

Fe₃Al 金属滤芯特性及在 U-gas 煤气化装置中的应用

刘显胜¹, 顾虎², 平韶波², 刘海建¹, 王浩², 杨军军², 刘冠颖²

(1. 义马煤业综能新能源有限责任公司, 河南 义马 472300; 2. 中国钢研科技集团 安泰科技股份有限公司, 北京 100081)

摘要:为了解决 U-gas 粉煤气化工艺飞灰过滤器装置中陶瓷滤芯的断裂问题, 分析了陶瓷滤芯和金属滤芯的性能差异, 在装置中安装了国产改进 2050 型 Fe₃Al 金属滤芯并投运试验, 研究了投运后合成气及飞灰特性、滤芯的微观形貌、过滤效率、流量-压差曲线、滤饼渗透性等特性。结果表明, 在与陶瓷滤芯相同过滤精度条件下, Fe₃Al 金属滤芯具有孔隙率高、渗透性高、压溃强度大等优势。投运结果表明, Fe₃Al 滤芯投运 3 个月以来无断裂故障, 在相近工况条件下, Fe₃Al 滤芯运行平衡压差相比陶瓷滤芯下降了 50%, 且水洗塔悬浮物固含量由 1 000~2 000 mg/L 下降至 100~500 mg/L。

关键词: Fe₃Al 金属滤芯; U-gas 工艺; 飞灰过滤器; 过滤效率; 滤饼渗透性

中图分类号: TQ546 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2017)05-0119-06

Performance of Fe₃Al metal filter and its application in U-gas coal gasification plant

LIU Xiansheng¹, GU Hu², PING Shaobo², LIU Haijian¹, WANG Hao², YANG Junjun², LIU Guanying²

(1. Yima Coal Comprehensive New Energy Co., Ltd., Yima 472300, China;

2. Advanced Technology and Materials Co., Ltd., China Iron and Steel Research Institute Group Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: In order to resolve the fracturing issue of the traditional ceramic filter in fly ash filter of pulverized coal U-gas gasification process, the performance of the ceramic filter and metal filter was investigated. The improved domestic 2050 type Fe₃Al sintered metal filter were firstly installed in fly ash filter in U-gas system; and it was taken as a research object on the commissioning test. The properties of syngas and fly ash, microstructure of filter, filtration efficiency, flow rate, differential pressure curve and filter cake permeability were studied. The results show that the Fe₃Al filter with the same filtration precision as the ceramic filter has high porosity, permeability, and crushing strength. And it gains a 3 months continuous operation performance under similar condition. The running balance differential pressure of Fe₃Al filter decreases by 50% compared with traditional ceramic filter; meanwhile the content of suspended solids in washing tower significantly decreases from 1 000~2 000 mg/L to 100~500 mg/L.

Key words: Fe₃Al metal filter element; U-gas process; fly ash filter; filtration efficiency; filter cake permeability properties

0 引 言

煤气化技术是当今煤炭洁净、高效利用的主要方式之一, 是现代煤化工装置中的重要环节, 涉及煤化工装置的正常运行^[1-3]。U-gas 流化床煤气化技术是美国芝加哥煤气工业研究院(IGT)在 20 世纪 70 年代开发研制的煤气化技术^[4-5], 在劣质煤(高硫、高灰、高水)的流化床灰熔聚气化方面广泛适用, 非

常适合褐煤、长焰煤、烟煤的气化应用^[3-6]。飞灰过滤器是 U-gas 气化技术装置的重要设备, 其作用主要是过滤粗煤气中的飞灰, 保证粗煤气中的粉尘含量 < 10 mg/m³, 并将过滤的飞灰通过返粉技术返回气化炉二次利用^[7]。飞灰过滤器运行是否正常, 直接影响到整套煤气化装置能否长周期安全稳定运行。国内外学者通过试验和数值模拟对气化工艺中过滤器的故障原因进行分析, 并对比了 Fe₃Al 滤芯

收稿日期: 2016-09-30; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2017.05.022

作者简介: 刘显胜(1972—), 男, 河南邓州人, 工程师, 硕士, 从事煤化工机电设备管理工作。E-mail: ymlsx1972@126.com

引用格式: 刘显胜, 顾虎, 平韶波, 等. Fe₃Al 金属滤芯特性及在 U-gas 煤气化装置中的应用[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(5): 119-124.

