



移动扫码阅读

卢科, 岳添漆, 秦丰, 等. 致密气闪蒸废气消烟燃烧的燃烧器仿真与试验 [J]. 能源环境保护, 2025, 39(6): 176–187.

LU Ke, YUE Tianqi, QIN Feng, et al. Numerical and Experimental Investigation of a Burner for Smokeless Combustion of Flash-Vaporized Off-Gas from Tight Gas [J]. Energy Environmental Protection, 2025, 39(6): 176–187.

致密气闪蒸废气消烟燃烧的燃烧器仿真与试验

卢 科¹, 岳添漆^{2,3}, 秦 丰¹, 苏 明^{2,3}, 易 畅^{2,3},

何 杨^{1,2}, 赵 靛^{2,3}, 武家辉⁴, 徐义书^{4,*}

(1. 中国石油西南油气田分公司 致密油气勘探开发项目部, 四川 成都 610051; 2. 中国石油西南油气田分公司 安全环保与技术监督研究院, 四川 成都 610041; 3. 页岩气评价与开采四川省重点实验室, 四川 成都 610041; 4. 华中科技大学 能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 致密气场站生产过程产生的闪蒸废气富含水和非甲烷烃类, 燃烧处置中普遍存在“冒黑烟”问题。设计了通过可燃废气射流引射空气形成部分预混燃烧的文丘里结构型燃烧器, 通过 CFD 仿真分析了燃烧器的套筒角度、套筒直径以及废气(燃料)射流旋流叶片等结构参数对燃烧与碳烟生成行为的影响规律, 确定了燃烧器结构并制造了样机, 开展了现场试验验证。结果显示, 增大吸入段套筒角度是比较理想的改进方法, 由 30°增加到 60°能使引射空气量增加 64%, 减少碳烟生成(降幅 73%); 而增大混合段套筒直径会使内部出现低速区域, 不仅降低冷却套筒的效果, 而且增加的引射空气还会使燃料提前着火, 出现 1 500 K 以上的内部高温区域, 不利于燃烧器安全长期运行。燃料喷口设置旋流叶片能够在燃烧器内部形成旋流射流, 可以在不显著改变燃烧器外形尺寸的情况下减少碳烟生成并降低火焰尺寸, 有利于燃烧器的清洁、长期运行。根据仿真结果设计制造的燃烧器在现场试验中火焰稳定, “冒黑烟”现象消失, 验证了新设计的燃烧器具有多点射流引射、旋流稳燃特征、部分预混特征, 可有效减少致密气闪蒸废气燃烧中碳烟的生成, 实现清洁燃烧处置。

关键词: 致密气; 碳烟; 文丘里; 部分预混燃烧; 燃烧器

中图分类号: X701

文献标识码: A

文章编号: 2097-4183(2025)06-0176-12

Numerical and Experimental Investigation of a Burner for Smokeless Combustion of Flash-Vaporized Off-Gas from Tight Gas

LU Ke¹, YUE Tianqi^{2,3}, QIN Feng¹, SU Ming^{2,3}, YI Chang^{2,3},

HE Yang^{1,2}, ZHAO Liang^{2,3}, WU Jiahui⁴, XU Yishu^{4,*}

(1. Tight Oil and Gas Exploration and Development Project Department, Southwest Oil & Gasfield Branch, PetroChina, Chengdu 610051, China; 2. Institute of Safety, Environmental Protection and Technical Supervision, Southwest Oil & Gasfield Branch, PetroChina, Chengdu 610041, China; 3. Sichuan Provincial Key Laboratory of Shale Gas Evaluation and Exploitation, Chengdu 610041, China; 4. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The flash vapor emissions generated during the production process at tight gas field stations are typically rich in water and non-methane hydrocarbons. When these emissions are burned for

收稿日期: 2025-07-21

修回日期: 2025-08-12

接受日期: 2025-08-14

DOI: 10.20078/j.eep.20250904

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52476116); 浙江省科技计划资助项目(2023C03156)

第一作者: 卢 科(1980—), 男, 四川资中人, 工程师, 主要研究方向为石油天然气开采安全环保管理。E-mail: luke@petrochina.com.cn

*通讯作者: 徐义书(1989—), 男, 山东潍坊人, 副教授, 主要研究方向为清洁燃烧与燃烧污染物生成控制。E-mail: xuyishu@hust.edu.cn

disposal, a common problem is the generation of "black smoke". This issue is often encountered due to incomplete combustion and the formation of particulate matter. In this study, a Venturi-structured burner that facilitates partial-premixed combustion by a jet of combustible waste gases entraining air was designed. The primary objective was to reduce soot formation while ensuring stable combustion. To understand the effects of various structural parameters on combustion performance and soot formation behavior, computational fluid dynamics (CFD) simulations were conducted. The simulation investigated the influence of several key burner parameters, including the sleeve angle, sleeve diameter, and the presence of swirl vanes in the fuel jet. Based on these findings, the optimal burner structure was determined, a prototype burner was fabricated, and field trials were conducted to validate the design. The results from CFD simulations and experimental verification revealed several important trends. First, increasing the sleeve angle in the intake section of the burner proved to be the most effective optimization strategy. By increasing the angle from 30° to 60° , the entrained air volume increased by 64%, and soot formation was reduced by 73%. This improvement can be attributed to the enhanced air-fuel mixing, which improves combustion efficiency and reduces particulate matter formation. In contrast, enlarging the diameter of the mixing sleeve created low-velocity zones within the burner. This reduction in air velocity decreased the cooling effect of the sleeve and caused early ignition of the fuel. As a result, regions of the burner exceeded 1 500 K, creating high-temperature zones that could jeopardize the safe long-term operation of the burner. This finding emphasizes the importance of maintaining an optimal balance in the burner's structural design to avoid excessively high temperatures. The addition of swirl vanes at the fuel nozzle proved beneficial in creating a swirling jet inside the combustion chamber. This approach successfully reduced soot formation and flame size. Importantly, it achieved these improvements without significantly altering the external dimensions of the burner, contributing to a more compact and efficient design. Finally, the burner designed based on the simulation results showed stable flame behavior in field tests, with no visible black smoke. The newly designed burner, which incorporates multi-point jet entrainment, swirl-stabilized combustion, and partial-premixed features, effectively reduced soot formation during the combustion of flash vapor emissions from tight gas field stations. This demonstrates the potential of this burner design to achieve clean combustion and reduce the environmental impact of gas field emissions.

Keywords: Tight gas; Soot; Venturi; Partial-premixed combustion; Burner

0 引言

致密气是我国非常规天然气的主体,更是天然气增储上产的重要依托^[1-3]。在致密气开采中,通常需采用闪蒸处理工艺以提升产出油气产品的品质,但该工艺普遍存在闪蒸废气的无害化处置问题^[4]。燃烧处理闪蒸废气是一种简单高效、经济可行的方法,广泛应用于我国致密油气生产。目前燃烧处理致密气闪蒸废气采用的设备多为针对天然气放喷简单设计的扩散燃烧器,在运行过程中较常规天然气更高频次地出现“冒黑烟”现象^[5],造成了较为严重的环保隐患和社会影响,已成为制约致密气工程高效规模化运行的重要因素^[6]。治理致密气闪蒸废气放喷燃烧“冒黑烟”问

