DOI: 10.11883/1001-1455(2017)05-0863-08

汽油蒸气/空气预混火焰的无拉伸层流燃烧速率*

李阳超,杜 扬,齐 圣,李国庆,王世茂
(后勤工程学院供油系,重庆 401331)

摘要:为了研究汽油蒸气/空气的爆炸特性,介绍了汽油蒸气/空气预混火焰的无拉伸层流燃烧速率。通过实验研究了无拉伸层流燃烧速率,与汽油的主要组分异辛烷和正庚烷与空气的预混火焰层流燃烧速率做了对比,发现汽油蒸气/空气的无拉伸层流燃烧速率小于异辛烷和正庚烷与空气的预混火焰无拉伸层流燃烧速率,但无拉伸层流燃烧速率随当量比的变化规律相同,随着当量比增大,无拉伸层流燃烧速率呈先增大、再减小的变化趋势,最大值在当量比为 1 处取得。

关键词:汽油蒸气;爆燃;预混火焰;超压;无拉伸层流;燃烧速率
中图分类号:O381 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

在石油工业生产、储存、运输和炼制过程中极易产生油料挥发现象,稍有不慎遇明火就会引发油气爆炸,产生极其严重的后果。挥发性很强的汽油极易产生汽油蒸气并与空气混合形成可燃混合气体,并且只需要极小的能量就能引发爆炸事故,常见的碳氢化合物的最小点火能量约为 0.25 mJ[1],危险程度可想而知。所以,针对汽油蒸气/空气混合气体爆炸的研究具有十分重要的工程价值和理论价值。无拉伸层流燃烧速率是评估可燃气体爆炸的重要参数,因为层流燃烧速率包含了关于可燃气体混合物反应活性、扩散性、放热性等基本信息[2],也是确定可燃气体详细化学反应动力学机理的依据[3]。

现在关于汽油/空气预混可燃气体的无拉伸层流燃烧速率研究,主要是对汽车内燃机燃料供给系统,将汽油喷射至气缸内雾化后与空气混合形成的预混可燃气体的无拉伸层流燃烧速率的实验和数值模拟研究[3-5]。然而对于汽油自然蒸发聚积并与空气形成的可燃性混合气体的无拉伸层流燃烧速率的研究却未见报道,现有的几种经典爆炸理论与数值模型,例如:等温模型、绝热模型[6]和湍流燃烧速率模型等都需要可燃气体层流燃烧速率作为关键的计算参数。所以对于汽油蒸气爆炸防控技术来说,研究汽油蒸气/空气预混气体的无拉伸层流燃烧速率对油气爆炸的理论计算和数值模拟研究至关重要。

本文中,主要针对 93 号汽油蒸气/空气混合气体的爆炸特性进行研究,通过实验获得汽油蒸气/空气预混火焰的爆炸超压-时间数据和火焰传播图像,基于渐近分析法和外推法对火焰传播图像进行分析计算得到层流无拉伸燃烧速率,为油气爆炸理论及数值模拟研究提供关键参数。

1 实验系统与方案

本实验系统设计如图 1 所示,为了更好地表现火焰传播速率与超压的对应关系,采用超压测量、数据采集与高速摄影同步进行的实验方法。为了测量火焰传播速率,本实验在带有可视化窗口的立方体容器主实验台架中进行。容器的截面尺寸为 200 mm×200 mm,长为 500 mm。可视化窗采用钢化玻璃,透光度良好。本实验使用高能点火器在爆炸容器中心处通过点火杆点火,其点火能量为 2 J。数据采集与分析系统与压阻式传感器相连来采集爆炸过程中的瞬态超压,压力传感器量程为 0~2 MPa,采样频率设置为 20 kHz,采样长度为 2 ms。汽油蒸气体积分数使用 GXH-1050 型碳氢化合物体积分数测试仪进行测量。主实验台架的端部使用盲板和垫圈进行密封,保证了良好的气密性。为模拟实际储