LIU Xiansheng, GU Hu, PING Shaobo, et al. Performance of Fe₃Al metal filter and its application in U-gas coal gasification plant[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(5): 119-124.

和陶瓷滤芯的特性。郭肖选等^[8]对陶瓷滤芯、 Fe_3Al 滤芯优缺点进行分析,认为 Fe_3Al 滤芯多孔性能与力学性能均优于陶瓷滤芯,但易在合成气中生成硫化物,腐蚀设备。刘鲁伟^[9]认为壳牌煤气化工艺中高温高压飞灰过滤器的故障原因有煤种更换频繁、反吹不及时、反吹气温度不足、反吹气压力不足、滤芯安装问题、滤芯更换不完全、工艺操作不平稳等。姬忠礼等^[10]利用流体瞬变理论建立了脉冲喷吹系统内气体流动的动态模型,分析了储气罐容积、管线长度、喷嘴直径等参数对喷吹气体流动特性和反吹均匀性的影响。Cheng等^[11]研究了不同面速下滤饼的性能变化。为解决U-gas粉煤气化工艺飞灰过滤器装

置中陶瓷滤芯的断裂问题,笔者分析了陶瓷滤芯和金属滤芯的性能差异,首次在装置中安装了国产改进2050型 Fe_3Al 金属滤芯并投运试验,研究了投运后合成气及飞灰特性、滤芯的微观形貌、过滤效率、流量-压差曲线、滤饼渗透性等特性,以期能为过滤器系统中反吹工艺参数的设定和改善提供参考。

1 陶瓷飞灰过滤器问题分析

在义马煤业综能新能源有限责任公司(简称义煤综能公司)U-gas煤气化装置中,除尘系统使用的飞灰过滤器是陶瓷过滤器。U-GAS气化技术流程如图1所示,操作运行参数见表1。

