

硫回收富氧燃烧及提升主燃烧炉温度方法研究

周明宇¹ 曹文浩¹ 王向林² 沈荣华² 兰 林¹ 汤国军¹ 闵 刚¹

1. 中国石油工程建设有限公司西南分公司, 四川 成都 610041;
2. 中国石油西南油气田公司重庆天然气净化总厂, 重庆 401147

摘 要: 为了提升克劳斯硫回收装置对于处理低 H_2S 浓度酸气的适应性, 主燃烧炉采用富氧空气燃烧成为提高炉温、提升酸气火焰稳定性的有效措施。为深入了解富氧燃烧效果、研究富氧燃烧工艺路线及不同富氧浓度对主燃烧炉温度的影响, 借助富氧燃烧测试平台开展现场试验, 确立不同工况下富氧燃烧的工艺路线, 系统研究不同富氧浓度对提升主燃烧炉温度的作用。此外, 还对比分析了其它提升主燃烧炉温度的方法。通过富氧燃烧工艺及其他提升主燃烧炉温度方法的对比分析, 得出最优的富氧燃烧工艺路线, 并推荐了提升克劳斯硫回收装置主燃烧炉温度的方法原则, 为工业化应用提供支持。

关键词: 硫回收; 富氧燃烧; 提升炉温; 测试试验

DOI: 10. 3969 /j. issn. 1006 - 5539. 2020. 03. 006

Research Study on the Raising of Main Furnace Temperature of Sulphur Recovery Process Using Enriched Oxygen

Zhou Mingyu¹, Cao Wenhao¹, Wang Xianglin², Shen Ronghua², Lan Lin¹, Tang Guojun¹, Min Gang¹

1. China Petroleum Engineering & Construction Corp. Southwest Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China;
2. Chongqing Natural Gas Purification Plant of PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Chongqing, 401147, China

Abstract: To improve the adaptability of Claus sulphur recovery system on handling low H_2S content acid gas, supplying oxygen enriched air to the main furnace is an effective way of increasing furnace temperature and stability of acid gas flame. In order to better understand the effect of oxygen enriched air on combustion, and study the process of oxygen enriched combustion and the impact of different oxygen concentration on combustion temperature, this paper carried out field tests using actual oxygen enriched air combustion test rig. These tests followed systematic approach to assess how different concentration of oxygen enriched air can increase main furnace temperature, at different operating conditions and combustion processes. This paper also conducted a literature search to compare and analyse other methods of raising main furnace temperature. Through the above analysis and comparison, the optimum oxygen enriched air combustion process was developed. The paper recommends the method and principle of increasing main

收稿日期: 2020 - 02 - 24

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目“高酸性天然气高效处理技术研究”(2019 D - 1609)

作者简介: 周明宇(1981 -), 男, 四川什邡人, 高级工程师, 博士, 主要从事天然气处理研究与设计工作。

furnace temperature for Claus sulphur recovery process, to support application on an industrial scale.

Keywords: Sulphur recovery; Oxygen enriched air combustion; Raising furnace temperature; Test and experiment.

0 前言

大部分原油和原料天然气中都含硫,在石油化工天然气加工过程中由于产品脱硫工序会产生含 H_2S 气体(称为酸气),毒性很大,对人类的生存与环境危害甚大。因此,酸气必须经过处理后才能排放。工业上通常采用克劳斯工艺方法回收酸气中的元素硫^[1-10]。

当酸气中 H_2S 浓度较高且潜热量较大时,常采用常规克劳斯加还原吸收法尾气处理工艺路线,这是一条成熟可靠的工艺路线,投资也相对合理。但该工艺路线存在以下问题。

1) 常规克劳斯硫回收装置主燃烧炉供风用普通空气,大量 N_2 进入系统,增加了过程气量,稀释了过程气中反应物浓度,导致装置效率降低;为保证能够满足生产操作的需求,必须考虑足够大的设备、管道尺寸,增加了装置的设备投资^[11]。

