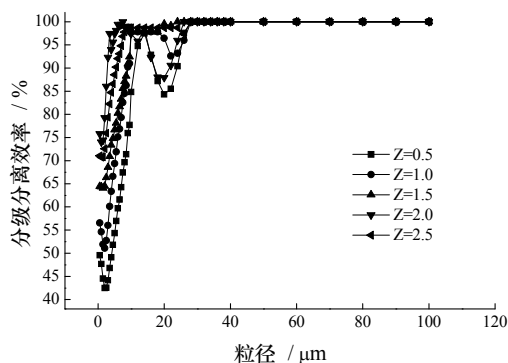


图 29 800℃-18m/s 下的分级分离效率

Fig.29 Fractional collection efficiency under 800℃-18m/s

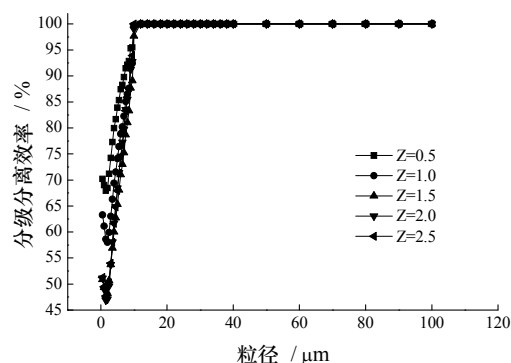


图 30 800℃-20m/s 下的分级分离效率

Fig.30 Fractional collection efficiency under 800℃-20m/s

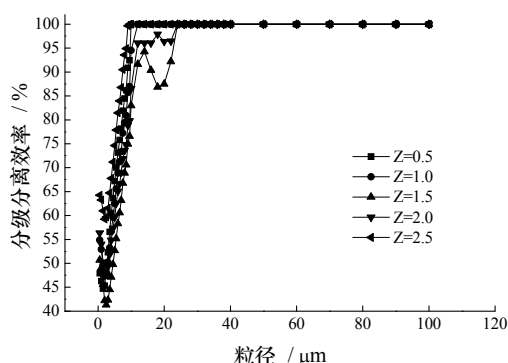


图 31 800℃-22m/s 下的分级分离效率

Fig.31 Fractional collection efficiency under 800℃-22m/s

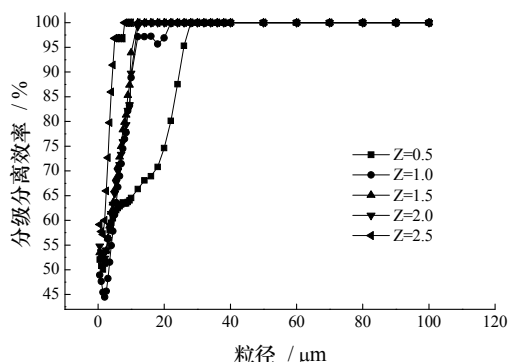


图 32 800℃-24m/s 下的分级分离效率

Fig.32 Fractional collection efficiency under 800℃-24m/s

如图 27-图 32 所示:在 800℃时,不同风速下,粒径  $dp \leq 3\mu\text{m}$  时,粒径越小分级分离效率越高,随着粒径的增大分级分离效率逐渐降低,粒径在  $3\mu\text{m}$

附近分级分离效率达到低点,其后随着粒径的增大,分级分离效率又逐渐增大,在  $dp=20\mu\text{m}$  左右又出现一次低点.在 800℃时,不同风速下,当粒径  $dp \geq 30\mu\text{m}$  时生料被 100% 收集.临界粒径随着风速的提高逐渐减小,随着固气比的增加逐渐减小.

### 3 结论

(1) 生料颗粒直径  $dp \leq 1\mu\text{m}$  时,分级分离效率很高,随着颗粒直径的增大,分级分离效率先降后升,呈现出弯钩曲线,“鱼钩效应”很明显.说明当物料颗粒直径  $dp \leq 1\mu\text{m}$  时,由于小颗粒间的团聚作用或小颗粒粘附在大颗粒表面的原因,所以被收集下来的可能性反而较高.

(2) 粒径的分级分离效率出现 2~3 次低点,一方面可能由于风速的波动引起的,另一方面有可能是颗粒碰撞分裂或高温下的爆裂引起的,“二次鱼钩效应”值得进一步深入研究.

(3) 临界粒径随着风速提高而减小,随着固气比的增加而减小,和其它研究者的结论是一致的.

(4) 对比不同温度下的分级分离效率,可以发现:随着温度的升高,临界粒径先增大后降低,400~600℃时临界粒径较大,800℃时临界粒径反而较小,这是和众多研究者不同的地方.这说明 600℃以下时,温度升高,气体粘度增加,有阻碍细微颗粒分离的作用;当温度在 600℃以上时,细微颗粒的热团聚作用显然更突出,从而使临界粒径反而变小.