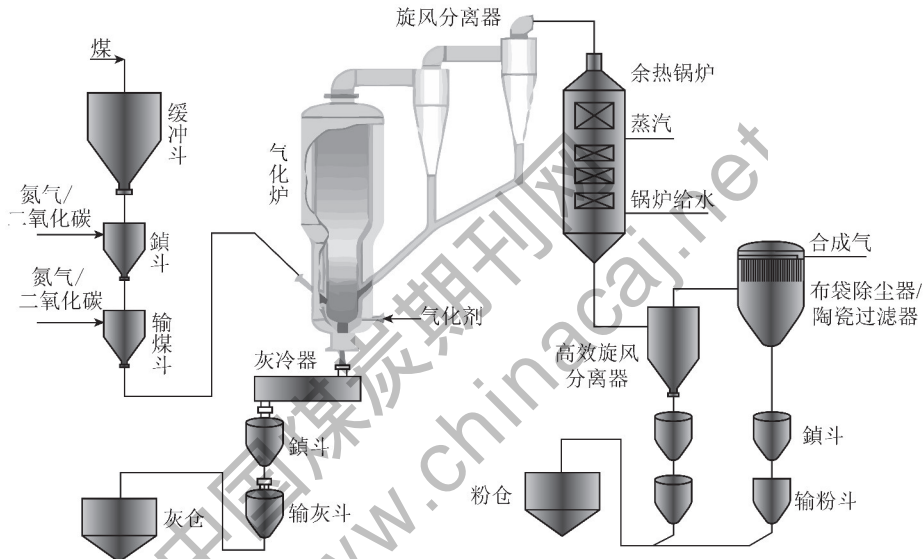


图1 SES U-GAS 气化技术流程

Fig. 1 SES U-GAS gasification process

表1 飞灰过滤器操作运行参数

Table 1 Fly ash filter operating parameters

合成气流 量/ m^3	飞灰含量/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$		飞灰粒度分布/ μm			运行压力/ MPa		运行温度/ $^{\circ}\text{C}$		反吹气压力/ MPa		反吹气温度/ $^{\circ}\text{C}$	
	滤前	滤后	D_{10}	D_{50}	D_{90}	设计	工作	设计	工作	设计	工作	设计	工作
$\leq 117\ 000$	100	< 0.01	1~2	7~8	20~25	1.6	1.18	350	300	3.0	2.2	260	220

注: D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 分别为粒度分布曲线中累积分布为10%、50%、90%的最大颗粒的等效直径。

陶瓷滤芯断裂是飞灰过滤器设备故障的主要原因,因飞灰过滤器陶瓷滤芯断裂引起的紧急停车每年不低于2次,经济损失在600万元以上。陶瓷滤芯断裂的主要原因有:①陶瓷滤芯材质韧性差,气化炉产生的粗煤气含尘量过高(达 $100\ \text{g}/\text{m}^3$),工作过程中易出现飞灰架桥,致使陶瓷滤芯在反吹过程中更易断裂;②陶瓷滤芯本身质量存在问题,直线度、壁厚偏差及表面粗糙度等不符合要求,且内部存

在微小裂纹源;③陶瓷滤芯在运输安装过程中受到碰创易产生微裂纹,且底部支撑拉杆易变形致使装配凹槽预留间隙不当,从而引起陶瓷滤芯断裂;④孔隙率下降,压差较高,老化严重^[7-9]。

为此,义煤综能公司采用安泰科技股份有限公司自主开发研制的国产改进2050型 Fe_3Al 金属烧结滤芯替代飞灰陶瓷滤芯,以解决陶瓷滤芯断裂及设备运行稳定性差的问题。

2 Fe₃Al 烧结金属滤芯特征

国产改进 2050 型 Fe₃Al 烧结金属滤芯^[7,12-15]主要采用粉末冶金方法及喷涂复合技术制备而成,显著的特点是基体为大孔径的骨架结构,外表面均匀涂覆一层细小的粉末颗粒,形成性能优良的非对称复合结构材料。Fe₃Al 烧结金属滤芯既具有陶瓷滤芯的耐高温、耐腐蚀的优点,也具有传统金属滤芯

的力学性能好、抗热变形性能强等优异特性。此外,采用非对称复合结构的 Fe₃Al 滤芯还具有精度高、通量大、反吹再生性能优等特点。

义煤综能公司煤气化装置所采用的滤芯性能见表 2。由表 2 可知,相同过滤精度的 2 种滤芯,国产改进 2050 型 Fe₃Al 烧结金属滤芯不仅具有壁厚薄、孔径小、渗透性高等特点,还具有高压溃强度的明显优势。

表 2 煤气化装置中的两类滤芯性能对比

Table 2 Performance comparison of two kinds of filter elements in coal gasification unit

飞灰过滤器	滤芯材质	滤芯壁厚/mm	孔隙率/%	平均孔径/ μm	过滤精度/ μm	渗透率/ $(\text{L} \cdot (\text{Pa} \cdot \text{min} \cdot \text{cm}^2)^{-1})$	渗透系数/ m^2	压溃强度/MPa
陶瓷滤芯组	陶瓷	10	34	6	0.3	6.85×10^{-5}	2.06×10^{-12}	27
Fe ₃ Al 滤芯组	Fe ₃ Al	5	45	5	0.3	2.47×10^{-4}	3.71×10^{-12}	86

3 Fe₃Al 烧结金属滤芯在 U-gas 装置的应用

3.1 合成气及飞灰特性

飞灰合成气由 H₂、N₂、CO、CO₂、CH₄ 组成,其体积分数分别为 36.22%、0.51%、28.00%、30.81%、4.46%。合成气相密度为 18.5 kg/m³,合成气黏度为 2.45×10^{-5} Pa·s,合成气的密度越大、黏度越高,过滤器的压差将越高。

