

天然气预混湍流燃烧特性的实验

陈潇潇¹, 曾文¹, 党嘉莹¹, 胡二江², 马宏宇³

- (1. 沈阳航空航天大学 航空发动机学院, 沈阳 110136;
2. 西安交通大学 能源与动力工程学院 动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049;
3. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 为了获得天然气的预混湍流燃烧特性, 在湍流燃烧弹中对天然气在当量比范围为 0.7~1.4、初始压力范围为 0.1~0.3 MPa、初始温度范围为 300~400 K、湍流强度范围为 1.0~2.7 m/s 条件下的预混湍流燃烧火焰发展特性进行了试验测试, 并分析了当量比、湍流强度、初始温度、初始压力对天然气湍流火焰传播速度、火焰褶皱比以及湍流燃烧速度的影响。结果表明: 湍流火焰传播速度随着当量比的升高先增加再降低, 在当量比为 1.1 时达到最大, 并且随湍流强度与初始温度的升高而升高, 但随初始压力的升高变化不明显。火焰褶皱程度随湍流强度与初始压力的升高或当量比与初始温度的降低而逐渐增强。湍流燃烧速度随当量比的升高先升高后下降, 在当量比为 1.1 时达到最大, 并且随湍流强度、初始温度与初始压力的升高而逐渐升高。

关 键 词: 天然气; 湍流燃烧弹; 湍流火焰传播速度; 湍流燃烧速度; 火焰褶皱比
中图分类号: V231.2; TK401 **文献标志码:** A

Experiment on premixed turbulent combustion characteristics of natural gas

CHEN Xiaoxiao¹, ZENG Wen¹, DANG Jiaying¹, HU Erjiang², MA Hongyu³

- (1. School of Aero-engine, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;
2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering,
School of Energy and Power Engineering,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. Shenyang Engine Research Institute,
Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: In order to gain the premixed turbulent combustion characteristics of natural gas, the premixed turbulent combustion flame propagation characteristics of natural gas at the conditions of the equivalence ratios range of 0.7—1.4, the initial pressures range of 0.1—0.3 MPa, the initial temperatures range of 300—400 K, and the turbulence intensities range of 1.0—2.7 m/s were experimentally tested in the turbulent combustion bomb. Furthermore, the influences of equivalence ratio, turbulence intensity, initial temperature, and initial pressure on the turbulent flame propagation speed, flame wrinkle ratio and turbulent combustion speed of natural gas were investigated. The results showed that the turbulent flame propagation speeds of natural gas increased and then decreased with the increase of equivalence ratio, and reached the maximum at equivalence ratio of 1.1. With the increase of turbulence intensity and initial

收稿日期: 2021-09-19

基金项目: 国家科技重大专项(2017-III-0006-0031)

作者简介: 陈潇潇(1985—), 女, 实验师, 博士生, 主要从事发动机先进燃烧技术研究。

通信作者: 曾文(1977—), 男, 教授, 博士, 主要从事发动机先进燃烧技术研究。E-mail: zengwen928@sohu.com

引用格式: 陈潇潇, 曾文, 党嘉莹, 等. 天然气预混湍流燃烧特性的实验[J]. 航空动力学报, 2023, 38(4): 795-805. CHEN Xiaoxiao, ZENG Wen, DANG Jiaying, et al. Experiment on premixed turbulent combustion characteristics of natural gas[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(4): 795-805.

temperature, the turbulent flame propagation speed gradually increased. However, with the increase of initial pressure, the turbulent flame propagation speed varied slightly. With the increase of turbulence intensity and initial pressure, or the decrease of equivalence ratio and initial temperature, the flame wrinkle ratio gradually increased. With the increase of equivalent ratio, the turbulent combustion speeds increased first and then decreased, and reached the maximum at equivalent ratio of 1.1. With the increase of the turbulence intensity, initial temperature and pressure, the turbulent combustion speeds gradually increased.

Keywords: natural gas; turbulent combustion bomb; turbulent flame propagation speed; turbulent combustion speed; flame wrinkle ratio

目前燃气轮机(用于舰船主动力的轻型燃气轮机使用柴油燃料)均以天然气为燃料,因此,天然气燃气轮机在国内外市场需求量巨大。同时,燃气轮机的排放指标是否满足环保法规的要求成为了国内外市场的准入门槛。我国由于针对燃气轮机开展的低排放燃烧技术研究起步较晚,天然气燃气轮机迄今为止尚无成熟的低排放燃烧技术^[1]。减少天然气燃气轮机排放的主要措施是燃烧室采用分级分区燃烧模式,采用预混的方式降低主燃区的化学反应温度、控制火焰锋面前的当量比,从而降低 NO_x 生成量。同时,为控制 CO、UHC(未燃碳氢化合物)等污染物的生成量,对燃烧室空间内燃料预混当量比进行控制,以便维持可接受的化学反应速率,从而控制 CO 和 UHC 的生成量^[2-5]。然而,燃气轮机燃烧室内部燃烧流场非常复杂,燃料的燃烧反应过程与强湍流流场是不可解耦的强耦合过程,使得燃烧室内污染物的生成机理变得混沌,低排放燃烧组织变得异常复杂。因此,开展宽工况、复杂燃烧环境下天然气湍流燃烧特性的研究,掌握天然气在宽工况范围下湍流火焰发展特性以及湍流燃烧特性,将为低排放天然气燃气轮机的研制提供理论参考与技术支持。

目前,碳氢燃料预混湍流燃烧特性的实验测试设备主要包括本生灯^[6]、旋转射流装置^[7]和湍流燃烧弹^[8]等。相对于本生灯与旋转射流装置,湍流燃烧弹能够更方便地实现高压条件下碳氢燃料湍流燃烧特性的研究。Driscoll^[9]指出碳氢燃料预混湍流燃烧过程中火焰结构与火焰褶皱度对湍流燃烧速度有显著影响。Kobayashi 等^[10]对初始压力为 0.1 MPa、初始温度范围为 300~573 K 条件下甲烷与空气的预混湍流火焰传播速度进行了实验测试。Bradley 等^[11]在湍流燃烧弹中实验测试了乙醇/空气混合物在初始温度为 358 K、初始压力范围为 0.1~1.2 MPa 条件下的预混湍流燃烧速度,获得了湍流燃烧速度的主要影响因素与影响规律。Ichimura 等^[12]在初始压力为 0.1 MPa、

初始温度为 298 K、当量比范围为 0.6~1.3 条件下对氨气/空气混合气的预混湍流火焰传播特性进行了实验测试,获得了氨气/空气混合气湍流火焰的点熄火极限。蔡晓等^[13-14]在湍流燃烧弹内分别对甲烷与氨气、甲烷与氢气等混合气的预混湍流火焰传播过程进行了实验测试,指出即使在强湍流条件下,湍流传播火焰仍然会受到不稳定性、马赫斯坦常数、路易斯数等的影响,并且出现了自相似传播现象。姜延欢等^[15]在湍流燃烧弹内对常温常压下体积分数为 50%CH₄/50%H₂ 的混合气体在不同湍流强度下的火焰传播特性进行了实验研究,结果表明湍流强度的大小对火焰面褶皱度有直接影响。