* **收稿日期**:2016-03-15;**修回日期**:2016-10-18
基金项目:国家自然科学基金项目(51704301);国防科技基金项目(3604031)
重庆市研究生科研创新项目(CYS15235,CYB16128)
第一作者:李阳超(1991—),男,硕士研究生,liyangchao91@163.com。

油过程中挥发产生的汽油蒸气,采用汽油蒸气发生与供给系统快速产生汽油蒸气,该系统通过一台真空泵以恒定的流速向主实验台架中供给气体。其操作流程为:打开球阀 a、b、d 和 e,关闭球阀 c,这时真空泵产生的气流以恒定流速向油瓶中吹气,因为连接球阀 d 的管路在汽油液面以下,气流使液态汽油不断翻滚,加速了液态汽油中轻质组分的挥发,再通过液面以上的管路输送到主实验容器中;当碳氢体积分数测试仪显示达到实验所需体积分数时,关闭球阀 d、e,打开球阀 c,使汽油蒸气在容器中循环一段时间,使得汽油蒸汽与空气混合均匀。当碳氢测试仪显示体积分数不再变化时,关闭真空泵和球阀 a、b,防止汽油蒸气泄漏,碳氢测试仪继续测量 15 s,保证体积分数稳定不变后,即认为容器中汽油蒸气体积分数达到实验要求。实验过程中使用高速摄影仪记录火焰发展过程,所使用的高速摄影仪拍摄速率为 250 s^{-1}。整个实验系统由电脑上的同步控制系统启动,实现点火、测压与高速摄影同步进行。本实验的工况条件:汽油蒸气/空气混合物中汽油蒸气的体积分数为 1.50%、1.65%、1.70%、2.00%、2.48%,初始压力为 0.1 MPa,初始温度为 300 K,点火能量为 2 J,拍摄速率为 250 s^{-1}。每组汽油蒸气体积分数下的实验至少重复 5 次,每组实验数据的标准差在 2%以内,实验具有较高的重复性。