采用不同煤气化技术工艺的合成气中飞灰含量及飞灰性能都会影响过滤器的运行。飞灰含量越高、粒度越小、堆密度越高,过滤器的压差也会越大。U-gas 装置中形成的飞灰含量高,含碳量为 48.5%,飞灰密度为 1 850 kg/m³,飞灰堆密度为 340 kg/m³。国产改进 2050 型 Fe₃Al 烧结金属滤芯表面飞灰的微观形貌如图 2 所示。由图 2 可知,飞灰形态为层片不规则状,易发生团聚现象。采用马尔文激光粒度分析仪 Mastersizer 2000 对飞灰粒度进行进一步分析测试。结果表明,飞灰粒度在 0.3~8.0 μm ,分布较广,且平均等效粒径 $D(0.5)$ 约为 8.7 μm ,这说明滤芯的精度很高,可以有效拦截飞灰中 8.7 μm 以下的较细粉尘。

3.2 滤芯的微观形貌

使用后带灰 Fe₃Al 烧结金属滤芯及清洗后的涂层断面微观形貌如图 3 所示。图 3(a)中滤芯涂层表面充满了飞灰颗粒,飞灰堵塞涂层孔隙,有些已深嵌入基体孔隙中;图 3(b)中经清洗后滤芯的涂层及基体的孔隙形貌予以大部分恢复,且涂层厚度均匀,

无腐蚀和脱落。

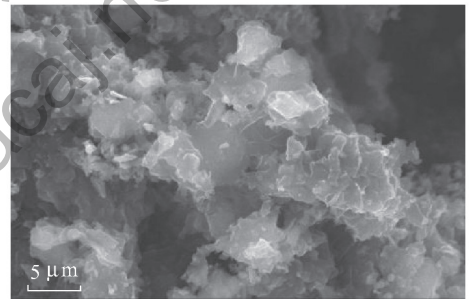
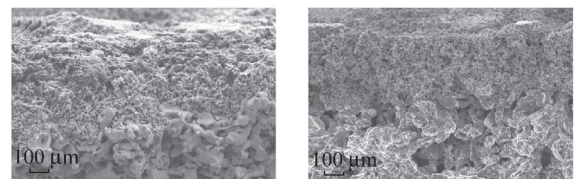


图 2 国产改进 2050 型 Fe₃Al 滤芯表面飞灰的形貌

Fig. 2 Morphology of surface fly ash on improved 2050 type Fe₃Al filter



(a) 使用后带灰

(b) 清洗后

图 3 国产改进 2050 型 Fe₃Al 烧结金属滤芯断面的微观形貌

Fig. 3 Cross-section micrograph of improved 2050 type Fe₃Al sintered metal filter

3.3 滤芯的过滤效率

滤芯的过滤效率主要与滤芯孔径分布有关,其大致可以通过分析滤后合成气水洗后的固含量确定。U-gas 系统装置中使用的国产改进 2050 型 Fe₃Al 烧结金属滤芯的孔径分布如图 4 所示。由图 4 可知,Fe₃Al 滤芯的孔径分布较为均匀,大部分孔

隙尺寸为 $3.5 \sim 6.0 \mu\text{m}$ 。在水洗塔的排污固含量检测中发现,原陶瓷滤芯组水洗塔排污固含量维持在 $500 \sim 1\,500 \text{ mg/L}$,而国产改进 2050 型 Fe_3Al 烧结金属滤芯组的固含量降至 $100 \sim 500 \text{ mg/L}$ 。这表明国产改进 2050 型 Fe_3Al 烧结金属滤芯的过滤效果好,提高了飞灰过滤器的精度和效率。

