

H₂O 对合成气火焰燃烧特性的影响

厉剑梁

(中国华电集团公司,北京 100031)

摘要:使用 Chemkin 软件对 CO/H₂ 合成气在 O₂/N₂/H₂O 气氛下预混火焰的火焰传播速度和着火延迟时间进行数值模拟。模拟选用 GRI-Mech 3.0 反应机理。模拟结果表明,H₂O 的性质尤其是化学性质对燃烧特性有重要影响。在低 H₂ 含量时,H₂O 的化学性质提高火焰传播速度,降低着火延迟时间。在高 H₂ 含量合成气燃烧中,H₂O 的化学性质会降低火焰传播速度以及着火延迟时间。

关键词:富氧燃烧,燃烧特性,化学影响

中图分类号:TK 16

文献标志码:B

文章编号:1674-1951(2017)12-0059-03

0 前言

Oxy-fuel 燃烧技术是如今备受瞩目的一种新型燃烧技术^[1],该燃烧技术通过 O₂ 代替空气作为氧化剂与燃料混合燃烧,燃烧产物主要为 H₂O 和 CO₂,此时出口烟气中的 CO₂ 含量可以达到 80%,而高含量的 CO₂ 更利于烟气的分离和净化。由于燃烧产生的高温以及能够减少碳捕集过程中需要分离的成分,Oxy-fuel 燃烧技术能够很好地提高燃烧系统的效率。在 Oxy-fuel 燃烧技术的基础上,Anderson^[2]等人提出用水蒸气替代循环烟气作为稀释剂参与燃烧,即实现燃料在 O₂/H₂O 气氛下的燃烧。与 O₂/CO₂ 燃烧技术相比,O₂/H₂O 燃烧技术避免了烟气循环系统,同时仅通过冷凝出口烟气就能得到高纯度的 CO₂。此外,O₂/H₂O 燃烧技术还能进一步降低氮氧化物的排放^[3]。因此,O₂/H₂O 燃烧技术被认为是新一代的富氧燃烧技术。

但是在 O₂/H₂O 气氛下,H₂O 替代 N₂ 会对燃烧过程产生影响,这些影响不仅是 H₂O 的物理性质(比热容、扩散系数等)造成的,还来自于 H₂O 的化学特性产生的影响。在燃烧过程中,除了与 NO_x 相关的反应,N₂ 基本不参与其他化学反应,可以被认为是惰性气体,而 H₂O 由于自身的特点,既可以是生成物,也可以作为反应物。因此,当氧化剂中含有 H₂O 时,燃烧特性需要重新认识。

为了能够对 O₂/H₂O 燃烧的燃烧特性有更进一步的理解,科研人员开展了一系列的实验和模拟。Park^[4]研究了 H₂O 的添加对甲烷在空气气氛下燃烧中的火焰结构和 NO_x 排放特性的影响。研究发现添加少量水蒸气时 H₂O 的化学效应会提升最大火焰

温度,而且会降低 CO 的排放指数,升高 CO₂ 的排放指数。Richards^[5]等使用 Chemkin 软件比较了 O₂/CO₂ 和 O₂/H₂O 气氛下的燃烧火焰的停留时间和 CO 平衡浓度。结果发现 CO₂ 气氛下火焰的停留时间比 H₂O 气氛下的停留时间长 5~7 倍,并且 CO₂ 气氛下的 CO 的平衡浓度更高。Tu^[6]等通过 FLUENT 数值模拟方法探讨 H₂O 对煤粉富氧无焰燃烧的影响。研究发现 H₂O 的添加相对于 CO₂ 气氛可以提高火焰温度,H₂O 的添加可以导致煤粉发生气化反应产生大量的 H₂ 从而促进煤粉着火,而且 H₂O 可以抑制 HCN 的转化,H₂ 的存在会促进 NO-Reduction 机理的转化,降低污染物 NO 的排放。