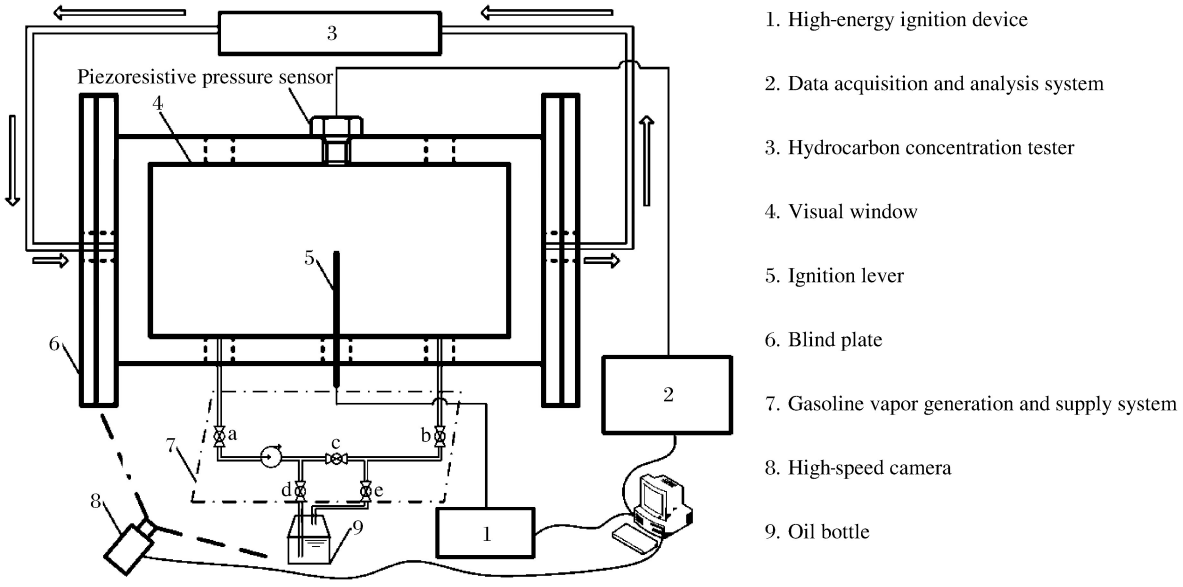

图 1 实验布局示意图

Fig. 1 Schematic of experimental layout

2 无拉伸层流燃烧速率与马克斯坦长度的计算方法

可燃气体的层流燃烧速率和马克斯坦长度的获取通常有以下 3 种方法:方法 1,根据可燃气体爆炸过程中火焰传播速率的测量结果,进行一系列计算得到[4,7-9];方法 2,通过先进的图像后处理技术,如层析图像和 PIV(particle image velocimetry)技术直接测量火焰锋面相对于新鲜未燃气体的传播速率,根据燃烧速率的定义(燃烧速率是火焰前锋相对于前方未燃气体的相对传播速率),测量值即为层流燃烧速率[4-5];方法 3,通过热流法来获取层流燃烧速率[10]。本文中采用方法 1 计算无拉伸层流燃烧速率,该方法也是应用最普遍的计算燃料/空气混合气体无拉伸层流燃烧速率的方法。

首先,通过高速摄影仪得到汽油蒸气爆炸过程中火焰传播过程图像,从图像信息中提取不同时刻的火焰半径 R_{fla},关于火焰半径的提取方法需根据特定工况条件下的火焰传播状态来确定。实验中火焰形态会受到容器形状、拉伸、Lewis 数和可燃气体当量比的影响,所以为了使火焰半径的测量误差尽可能控制在较小的范围内,针对不同的实验状况研究者们采用了不同的提取方法。A. Hayakawa 等[11]利用圆柱形容器,在中心点火条件下研究层流燃烧速率,将纹影图像中与火焰面积相等的圆的半径等效为火焰半径。齐圣[12]在测量容积式密闭空间内火焰传播速率的实验中,鉴于火焰传播过程中出现的水母

形火焰[11]，导致火焰在水平方向与垂直方向上传播速率具有明显的差异，采用取火焰 3 个传播方向上速率平均值作为火焰传播速率。本文中所使用的容器与齐圣[12]的实验容器形状相同，且在实验过程中也出现水母形火焰，所以本文中采用齐圣[12]的火焰半径提取方法，来计算本实验中的拉伸火焰速率 S_N。该方法需测量水平、竖直方向上共 3 个火焰半径值，如图 2 火焰半径提取示意图所示。根据下式：

$$r_{fla}=\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}\alpha R_{fla,i} \tag{1}$$

可以计算出实际火焰半径 r_{fla}，其中 α 为实际距离与高速摄影图像中距离的比值。由此，可以得到球状预混火焰传播过程中的拉伸火焰速率：

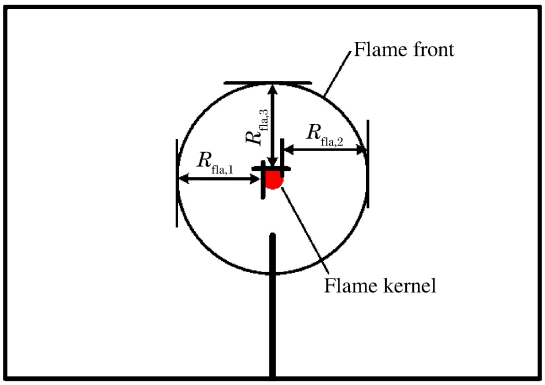

图 2 火焰半径提取示意图

Fig. 2 Illustration of flame radius extracted

$$S_N=\frac{\mathrm{d}r_{fla}}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