题、实现致密气的高效清洁燃烧已成为当前致密气开发的迫切需求。

“冒黑烟”现象本质是致密气闪蒸废气燃烧过程中碳烟(soot)生成和排放,是碳氢燃料在不完全燃烧条件下存在的共性问题。已有研究表明^[7-10],燃料性质(如碳氢分子结构、成分)和燃烧条件(如 O_2 含量、 H_2O 含量、 CO_2 含量、温度)均会显著影响碳烟的生成和排放。对比研究发现,乙烷、乙烯和乙炔 3 类 C_2 燃料组分中乙烯燃烧有轻微黑烟,而乙炔燃烧有较浓的黑烟现象,炔烃类组分中不饱和化学键的存在使其反应速率较其他烃类更快,是导致其碳烟生成特性的重要原因之一。碳烟生成倾向也与燃料中重型碳氢组分含量存在较强的正相关关系。针对燃烧条件的研究发现,

在富燃料(即贫空气)燃烧条件下,碳氢燃料分子会大量热解生成乙炔,而乙炔会继续通过聚合反应生成多环芳烃(PAHs),其作为碳烟前驱物通过物理化学凝聚等复杂物理化学过程形成碳烟颗粒。碳烟颗粒在充分接触·OH、·O和O₂等氧化性组分时可以被氧化成CO₂,但当氧化过程不充分时,部分碳烟颗粒会穿透火焰面排放至外界,最终形成“冒黑烟”现象。与常规天然气不同,致密气及其闪蒸废气中不仅含有甲烷,还富含乙烷、丙烷等C₂~C₄类碳氢组分,在高温缺氧条件下极易成环形成PAHs或成核形成碳烟颗粒物,因此面临更为突出的碳烟生成和控制问题。

为实现致密气闪蒸废气的清洁燃烧、消除“冒黑烟”现象,亟须研发符合其物化特性的专用燃烧器。根据进入燃烧区域前燃料气与空气的混合方式,燃烧器可分为扩散式、完全预混式和部分预混式3类。在完全预混式燃烧器中,燃气从喷口喷出前已与空气完全接触混合,因此氧化燃烧较充分,通常不易产生碳烟,但完全预混式燃烧器存在火焰稳定性较差、回火风险高、燃烧温度高易超温烧损等不足,且需要额外鼓风设备和电力输入,难以应用于流量大且频繁波动的闪蒸废气燃烧场景。SHAFIEY DEHAJ等^[11]设计了一款完全预混式天然气燃烧器,该燃烧器内填充多孔介质,可将天然气与空气预混进而燃烧。然而,该燃烧器体积较小,可处理的天然气流量有限,无法完成大流量的致密气处理任务,且该燃烧器需要增设多孔介质,增加了燃烧器的复杂性。在扩散式燃烧器中,燃气与空气无需预先接触混合,因此具有无回火、无爆炸危险、安全系数高、运行稳定、工艺简单、制作成本低等优点。然而,扩散式燃烧器燃烧速度慢、火焰长,且因氧化过程不充分极易产生碳烟。基于扩散燃烧原理,刘飞^[12]、庞东晓等^[13]设计并试验了试油测试用密闭式燃烧装置,通过采用大尺寸筒体封装燃烧器实现了火焰不冒出燃烧筒体,在降低噪声、减少热量和光污染方面卓有成效。该密闭燃烧装置主要由筒体、耐高温隔热材料、燃烧头、吸风口、火焰检测器等组成。燃烧头安装在筒体内部底端,筒体底部同时设有吸风口和天然气入口,通过多喷嘴设计和大尺寸密闭式筒体设计将天然气分成小股,使燃料气体更容易与空气混合并且增大出口流速,促进气体螺旋状流动,从而增加气体流动的长度和燃烧时间,实现无烟燃烧。研究结果表明,该密闭式燃烧装置

试油测试较为理想,可以替代燃烧池,应用于废弃天然气处理。然而,该燃烧装置尺寸较大(外径2.40 m、内径1.85 m、高度11.80 m),内部需设置高温防护材料,制造难度大、成本高,且系统组成过于复杂,安装和使用维护成本高。程欣等^[14]仿真测试了多喷点射流扩散燃烧器,该燃烧器放喷头上开设5排环向燃料喷孔,每排8个,燃料经环向喷孔射流进入密闭圆筒腔体后,再经圆套筒出口喷出,与外界空气接触并形成扩散燃烧状态。结果表明,该燃烧方式效率较低,燃烧不完全、易冒黑烟,同时扩散燃烧形成上浮火焰形态,火焰根部距离套筒出口较近,形成的高温热辐射使燃烧器本体受热变形而失效。COZZI等^[15]设计了一款带有旋流结构的扩散式天然气燃烧器,在空气与燃料接触进入燃烧器前,空气会先经过一个旋流器形成旋流后喷出,增强了与燃料的混合,进而增强燃烧、减少碳烟排放,但该燃烧器仍然需要额外的动力装置供给空气,增加了设备的复杂性。

致密气闪蒸废气燃烧器的设计关键是实现燃烧器内燃料气与空气等化学组分、温度场、流场的合理匹配。部分预混式燃烧器是兼具扩散式燃烧器和完全预混式燃烧器优势的可行方法,燃气喷出前已与部分空气进行接触混合,喷出后再通过扩散作用与空气进行二次混合燃烧,在燃烧速度、火焰稳定性、回火安全性、抑制碳烟生成和排放等方面具有综合优势。SUN等^[16]设计了一种可以增强预混效果的部分预混燃烧器,在燃烧室内安装了一个文丘里结构通道,燃料与空气同时通过文丘里通道,增强了预混效果。该燃烧器虽然使用文丘里结构增强了燃料与空气的预混效果,但是空气的注入仍需消耗额外的能量。鉴于闪蒸废气自带压力的特点,可以通过设计文丘里结构实现空气引射混合,而不需要额外鼓风设备。陈建旭^[17]提出了一种具备文丘里套筒结构的燃烧器,并通过建模仿真,初步分析了其燃烧状况以及热辐射特征。该燃烧器喷头设置了分支结构,分支上有多个喷孔,燃料气体在套筒后部由径向喷射变为扩散喷出。套筒内壁为文丘里结构,可以通过燃料喷射引射空气,使燃料气体和空气混合形成局部预混燃烧。该燃烧器的结构设计中为减小高温对燃烧器的损伤,将火焰根部设置在燃烧器之外,这导致了火焰稳定性降低,在环境风变动情况下极易出现短时脱火,最终导致燃烧效率降低、碳烟排放浓度升高。

本文首先基于致密气闪蒸废气特征^[18-19]和文丘里原理^[20],设计了通过燃料气射流引射空气形成部分预混燃烧的文丘里结构型燃烧器,进一步在燃料射流喷口处设计了燃料旋流结构、在燃烧器出口处设计了稳焰齿,用以提升其在流量波动、环境多变的开放燃烧中的稳定燃烧能力。随后,筛选了表征致密气闪蒸废气燃烧行为的简化组分模型,通过 CFD 仿真计算比较燃烧器的套筒角度、套筒直径以及有无旋流叶片情况下致密气燃烧与污染物生成的行为,确定燃烧器结构。最后,加工制造闪蒸废气燃烧器样机(PP-S-5000 型闪蒸废气燃烧器),在四川某致密气场站进行了现场试验观测,检验了燃烧器对碳烟的消除效果。

1 燃烧器结构试验设计

1.1 燃烧器总体结构

根据文丘里结构的原理,流体在管内流动时速度会随着横截面积的减小而增大,在管道直径最小处速度最大。由伯努利定律可知流速的增大会导致压力的减小,从而形成压力差,引射周围流体。参考文丘里管结构^[21-23],新设计的燃烧器主