本文在湍流燃烧弹中实验测试了天然气在初始压力(p)分别为 0.1、0.2、0.3 MPa,温度(T)分别为 300、350、400 K,当量比(ϕ)范围为 0.7~1.4,湍流强度分别为 1.0、2.0、2.7 m/s 条件下的预混湍流燃烧火焰发展特性,并分析了各关键因素对天然气预混湍流燃烧过程中火焰传播特性以及燃烧速度的影响规律。

1 实验装置

定容湍流燃烧器实验系统^[16]如图 1 所示,湍流燃烧弹为圆柱形不锈钢体,内径为 300 mm,长

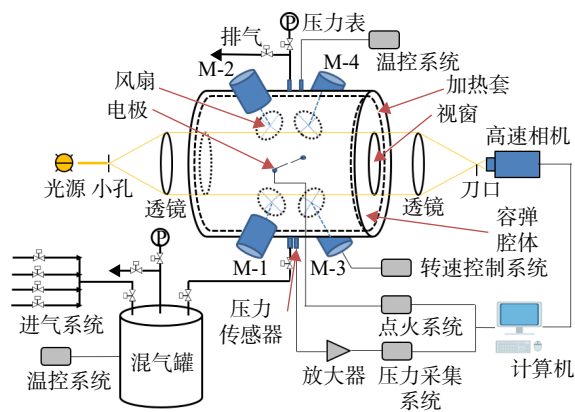


图 1 实验系统布置图

Fig. 1 Layout of experimental system

为 307 mm, 两端各装有直径为 150 mm 的石英玻璃, 以提供光学测试通道。腔体内壁上正交分布四个风扇, 通过腔体外壁上的四台电动机驱动风扇旋转后可形成各向同性且均匀的湍流场。腔体中心线位置装有点火电极, 用于点燃可燃混合气体。

在湍流流动中, 湍流速度为平均速度与脉动速度之和。由于湍流燃烧弹内并没有稳定的主流速度, 因此本文采用脉动速度平均的方均根数值作为湍流强度。实验前采用粒子图像测试系统 (PIV) 对湍流燃烧弹内冷态流场进行测量, 找出风扇转速与湍流强度的关系。本测试系统中, 湍流强度 u' 与风扇转速的关系为: $u' = 0.001\ 81\ n$, 其中 n 为风扇转数 (r/min)。

2 实验原理

在湍流火焰向外传播初期火焰锋面便开始出现大量胞状结构, 且随着火焰逐步向外扩展, 前锋面将出现明显褶皱。因此, 在对预混湍流燃烧火焰传播过程进行研究时, 基于层流火焰传播理论提出的“火焰半径”需要进行修正。Bradley 等^[17]与 Chaudhuri 等^[18]经过大量实验研究发现: 虽然在相同实验工况条件下, 湍流火焰在相同时刻会由于湍流的随机性呈现出不同的形态, 但是火焰峰面围成的面积始终相等。因此本文采用等效圆面积半径 R_s 来定义湍流火焰平均半径

$$R_s = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (1)$$

式中 A 为火焰锋面的投影面积。

对于球形扩散火焰, 湍流火焰传播速度可定义为火焰半径对时间的变化率:

$$S_t = \frac{dR_s}{dt} \quad (2)$$

式中 t 为时间。

湍流燃烧速度^[19] 定义为

$$u_t = \frac{\rho_b}{\rho_u} S_t \quad (3)$$

式中 ρ_u 与 ρ_b 分别代表未燃气体与已燃气体的密度。

由于火焰半径发展到 30 mm 时, 火焰锋面的胞状结构已经充分发展, 电火花对初始火核的影响较小, 并且此刻火焰胞状结构受压力影响较小。因此, 本文通过选取火焰半径 $R_s=30$ mm 处的湍流燃烧速度作为湍流充分发展后的湍流燃烧速度 $u_{t,30\text{ mm}}$ 。同时, 选取相同工况下火焰锋面发展到相

同火焰半径时, 湍流燃烧速度与层流燃烧速度 u_l 的比值, 即相对湍流燃烧速度 u_t/u_l , 研究湍流对预混燃烧速度的影响机制。

Driscoll 等^[9]提出的表面褶皱燃烧理论指出, 湍流流动使火焰锋面发生褶皱变形后将产生大小不等的涡团, 这些涡团加大了火焰燃烧面积, 从而提高了湍流燃烧速度。为了研究受湍流影响后火焰锋面的褶皱程度, 本文采用火焰褶皱比 W ^[20] 进行量化表征:

$$W = \frac{R_p^2}{R_s^2} \quad (4)$$

式中 $R_p = L/(2\pi)$ 为周长当量半径, L 为火焰锋面投影面积的外轮廓周长。

3 结果与分析

3.1 湍流火焰发展特性

湍流火焰在传播过程中一直处于加速传播状态, 产生此现象的主要原因是, 受湍流影响, 火焰在向外传播过程中火焰锋面会出现褶皱, 形成胞状结构, 这些胞状结构随火焰的进一步传播会持续地增长和分裂, 使火焰锋面面积持续增加。根据式(2), 火焰传播速度也将持续增加, 从而导致湍流火焰出现自加速传播。

图2显示了当量比(ϕ)对天然气预混湍流火焰发展趋势的影响规律, 图中 r 表示瞬态火焰半径。从图可以看出, 混合气处于贫燃状态时, 受浮力不稳定影响, 火焰逐渐向容弹中心线以外漂移。随着当量比增加, 火焰锋面逐渐呈球形向外扩展, 且随着火焰的发展, 火焰锋面胞状结构逐渐变大。当混合气处于富燃状态时, 在火核发展初期火焰锋面便开始出现分叉现象, 使得火焰无法以球形向外传播。产生上述现象的主要原因是, 在贫燃或富燃状态时, 由于燃料或氧化剂太少, 产生的反应热过少, 难以维持火焰传播必须的热量积累, 火焰无法实现稳定传播。

图3显示了湍流强度对天然气预混湍流火焰发展趋势的影响规律。从图可以看出, 低湍流强度下, 火焰发展初期火核能够保持“刚性”以球形向外传播。同时, 随着火焰半径的发展, 火焰锋面逐渐出现胞状结构。当湍流强度逐渐升高时, 火焰锋面出现分化现象的时间更早, 小胞状结构也更多, 火焰无法以容弹中心位置向外传播。高湍流强度下, 火焰受流体动力学不稳定性影响较大, 部分小尺度涡团结构容易被耗散掉, 火焰容易被吹熄。

