

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2016.05.002

浸没燃烧式LNG气化器燃烧器的研究

□ 中国船舶重工集团公司第七一一研究所能源装备事业部 (201108) 刘世俊 郭超 雷江震 吉天晓
□ 中国石油气电集团有限责任公司 (315800) 杨贤潮

摘 要: 本文介绍了几种应用于LNG接收站的气化器,分析了SCV中浸没式燃烧器的关键技术,在此基础上设计并搭建浸没式燃烧器的试验平台,在试验的基础上将技术成果应用在国内某LNG接收站中,取得了良好的运行成果。结果表明浸没式燃烧器的一次点火成功率达到100%,整个试验和工业运行过程燃烧比较稳定,烟气中污染物排放达标。

关 键 词: 浸没式燃烧器 冷却水循环 喷雾水 氮氧化物

Study on Burner of LNG Submerged Combustion Vaporizer

Liu Shijun, Guo Chao, Lei Jiangzhen, Ji Tianxiao, Yang Xianchao

Abstract: This paper briefly discussed the different types of vaporizers in use LNG terminal, and analysed the principles and comprises of SCV. Discussed the key technology of SCV, bulided up the experimental platform of the submerged burner, and plenty of experiments were carried out. Applied the achievements to the domestic LNG terminal on the basis of experiments and good operating results were made. As the results, the first ignition always success, the combustion was stable at the whole operation of experiment and industry and the pollutants in the flue gas is satisfied to standard.

Keywords: Submerged burner Cooling water circulation Spray water Nitrogen oxide

H.3.4.2 使用专用脱漆水把丙烯酸面漆完全脱去。

H.3.4.3 按表H.1要求,测试环氧涂层表现。

H.4 方案

H.4.1 丙烯酸面漆+环氧漆双涂层在钢管生产厂宜以流水作业方式生产。

H.4.2 丙烯酸面漆的试验项目、生产过程质量检验、

出厂检验、涂层修补及重涂可参照环氧层涂覆管的有关方案。

H.4.3 工地涂层修补

若发现丙烯酸涂层破损、刮花,应以环氧漆或丙烯酸漆修补,修补前须确保表面清洁。

(全文完)

目前，世界上液化天然气（LNG）技术已经成为一门新兴工业正在迅猛发展。LNG技术除了用在解决天然气储存、运输问题外，还广泛地应用于天然气调峰。在实际应用中，不管是民用燃气还是工业应用，LNG总是要气化并恢复到常温以后才能使用。LNG气化器是一种专门用于LNG气化的换热器，但由于LNG的使用特殊性，使LNG气化器也颇具特色。低温的液态天然气要转变为常温的气体，必须要提供相应的热量使其气化。热量的来源可以从环境空气或水中获得，也可以通过燃料燃烧或蒸气来加热LNG。

1 LNG气化器分类^[1, 2, 3]

目前LNG接收站常用的气化器有3种：海水开架式气化器（Open Rack Vaporizer简称ORV），浸没燃烧式气化器（Submerged Combustion Vaporizer简称SCV），中间介质管壳式气化器（Intermediate Fluid Vaporizer简称IFV），上述3种气化器的比较见表1。

2 SCV理论分析^[4]

2.1 SCV组成^[5, 6]

SCV气化器主要包括浸没式燃烧器部分和管束式换热单元部分。浸没式燃烧器作为SCV的心脏，其运行的安全稳定关系到整套SCV的状况，故需要对浸没式燃烧器的性能进行试验研究。本项目搭建一个气化为30t/h的浸没式燃烧器试验台，测试燃烧器的性能。本项目只涉及燃烧部分的试验，下面所有论述都

是基于燃烧部分，并不涉及SCV气化器管束式换热单元部分。

如图1所示，浸没燃烧式气化器（SCV）共分为6个系统，即助燃空气系统、燃烧炉系统、燃料气系统、冷却水循环系统、自动控制系统。装置主要由本体、助燃风机、燃烧器、混凝土罐、冷却水泵、碱液罐、风道、烟囱、甲板、工艺管路、控制元件及其他附属设备组成。

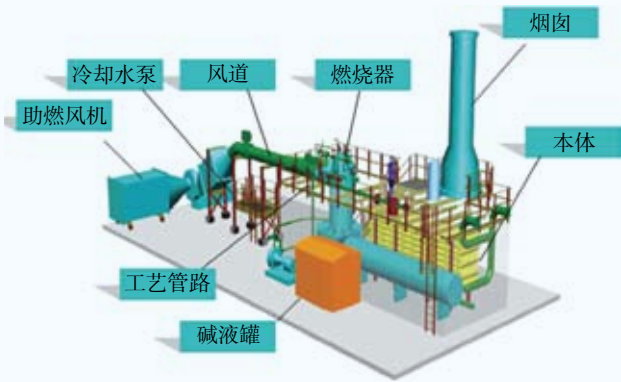


图1 SCV系统构成图

2.2 浸没式燃烧器关键技术

2.2.1 SCV点火^[7-9]

SCV的点火程序很复杂，高能点火器点燃一级引燃，一级引燃点燃二级引燃后关闭一级引燃，主燃烧器通过二级引燃火焰点燃。正常运行时，燃烧器的负荷全部由主燃烧器提供。^[10]现有SCV在开工点火测试时，点火枪不是每次均能点燃天然气，经常出现点火枪连续点火4次~5次后才能点燃的情况，使得操作人