要由燃料总管、燃料分支管和套筒 3 部分组成(图 1)。燃料总管和套筒同轴布置,呈轴对称结构。燃烧器的套筒结构可分为吸入段、混合段和扩张段,其中吸入段从右到左又分为角度渐变的 3 段,以促进吸入被引射的空气,并减少空气进入时的阻力损失。混合段的作用是与燃料喷孔配合使用实现燃料射流形成负压区,产生对空气的吸入动力;同时,使燃料气体和引射的空气在进入扩张管前进行混合,尽量使混合气体的速度、浓度以及温度均匀分布,使得燃料气体的燃烧更加充分,提高了燃烧效率,并减少了碳烟的生成量。扩张段以降低混合气速度,提高混合气压力,并使燃料气体和空气进一步混合。燃料总管一端通过螺纹连接闪蒸废气来源管道,一端与燃料分支管和内圈喷孔相连,8 个分支环绕燃料总管均匀阵列分布。闪蒸废气从燃料总管流入后,一部分通过内圈喷孔喷出,另一部分流入燃料分支管,从分支喷孔喷出。从喷孔喷出的闪蒸废气利用自身速度以及套筒的文丘里结构引射外界空气进入套筒,与闪蒸废气进行混合,然后发生燃烧反应。

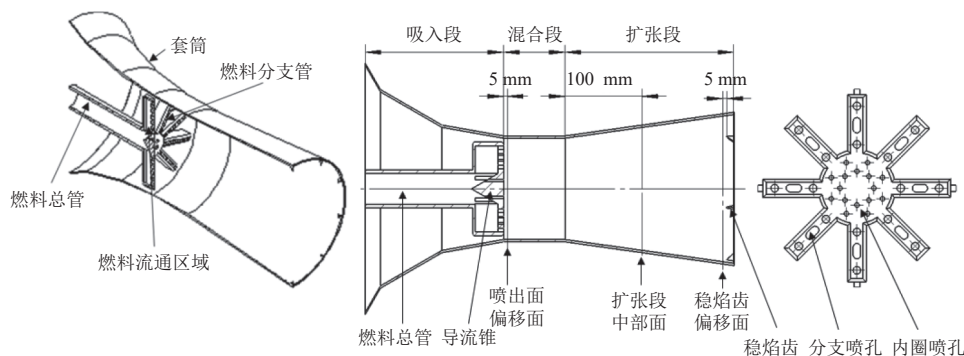


图 1 燃烧器结构(无旋流叶片型)

Fig. 1 Burner structure (without whirl vane)

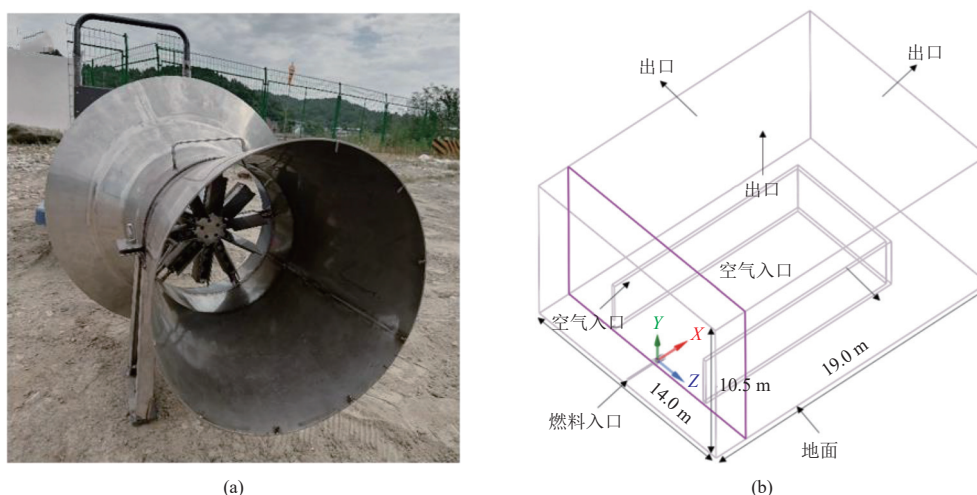
为了强化空气引射和稳定燃烧效果,进行了 3 个方面的特别设计。第一,在燃料总管的末端增加导流锥,通过增大内圈孔深度的方法适当限制内圈孔燃料的喷出速度,并对流向分支的燃料气体进行引导,提高分支孔燃料的喷出速度,平衡分支孔与内圈孔速度,提升混合段射流填充度及引射效果。第二,在燃料分支管燃料喷口处设置旋流叶片,增强燃料射流的旋流强度和对空气的引射效果;同时,减小筒内壁面附近的低速区,使燃料气体和空气的混合气体速度分布更均匀,避免出现内部早燃热点。第三,在扩张段的结束端沿

轴向设置稳焰齿结构,稳焰齿呈三角形(高 10 mm),具有锋利的尖端,在燃烧中作为热点,具有随时点火、有利于燃料着火以及稳定燃烧的作用。

1.2 燃烧仿真方法与检验

燃烧器样机实物如图 2 所示,最大外径 328 mm,长度 480 mm,质量 11 kg。仿真计算中,将一个包含燃烧器的大长方体通过布尔减算法扣除燃烧器结构,得到计算域。大长方体的总长为 19.0 m,总宽为 14.0 m,总高为 10.5 m,尺寸大于实际燃烧池尺寸(长 13.0 m,宽 7.4 m,高 3.5 m)。

流体域通过 Fluent Meshing 进行网格划分。



(a)

(b)

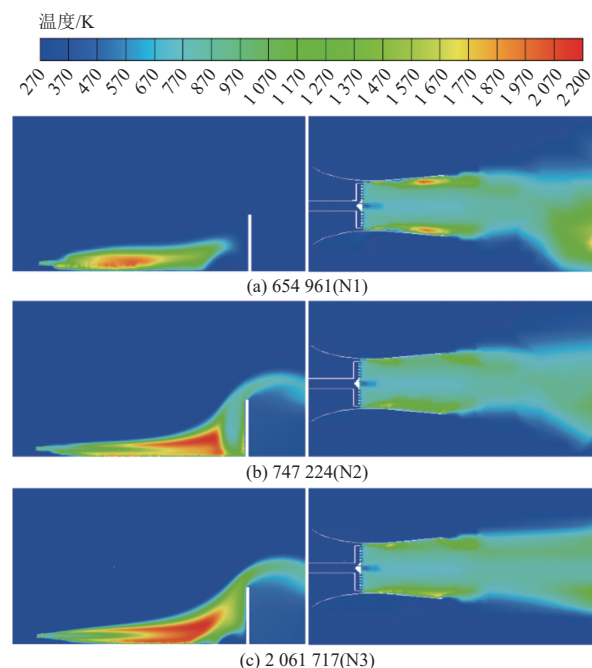
图 2 (a)燃烧器实物, (b)仿真计算域

Fig. 2 (a) Burner object. (b) Simulation domain

由于研究过程不需要特别关注边界层区域的燃烧及污染物生成,因此设置不生成边界层。设置体网格的类型为 poly-hexcore,即多面体-六面体核心网格,体网格的最小网格长度设置为 4 mm,最大网格长度设置为 256 mm,总网格数为 654 961 (N1)。对火焰区域作初步局部加密处理,取体网格最小长度和全局体网格最小长度相同(4 mm),取局部最大体网格长度为 128 mm,局部加密处理后网格划分得到的网格数量为 747 224(N2)。进一步局部加密取体网格最小长度 4 mm,最大长度为 64 mm,网格划分得到的网格数量为 2 061 717 (N3)。图 3 为网格独立性验证结果,可见网格数量由 747 224 增大到 2 061 717 后,温度峰值由 2 156 K 增大到 2 167 K,增值低于 1%,火焰内部的高温区域均在火焰末端且占比较大,而且二者得到的火焰长度也比较接近,火焰均接触壁面并从壁面上方绕过与计算域出口域相连。因此认为对火焰区域作初步局部加密处理后得到的网格可以表征燃料的燃烧和污染物生成特性。在保证结论的准确性可满足本研究需求的前提下,尽量节省计算资源,缩短计算周期,因此本文在模拟仿真中选择对火焰区域做初步局部加密处理的网格划分方案(N2)。