合成气是一种清洁能源,其来源广泛,由煤炭、生物质等热解或者气化产生,主要由 CO 和 H₂ 组成。在过去几十年,许多学者对 H₂/CO 合成气火焰的燃烧特性的研究产生了极大的兴趣。但是目前的研究主要集中在 N₂ 气氛或者 CO₂ 气氛下,对在 O₂/H₂O 燃烧气氛下的 CO/H₂ 的燃烧特性的研究较少。在这里,本文研究了 O₂/H₂O 燃烧气氛下 CO/H₂ 燃烧的火焰传播速度,讨论 H₂O 对火焰传播速度的影响。

1 数值模拟方法

本文采用化学动力学分析软件 Chemkin 的 PREMIX 模型。层流预混反应模型是个理想化的模型,火焰为一维稳定火焰,整个燃烧过程是等压绝热过程。

在这里,为了研究 H₂O 的化学性质对整个燃烧过程带来的影响,本文在模拟时虚构了一种组分 X,X 具有与 H₂O 相同的热力特性和扩散特性,但是这种虚构的组分不参与任何化学反应,可以认为是一种惰性气体。

在本文,计算的合成气燃料采用 H_2 体积分数分别为 10% 和 50% 的合成气,氧化剂为 $O_2/N_2/H_2O$ (X) 的混合气体,各组分的体积比见表 1。此外,反应物初始温度为 398 K,压力为 0.101325 MPa (1 atm)。

表 1 氧化剂各组分体积比

工况	$O_2/\%$	$N_2/\%$	$H_2O/X/\%$
1	21	59	20
2	21	49	30
3	21	39	40
4	21	29	50
5	21	19	60
6	21	9	70
7	21	0	79

本文采用 GRI - Mech3.0 机理^[7],包含 53 种组分和 325 步基元反应。该机理适用的反应条件为温度在 1000 ~ 2500 K,压力在 0.001 333 MPa (10 torr) 与 1.013 25 MPa (10 atm) 之间,当量比在 0.1 ~ 5 的范围内。该机理是经过优化的详细化学反应机理,目前被广泛应用于 CH_4 、 H_2 、CO 气体燃烧模拟中并且在大量的实验数据中得到很好的验证。

2 H_2O 对火焰传播速度的影响

在 H_2 含量为 10% 时预混火焰中添加不同比例 H_2O 的层流火焰速度数据如图 1 所示。从图中可以看出, H_2O 参与化学反应时的火焰传播速度大于 H_2O 不参加化学反应时的速度,这说明 H_2O 的化学性质促进火焰速度的传播。另一方面,随着 H_2O 的添加比例的增加,火焰传播速度首先增大,当 H_2O 添加比例达到 30% 时,火焰传播速度达到最大值,该结果与文献中获得的结论相似。 H_2O 比例继续增大,此时火焰传播速度开始下降。而当添加的 H_2O 不参加反应,即当稀释剂为 X 火焰传播速度随着稀释剂比例升高不断降低。这说明当 H_2O 的比例为 30% 时的化学性质的影响最大。

在 H_2 含量为 50% 时预混火焰中添加不同比例 H_2O 的层流火焰速度如图 2 所示。可以发现,此时 H_2O 参与化学反应时的火焰传播速度小于 H_2O 不参加化学反应时的速度,这说明当高 H_2 含量时, H_2O 的化学性质抑制火焰速度的传播。这一点与低 H_2 含量时的结果完全相反。而且随着 H_2O 含量的增加,火焰传播速度也没有出现先增大后降低的现象,而是一个单调下降的过程。