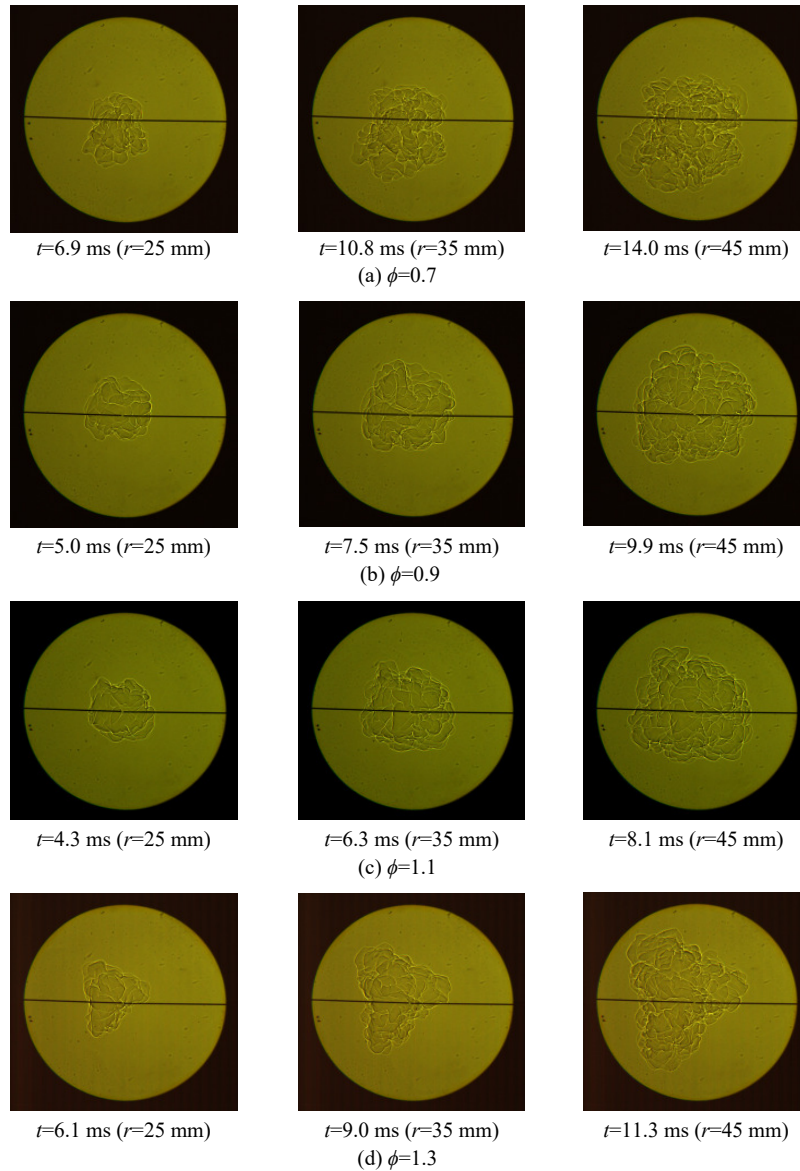
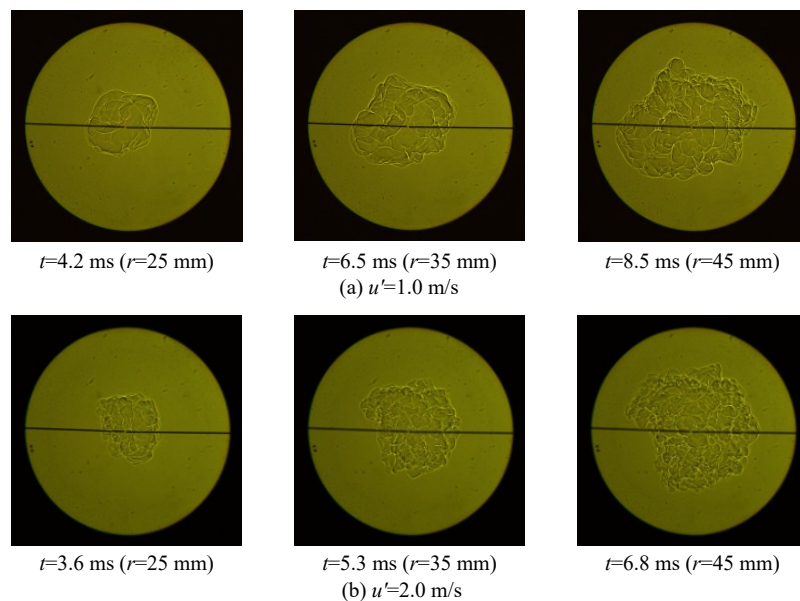


图 2 当量比对天然气湍流燃烧火焰传播过程的影响 ($p=0.1$ MPa, $T=350$ K, $u'=1$ m/s)

Fig. 2 Influence of equivalence ratio on turbulent combustion flame propagation process of natural gas ($p=0.1$ MPa, $T=350$ K, $u'=1$ m/s)



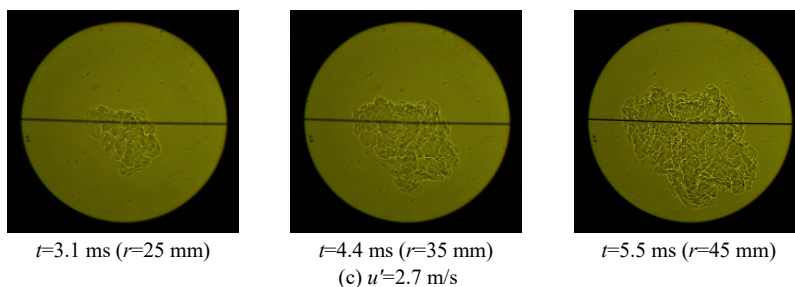


图3 湍流强度对天然气湍流火焰传播过程的影响($p=0.1$ MPa, $T=350$ K, $\phi=1.0$)

Fig. 3 Influence of turbulent intensity on turbulent combustion flame propagation process of natural gas ($p=0.1$ MPa, $T=350$ K, $\phi=1.0$)

图4显示了初始温度(T)对天然气预混湍流火焰发展趋势的影响规律。从图可以看出,随着初始温度的升高,火焰锋面形成的胞状结构逐渐增大,火焰向外传播的稳定性逐渐升高。当可燃气体处于湍流状态时,由于流体内产生大量涡团扰动,随着温度的升高,使燃料和氧化剂的动量、能量迅速传播,促使火焰稳定传播。

图5显示了初始压力(p)对天然气湍流火焰发展趋势的影响规律。从图可以看出,随着初始压力升高,火焰锋面细胞分化越明显,火焰锋面形成的胞状结构也越小。

图6显示了当量比对火焰半径随时间、湍流火焰传播速度随火焰半径变化的影响规律。如图6所示,湍流火焰传播速度随当量比的升高先增加再降低,最大值出现在当量比为1.1时;同时,在各当量比下,湍流火焰传播速度随火焰半径的增加逐渐升高,出现自加速现象。

图7显示了湍流强度对火焰半径随时间、湍流火焰传播速度随火焰半径变化的影响规律。如图所示,随着湍流强度的增加,火焰半径增长速度逐渐加快,湍流火焰传播速度也随之升高。