Fluent 软件可以模拟多种燃烧场景,包含多种气相燃烧模型。本研究选用 EDM 模型^[24],基于组分质量分数的输运方程解,采用简化化学反应机理,对化学反应进行模拟。EDM 模型可以准确模拟湍流火焰的燃烧过程。Fluent 软件针对多种辐射换热情况提供了多种辐射传热模型,因 Discrete Ordinates(DO)模型^[25]具有适用性强、精度相对较

高且计算量较大等优点,作为本研究的辐射换热模型。因本研究计算模型中包含燃烧产物的气相组分,在使用 DO 辐射换热模型时,需对流体的吸收系数与散射系数进行设定,对于含有 CO_2 和 H_2O 的混合物,选用 WSGGM 方法^[26]确定总吸收系数。本研究通过矩量法 MOM 模型^[27]对碳烟生成进行了模拟,根据其理论,考虑乙炔(C_2H_2)作为碳烟形成的关键前驱体,矩量法的参数设置参考谢毫^[28]对碳烟生成模型的研究。表 1 为模拟的 4 种燃烧器结构及主要参数,分别探究吸入段套筒角



(a) 654 961(N1)

(b) 747 224(N2)

(c) 2 061 717(N3)

图 3 燃烧器中轴截面温度分布云图

Fig. 3 Temperature distribution of the central axis section of the burner

表 1 燃烧器结构及主要参数

Table 1 Burner structure and main parameters

项目	吸入段角度/(°)			混合段套筒 直径/mm	扩张段 角度/(°)	分支孔	内圈孔	有无旋流叶片
	第一段	第二段	第三段					
方案1	6	15	30	242	5	6个圆孔	5个圆孔	无
方案2	10	30	60	242	5	4个圆孔, 1个腰孔	5个圆孔	无
方案3	10	30	60	342	5	4个圆孔, 1个腰孔	5个圆孔	无
方案4	10	30	60	242	8	2个圆孔, 2个腰孔	5个圆孔	有

度、混合段套筒直径、燃料射流角度以及旋流叶片对燃烧和污染物生成的影响。

1.3 数据处理与分析方法

基于仿真计算结果,统计燃料及空气流通面的质量流率以及燃料各组分和氧气的摩尔分数,从而计算获得燃烧器在不同结构参数下的空气引射系数^[29],反映燃烧器引射空气的能力。此外,还定义了引射预混系数,反映燃料与空气的预混效果。定义如下:

$$U = \frac{Q_{\text{air}}}{Q_{\text{fuel}}} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{ac}}} \quad (2)$$

式中: U 为空气引射系数, Q_{air} 为引射空气质量流量, kg/s; Q_{fuel} 为燃料质量流量, kg/s; α 为引射预混系数, n_{air} 为引射空气摩尔速率, mol/s; n_{ac} 为燃料完全燃烧需要的空气摩尔速率, mol/s。

为观察燃烧器内燃料的径向混合和燃烧情况,定义 3 个径向观测截面(图 1)。第一个径向截面为燃料的喷出面沿燃料总管中燃料的流动方向偏移 5 mm,第二个径向截面为扩张段中部的截面,第三个径向截面为稳焰齿与套筒的连接点沿燃料总管中燃料的流动方向的反方向偏移 5 mm。

2 结果与讨论

2.1 吸入段套筒角度对燃烧和污染物生成的影响

图 4~6 显示了不同吸入段套筒角度对燃烧器内空气引射、混合以及致密气燃烧和污染物生成特性的影响。结果显示,当套筒吸入段的的角度分别由 6°、15°和 30°(方案 1)增大到 10°、30°和 60°(方案 2)后,引射空气的质量流率由 0.048 44 kg/s 增加到了 0.079 12 kg/s,空气量增加 64%。空气引射系数由 1.568 增加到 2.561,同时,引射预混系数由 0.094 增加到 0.154,表明有更多的空气被引射

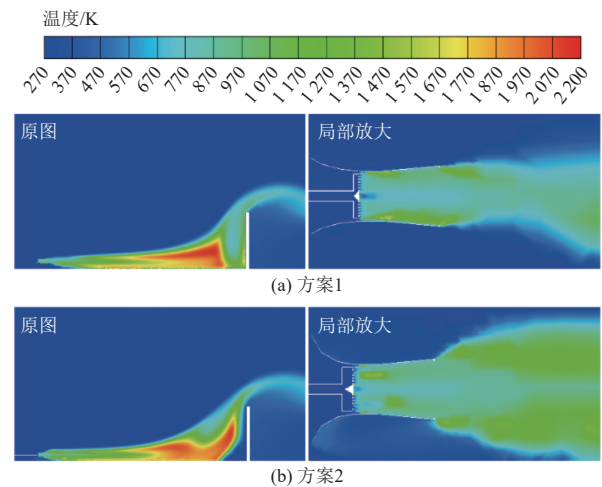


图 4 燃烧器中轴截面温度分布云图

Fig. 4 Temperature distribution of the central axis section of the burner

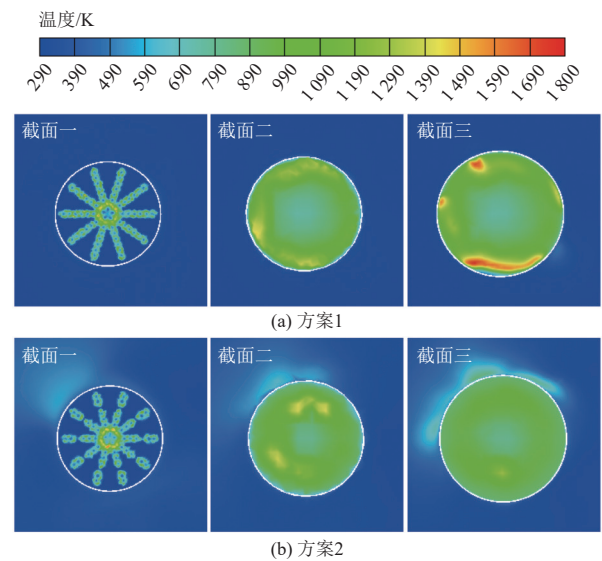


图 5 燃烧器径向截面温度分布云图

Fig. 5 Temperature distribution of the radial section of the burner

入燃烧器内并和燃料混合。如图 4 所示,预混空气促进了燃料的点燃和燃烧,因此燃料在喷出套

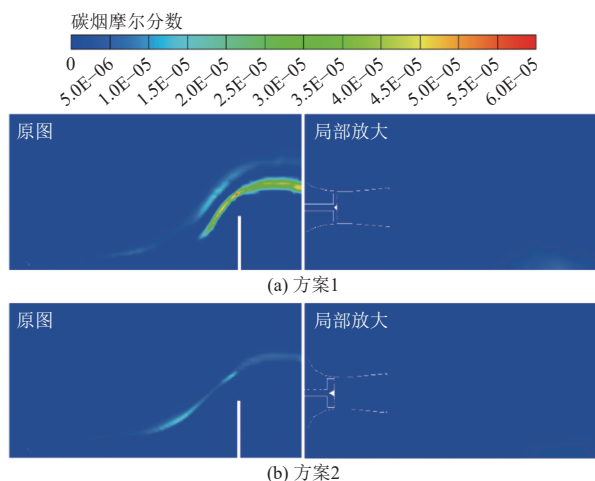


图 6 燃烧器中轴截面碳烟摩尔分数分布云图

Fig. 6 Mole fraction distribution of soot of the central axis section of the burner