2) 当需要处理低 H_2S 浓度酸气时,主燃烧炉温度随之降低,只有通过酸气分流来提高炉温,但这影响了装置运行效率,若 H_2S 浓度进一步降低,将影响酸气在主燃烧炉中燃烧的稳定性,导致装置无法稳定运行^[12]。

为此,20 世纪 80 年代开发了以富氧空气作为 H_2S 氧化剂的富氧克劳斯工艺^[13],提高装置效率,扩大装置处理能力,进一步提升了对低 H_2S 浓度酸气的适应性^[14-15]。

由于较低的富氧程度可在较少的投入下获得较多的收益,因此目前富氧克劳斯硫回收装置大多在较低的富氧程度下运行^[16]。为了提高石油天然气化工过程中酸气回收硫的回收率,在克劳斯硫回收工艺中,采用高浓度富氧或纯氧技术,进一步减少过程气量,提升转化效率,缩小设备尺寸。为了提升富氧/纯氧燃烧克劳斯工艺在实际工程应用中的稳定性和可靠性,需要进一步深入开展试验研究。

1 富氧燃烧工艺路线研究

富氧燃烧是用比通常空气(含氧 21%)含氧浓度高的富氧空气进行燃烧的统称。富氧燃烧的形式大致可分为:微富氧燃烧、富氧燃烧、纯氧燃烧^[17]。不同形式富氧燃烧的区别主要在于富氧空气中的氧浓度不同,而在特定的克劳斯硫回收装置中,随着主燃烧炉燃烧器供风中氧浓度的不同,总的供风量也不同。

根据燃烧经典理论,燃烧器燃烧室的设计主要基于

“3 T”原则进行,即烟气停留时间(Time)、反应温度(Temperature)、紊流混合程度(Turbulence mixing)^[18]。

“3 T”原则提及在有限的停留时间和高温空间中,气体混合程度的好坏主要取决于气体的湍流效果,并提出强化燃烧过程的途径包括以下三项。

1) 改善气流相遇条件,即将燃气与空气分成细流,增大两股气流的接触面,使两股气流有一定的速度差,并成一定的交角相遇,从而增加气流扰动。

2) 加强紊流,燃气与空气构成撞击混合,强化混合过程。

3) 采用旋流气流混合过程及化学反应过程。旋流有两个作用,一是增加了气流的紊流,强化了混合过程;二是旋流中心的回流区使大量烟气回流与燃气混合物相混,加强了混合效果,提高了反应区温度,强化了化学反应过程。

基于以上理论分析可知,即便是富氧燃烧,为了强化燃烧过程,仍然需要坚持“3 T”原则,且尽可能使气体以旋流的方式进入燃烧器内部。但是从燃烧器结构上分析,不能同时对富氧空气和酸气两种介质同时进行旋流。因此,只能选择一种气体介质(富氧空气或酸气)进行旋流。当采用富氧燃烧或纯氧燃烧时,建议选择酸气进行旋流,见图 1。借助富氧燃烧试验平台开展了现场试验,通过试验结果证明,采用该种工艺路线可以保证酸气火焰稳定燃烧。

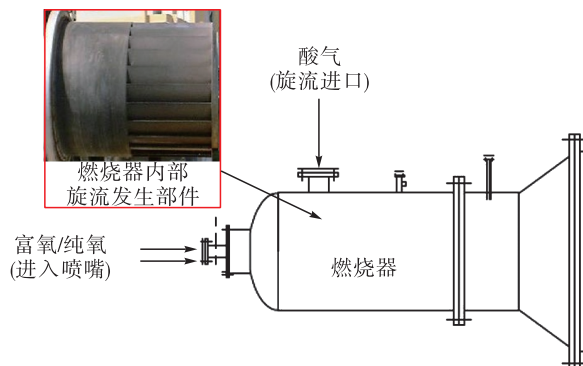


图 1 富氧燃烧进气工艺路线示意图

Fig. 1 Process flow diagram of oxygen enriched combustion air intake

2 富氧浓度对提升主燃烧炉温度的影响

本文通过富氧燃烧试验平台开展了现场试验,通过

系统试验研究了不同富氧浓度对于提升主燃烧炉温度的影响,结果见表 1。通过不同富氧浓度的空气(甚至纯氧)与不同浓度 H_2S 组合成 11 种工况,开展富氧燃烧试验;观察了每种工况火焰燃烧的稳定性和,测试了每种工况的燃烧温度。