式中：t 为时间。

通过拉伸火焰传播速率 S_N来计算无拉伸层流燃烧速率 S_L需要考虑实际火焰面传播过程中变形的影响。理论上，无拉伸层流燃烧速率 S_L是指在无限大平面中层流火焰（一维）的燃烧速率，但是实验中预混火焰的火焰锋面在传播过程中发生弯曲变形，形成了球状火焰，所以拉伸效应对层流燃烧速率的影响必须考虑在内。通过火焰拉伸率 ε 来表征火焰的拉伸程度，其为单位时间、单位面积火焰表面积的变化率。对于以球状传播的火焰，其拉伸率 ε 可以用下式表示：

$$\varepsilon=\frac{1}{A}\frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{4\pi r_{fla}^2}\frac{\mathrm{d}(4\pi r_{fla}^2)}{\mathrm{d}t}=\frac{2}{r_{fla}}\frac{\mathrm{d}r_{fla}}{\mathrm{d}t}=\frac{2}{r_{fla}}S_N \tag{3}$$

式中：$A(=4\pi r_{fla}^2)$为球状火焰锋面的表面积。由于火焰拉伸效应，导致实际球形火焰的燃烧速率和温度都不同于无拉伸火焰[13]。根据渐进分析[5]可知，无拉伸火焰速率 S_S和拉伸火焰速率 S_N之间的差值可以认为与火焰拉伸率 ε 成比例：

$$S_S-S_N=L_b\varepsilon \tag{4}$$

式中：L_b为已燃气体的马克斯坦长度。因此，无拉伸火焰传播速率 S_S 可以由外推法[14]得到，即当 $\varepsilon\to0$（或 $r_{fla}\to\infty$）时，$S_S=S_N$，而 S_N 是可以通过高速摄影图像测量计算得到的。得到 S_S 后，无拉伸层流燃烧速率 S_L 可以由下式计算得到：

$$S_L=\frac{\rho_b}{\rho_u}S_S \tag{5}$$

式中：ρ_u为未燃气体密度，ρ_b 为已燃气体密度。

3　实验结果与分析

3.1　火焰形态

如图 3 所示为汽油蒸气体积分数为 2.00%时的火焰时序图像，从图 3 可以发现在实验中从 32 ms 开始，火焰核心逐渐脱离点火中心向上方运动，从 40 ms 以后开始出现水母形火焰。这是由于浮力作用[11]的缘故，火焰形态发生了显著的变化，火焰传播速率也随之发生变化，导致火焰传播过程中 3 个方向上的火焰传播速率产生差异。火焰核心受浮力作用向上运动，并不断朝水平方向发展，火焰从球状火焰逐渐发展为水母形火焰。为保证无拉伸层流燃烧速率计算的可靠性，需要尽可能避免浮力作用的影响。如图 4 所示，对比汽油蒸气体积分数为 1.48%的汽油蒸气/空气预混火焰传播速率和汽油蒸气体积分数为 1.65%的汽油蒸气/空气预混火焰传播速率可知，汽油蒸气体积分数低的汽油蒸气/空气混合物火焰传播速率相对较慢，容易受浮力作用的干扰，此时通过高速摄影图像得到的火焰传播速率是包含