表1 LNG气化器类型比较^[3]

类型	ORV	SCV	IFV
热源	海水、海水、工艺废热	燃料	海水、废热、空气
使用记录	-经常作为基本负荷气化器 -作为气化系统，其技术已被广泛证明	-非常常见 -作为应急备用和调峰，在全世界被广泛运用	受限
优点	-运行和维护方便 -海水、河水、锅炉和工艺废热都可以利用 -如果可以利用海水河水，其运行成本极低	-初期投资成本低 -热效率高 -可在寒冷地区使用 -启动速度快	即使不能使用水作为热源，但是仍可使用
缺点	-当海水高度不纯，如固体悬浮颗粒和铜的含量较高时，海水不能用作热源 -当海水温度低于5℃是，CAPEX显著增长	-运行成本较高 -需要处理废水（PH、COD） -维护和操作复杂	-安装空气热回收系统占地面积较大 -维护和周期检查工作相对复杂 -相对其他类型的气化器使用经验较少

员必须花费额外时间操作SCV点火,分散其监视其他控制参数的精力。另外,由于点火枪均是通过瞬间高电压产生火花,每次打火花均对点火枪的材质和绝缘性能造成损伤,假设每次给1台SCV点火均需要4次~5次,则将明显缩短点火枪的使用寿命,频繁更换点火枪势必增加生产成本。此外,开启1台SCV的步骤:开水泵(约0.5min)→开风机(约0.5min)→点火(约4min),若能够确保点火一次性成功,将明显缩短紧急启动备用SCV的时间^[11]。

2.2.2 燃烧的稳定条件设计

浸没式燃烧器的工作条件比其它任何燃烧装置要恶劣的多,例如,浸没燃烧器燃烧室出口位于液面下一定深度,燃烧室受到较大的背压作用;在SCV中,燃烧室背压更大;烟气与液体接触传热时,火焰可能与液体接触而形成不完全燃烧;烟气鼓泡穿过液层时液面波动大,压力波动会引起燃烧不完全、熄火、爆鸣,甚至发生爆炸事故。因此,浸没燃烧器是各种燃烧器中技术要求最高的。为了保证燃料完全燃烧,防止回火和脱火,设计浸没式燃烧器时要采取必要的稳焰措施,目前应用较广而效果较好的稳焰措施是高速旋流稳焰法。高速旋流烟气的回流促进了燃气与空气的混合、预热及着火,强化了燃烧过程,提高了火焰的稳定性,本文亦采用了该稳焰措施^[12]。

2.2.3 燃烧的污染物排放

随着环保要求的提高,对SCV排放烟气中污染物浓度要求越来越严格,特别是 NO_x 。 NO_x 与空气中的水结合最终会转化成硝酸和硝酸盐,硝酸是酸雨的成因之一;它与其他污染物在一定条件下能产生光化学烟雾污染。

燃烧过程中 NO_x 的生成有以下3种途径^[13]:

(1) 燃料型 NO_x :由燃料中的氮化物热分解氧化产生。

(2) 快速型 NO_x :由空气的 N_2 与燃料中的碳氢离子团(CH 等)反应生成。

(3) 热力型 NO_x :空气中的 N_2 在高温下氧化而成。

对于SCV, NO_x 主要通过热力型生成途径而产生的。目前采用过的降 NO_x 措施有以下几种方式:

(1) 喷水:在主燃烧器处增加一路喷雾水,喷雾水降低了燃烧区的中心火焰温度,减少 NO_x 浓度,喷雾水可以控制 NO_x 含量在35ppm~50ppm。但喷水不

能无限制的降低 NO_x 。

(2) 催化还原装置:由于喷雾水不能无限制的降低 NO_x ,对于环境要求比较高的地方,只能在烟囱中增加催化还原装置,来还原 NO_x 。但该系统控制复杂,一次投资费用较高,维修频繁,导致系统周期性停车。还原剂使用寿命短,更换频繁,且价格昂贵,操作费用高。一些新型的降 NO_x 措施还包括运用无焰热氧化燃烧和向水浴池中喷臭氧,但这些装置较复杂。