筒时燃烧更加剧烈,导致火焰宽度增大,高温区域也增大。相较而言,增大套筒吸入段的角度对火焰的长度没有显著影响。

增大套筒吸入段的角度后引射的空气量增加,空气带来的冷却效果更强,这有效降低了套筒内部的温度。如图 5 所示,方案 2 中的套筒内部面的高温区域明显减小,峰值温度由方案 1 时的 1 774 K 减少到 1 417 K,降低 357 K。套筒内温度的降低有利于减少燃烧高温对套筒结构的损伤,延长套筒的使用寿命。

碳烟生成同时受空气供应量和燃烧温度的影响。图 6 结果显示,增大套筒吸入段的角度后引射的空气量增加使得燃烧更加充分,生成的碳烟量减少。碳烟摩尔分数峰值由方案 1 中的 5.76×10^{-5} 减少到方案 2 中的 1.58×10^{-5} ,降幅达 73%;而截面上的平均碳烟摩尔分数由 9.04×10^{-7} 减少到 2.46×10^{-7} ,即碳烟生成总量也减少 73%。综上可知,在 60° 范围内增大套筒角度是比较理想的改进方法,将套筒吸入段的角度分别由 6° 、 15° 和 30° 增大到 10° 、 30° 和 60° 后能使引射的空气量增加 64%,碳烟生成量降低 73%,同时还能降低高温对套筒的不利影响,从而延长使用寿命。

2.2 混合段套筒直径对燃烧和污染物生成的影响

图 7~10 显示了不同混合段套筒直径对空气引射、致密气燃烧和污染物生成特性的影响。仿真结果统计显示,当混合段套筒直径由 242 mm (方案 2) 增大至 342 mm (方案 3) 后引射空气的质量流率由 0.079 12 kg/s 增加至 0.103 00 kg/s,引射

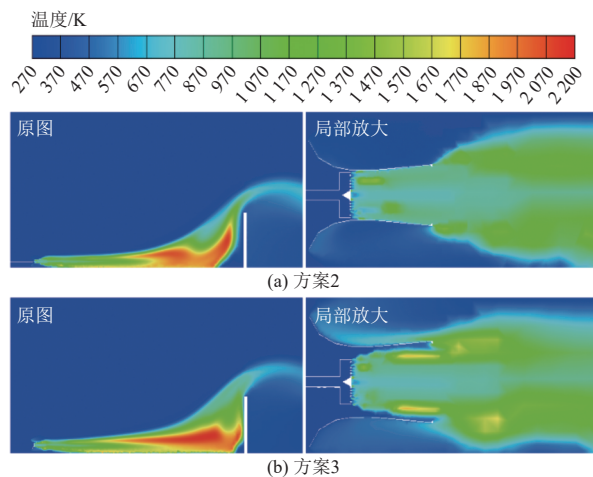


图 7 燃烧器中轴截面温度分布云图

Fig. 7 Temperature distribution of the central axis section of the burner

的空气量增加了 30%。相应地,空气引射系数由 2.561 增加到 3.333,引射预混系数由 0.154 增加到 0.200,表明有更多的空气被引射进入燃烧器中并和燃料混合,燃料在喷出套筒时也会燃烧得更加剧烈。如图 7 所示,火焰的宽度增大,高温区域也增大,但增大套筒直径对于火焰的长度同样无显著影响。

与增大吸入段套筒角度类似,增大混合段套筒直径后引射的空气量增加,使得燃料燃烧更充分,也使得生成的碳烟数量减少。如图 8 所示,当混合段套筒直径由 242 mm 增大至 342 mm 时,碳烟摩尔分数峰值由 1.58×10^{-5} 减少到 2.12×10^{-6} ,降幅达 87%,截面的平均碳烟摩尔分数由 2.46×10^{-7} 减少到 4.23×10^{-8} ,即碳烟生成总量也减少近 87%。

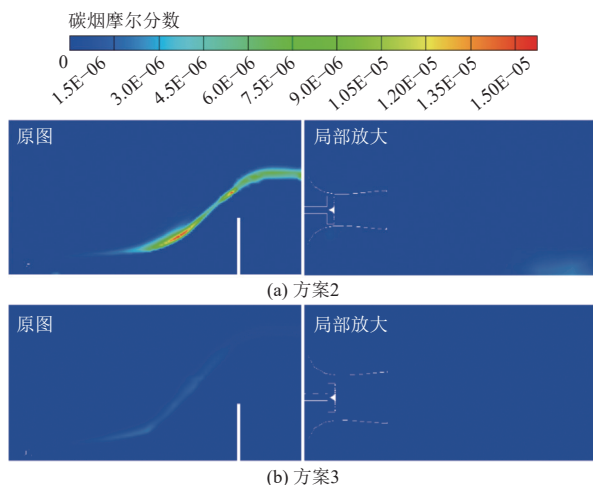


图 8 燃烧器中轴截面碳烟摩尔分数分布云图

Fig. 8 Mole fraction distribution of soot of the central axis section of the burner

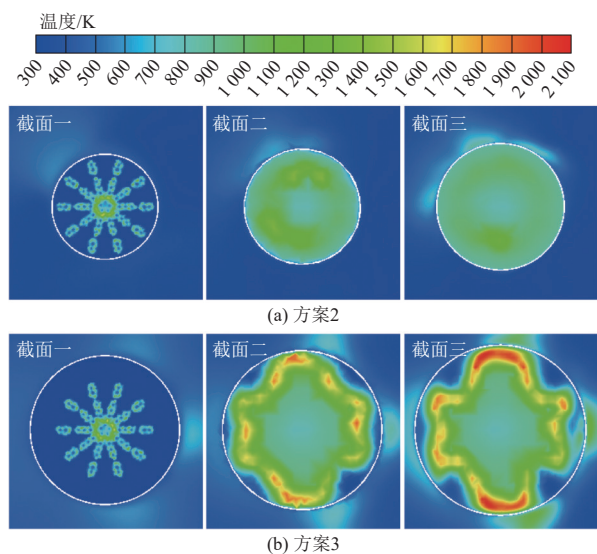


图9 燃烧器径向截面温度分布云图

Fig. 9 Temperature distribution of the radial section of the burner

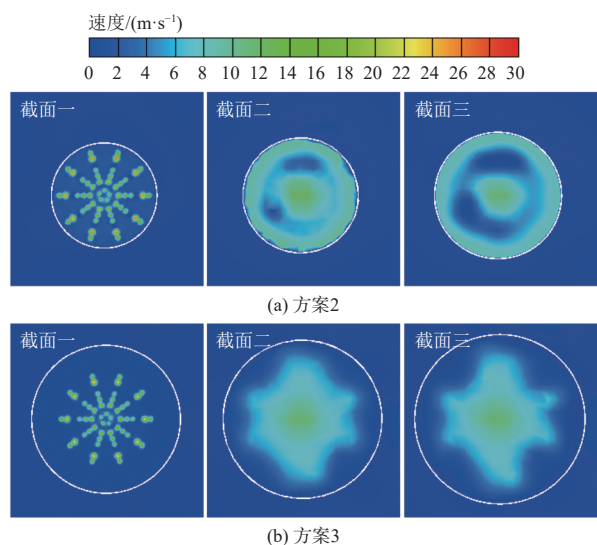


图10 燃烧器径向截面速度分布云图

Fig. 10 Velocity distribution of the radial section of the burner

然而,值得注意的是,增大套筒直径后燃烧器内通流面积及区域增大,套筒中空气及燃料的流动速度降低。这一方面导致冷空气通过对流换热冷却套筒的能力下降;另一方面,引射进入燃烧器混合段及扩张段的空气不能与中心燃料充分混合,从而形成内部局部燃烧高温区。如图9所示,直径增大后峰值温度由1417 K增加到2085 K,增加了668 K,并在套筒内部靠近套筒壁面附近形成了1500 K以上的高温区(面积占比近20%),极易对套筒造成损伤。