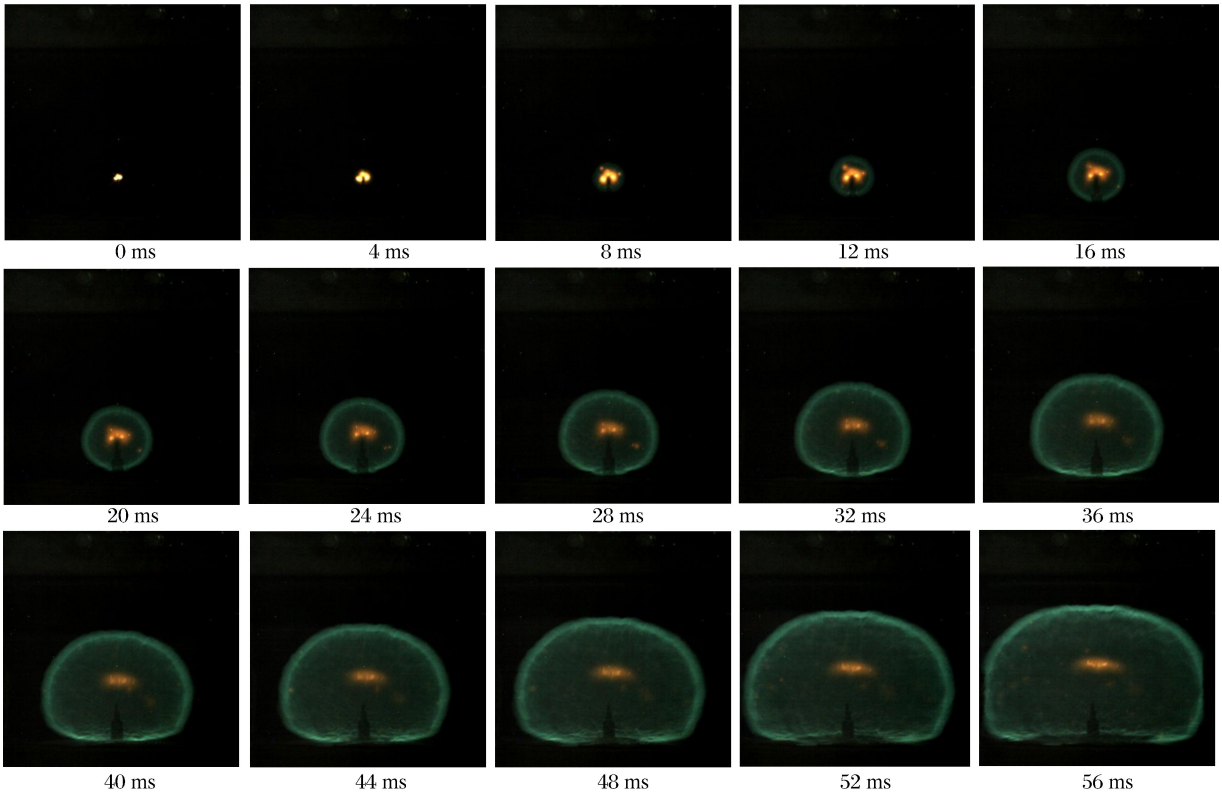

图 3 汽油蒸气体积分数为 2.00%的汽油蒸气/空气预混火焰传播高速摄影图像

Fig. 3 High-speed images of gasoline vapor/air premixed flame propagation at the gasoline vapor volume fraction of 2.00%