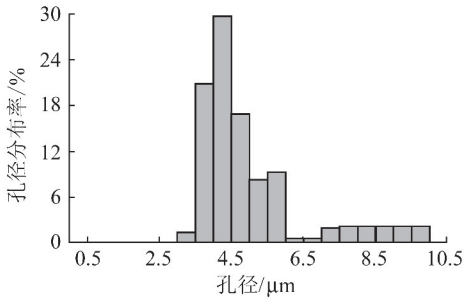


图4 国产改进 2050 型 Fe_3Al 烧结金属滤芯的孔径分布

Fig. 4 Pore size distribution of improved 2050 type Fe_3Al sintered metal filter

3.4 流量-压差曲线

飞灰过滤器的使用稳定性与滤芯的运行压降有直接关系。新安装滤芯因其不规则孔隙的性能会对合成气产生一定的阻力降而形成滤芯的初始压差 ΔP_0 ,在一定工况条件下,初始压差为一定值。随着携带飞灰的合成气不断过滤输送,滤芯表面因集聚截留的飞灰形成滤饼致使压差逐步升高,之后稳定在某一状态,此时的压差称为平衡压差 ΔP_e 。而随着滤芯进一步过滤,在滤芯表面集聚沉积的飞灰量加大,致使滤芯压差增大,增大到一定程度时,需用一定的反吹压力对滤芯进行反吹来清除表面飞灰,此时的压差称为反吹压差 ΔP_b 。滤芯在反吹后,进入滤芯内部孔隙及吸附在滤芯表面难以反吹脱落的飞灰颗粒将形成永久滤饼。永久滤饼会降低滤芯的渗透性,其带来的压差称之为残余压差 ΔP_s 。其中平衡压差与残余压差的关系式^[16]为

$$\Delta P_e = \Delta P_s + \Delta P_0 \quad (1)$$

对于一组高温过滤器而言,当采用的滤芯材质一定时,滤芯的初始压差 ΔP_0 一定,运行过程中的平衡压差 ΔP_e 的变化主要来自于残余压差 ΔP_s ,而残余压差的产生与反吹清灰过程及永久滤饼的形成有关联。在一定过滤条件下,反吹压力越高,动态滤饼的清除效果越好,永久滤饼层的积累厚度越薄,残余压差越低,对过滤系统而言更好。但是,反吹压力不能无限升高,反吹压力太高,容易造成次卷吸现象,使已吹脱的飞灰再次回吸在滤芯表面,无法达到

有效的清灰效果。姬忠礼等^[10,17]、杨亮等^[18]、栾鑫等^[19]针对刚性过滤器中最优反吹压力及如何避免次卷吸现象的发生等进行研究,说明合适的反吹压力不仅会使反吹瞬间的负压段减小,避免了次卷吸现象,还能有效降低反吹气体的耗气量。

U-gas 装置中陶瓷滤芯和国产改进 2050 型 Fe_3Al 金属滤芯在使用过程中的实际流量-压差曲线如图 5 所示。在同等工况及合成气进气流量相近的条件下, Fe_3Al 金属滤芯运行平衡压差相比陶瓷滤芯下降了 50%,显示出 Fe_3Al 金属滤芯较优的综合性能。 Fe_3Al 金属滤芯的压差优势源于两方面:① 金属滤芯相比陶瓷滤芯壁薄、孔隙率大且本征渗透性高(表 2),致使初始压差 ΔP_0 具备明显优势;② 金属滤芯表面形成的滤饼层相对陶瓷滤芯而言相对较薄,产生的残余压差 ΔP_s 明显较低。

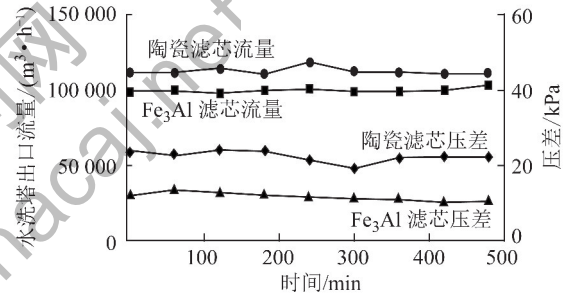


图5 陶瓷滤芯与 Fe_3Al 金属滤芯在相同工况下的流量-压差运行曲线

Fig. 5 Flow-pressure drop curve of ceramic filter and Fe_3Al metal filter in the same working condition