表 1 富氧燃烧试验工况及温度测试结果表

Tab. 1 Working condition and temperature test results of oxygen enriched combustion test

工况	$x_{\text{H}_2\text{S}} / (\%)$	$x_{\text{O}_2} / (\%)$	主燃烧炉实测温度 / $^{\circ}\text{C}$
1	40	21	944
2	50	21	982
3	60	21	1 061
4	30	35	950
5	40	35	1 067
6	30	45	958
7	30	60	995
8	30	80	1 041
9	30	100	1 056
10	30	30	943
11	28	100	958

在 30% H_2S 浓度下,测试了不同富氧浓度空气燃烧时的主燃烧炉温度,并做成了变化趋势的曲线,见图 2。同时通过试验平台设置的炉尾部中心观察视镜对其燃烧情况进行了观察,见图 3。

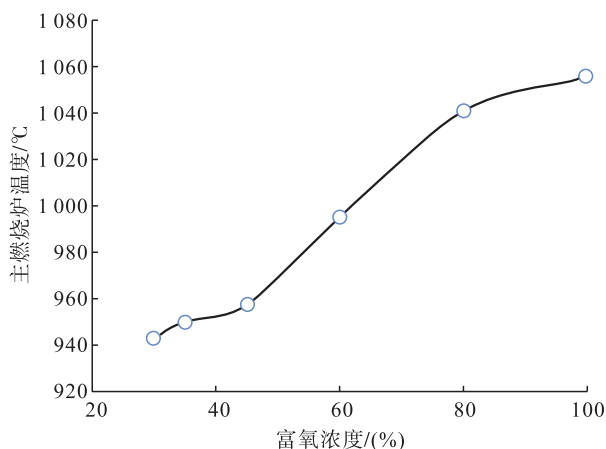


图 2 不同富氧浓度对主燃烧炉温度的影响
(H_2S 浓度为 30%)

Fig. 2 Effect of different oxygen enriched concentrations on temperature of main combustion furnace(H_2S concentration is 30%)

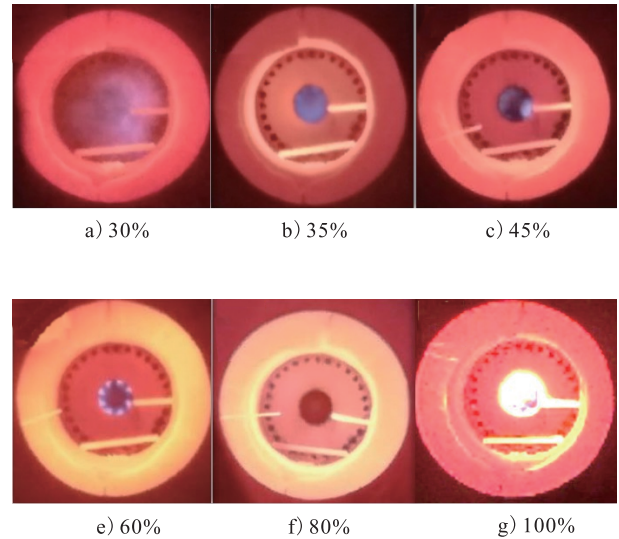


图 3 不同富氧浓度下主燃烧炉燃烧情况(H_2S 浓度为 30%)

Fig. 3 Combustion situation of main combustion furnace under different oxygen enrichment concentrations(H_2S concentration is 30%)

从图 2 可以看出,随着富氧浓度的提高,主燃烧炉温度显著提高,证明提高富氧浓度对提升克劳斯硫回收装置主燃烧炉温度产生有利影响,特别在低浓度 H_2S 酸气工况,能够显著提高酸气火焰燃烧温度。在 30% H_2S 浓度下,不同富氧浓度工况下主燃烧炉酸气燃烧情况见图 3,可以看出,即便在较低 H_2S 浓度下,采用富氧空气进行燃烧,仍能够有效维持燃烧稳定性。