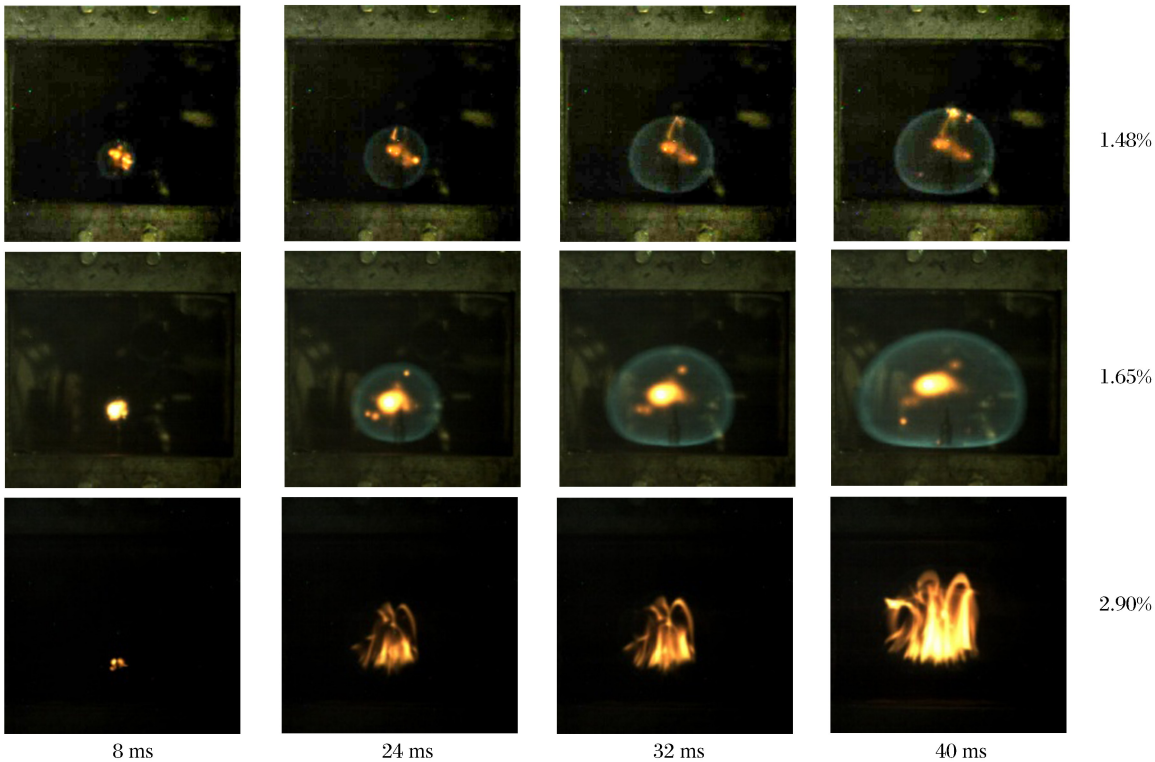

图 4 汽油蒸气体积分数不同的条件下汽油蒸气/空气预混火焰传播高速摄影图像

Fig. 4 High-speed images of gasoline vapor/air premixed flame propagation at different gasoline vapor volume fractions

了浮力推举作用的火焰传播速率，在低体积分数情况下应该使用高速激光层析扫描记录的方法得到火焰锋面与未燃新鲜气体之间的相对速率来得到燃烧速率[5]，所以不能使用本文中所述方法来进行测量[11]。在高体积分数条件下，高速摄影图像显示没有形成明显的球状火焰，如图 4 中汽油蒸气体积分数为2.90%的汽油蒸气/空气预混火焰所示，因此也不能使用本文中所述方法。汽油蒸气/空气混合气体在常温常压条件下的爆炸极限为汽油蒸气体积分数在 0.92%～3.76%之间[3]，本实验中发现汽油蒸气体积分数在 1.50%～2.48%之间，即汽油蒸气体积分数在 1.63～2.70 倍爆炸极限下限 LEL(lower explosion limitation)之间的汽油蒸气/空气混合气体在爆炸初期阶段具有较快的火焰传播速率和明显的球状火焰，相比低体积分数预混油气火焰的传播速率其受到的浮力作用可以忽略，所以适合使用本文中所述方法进行火焰传播速率的提取。因此，本文中选取该区间内 4 种汽油蒸气初始体积分数1.50%、1.65%、1.70%、2.00%下的预混气体火焰作为研究对象。