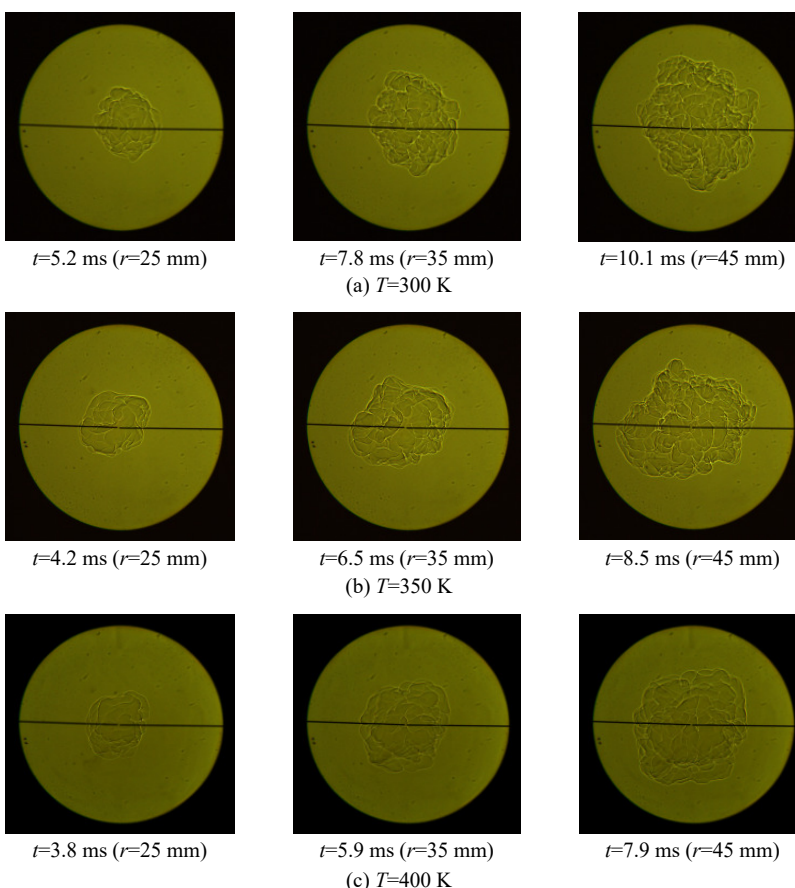


图4 初始温度对天然气湍流火焰传播过程的影响($p=0.1$ MPa, $u'=1$ m/s, $\phi=1.0$)

Fig. 4 Influence of initial temperature on turbulent combustion flame propagation process of natural gas ($p=0.1$ MPa, $u'=1$ m/s, $\phi=1.0$)

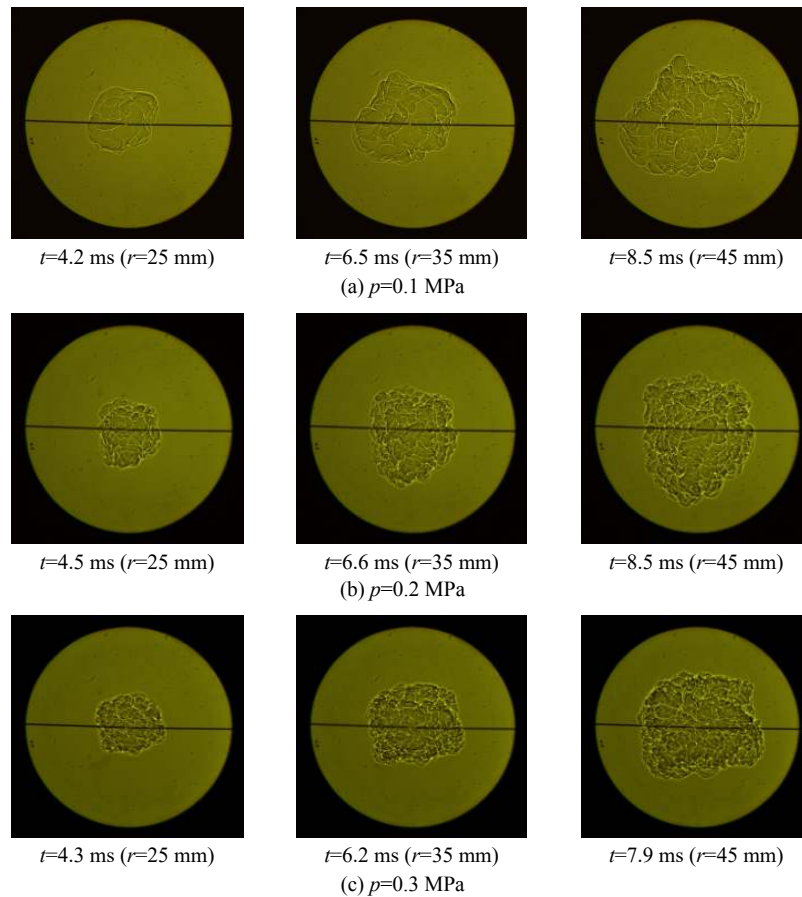


图 5 初始压力对天然气湍流火焰传播过程的影响 ($T=350\text{ K}$, $u'=1\text{ m/s}$, $\phi=1.0$)

Fig. 5 Influence of initial pressure on turbulent combustion flame propagation process of natural gas ($T=350\text{ K}$, $u'=1\text{ m/s}$, $\phi=1.0$)