3 H_2O 对着火延迟时间的影响

在实验中,有很多种方法可以确定着火延迟时间,这些方法由实验测量过程决定。本文选择以温

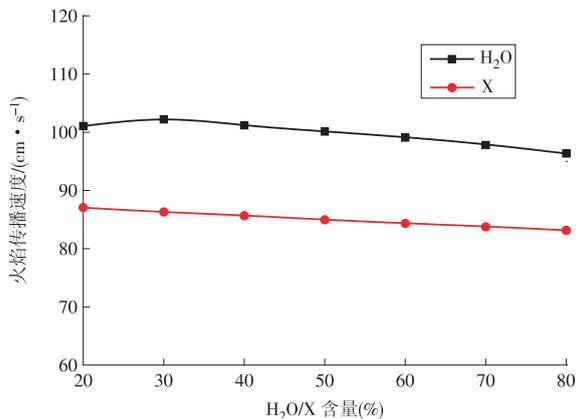


图 1 H_2/CO (10: 90) 燃料在不同 H_2O/X 比例下火焰传播速度

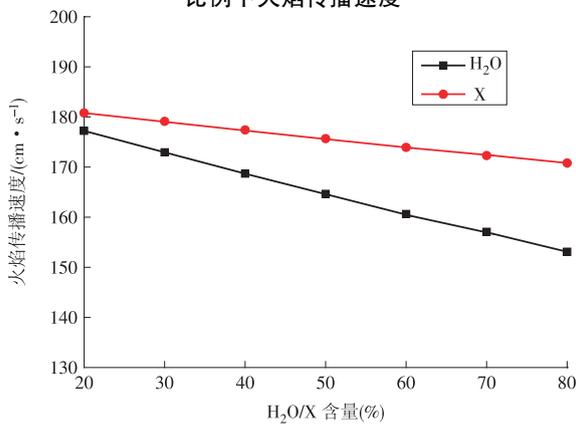


图 2 H_2/CO (50: 50) 燃料在不同 $H_2O(X)$ 比例下火焰传播速度

度梯度 (dT/dt) 的最大值作为判定着火延迟时间的依据。 H_2 含量为 10% 时预混火焰中添加不同比例 H_2O 的着火延迟时间如图 3 所示。

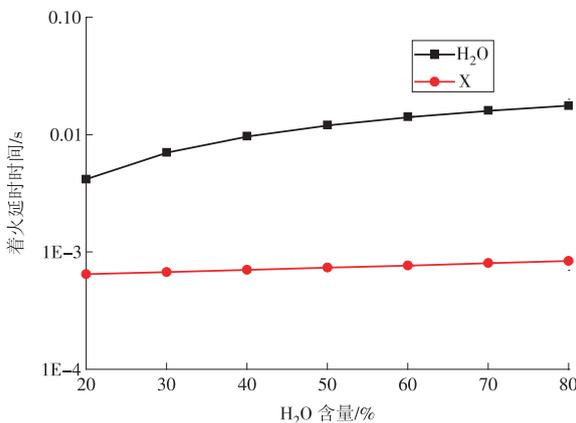


图 3 H_2/CO (10: 90) 燃料在不同 H_2O/X 比例下的着火延迟时间

从图 3 中可以看出, H_2O 参与化学反应时着火延迟时间更长,这说明 H_2O 的化学性质的影响会使着火延迟时间增加。此外,随着 H_2O 添加比例的增加,着火延迟时间会增加,这是由于 H_2O 的比热容大于 N_2 的比热容,导致火焰温度随着 H_2O 的添加而降低,从而延长了着火延迟时间。相比于 H_2O 的

添加,虚拟物质 X 的添加对着火延迟时间的影响相对较小。这是由于此处的变化仅仅来自于 H_2O 的物理性质的影响,这也说明 H_2O 的化学性质对着火延迟时间的影响更大。在 H_2 含量为 50% 条件下的预混火焰中添加不同比例 H_2O 的着火延迟时间如图 4 所示。对比图 3,50% H_2 时的着火延迟时间缩短, H_2 的添加有利于燃料的着火。而且图 4 中化学性质的影响相比于图 3 也更大,这表明 H_2O 的化学性质对着火延迟时间的影响在高 H_2 含量合成气中更加明显。