3.5 滤饼渗透性

煤气化装置中的含尘合成气过滤时,滤饼多为多层复合而成,后形成的滤饼层会对前面形成的滤芯层造成一定压力,将其压实;随着过滤的进行,滤饼层厚度增加,直到一定厚度的滤饼层达到不可压缩的状态,过滤器压降随之稳定^[20]。根据不同粉尘颗粒的性质,飞灰过滤器的压降稳定周期也不同。

在过滤器系统设计中,滤芯的滤饼层渗透特性与运行压差及反吹时间间隔具有特定的联系,而滤饼层渗透特性与运行过程中的滤饼层阻力有直接关系。滤芯表面的滤饼层阻力 (ΔP_i) 可以根据 Kozeny-Carman (柯真尼-卡门) 方程^[11]近似计算得出

$$\Delta P_i = \frac{1\,800\mu h v_f^2 k_c (1 - \theta_m)}{60D_p^2 C \theta_m^3} \quad (2)$$

式中, μ 为空气黏度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; h 为膜层厚度, cm ; v_f 为空气流经滤芯表面膜层的流速, m/min ; k_c 为

Kozeny-Carman 常数, $k_c = 5$; θ_m 为滤芯表面膜层的孔隙率; D_p 为表面膜层粉末颗粒平均粒径, cm; C 为修正系数, 根据试验条件确定。

由式(2)可知, 滤芯表面滤饼层阻力与滤饼厚度呈正相关关系, 而与滤饼层中粉末颗粒的尺寸呈反相关关系。滤饼层厚度越大, 粉末颗粒越细小, 滤芯阻力越大, 渗透性能也就越低。滤饼的形成及稳定化过程非常复杂, 与过滤压降、滤芯孔径、气体黏度、飞灰粒径及含尘浓度等均有密切关系。

本文通过测定使用后带滤饼层的陶瓷滤芯、国产改进 2050 型 Fe₃Al 烧结金属滤芯及清洗滤饼层后 2 类滤芯的孔隙特性, 用以计算滤芯表面滤饼层

的渗透特性(表 3), 以便对过滤器系统中反吹工艺参数的设定和改善提供参考。由表 3 可知, 使用后携带滤饼层的 2 类滤芯压降远大于清洗后滤芯的压降, 滤饼层导致的压差阻力为滤芯初始压差阻力(清洗后滤芯的压降)的 5~10 倍, 说明过滤时的压降 80% 以上由滤饼带来, 滤饼(特别是永久滤饼)的存在使滤芯的整体渗透性大幅降低。对比陶瓷滤芯与 Fe₃Al 金属滤芯表面滤饼层的渗透特性, 约占滤芯本征渗透率的 13%; 而陶瓷滤芯表面形成的滤饼层渗透率相对较低, 约占滤芯本征渗透率的 11%, 这也体现了金属滤芯在 U-gas 煤气化装置中应用时的优异渗透特性。

表 3 国产改进 2050 型 Fe₃Al 烧结金属滤芯表面滤饼层渗透特性

Table 3 Permeability characteristics of filter cake layer on improved 2050 type Fe₃Al sintered metal filter

滤芯 材质	滤芯本征渗透率/ (L · (Pa · min · cm ²) ⁻¹)	滤饼厚 度/mm	表面流速/ (m · min ⁻¹)	带滤饼滤芯压 降 ΔP_1 /Pa	清洗后滤芯压 降 ΔP_2 /Pa	流量/ (m ³ · s ⁻¹)	滤饼层渗透率/ (L · (Pa · min · cm ²) ⁻¹)
陶瓷	6.85×10^{-5}	3	1.1	7 538.32	810.47	2.12×10^{-3}	6.60×10^{-6}
			2.2	13 625.28	1 520.35	4.03×10^{-3}	6.98×10^{-6}
Fe ₃ Al	2.47×10^{-4}	2	1.1	3 873.26	694.44	2.07×10^{-3}	3.46×10^{-5}
			2.2	7 870.37	1 310.76	3.94×10^{-3}	3.19×10^{-5}