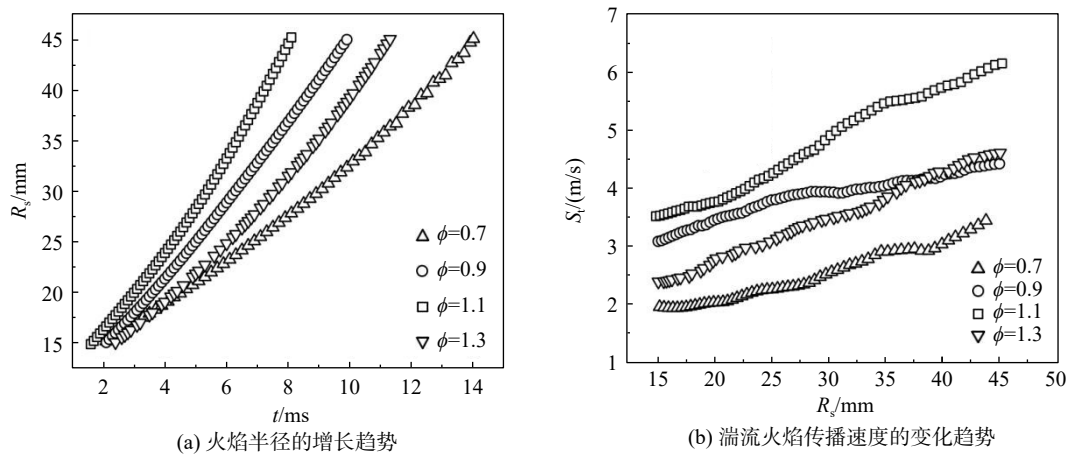


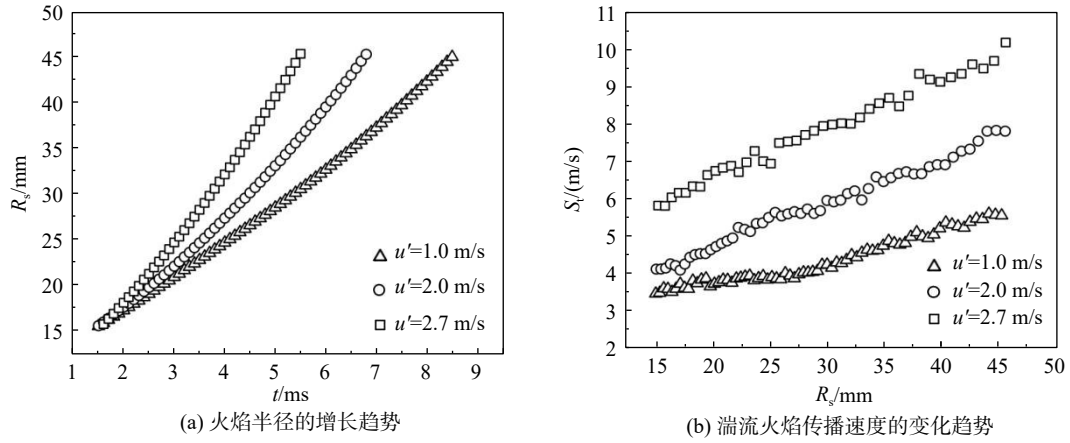
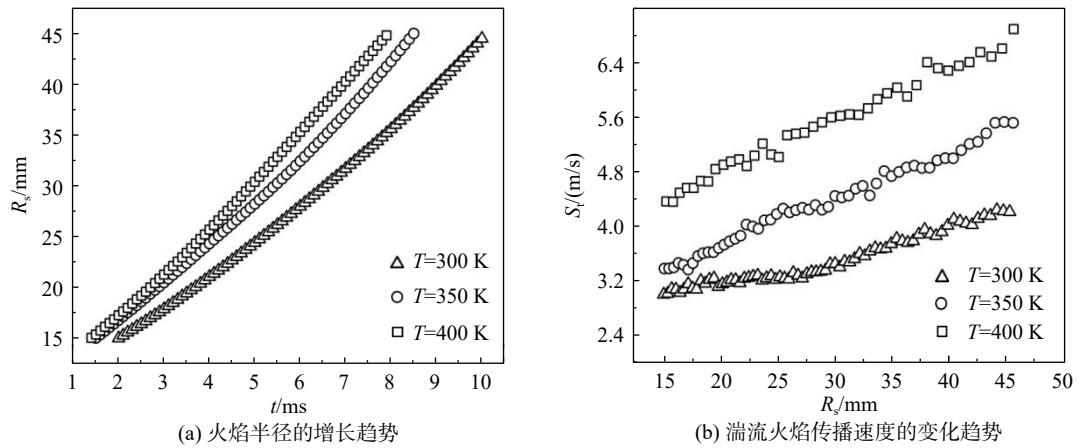
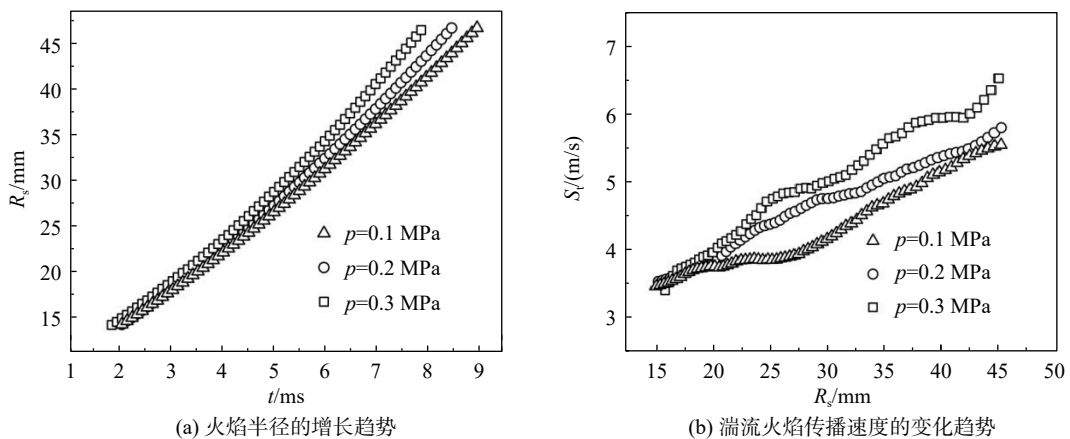
图 6 当量比对天然气湍流火焰传播特性的影响 ($p=0.1\text{ MPa}$, $T=350\text{ K}$, $u'=1\text{ m/s}$)

Fig. 6 Influence of equivalence ratio on turbulent combustion flame propagation characteristics of natural gas ($p=0.1\text{ MPa}$, $T=350\text{ K}$, $u'=1\text{ m/s}$)

图 8 显示了初始温度对火焰半径随时间、湍流火焰传播速度随火焰半径变化的影响规律。如图所示, 火焰半径增长速度与湍流火焰传播速度随初始温度的升高均逐渐升高。产生此现象的原因主要是由于初始温度越高, 裂解反应释放的自由基浓度就越大。随着自由基的扩散, 促进了质

量、热量和活性中间产物之间的传输, 提高了组分输运能力, 提升了火焰传播速度。

图 9 显示了初始压力对火焰半径随时间、湍流火焰传播速度随火焰半径变化的影响规律。从图 9 可以看出, 随初始压力的升高, 其对火焰半径增长速度与湍流火焰传播速度的影响逐渐显著;

图7 湍流强度对天然气湍流火焰传播特性的影响($p=0.1$ MPa, $T=350$ K, $\phi=1.0$)Fig. 7 Influence of turbulent intensity on turbulent combustion flame propagation characteristics of natural gas ($p=0.1$ MPa, $T=350$ K, $\phi=1.0$)图8 初始温度对天然气湍流火焰传播特性的影响($p=0.1$ MPa, $u'=1$ m/s, $\phi=1.0$)Fig. 8 Influence of initial temperature on turbulent combustion flame propagation characteristics of natural gas ($p=0.1$ MPa, $u'=1$ m/s, $\phi=1.0$)图9 初始压力对天然气湍流火焰传播特性的影响($T=350$ K, $u'=1$ m/s, $\phi=1.0$)Fig. 9 Influence of initial pressure on turbulent combustion flame propagation characteristics of natural gas ($T=350$ K, $u'=1$ m/s, $\phi=1.0$)

初始压力较低时,影响不明显,但随其升高时火焰半径增长速度与湍流火焰传播速度逐渐升高,但升高幅度较小。

3.2 湍流火焰褶皱特性

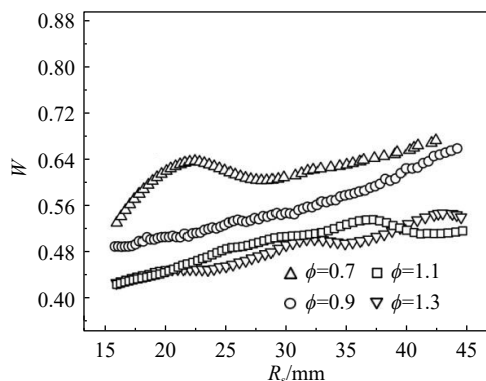
在湍流燃烧过程中,由于湍流脉动的作用,火焰锋面会弯曲变形,形成大小不一的褶皱,从而