从图 2 和图 3 的结果看,富氧燃烧对于处理低 H_2S 浓度酸气的克劳斯硫回收装置平稳、高效运行有着积极的作用。

3 其它提升主燃烧炉温度方法的对比

在克劳斯硫回收工艺中能够有效提升主燃烧炉温度的方法,除提高供风空气中氧气浓度之外,还有酸气分流、酸气预热、空气(或富氧空气)预热等方法。但后三种方法中,由于酸气分流中部分 H_2S 没有经过主燃烧炉高温克劳斯反应,会影响整个硫回收装置的反应效率,特别是在酸气中含 NH_3 、重烃等有害杂质时^[19-23],要慎用酸气分流这种方法。

按酸气 H_2S 浓度 20%,100% 纯氧为基准,通过软件模拟计算了四种方法对提升主燃烧炉温度的影响,分别为酸气分流 40%、同时预热酸气和富氧空气至 220 $^{\circ}\text{C}$ 、预热酸气至 220 $^{\circ}\text{C}$ 、预热富氧空气至 220 $^{\circ}\text{C}$ 。从图 4 的对比分析中可以看出,较其它三种方法,酸气分流对提高主燃烧炉温度的效果更为显著,同时预热酸气和富氧空气的效果又比单独预热一股气体的效果好。

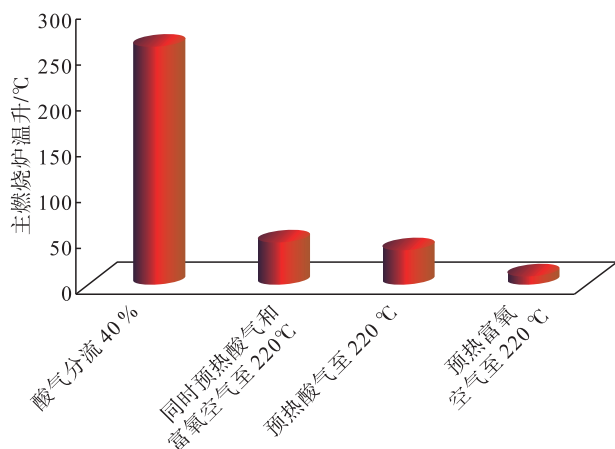


图4 不同方法对提高主燃烧炉温度的对比

Fig.4 Comparison of different methods for increasing the temperature of main combustion furnace

4 结论

本文通过借助富氧燃烧测试平台开展现场试验,工艺模拟软件等进行了对应的富氧燃烧的研究,深入了解了富氧燃烧效果,系统研究了不同富氧浓度对提高主燃烧炉温度的作用。同时,通过富氧燃烧工艺及其它提升主燃烧炉温度方法的对比分析,推荐了提升克劳斯硫回收装置主燃烧炉温度的方法原则。具体得出以下结论。

1) 富氧燃烧能够显著有效地提升酸气燃烧温度,对于处理低 H_2S 浓度酸气的克劳斯硫回收装置平稳、高效运行有着积极作用。

2) 综合考虑本文中所述的富氧燃烧对于提升主燃烧炉温度的效果、不同提升主燃烧炉温度方法对比以及酸气分流对硫回收装置反应效率的影响,推荐在实际克劳斯硫回收装置设计中为提升酸气燃烧温度,保证装置高效平稳运行,采用提升主燃烧炉温度方法的顺序为:富氧燃烧 > 酸气/富氧空气预热 > 酸气分流。

参考文献:

- [1] 周明宇,梁俊奕,李 建,等. 我国天然气净化厂酸气处理技术新思考[J]. 天然气与石油,2012,30(1):32-35.
Zhou Mingyu, Liang Junyi, Li Jian, et al. New Ideas for Sour Gas Treatment Process of Natural Gas Purification Plant in China [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30 (1): 32-35.
- [2] 周明宇,赵华莱,刘 健,等. 自主开发的含硫尾气处理技术及其应用[J]. 天然气与石油,2018,36(4):36-41.
Zhou Mingyu, Zhao Hualai, Liu Jian, et al. Self-Developed Sulfur-Containing Tail Gas Treatment Technology and Its Application [J]. Natural Gas and Oil, 2018, 36 (4): 36-41.
- [3] 唐昭峰,毛兴民,罗守坤,等. 国外硫磺回收和尾气处理技术进展综述[J]. 齐鲁石油化工,1996,24(4):302-311.
Tang Zhaozheng, Mao Xingmin, Luo Shoukun, et al. Review of Foreign Sulfur Recovery and Tail Gas Treatment Technology [J]. Qilu Petrochemical Technology, 1996, 24 (4): 302-311.
- [4] 汪家铭. 超级克劳斯硫磺回收工艺及应用[J]. 天然气与石油,2009,27(5):28-32.
Wang Jiaming. SuperClaus Sulfur Recovery Process and Its Application [J]. Natural Gas and Oil, 2009, 27 (5): 28-32.
- [5] 王开岳. 天然气净化工艺——脱硫脱碳、脱水、硫磺回收及尾气处理[M]. 北京:石油工业出版社,2005:363.
Wang Kaiyue. Natural Gas Purification Process: Desulphurization and Decarbonization, Dehydration, Sulfur Recovery and Tail Gas Treatment [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005: 363.
- [6] 温崇荣,李 洋. 天然气净化硫回收技术发展现状与展望[J]. 天然气工业,2009,29(3):95-97.
Wen Chongrong, Li Yang. Status Quo and Prospect of Sulfur Recovery Technologies in the Field of Natural Gas Purification [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29 (3): 95-97.
- [7] 徐志达,单石灵. 含硫原油的加工工艺[J]. 石油与天然气化工,2004,33(1):34-36.
Xu Zhida, Shan Shiling. Refining Process for Sour Crude Oil [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2004, 33 (1): 34-36.
- [8] 陈建兵,叶 帆,赵德银,等. 天然气脱硫过程分析及应对措施[J]. 油气田地面工程,2018,37(7):32-37.
Chen Jianbing, Ye Fan, Zhao Deyin, et al. Analysis and Countermeasures of Natural Gas Desulfurization Process [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2018, 37 (7): 32-37.
- [9] 于孔文,连少春. 天然气加工工艺存在问题解析[J]. 化学工程与装备,2018(11):286-287.
Yu Kongwen, Lian Shaoshun. Analysis of Problems of Natural Gas Processing Technology [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2018 (11): 286-287.
- [10] 张大秋,陈玉婷,彭 鹏,等. 原油和天然气脱硫技术对比及展望[J]. 石化技术,2016,23(2):238-239.
Zhang Daqiu, Chen Yuting, Peng Peng, et al. Comparison and Prospect of Desulfurization Technology of Crude Oil and Natural Gas [J]. Petrochemical Industry Technology, 2016, 23 (2): 238-239.
- [11] 乔卫领,李 捷,叶茂昌,等. 富氧克劳斯硫磺回收工艺应用探讨[J]. 石油与天然气化工,2009,38(2):132-136.
Qiao Weiling, Li Jie, Ye Maochang, et al. Discussion on the Application of the Claus Sulfur Recovery with Oxygen