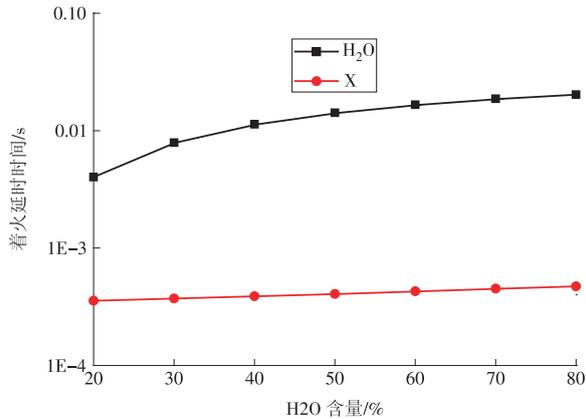


图 4 $H_2/CO(50:50)$ 燃料在不同 H_2O/X 比例下的着火延迟时间

4 结束语

本文通过使用水蒸气替代空气中 N_2 的方法,研究了 H_2O 的化学性质对两种不同 H_2 含量的合成气预混火焰的火焰传播速度和着火延迟时间的影响,可以得出以下结论。

(1) 在低 H_2 含量时, H_2O 的化学性质促进火焰的传播。在高 H_2 含量时, H_2O 的化学性质抑制火焰的传播。并且随着 H_2O 的添加,高 H_2 含量合成气火焰的传播速度下降速率更快。

(2) 在两种燃烧过程中, H_2O 的化学性质都会

(上接第 58 页)的安全性和经济性,本文通过分析 SCR 脱硝装置投运后对空预器造成腐蚀和堵灰的原因,并提出一些预防措施,通过数据对比,效果显著,保证了机组安全经济稳定运行。

参考文献:

- [1] 华电莱州发电有限公司. 1 000 MW 机组集控运行规程 [Z]. 莱州:华电莱州发电有限公司,2015.
- [2] 冯志华,常丽萍,任军,等. 煤热解过程中氮的分配及存在形态的研究进展[J]. 煤炭转化,2000,23(3):6-12.
- [3] 赵惠富. 污染气体 NO_x 的形成和控制[M]. 科学出版社,

导致燃烧的着火延迟时间变长。 H_2O 的化学性质对着火延迟时间的影响在高 H_2 含量合成气中更加明显。

参考文献:

- [1] LAI X, Ye Z, XU Z, et al. Carbon capture and sequestration (CCS) technological innovation system in China: Structure, function evaluation and policy implication[J]. Energy Policy, 2012, 50(11): 635-646.
- [2] ANDERSON R, HUSTAD C, SKUTIEY P, et al. Oxy-fuel Turbo Machinery Development for Energy Intensive Industrial Applications [J]. Energy Procedia, 2014(63): 511-523.
- [3] TU Y, LIU H, SU K, et al. Numerical study of H_2O addition effects on pulverized coal oxy-MILD combustion [J]. Fuel Processing Technology, 2015(138): 252-262.
- [4] PARK J, SANG I K, JIU H Y. Addition Effects of H_2 and H_2O on Flame Structure and Pollutant Emissions in Methane-Air Diffusion Flame [J]. Energy & Fuels, 2007, 21(6): 3216-3224.
- [5] RICHARDS G A, CASLETON K H, CHORPENING B T. CO_2 and H_2O diluted Oxy-fuel combustion for zero-emission power [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2005, 219(2): 121-126.
- [6] TU Y, LIU H, SU K, et al. Numerical study of H_2O addition effects on pulverized coal oxy-MILD combustion [J]. Fuel Processing Technology, 2015(138): 252-262.
- [7] SMITH B G P, GOLDEN D M, FRENKLACH M, et al. Gri-Mech 3.0 [Z], http://www.me.berkeley.edu/gri_mech, 2015.

(本文责编:齐琳)

作者简介:

厉剑梁(1981—),男,浙江东阳人,高级工程师,从事大型火力发电厂电厂节能技术,节能项目管理等方面工作 (E-mail: jianliang-li@chd.com.cn)。

1993.

- [4] 郑博文. 脱硝系统运行与防止空预器堵塞[J]. 科技与创新, 2014(14): 22-23.

(本文责编:齐琳)

作者简介:

李绍刚(1982—),男,山东曲阜人,工程师,工学硕士,从事电厂运行方面的工作 (E-mail: 15153577692@139.com)。

韩丽娜(1985—),女,山东济南人,工程师,工学硕士,从事电厂运行方面的工作 (E-mail: lina0904@163.com)。