为了验证浸没式燃烧器设计的点火、燃烧特性与污染物排放特性,七一一所自行搭建了气化负荷为30t/h的浸没式燃烧器试验台并对其进行了基础试验研究。

3 燃烧器的试验研究

3.1 试验系统介绍

浸没式燃烧器试验台主体图见图2,其主要设备、设施和系统包括:浸没式燃烧器、烟气分配器、储水箱、燃烧空气鼓风机及风量控制系统、燃料气管系及控制系统、烟囱、仪表空气管系及控制系统、冷水循环系统。



图2 浸没式燃烧器试验台主体图

燃料气系统由3个杜瓦瓶和1台空温式气化器组成,杜瓦瓶内的LNG通过汇流排经气化能力为600Nm³/h空温式气化器气化后为浸没式燃烧器提供燃料。由高压、大流量的鼓风机为浸没式燃烧器提供燃烧所需的空气,主管道(DN400)分成两路,一次风进入主燃烧器处,二次风与上部蜗壳连接,进入燃烧室。水浴池冷却水循环管路分为三路,第一路向燃烧室冷却水夹套提供冷却水,第二路向主燃烧器提供降 NO_x 喷

雾水,第三路向主燃烧器冷水盘管提供冷却水。燃烧室冷却水管路用来冷却炉膛,防止高温通过热传导方式传到燃烧器盖板,造成上面仪表的高温损坏。降 NO_x 喷雾水管路主要是通过水的雾化降低炉膛的温度,减少热力型 NO_x 的生成量。而主燃烧器冷却水管路用来降低主燃烧器处的温度,延长主燃烧器的寿命。

浸没式燃烧器采用空气两次分级技术降低 NO_x 的含量,一次空气从主燃烧器鼓出,与从主燃烧器喷嘴出来的燃料气边混合边燃烧,二次空气从上部蜗壳旋流进入燃烧器中部锥形燃烧室,与未完全燃烧的可燃气体混合物完全燃烧,同时压低火焰,冷却燃烧器。一次空气使燃烧区处于贫氧状态,降低主火焰平均温度,有利于减少 NO_x 的产生。

试验过程中,首先开启循环水泵,此时的喷雾水管路处于关闭状态。再开启离心风机,保持大火风量,将浸没式燃烧器中的水鼓出水浴池。然后通入燃料气,对燃料气管路进行吹扫,进入自动点火程序。自动点火之前,燃烧风处于小火风量,通过自动点火,利用高能点火装置将一级引燃气引燃后,点燃二级引燃,保持稳定后关闭一级引燃。同时主燃料气管路处于点火小流量状态,通过二级引燃点燃主燃烧器,稳定后关闭二级引燃。接着对燃烧器进行负荷调节,燃料气的流量作为依据,来改变燃烧风的流量和配比。

3.2 试验结果分析

浸没式燃烧器可以在10%~100%负荷内调节运行,燃烧器在每个工况下能够正常运行,火焰形状稳定,烟气中污染物排放不超标。

一次风的增加缩短主火焰的长度,但是增加一定程度超过火焰传播速度后,火焰熄灭,多次的试验也得到相同的现象。二次风使主火焰完全燃烧,并保持旋流,旋转的高温烟气是一个稳定的点火源,引燃新喷入的可燃气体。二次风的增大使火焰旋流强度更大,火焰更加稳定。在燃烧风总量保持不变且火焰不熄灭的前提下,一次、二次风对比对燃烧产物没有显著的影响。

以50%负荷为例,CO和 NO_x 随喷雾水量的变化如图3所示。可以看出,CO随喷雾水量先升高后降低,喷雾水对CO的影响较为复杂,但满足烟气的排放标准。理论上,CO主要受燃烧的组织方式影响,当燃烧组织不好的时候,烟气中含有较高含量的CO。 NO_x

随喷雾水量的增加而降低,降低的程度先较大,后来变缓趋于定值。这是由于喷雾水降低主火焰区域的平均温度,减少热力型 NO_x 的生成量,但对快速型 NO_x 的生成量没有很大效果。故喷雾水只能降低部分 NO_x ,若需要进一步降低 NO_x ,可以采取相应的措施,如喷臭氧、无焰氧化燃烧、加还原剂反应 NO_x ^[5]。