4 结 论

1) 在义煤综能的 U-gas 煤气化工艺飞灰过滤器装置中, 为解决传统陶瓷滤芯的断裂故障, 使用国产改进 2050 型 Fe₃Al 烧结金属滤芯替代传统陶瓷滤芯进行试验。在同等工况及合成气进气流量相近的条件下, Fe₃Al 金属滤芯的运行平衡压差下降了 50%, 水洗塔悬浮物固含量由 1 000~2 000 mg/L 降至 100~500 mg/L, 金属滤芯外表面形成了 2 mm 滤饼层, 滤饼层导致的压差阻力为滤芯初始压差阻力(清洗后滤芯的压降)的 5 倍左右, 说明过滤时的压降 80% 以上由滤饼带来。

2) 国产改进 2050 型 Fe₃Al 烧结金属滤芯投用投用 3 个月以来, 国产改进 2050 型 Fe₃Al 金属滤芯不仅没有发生过滤芯断裂故障, 还极大改善了 U-gas 除尘系统的可靠稳定性。

参考文献 (References):

[1] 张鸿林, 张雷. 洁净煤气化是现代煤化工和低碳经济的平台[J]. 煤化工, 2010, 38(5): 1-4.

ZHANG Honglin, ZHANG Lei. Clean-coal gasification is a platform of the modern coal-chemical industry and low-carbon economy[J]. Coal Chemical Industry, 2010, 38(5): 1-4.

[2] 梁永煌, 游伟, 章卫星, 等. 现代煤化工产业中洁净煤气化技术的分析与比选[J]. 化工设计, 2014, 24(4): 7-14.

[3] 任永强, 许世森, 郝时旺. 干法进料煤气化技术在中国的进展与发展趋势[J]. 中国电力, 2004, 37(6): 49-52.

REN Yongqiang, XU Shisen, GAO Shiwang. Development status and tendency of coal gasification technology with dry coal feed in China[J]. Electric Power, 2004, 37(6): 49-52.

[4] 邹国雄. U-Gas 煤气化工艺的现状[J]. 煤化工, 1986, 14(4): 74-82.

[5] 汪家铭. SES 煤气化技术及其在国内的应用[J]. 化肥设计, 2010, 48(5): 5-11.

WANG Jiaming. SES coal gasification technology and its application in China[J]. Chemical Fertilizer Design, 2010, 48(5): 5-11.

[6] 沈和平, 刘瑞民, 任鹏, 等. 粉煤流化床煤气化技术应用研究[J]. 科技传播, 2013(12): 173-174.

SHEN Heping, LIU Ruimin, REN Peng, et al. Research on the application of coal fluidized-bed gasification technology[J]. Public Communication of Science & Technology, 2013(12): 173-174.

[7] 王浩, 杨建军, 王凡, 等. 煤气化装置飞灰过滤器用滤芯研究进展及应用[J]. 石油化工设备, 2012, 41(3): 68-71.

WANG Hao, YANG Junjun, WANG Fan, et al. Study progress and application on coal gasification device fly ash filter candle[J].