使燃烧面积扩大,提升火焰传播速度与燃烧速度。同时,火焰锋面产生褶皱主要受湍流拉伸作用、流体力学不稳定性和热扩散不稳定性等因素影响。

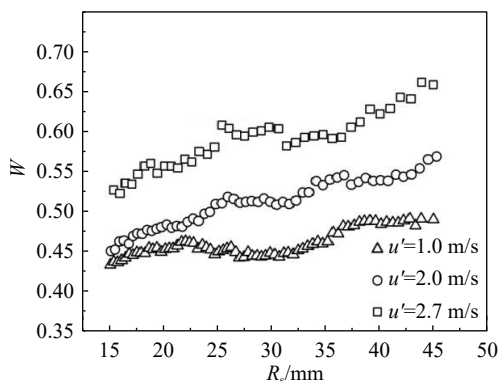
图 10 显示了各关键影响因素对天然气湍流火焰褶皱比随火焰半径变化趋势的影响规律。

如图 10 所示,火焰褶皱比随湍流强度与初始压力的增加呈增大趋势,表明火焰锋面的褶皱程度随燃烧的进行而逐渐增大。产生此现象的主要

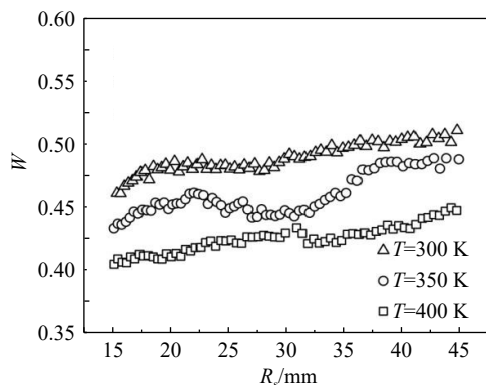
原因在于湍流强度与初始压力的升高使湍流拉伸作用增强,流体力学不稳定性逐渐占主导作用。随着当量比与初始温度的升高,火焰褶皱比逐渐减小。产生此现象的主要原因是由于随着当量比与初始温度的升高,涡团在不断流动的过程中分裂成多个旋向不同的次级涡团。但这些次级涡团在近火焰锋面处相互作用,互相抵消,最终耗散,使湍流脉动作用减弱,火焰锋面褶皱程度降低。



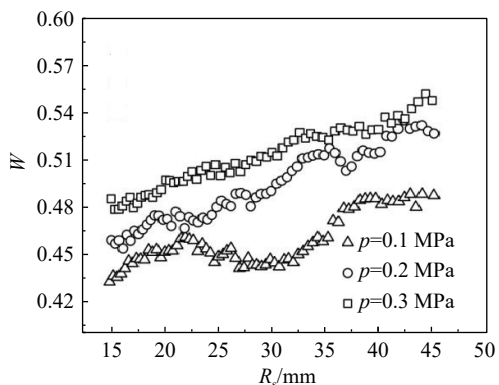
(a) 当量比对褶皱比随火焰半径变化趋势的影响
($p=0.1$ MPa, $T=350$ K, $u'=1$ m/s)



(b) 湍流强度对褶皱比随火焰半径变化趋势的影响
($p=0.1$ MPa, $T=350$ K, $\phi=1.0$)



(c) 初始温度对褶皱比随火焰半径变化趋势的影响
($p=0.1$ MPa, $u'=1$ m/s, $\phi=1.0$)



(d) 初始压力对褶皱比随火焰半径变化趋势的影响
($T=350$ K, $u'=1$ m/s, $\phi=1.0$)

图 10 湍流褶皱比随火焰半径的变化趋势

Fig. 10 Variations of flame wrinkle ratio with flame radius

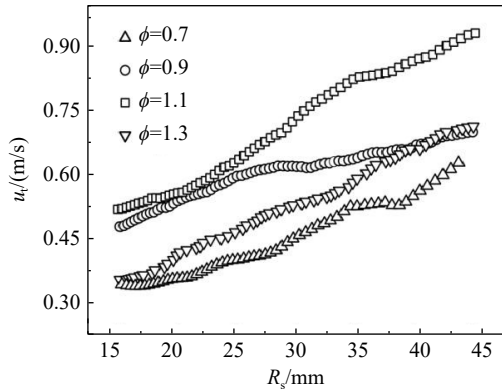
3.3 湍流燃烧速度

图 11 显示了当量比对湍流燃烧速度、半径 30 mm 处湍流燃烧速度以及相对湍流燃烧速度的影响规律。

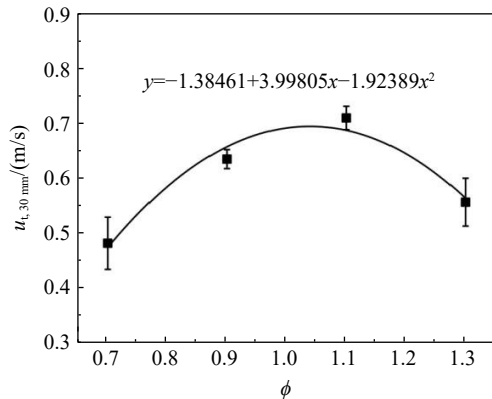
如图 11 所示,湍流燃烧速度与半径 30 mm 处湍流燃烧速度随当量比的升高先升高后下降,最大值出现在当量比为 1.1 时。当量比分别为 0.7、0.9、1.1 时,在整个火焰传播过程中,湍流燃烧速度均大于层流燃烧速度。但是,当量比为 1.3 时,在火焰发展初期,层流燃烧速度高于湍流燃烧速度;随着火焰的进一步发展,湍流燃烧速度逐渐高于层流燃烧速度。

图 12 显示了不同湍流强度下天然气的湍流燃烧速度、半径 30 mm 处湍流燃烧速度以及相对湍流燃烧速度。如图所示,湍流燃烧速度、半径 30 mm 处湍流燃烧速度、相对湍流燃烧速度随湍流强度的增加均呈上升趋势。湍流充分发展以后,湍流强度越强,湍流燃烧速度越快,且湍流燃烧速度均高于层流燃烧速度。由此可以看出,湍流强度的增加能够提高天然气湍流燃烧速度。同时,湍流通过改变火焰锋面胞状结构促使天然气预混燃烧速度提升,使得相同工况下湍流燃烧速度均高于层流燃烧速度。

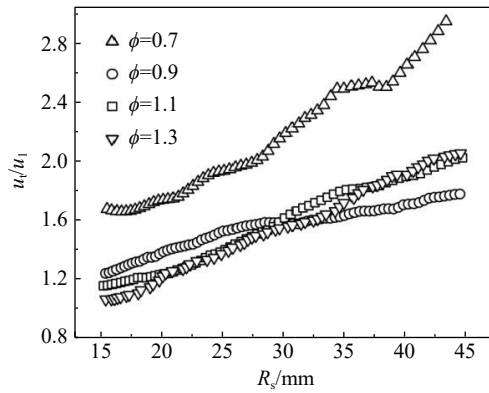
图 13 显示了初始温度对湍流燃烧速度、半



(a)



(b)



(c)