- Enrichment Technology [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2009, 38 (2): 132 - 136.
- [12] 王世建,冉文付,陈奉华. 天然气净化装置低负荷运行节能措施探讨[J]. 石油与天然气化工, 2013, 42(5): 447 - 456.
- Wang Shijian, Ran Wenfu, Chen Fenghua. Discuss on the Energy-Saving Measures of Low-Load Operation of Natural Gas Purification Device [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2013, 42 (5): 447 - 456.
- [13] 苏俊林,潘亮,朱长明. 富氧燃烧技术研究现状及发展[J]. 工业锅炉, 2008(3): 1 - 4.
- Su Junlin, Pan Liang, Zhu Changming. Research Status and Development of Oxygen-Enriched Combustion Technology [J]. Industrial Boiler, 2008 (3): 1 - 4.
- [14] 陈赓良. 富氧硫磺回收工艺技术的开发与应用[J]. 石油与天然气化工, 2016, 45(2): 1 - 6.
- Chen Gengliang. Development and Application of Oxygen-enriched Sulfur Recovery Process [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2016, 45 (2): 1 - 6.
- [15] 徐广华,刘雨晴. 克劳斯硫磺回收工艺中的富氧技术[J]. 化工进展, 2002, 21(8): 572 - 575.
- Xu Guanghua, Liu Yuqing. Technology of Rich Oxygen in Sulfur Recovery Unit [J]. Chemical Industry and Engineering Process, 2002, 21 (8): 572 - 575.
- [16] 蒲远洋,周明宇,王非,等. 富氧燃烧测试平台设计[J]. 天然气与石油, 2019, 37(5): 50 - 54.
- Pu Yuanyang, Zhou Mingyu, Wang Fei, et al. Design of Aerobic Combustion Test Platform [J]. Natural Gas and Oil, 2019, 37 (5): 50 - 54.
- [17] 黄飞,林向东,尤国英. 富氧燃烧分析[J]. 电力情报, 1999(3): 43 - 44.
- Huang Fei, Lin Xiangdong, You Guoying. Oxygen Enriched Combustion Analysis [J]. Information on Electric Power, 1999 (3): 43 - 44.
- [18] 刘蓉,刘文斌. 燃气燃烧与燃烧装置[M]. 北京:机械工业出版社, 2009: 234 - 235.
- Liu Rong, Liu Wenbin. Gas Combustion and Combustion Device [M]. Beijing: China Machine Press, 2009: 234 - 235.
- [19] 龚建华,朱利凯. 克劳斯法制硫工艺中燃烧反应炉的温度调控[J]. 石油与天然气化工, 2003, 32(1): 22 - 25.
- Gong Jianhua, Zhu Likai. The Temperature Control of Combustion Furnace in Claus Process [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2003, 21 (1): 22 - 25.
- [20] 曹文全,韩晓兰,周家伟,等. 常规克劳斯非常规分流法硫磺回收工艺在天然气净化厂的应用[J]. 石油与天然气化工, 2016, 45(5): 11 - 16.
- Cao Wenquan, Han Xiaolan, Zhou Jiawei, et al. Application of Sulfur Recovery Technology in Natural Gas Purification Plant by Conventional Claus Un-Conventional Divided Flow Method [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2016, 45 (5): 11 - 16.
- [21] 马永波,刘炜,王东庆,等. 高含硫天然气净化厂总硫回收率的主要影响因素探讨[J]. 山东化工, 2013, 42(7): 83 - 86.
- Ma Yongbo, Liu Wei, Wang Dongqing, et al. A Discussing About Major Influencing Total Sulfur Recovery of High-sulfur Natural Gas Purification Plant [J]. Shandong Chemical Industry, 2013, 42 (7): 83 - 86.
- [22] 温崇荣,马泉,袁作建,等. 天然气净化厂硫磺回收及尾气处理过程有机硫的产生与控制措施[J]. 石油与天然气化工, 2018, 47(6): 12 - 17.
- Wen Chongrong, Ma Xiao, Yuan Zuojian, et al. Generation and Control Measures of Organic Sulfur in Sulfur Recovery and Tail Gas Treatment Process in Natural Gas Purification Plant [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2018, 47 (6): 12 - 17.
- [23] 吴立涛,廖小东,黄金刚,等. 炼油厂硫磺回收工艺及催化剂的改进和优化[J]. 石油与天然气化工, 2019, 48(1): 32 - 37.
- Wu Litao, Liao Xiaodong, Huang Jingang, et al. Improvement and Optimization of Sulfur Recovery Process and Catalyst in a Refinery [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2019, 48 (1): 32 - 37.