如图10所示,套筒直径增大后,稳焰齿偏移面的低速区域面积(速度小于2 m/s)由7%增长到了25%,这将导致火焰刚性减弱,火焰在开放空间中的稳定性降低。综上可知,增大混合段套筒直径虽然有利于提升引射预混系数、减少碳烟生成,但不利于燃烧器的安全长期运行。同时考虑制造成本和安装灵活性,增大混合段套筒直径的可行性较低。

2.3 混合段燃料射流角度对燃烧和污染物生成的影响

图11~13显示了混合段燃料射流角度(方案2和4)对致密气燃烧和污染物生成特性的影响。方案4中增加的旋流叶片占据了一部分空气通流面积,导致引射的空气质量流率下降。结果显示,

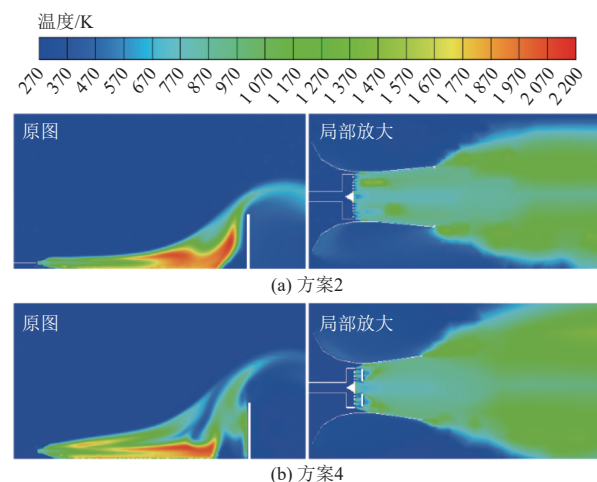


图11 燃烧器中轴截面温度分布云图

Fig. 11 Temperature distribution of the central axis section of the burner

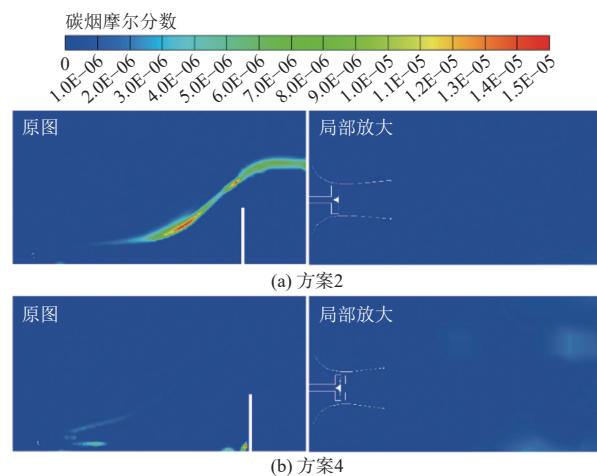


图12 燃烧器中轴截面碳烟摩尔分数分布云图

Fig. 12 Mole fraction distribution of soot of the central axis section of the burner

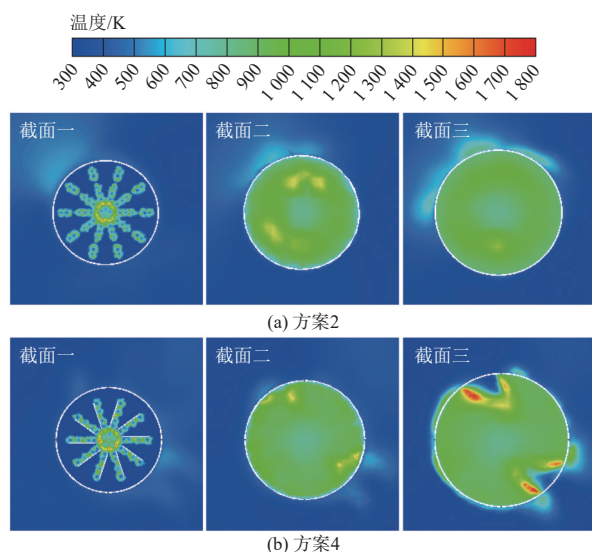


图 13 燃烧器径向截面温度分布云图

Fig. 13 Temperature distribution of the radial section of the burner

引射的空气质量流率由方案 2 中 $0.079\ 12\ \text{kg/s}$ 减少到方案 4 中 $0.076\ 17\ \text{kg/s}$, 减少 4%。相应地, 空气引射系数由 2.561 略微降低至 2.465, 引射预混系数也由 0.150 略微降低至 0.148。值得注意的是, 旋流叶片促使燃烧器内混合气体形成周向速度分量, 减少了轴向速度, 延长了混合气在燃烧器内的停留和燃烧时间, 有利于缩短火焰长度。如图 11 所示, 火焰由接触壁面后再偏转向上, 在距壁面约 100 mm 处就开始偏转向上, 火焰的长度大约减少了 8%。火焰长度缩短可避免高亮火焰溢出燃烧池, 降低燃烧对周边环境的热辐射污染。

图 12 结果显示, 燃烧器中增加旋流叶片后局部燃料浓度较高, 导致局部碳烟峰摩尔分数值略升高, 由 1.58×10^{-5} 增加到了 1.76×10^{-5} , 升高 11%。旋流叶片总体上能促进燃料气体和空气的混合, 使得燃烧更充分, 碳烟生成总量减少。结果显示, 界面上的平均碳烟摩尔分数由 9.04×10^{-7} 减少到了 4.87×10^{-8} , 碳烟总量为无旋流叶片的 20%。

图 13 结果显示, 旋流叶片能汇聚燃料, 使局部燃料浓度较高, 也会使得局部高温区域峰值温度由 1 417 K 增加到 1 801 K (增加 384 K), 但形成的高温区域在套筒内部面的占比较小, 且旋流烟气对套筒壁面充分冲刷换热, 进而不会对套筒寿命造成不利影响。综上, 通过改变混合段燃料射流角度, 形成旋流射流, 可以在不显著改变燃烧器外形尺寸的情况下减少碳烟生成并降低火焰尺

寸, 对燃烧器安全长期运行十分有利。

2.4 燃烧与火焰特性试验检验

基于上述仿真结果, 优选吸入段套筒角度分别为 60° 、 30° 和 10° , 混合段套筒直径 242 mm、燃料射流孔外设置旋流叶片, 扩展段套筒角度 8° 等参数, 加工制造了闪蒸废气燃烧器样机 (PP-S-5000 型闪蒸废气燃烧器), 在四川某致密气场站进行了现场试验, 检验了燃烧器对碳烟消除效果以及运行可靠性。试验中通过光学相机拍摄火焰可见光图像, 对比原燃烧器及新燃烧器在燃烧相同致密气闪蒸废气时的火焰形貌特征。使用滤膜及取样枪测量火焰中心的碳烟浓度。同时, 采用 K 型热电偶, 测量燃烧器内扩张段处的温度, 检验高温烧蚀风险。