图 11 当量比对湍流燃烧速度的影响规律

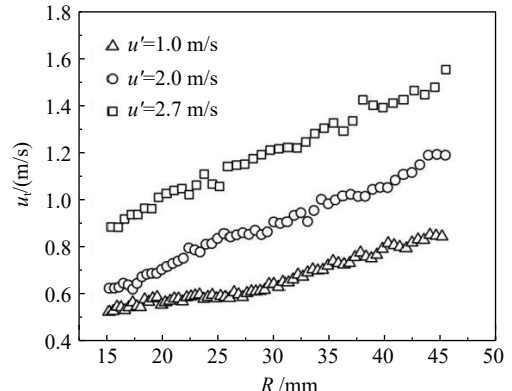
(p=0.1 MPa, T=350 K, u'=1 m/s)

Fig. 11 Influence of equivalence ratio on turbulent combustion speed (p=0.1 MPa, T=350 K, u'=1 m/s)

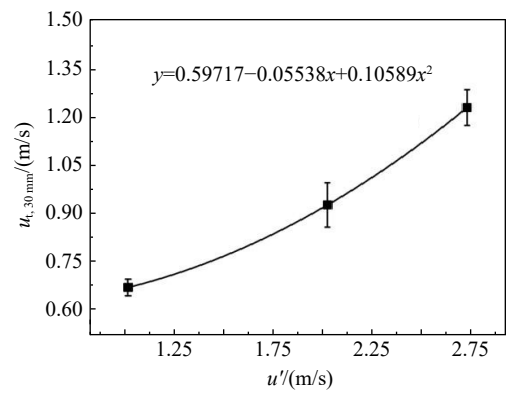
径 30 mm 处湍流燃烧速度以及相对湍流燃烧速度的影响规律。

如图 13 所示, 湍流燃烧速度与半径 30 mm 处湍流燃烧速度随初始温度的增加均呈上升趋势, 但相对湍流燃烧速度变化不明显。

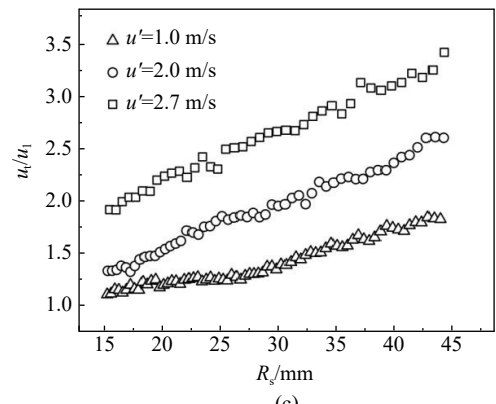
初始温度的升高加快了湍流分子之间的流动性, 促使火焰表面积增加, 提升了混合燃气分子之间的化学反应速率, 从而提升了湍流燃烧速度。然而, 当初始温度过高时, 火焰锋面受质热扩散



(a)



(b)



(c)

图 12 湍流强度对湍流燃烧速度的影响规律

(p=0.1 MPa, T=350 K, \$\phi=1.0\$)

Fig. 12 Influence of turbulence intensity on turbulent combustion speed (p=0.1 MPa, T=350 K, \$\phi=1.0\$)

不稳定性影响较大, 流体动力学不稳定性影响减弱, 湍流对燃烧速度的促进作用减弱。

图 14 显示了初始压力对湍流燃烧速度、半径 30 mm 处湍流燃烧速度以及相对湍流燃烧速度的影响规律。如图所示, 在火焰发展初期, 初始压力对湍流燃烧速度的影响不明显。当火焰充分发展后, 随着初始压力的升高, 湍流燃烧速度、半径 30 mm 处湍流燃烧速度以及相对湍流燃烧速度逐渐增大。

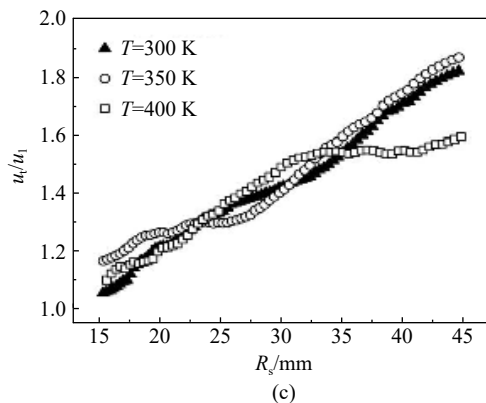
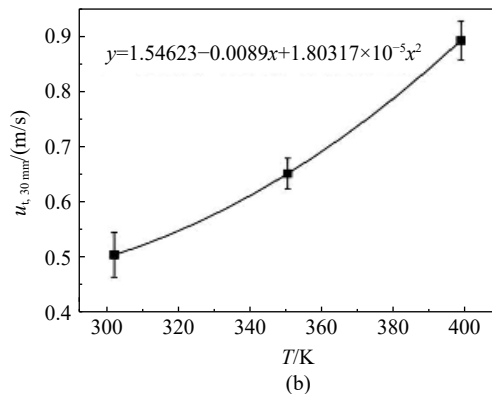
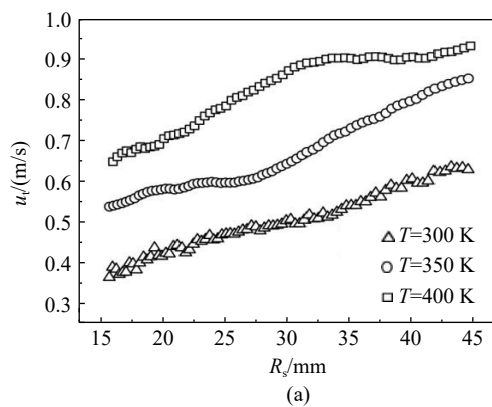


图 13 初始温度对湍流燃烧速度的影响规律
($p=0.1$ MPa, $u'=1$ m/s, $\phi=1.0$)

Fig. 13 Influence of initial temperature on turbulent combustion speed ($p=0.1$ MPa, $u'=1$ m/s, $\phi=1.0$)

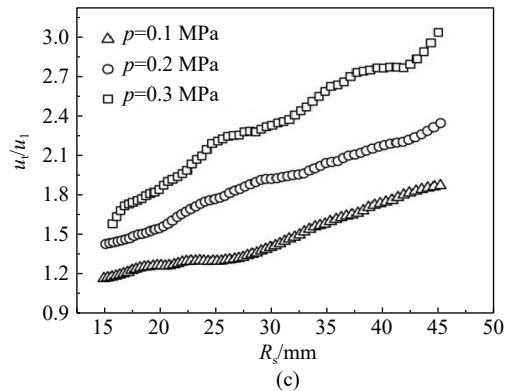
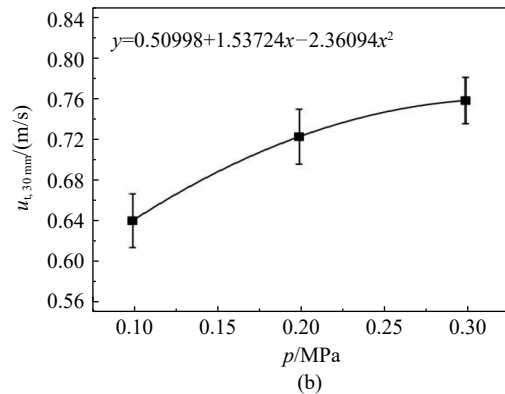
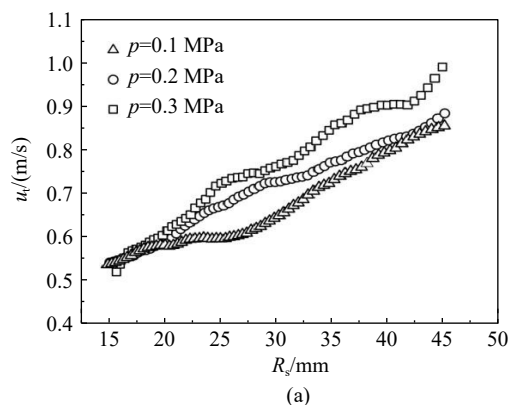