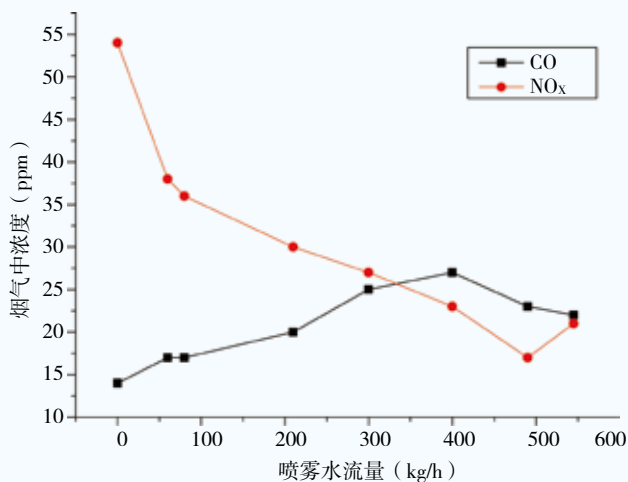


图3 CO和 NO_x 随喷雾水量变化图

4 浸没式燃烧器的应用实例

在国内的某个LNG接收站中采用国产化的浸没燃烧式气化器,气化负荷为200t/h,其技术参数如表2所示。

表2 技术参数

项目	单位	数值	项目	单位	数值
气化量	(t/h)	200	设计温度	℃	-170/60
LNG进口压力	MPa	9.75	LNG进口温度	℃	-158
设计压力	MPa	15	NG出口温度	℃	1
气化器负荷	MW	37	水浴温度	℃	23
负荷调节比	%	10 ~ 100%	烟气排出温度	℃	40

在项目调试初期,SCV点火存在一些困难,当燃料气和助燃空气调节在比较好的配比范围内时,一次点火成功率达到100%。气化器的负荷测试和72h性能测试时取得满意效果。在10%~100%负荷测试中,每个工况持续运行3h,每个工况下燃烧器运行良好,火

焰形状稳定且充满炉膛,烟气中污染物排放不超标。在72h性能测试时,气化器100%负荷连续运行72h,燃烧器运行稳定,火焰明亮,从观火孔可以明显观察主燃烧器处的冷却水盘管,烟气中污染物排放低于国家标准。

5 结论

(1) 浸没式燃烧器可以在10%~100%负荷内调节运行;

(2) 燃烧器在每个工况下能够正常运行,火焰形状稳定,烟气中污染物排放不超标;

(3) 增加喷雾水流量可以明显降低 NO_x 含量,降低程度先较大,后来较平缓趋于直线。但喷雾水只能降低 NO_x 到一定的量,剩余含量的 NO_x 只能通过其余途径降低。

通过对SCV中关键技术的分析,采取双蜗壳旋流增强燃烧的稳定性,单点注水降低 NO_x 排放等措施。在小型试验平台上研究浸没式燃烧器的运行参数和规律,为浸没式燃烧器在实际项目中的运行提供良好的指导。

参考文献

- 1 顾安忠编. 液化天然气技术手册[M]. 机械工业, 2010; 586

- 2 Hou Z Z Y E X. Lower Emission LNG Vaporization[J]. Chinese Rural Health Service Administration. 2006
- 3 陈伟, 陈锦岭, 李萌. LNG接收站中各类型气化器的比较与选择[Z]. 中国贵州贵阳, 2007; 8
- 4 王格新, 邓冬. 山东LNG工程气化工艺技术及设备研究[Z]. 乌鲁木齐, 2013; 1173-1178
- 5 李泓钰. 浸没燃烧式LNG气化器模拟实验研究[D]. 北京建筑大学, 2015
- 6 孙海峰. 浸没燃烧式LNG气化器的传热计算与数值仿真[D]. 北京建筑大学, 2014
- 7 Gruzdev V N, Vinogradov Y V, Talantov A V. Igniting capacity of a submerged jet of hot combustion products[J]. Combustion, Explosion and Shock Waves. 1978; 14 (3): 389-390
- 8 Golovichev V I, Yasakov V A. Analysis of a reacting submerged hydrogen jet[J]. Combustion, Explosion and Shock Waves. 1972; 8 (1): 41-56
- 9 刘燕龄. 浸没燃烧蒸发器操作特点及使用效果[J]. 化学世界, 1965; 6: 266-267
- 10 刘世俊, 郭超. 浸没燃烧法在LNG气化工艺中的应用[J]. 城市燃气, 2015; 12: 22-27
- 11 程云东. 浸没燃烧式气化器的设计缺陷及改进方法[J]. 油气储运, 2014; 3: 292-294
- 12 宫小龙. 增压浸没燃烧汽化装置研制及其基本特性研究[D]. 北京工业大学, 2012
- 13 岑可法. 高等燃烧学 [M]. 浙江大学出版社, 2002: 563-571

工程信息

昌北液化天然气LNG气化站取得经营许可

作为南昌市政府重点推进项目由南昌燃气公司建设的昌北液化天然气LNG气化站日前取得经营许可,该气化站设计规模为储存2 000m³液化天然气,分2期建设,一期投资4 399.4万元,建

150m³低温储罐6个,二期投资270万元,建150m³低温储罐2个,占地约3.34万m²。该站作为南昌燃气应急气源。

(陈宇)