图 14 显示了试验过程中拍摄的新、旧燃烧器火焰侧面形貌, 分别记录了连续 3 个不同时刻的情况。可以看出, 使用原始燃烧器的火焰内部呈亮白色且外围呈现橘黄色, 外围颜色较深, 在空气中存在肉眼可见的“冒黑烟”现象; 火焰尺寸较大且不稳定, 火焰顶端溢出燃烧池, 对周边环境造成热辐射。使用新型燃烧器后, 火焰尺寸明显减小, 在燃烧池内部即可完成燃烧过程, 有效避免了火焰溢出及热辐射污染。同时, 新燃烧器在燃烧致密气闪蒸废气时火焰颜色呈现亮白色, 颜色浅且不存在局部发黑现象, 火焰较为稳定, “冒黑烟”现象消失。这验证了新燃烧器具有多点射流引射、旋流稳定燃烧、部分预混等特征, 可有效减少致密气闪蒸废气燃烧中碳烟的生成, 从而实现致密气闪蒸废气清洁燃烧处置。

图 15 显示了试验过程中测量的新旧燃烧器燃烧碳烟浓度。可以看出, 使用旧燃烧器得到的火焰呈深橘黄色, 局部明显发黑, 存在“冒黑烟”现象, 滤膜上收集到大量碳烟颗粒。使用新型燃烧器得到的火焰呈亮黄色, 局部发黑减轻, “冒黑烟”现象消失, 滤膜上收集的碳烟颗粒量显著减少, 这说明采用新型燃烧器燃烧减少了火焰中的碳烟排放。

此外, 试验测试结果显示, 运行中新型燃烧器的燃烧器内扩张段处的温度在 660~662 K 之间, 高于原始燃烧器的火焰温度。该温度范围有利于燃料及时着火并稳定火焰, 同时在常用不锈钢材料可用温度范围之内, 有利于燃烧器的经济制造和安全长期运行。

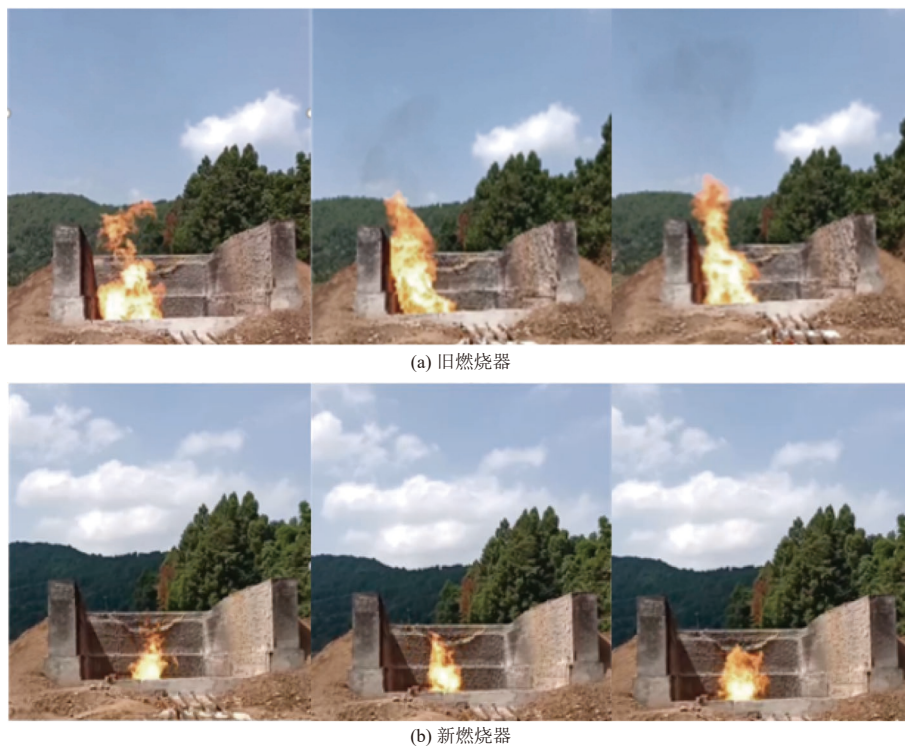


图 14 火焰形貌

Fig. 14 Flame morphology



图 15 碳烟浓度

Fig. 15 Soot concentration

3 结 论

本文基于致密气闪蒸废气特征和文丘里原理,设计了通过可燃废气射流引射空气形成部分预混燃烧的文丘里结构型燃烧器。通过 CFD 仿真计算分析了燃烧器的套筒角度、套筒直径以及

燃料射流旋流叶片等结构参数对致密气燃烧与碳烟生成行为的影响规律。根据仿真设计确定了燃烧器结构,加工制造了闪蒸废气燃烧器样机(PP-S-5000 型闪蒸废气燃烧器),并在致密气场站进行了现场试验验证。本文设计的基于文丘里结构的部分预混式致密气燃烧器,具有低碳烟排放、高使用年限等优点;开发了一个可用于预测碳烟生成趋势的 CFD 燃烧模型,用于指导燃烧器设计。由于试验过程中存在不可抗因素(如外界风力),该仿真模型难以通过试验定量验证。得出的主要结果与结论如下。

(1)在 60° 范围内增大吸入段套筒角度是较理想的改进方法,该角度由 30° 增加到 60° 能使引射的空气量增加 64%,减少碳烟生成(降幅 73%),还能降低高温对套筒的不利影响。

(2)增大混合段套筒直径会使内部出现低速区域,不仅降低冷却套筒的效果,而且增加的引射空气还会使得燃料着火提前,出现 1 500 K 以上的内部高温区域,对燃烧器的安全长期运行不利。同时考虑制造成本和安装灵活性,增大混合段套筒直径的可行性较低。

(3)燃料喷口设置旋流叶片能够在燃烧器内部形成旋流射流,可以在不显著改变燃烧器外形

尺寸的情况下减少碳烟生成并降低火焰尺寸,对燃烧器清洁、长时间稳定运行十分有利。

(4)现场试验结果表明,新燃烧器的燃烧火焰稳定,无“冒黑烟”现象,验证了燃烧器具有多点射流引射、旋流稳燃特征、部分预混特征的燃烧器可有效减少致密废气闪蒸废气燃烧中碳烟的生成,实现致密废气闪蒸废气清洁燃烧处置。

参考文献 (References):