### 参考文献 References

- [1] 罗晓兰,陈建义,杜美华,等.入口含尘浓度对旋风分离器效率影响规律的研究[J].石油化工设备技术,1999,20(2):8-10.  
LUO Xiao-lan, CHEN Jian-yi, DU Mei-hua, et al. Research for the Influence Law of Entrance Dust-bearing Concentration on the Cyclone Efficiency[J]. Petro-Chemical Equipment Technology, 1999, 20(2): 8-10.
- [2] Fabió Luis Fassani, Leonardo Goldstein Jr. A study of the effect of high inlet solids loading on a cyclone separator pressure drop and collection efficiency[J]. Powder Technology, 2000, 107: 60-65.
- [3] 陆雷,考宏涛,白崇功,等.旋风筒的分级分离效率与其入口风速的关系[J].硅酸盐学报,1999,27(4):415-419.  
LU lei, KAO Hong-tao, BAI Chong-gong. Relation Between Fractional Collection Efficiency and Inlet Velocity of Cyclone[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1999, 27(4): 415-419.
- [4] 钱付平,章名耀.温度对旋风分离器分离性能影响的数值研究[J].动力工程,2006,26(2):253-257



- QIAN Fu-ping, ZHANG Ming-yao. Numerical Study of the Influence of Temperature on Separation Performance of cyclone Separators[J]. Journal of Power Engineering, 2006,26(2):253-257.
- [5] 许世森,许晋源,许传凯. 温度和压力对旋风分离器高温除尘性能影响的研究[J]. 动力工程, 1997,17(2):52-58.
- XU Shi-sen XU Jin-yuan XU Chuan-kai. Study of the influence of temperature and pressure on high temperature dust separation properties of cyclone separators[J]. Journal of Power Engineering, 1997, 17(2): 52-58.
- [6] 刁永发,沈恒根,许晋源,等. 高温旋风分离分级效率的理论计算及其分析[J]. 化工机械, 2000,27(1):16-19.
- DIAO Yong-fa, SHEN Heng-gen, XU Jin-yuan, et al. Theory calculation of the high temperature cyclone fractional efficiencies and analysis[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2000,27(1):16-19.
- [7] 李文琦,陈建义. 旋风分离器高温性能试验研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006,30(3):91-105.
- LI Wen-qi, Chen Jian-yi. Experimental research of cyclone performance at high temperature[J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2006,30(3):91-105.
- [8] 杨沛浩,陈延信,徐德龙等. 高温高固气比条件下旋风预热器总分离效率的研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2011,43(1):53-57.
- YANG Peihao, CHEN Yanxin, XU Delong, et al. Investigation into the overall efficiency of preheater in condition of high temperature and high solid-gas mass ratio[J]. Journal of Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2011,43(1):53-57.

(编辑 沈波)

(上接第 749 页)

- [8] 李俊平,寇坤,刘武团. 七角井铁矿矿柱回收与采空区处理方案[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2013, 34(S1):137-143.
- LI Junping, KOU Kun, LIU Wutuan. Methods of extracting pillars and disposing abandoned-stope in Qijiaojing Iron-Mine[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2013, 34(S1), 137-143.
- [9] KOVARI K. Erroneous concepts behind the New Austrian tunnelling method[J]. Tunnels and Tunnelling, 1994, 26(11): 38-42.
- [10] 解世俊. 卸压开采[J]. 矿山技术, 1992, (2): 19-21
- XIE Shijun. The pressure-relief mining[J]. Mining Technology, 1992, (2): 19-21.
- [11] 王御宇,李学锋,李向东. 深部高应力区卸压开采研究[J]. 矿冶工程, 25(4): 4-7.
- WANG Yuyu, LI Xuefeng, LI Xiangdong. Study on stress-relief measures in high-stress zone of deep deposit[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2005, 25(4): 4-7.
- [12] 夏祥,石永强,李海波,等. 岩体单孔及群孔齐发爆破爆炸荷载数值分析[J]. 岩石力学工程学报, 2007, 26(Sup1): 3390-3396.
- XIA Xiang, SHI Yongqiang, LI Haibo, et al. Numerical Analysis of Explosive Load of Single-hole Blasting and Multiple-hole Simultaneous Blasting in Rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Sup1): 3390-3396.
- [13] 熊祖强,贺怀建. 冲击地压应力状态及卸压治理数值模拟[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(4): 489-493.
- XIONG Zuqiang, HE Huaijian. Numerical Simulation of Rock Burst Stress and its Control by Stress-relief[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2006, 23(4): 489-493.
- [14] 伍法权. 统计岩体力学原理[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993.
- WU Faquan. Principle of statistical mechanics of rock mass[M]. Wuhan: China University of Geosciences press, 1993.
- [15] 李俊平,王石,柳才旺,等. 小秦岭井巷工程岩爆控制试验[J]. 科技导报, 2013, 31(1): 48-51.
- LI Junping, WANG Shi, LIU Caiwang, et al. Field tests on rock burst control of shafts and tunneling engineering in Xiaoqinling Mountain[J]. Science and Technology Review, 2013, 31(1): 48-51.

(编辑 吴海西)