图 14 初始压力对湍流燃烧速度的影响规律
($T=350$ K, $u'=1$ m/s, $\phi=1.0$)

Fig. 14 Influence of initial pressure on turbulent combustion speed ($T=350$ K, $u'=1$ m/s, $\phi=1.0$)

4 结 论

在湍流燃烧弹中对压力分别为 0.1、0.2、0.3 MPa, 温度分别为 300、350、400 K, 当量比范围为 0.7~1.4, 湍流强度分别为 1.0、2.0、2.7 m/s 条件下天然气预混湍流燃烧火焰发展特性进行了实验测试, 并分析了当量比、湍流强度、初始温度、初始压力等参数对天然气预混湍流燃烧过程中火焰传播特性以及燃烧速度的影响规律。得到以下结论:

1) 湍流火焰传播速度随当量比的升高先增加再降低, 最大值出现在当量比为 1.1 时; 同时, 其随湍流强度与初始温度的增加逐渐升高, 但随初始压力的升高变化不明显。

2) 火焰褶皱程度随湍流强度与初始压力的增加逐渐增强, 随当量比与初始温度的升高逐渐减弱。

3) 湍流燃烧速度与半径 30 mm 处湍流燃烧速度随当量比的升高先升高后下降, 最大值均出现在当量比为 1.1 时; 同时, 其随湍流强度、初始

温度与初始压力的升高呈上升趋势。

参考文献:

- [1] 尉曙明, 索建秦. 航空衍生工业燃气轮机双燃料贫燃预混低污染燃烧技术[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(9): 2049-2057.
WEI Shuming, SUO Jianqin. Aero-derivative industrial gas turbine dual fuel lean premixed low emission combustion technology[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(9): 2049-2057. (in Chinese)
- [2] BULAT G, JONES W P, MARQUIS A J. NO and CO formation in an industrial gas-turbine combustion chamber using LES with the Eulerian sub-grid PDF method[J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(7): 1804-1825.
- [3] ALMEIDA D S, LACAVA P T. Analysis of pollutant emissions in double-stage swirl chamber for gas turbine application[J]. *Energy Procedia*, 2015, 66: 117-120.
- [4] LYRA S, CANT R S. Analysis of high pressure premixed flames using equivalent reactor networks for predicting NO_x emissions[J]. *Fuel*, 2013, 107(9): 261-268.
- [5] STARIK A M, KOZLOV V E, LEBEDEV A B, et al. Application of reactor net models for the simulation of gas-turbine combustor emissions[J]. *International Journal of Sustainable Aviation*, 2014, 1(1): 43-57.
- [6] KUMAR K, SUNG C J, HUI X. Laminar flame speeds and extinction limits of conventional and alternative jet fuels[J]. *Fuel*, 2011, 90(3): 1004-1011.
- [7] BOSSCHAART K J, LPH D G. The laminar burning velocity of flames propagating in mixtures of hydrocarbons and air measured with the heat flux method[J]. *Combustion and Flame*, 2004, 136(3): 261-269.
- [8] WEISS M, ZARZALIS N, SUNTZ R. Experimental study of Markstein number effects on laminar flamelet velocity in turbulent premixed flames[J]. *Combustion and Flame*, 2008, 154(4): 671-691.
- [9] DRISCOLL J F. Turbulent premixed combustion: flamelet structure and its effect on turbulent burning velocities[J]. *Progress in Energy & Combustion Science*, 2008, 34(1): 91-134.
- [10] KOBAYASHI H, SEYAMA K, HAGIWARA H, et al. Burning velocity correlation of methane/air turbulent premixed flames at high pressure and high temperature[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30(1): 827-834.
- [11] BRADLEY D, LAWES M, MANSOUR M S. Correlation of turbulent burning velocities of ethanol-air, measured in a fan-stirred bomb up to 1.2 MPa[J]. *Combustion and Flame*, 2011, 158(1): 123-138.
- [12] ICHIMURA R, HADI K, HASHIMOTO N, et al. Extinction limits of an ammonia/air flame propagating in a turbulent field[J]. *Fuel*, 2019, 246: 178-186.
- [13] 蔡晓, 王金华, 赵浩然, 等. 稀甲烷/氢气预混湍流传播火焰实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2020, 41(2): 514-519.
CAI Xiao, WANG Jinhua, ZHAO Haoran, et al. Experimental research on expanding turbulent flames of lean methane/hydrogen/air mixtures[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2020, 41(2): 514-519. (in Chinese)
- [14] CAI X, WANG J, BIAN Z, et al. Self-similar propagation and turbulent burning velocity of CH₄/H₂/air expanding flames: effect of Lewis number[J]. *Combustion and Flame*, 2020, 212: 1-12.
- [15] 姜延欢, 李国岫, 孙作宇, 等. 湍流强度对CH₄/H₂预混火焰结构特性的影响[J]. *燃烧科学与技术*, 2017, 23(6): 505-510.
JIANG Yanhuan, LI Guoxiu, SUN Zuoyu, et al. Effect of turbulence intensity on structural characteristics of CH₄/H₂ premixed flame[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2017, 23(6): 505-510. (in Chinese)
- [16] 边志坚, 王金华, 赵浩然, 等. 氨/氢气湍流预混火焰传播特性实验研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2020, 26(6): 551-557.
BIAN Zhijian, WANG Jinhua, ZHAO Haoran, et al. Experimental study on turbulent premixed flame propagation characteristics of ammonia/hydrogen mixtures[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2020, 26(6): 551-557. (in Chinese)
- [17] BRADLEY D, HAQ M Z, HICKS R A, et al. Turbulent burning velocity, burned gas distribution, and associated flame surface definition[J]. *Combustion and Flame*, 2003, 133(4): 415-430.
- [18] CHAUDHURI S, WU F, ZHU D, et al. Flame speed and self-similar propagation of expanding turbulent premixed flames[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(4): 1-5.
- [19] KITAGAWA T, NAKAHARA T, MARUYAMA K, et al. Turbulent burning velocity of hydrogen-air premixed propagating flames at elevated pressures[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(20): 5842-5849.
- [20] BREQUIGNY P, HALTER F, MOUNAM-ROUSSELLE C. Lewis number and Markstein length effects on turbulent expanding flames in a spherical vessel[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2016, 73: 33-41.

(编辑: 陈 越)