- Petro-Chemical Equipment,2012,41(3):68-71.
- [8] 郭肖选,刘保平,武志峰. Fe_3Al 滤芯在壳牌煤气化中的应用浅析[J]. 广州化工,2015,43(24):46-48.
GUO Xiaoxuan, LIU Baoping, WU Zhifeng. Fe_3Al in the Shell coal gasification application of fly ash filter[J]. Guangzhou Chemical Industry,2015,43(24):46-48.
- [9] 刘鲁伟. 壳牌煤气化高温高压飞灰过滤器滤芯损坏分析及解决措施[J]. 科技传播,2013(15):167-168.
LIU Luwei. Analysis and solution measures about the damages for high-temperature and high-pressure fly ash filter candles in Shell coal gasification[J]. Public Communication of Science & Technology,2013(15):167-168.
- [10] 姬忠礼,孟祥波. 脉冲反吹过程中陶瓷过滤器滤管内流场的测定与分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2000,24(3):73-75.
JI Zhongli, MENG Xiangbo. Measurement and analysis of flow field inside filtering candle of ceramic filter during pulse clearing process[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Sciences),2000,24(3):73-75.
- [11] CHENG Yuhuang, CHUEN Jinn Tsai. Factors influencing pressure drop through a dust cake during filtration[J]. Aerosol Science & Technology,1998,29(4):315-328.
- [12] 邢毅,况春江. 高温除尘过滤材料的研究[J]. 过滤与分离,2004,14(2):1-4.
XING Yi, KUANG Chunjiang. Development of filter elements for high-temperature gas filtration[J]. Journal of Filtration & Separation,2004,14(2):1-4.
- [13] 邢毅,麻洪秋,况春江. Fe_3Al 金属间化合物多孔材料的研究[J]. 粉末冶金技术,2005,23(4):263-267.
XING Yi, MA Hongqiu, KUANG Chunjiang. Investigation on Fe_3Al intermetallic porous materials[J]. Power Metallurgy Technology,2005,23(4):263-267.
- [14] 方玉诚,王浩,周勇,等. 粉末冶金多孔材料新型制备与应用技术的探讨[J]. 稀有金属,2005,29(5):791-796.
FANG Yucheng, WANG Hao, ZHOU Yong, et al. Development of porous metal materials and applications[J]. Chinese Journal of Rare Metals,2005,29(5):791-796.
- [15] 王浩,杨军军,刘冠颖,等. 洁净煤用非对称结构 Fe_3Al 滤材的性能测试研究[J]. 粉末冶金技术,2013,31(3):180-184.
WANG Hao, YANG Junjun, LIU Guanying, et al. Performance test of asymmetrical Fe_3Al filter candle for clean coal application[J]. Power Metallurgy Technology,2013,31(3):180-184.
- [16] 王浩,杨军军,刘冠颖,等. Fe_3Al 滤芯在煤气化装置飞灰过滤器中的应用[J]. 洁净煤技术,2013,19(1):78-82.
WANG Hao, YANG Junjun, LIU Guanying, et al. Application of Fe_3Al filter element in fly ash filter of coal gasification device[J]. Clean Coal Technology,2013,19(1):78-82.
- [17] 姬忠礼,郭建光. 负压区的存在对刚性陶瓷过滤器脉冲反吹性能的影响[J]. 工程热物理学报,2000,21(1):58-61.
JI Zhongli, GUO Jianguang. Effect of negative pressure region on pulse-jet cleaning performance of rigid ceramic filters[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2000,21(1):58-61.
- [18] 杨亮,姬忠礼,赖通. 行列式刚性陶瓷过滤器脉冲反吹系统中的压力特性[J]. 过程工程学报,2014,14(2):181-188.
YANG Liang, JI Zhongli, LAI Tong. Pressure characteristics in pulse cleaning system of rigid ceramic filter[J]. The Chinese Journal of Process Engineering,2014,14(2):181-188.
- [19] 栾鑫,姬忠礼,刘龙飞. 刚性过滤器脉冲反吹过程中滤管内动态压力特性[J]. 化工学报,2016,67(8):3452-3458.
LUAN Xin, JI Zhongli, LIU Longfei. Dynamic pressure characteristics in filter candle during process of pulse cleaning for rigid filter[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China),2016,67(8):3452-3458.
- [20] 戴献元,余立新. 化工原理(上册)[M]. 北京:清华大学出版社,2010.