- [1] 康玉柱. 中国致密岩油气资源潜力及勘探方向 [J]. [天然气工业](#), 2016, 36(10): 10-18.
KANG Yuzhu. Resource potential of tight sand oil & gas and exploration orientation in China[J]. [Natural Gas Industry](#), 2016, 36(10): 10-18.
- [2] 付融冰, 张慧明. 中国能源的现状 [J]. [能源环境保护](#), 2005, 19(1): 8-12.
FU Rongbing, ZHANG Huiming. Status on energy sources in China[J]. [Energy Environmental Protection](#), 2005, 19(1): 8-12.
- [3] 褚恒, 王登辉, 吴锋, 等. 天然气燃烧器的低氮优化及数值模拟 [J]. [能源环境保护](#), 2023, 37(5): 209-220.
CHU Heng, WANG Denghui, WU Feng, et al. Low-nitrogen optimization and numerical simulation of natural gas burners[J]. [Energy Environmental Protection](#), 2023, 37(5): 209-220.
- [4] 宋彬, 李静, 高晓根. 含硫气田水闪蒸气处理工艺评述 [J]. [天然气工业](#), 2018, 38(10): 107-113.
SONG Bin, LI Jing, GAO Xiaogen. Technology of flash gas treatment in sour water of sulfur-bearing gas fields[J]. [Natural Gas Industry](#), 2018, 38(10): 107-113.
- [5] 隋先富, 王玉, 张岭. 放空火炬冒黑烟问题原因深度剖析 [J]. [科技创新导报](#), 2016, 13(10): 57-58+60.
SUI Xianfu, WANG Yu, ZHANG Ling. In-depth analysis of the causes of black smoke emission from vent flares[J]. [Science and Technology Innovation Herald](#), 2016, 13(10): 57-58+60.
- [6] 王震东, 沈晓波, 修光利, 等. 国内外石化行业火炬污染排放控制标准与规范研究 [J]. [环境科学研究](#), 2019, 32(9): 1456-1463.
WANG Zhendong, SHEN Xiaobo, XIU Guangli, et al. Domestic and global standards and specifications for gas flare emission control in petrochemical industry[J]. [Research of Environmental Sciences](#), 2019, 32(9): 1456-1463.
- [7] 杨晓军, 郑佳伦, 杨志衡, 等. 航空替代燃料燃烧特性及碳烟生成数值模拟 [J]. [航空动力学报](#), 2023, 38(10): 2317-2327.
YANG Xiaojun, ZHENG Jialun, YANG Zhiheng, et al. Numerical simulation of combustion characteristics and soot generation of aviation alternative fuel[J]. [Journal of Aerospace Power](#), 2023, 38(10): 2317-2327.
- [8] 刘洋. 氨气掺混对乙烯扩散火焰中碳烟生成和颗粒特性的影响 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2022: 1-3.
LIU Yang. Effects of ammonia addition on soot formation and particle characteristics in ethylene diffusion flame[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022: 1-3.
- [9] YIN Zibin, LIU Shuqiang, TAN Dongli, et al. A review of the development and application of soot modelling for modern diesel engines and the soot modelling for different fuels[J]. [Process Safety and Environmental Protection](#), 2023, 178: 836-859.
- [10] 梁博文. CO₂/H₂O 氛围下丙烷富氧燃烧特性及碳烟生成研究 [D]. 荆州: 长江大学, 2023: 23-68.
LIANG Bowen. Study on oxygen-enriched combustion characteristics and soot formation of propane in CO₂/H₂O atmosphere[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2023: 23-68.
- [11] SHAFIEY DEHAJ M, EBRAHIMI R, SHAMS M, et al. Experimental analysis of natural gas combustion in a porous burner[J]. [Experimental Thermal and Fluid Science](#), 2017, 84: 134-143.
- [12] 刘飞, 赵益秋, 王雷. 试油测试用密闭燃烧装置开发与试验 [J]. [油气井测试](#), 2016, 25(6): 23-26+74.
LIU Fei, ZHAO Yiqiu, WANG Lei. Development and test of closed combustion device for oil testing and well test[J]. [Well Testing](#), 2016, 25(6): 23-26+74.
- [13] 庞东晓, 陆灯云, 韩雄, 等. 天然气密闭燃烧器的研制与应用 [J]. [天然气工业](#), 2019, 39(10): 127-131.
PANG Dongxiao, LU Dengyun, HAN Xiong, et al. Development and application of natural gas closed burners[J]. [Natural Gas Industry](#), 2019, 39(10): 127-131.
- [14] 程欣, 杨元明, 于铁峰, 等. 测试燃烧器放喷流动及燃烧特性数值模拟 [J]. [石油机械](#), 2020, 48(3): 66-71.
CHENG Xin, YANG Yuanming, YU Tiefeng, et al. Numerical simulation of flow and combustion characteristic of the testing burner[J]. [China Petroleum Machinery](#), 2020, 48(3): 66-71.
- [15] COZZI F, COGHE A. Behavior of hydrogen-enriched non-premixed swirled natural gas flames[J]. [International Journal of Hydrogen Energy](#), 2006, 31(6): 669-677.
- [16] SUN Zhenglu, WANG Yongtang, LIU Hong, et al. Design and uniformity analysis of fully premixed natural gas burner venturi mixer[J]. [IOP Conference Series: Materials Science and Engineering](#), 2020, 721: 012009.
- [17] 陈建旭. 新型测试燃烧器热辐射特性分析 [J]. [西部探矿工程](#), 2021, 33(6): 97-100.
CHEN Jianxu. Analysis of thermal radiation characteristics of a novel testing burner[J]. [West-china Exploration Engineering](#), 2021, 33(6): 97-100.
- [18] 冯敏. 海上测试燃烧器噪音和热辐射计算模型研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016: 1-6.
FENG Min. Research of offshore testing burner's noise and heat radiation model[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016: 1-6.

- [19] 贾鸿章. 高温高压闪蒸流场及热质交换特性的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2020: 3-8.
JIA Hongzhang. Research on high temperature and high pressure flash evaporation flow field and heat and mass transfer characteristics[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020: 3-8.
- [20] 郑永建, 王镇岗, 潘艳芝, 等. 基于文丘里管和射线技术的低压湿气测量方法 [J]. *天然气工业*, 2019, 39(9): 117-122.
ZHENG Yongjian, WANG Zhengang, PAN Yanzhi, et al. A low-pressure wet gas measurement method based on Venturi flowmeters and Gamma ray technology[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(9): 117-122.
- [21] WANG Weiwen, ZHOU Litong, LI Chaojie, et al. Novel Venturi injector reactor design and application in ammonia nitrogen wastewater treatment[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 68: 106352.
- [22] 李大尉, 谷世杰, 韩桂华, 等. 探究文丘里管型孔板参数变化对空化效果影响 [J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2024, 29(6): 13-21.
LI Dawei, GU Shijie, HAN Guihua, et al. Investigation of the influence of changes in the parameters of venturi tube orifice plates on the cavitation effect[J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2024, 29(6): 13-21.
- [23] 康勇, 赵进涛, 段飞飞. 临界流文丘里喷嘴流出系数的计算与分析 [J]. *工业仪表与自动化装置*, 2024(4): 81-85+97.
KANG Yong, ZHAO Jintao, DUAN Feifei. Calculation and analysis of critical flow Venturi nozzle discharge coefficient[J]. *Industrial Instrumentation & Automation*, 2024(4): 81-85+97.
- [24] 程晓磊. 基于 EDM、PDF 和 FR/ED 模型的煤粉燃烧过程适应性研究 [J]. *洁净煤技术*, 2020, 26(2): 43-49.
CHENG Xiaolei. Study on the adaptability of EDM, PDF and FR/ED models to pulverized coal combustion process simulation[J]. *Clean Coal Technology*, 2020, 26(2): 43-49.
- [25] DEHGHANI S, HOSSEINI SARVARI S M. Variable discrete ordinates method for radiation transfer in concentric spherical variable index media[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2023, 301: 108556.
- [26] JIN Guopei, SHAN Shiquan, WANG Xinran, et al. New multi-parametrical pressurized WSGG model correlations for gaseous radiative heat transfer in high H_2O/CO_2 molar ratio conditions for sustainable fuel utilization[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 69: 173-183.
- [27] WU Shaohua, ZHOU Dezhi, YANG Wenming. Implementation of an efficient method of moments for treatment of soot formation and oxidation processes in three-dimensional engine simulations[J]. *Applied Energy*, 2019, 254: 113661.
- [28] 谢毫. 煤粉湍流燃烧及碳烟生成模拟研究 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2021: 20-22.
XIE Hao. Simulation study of turbulent combustion of pulverized coal and soot formation[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2021: 20-22.
- [29] 何子煜, 徐杰, 王子兵. 受限条件下线形对文丘里引射器性能影响的数值分析 [J]. *节能*, 2024, 43(9): 66-69.
HE Ziyu, XU Jie, WANG Zibing. Numerical analysis of the performance impact of linear-to-venturi ejectors under restricted conditions[J]. *Energy Conservation*, 2024, 43(9): 66-69.