3.2　无拉伸层流燃烧速率

可燃气体的无拉伸层流燃烧速率与初始压力、点火能和温度等参数有关[15]，针对一般石油工业中油气泄漏事故大多发生在常温常压情况下，汽油蒸气/空气预混气体遇明火发生爆炸事故的案例占大多数，所以本文中研究在常温常压条件下汽油蒸气/空气混合气体的无拉伸层流燃烧速率，实验容器初始状态为常温常压。点火能对初期火焰燃烧速率的影响很大，点火能越高，火焰燃烧速率越快，且升压速率越平稳，火焰核心越易达到稳定状态[15]，但是过高的点火能使得火焰燃烧速率过快而高速摄影仪采集速率有限，导致火焰燃烧速率计算精度降低，当点火能设置为 2 J 时能满足要求。为了减小点火能的影响，使火焰燃烧速率独立于点火能，一些研究者认为当火焰直径大于 6 mm(临界直径)时火焰燃烧速率不受影响[10,15-16]，所以本文中取火焰半径 r_{fla} 大于 6 mm 时的图像进行计算。同时，要保证火焰发展过程中压力尽可能保持在一个大气压附近，所以只有火焰传播初期压力上升幅度不大时的火焰在本文中才具有研究价值。将点火时刻到爆炸超压上升幅度在初始压力 p_i 的 10%范围内的时间间隔定义为爆炸孕育期 τ_{preg}，如图 5 所示为汽油蒸气体积分数为 2.00%的汽油蒸气/空气预混气体爆炸孕育期示意图。从点火时刻0 ms开始，压力经过缓慢上升达到 10%p_i 时的这段时间即为爆炸孕育期 τ_{preg}，而且在 τ_{preg} 内 3 个方向上的火焰半径 $r_{fla,1}$、$r_{fla,2}$、$r_{fla,3}$ 要满足不受壁面作用影响的临界条件：$r_{fla} \leqslant 30\% r_{ves}$，即火焰半径范围要在容器半径 r_{ves} 的 30%以内[17]。在本实验中 4 种汽油蒸气初始体积分数条件下，在 τ_{preg} 内均可以认为容器中压力恒定，且火焰传播过程中不受点火能和壁面作用的影响。

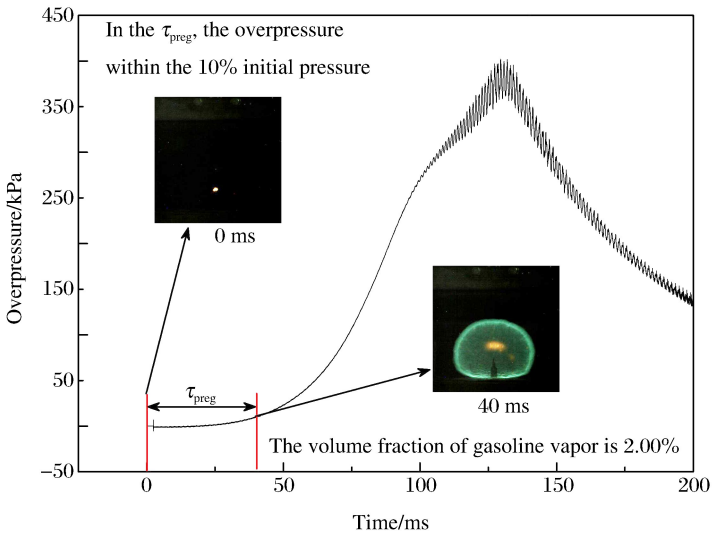

图 5　爆炸孕育期 τ_{preg} 定义示意图

Fig. 5　The definition of explosion pregnant period τ_{preg}

以汽油蒸气初始体积分数为2.00%的汽油蒸气/空气混合气体为例，说明无拉伸层流燃烧速率的计算过程。首先，通过火焰的高速摄影图像(图 3)得到火焰在 τ_{preg} 阶段内在水平、竖直共 3 个方向上的火焰半径，取其平均值得到火焰半径 r_{fla}，通过式(2)得到拉伸火焰传播速率 S_N。进而，发现火焰传播速率 S_N 随火焰拉伸率 ε 变化的规律，如图 6 所示，大致呈线性变化规律，所以根据式(4)进行线性拟合，得到拉伸火焰传播速率 S_N(cm/s)关于火焰拉伸率 ε(s^{-1})的线性函数，如下式所示：

$$S_N = 238.57 - 0.426\varepsilon \tag{6}$$

由上文可知，通过渐进分析可得无拉伸火焰传播速率 S_S 与拉伸火焰传播速率 S_N 的差值与火焰拉伸率 ε 成比例，且比例常数即为已燃气体马克斯坦长度 L_b。对式(6)使用外推法($\varepsilon\to0$)，得到图 6 中纵轴截距即为汽油蒸气初始体积分数为 2.00%时汽油蒸气/空气混合气体的无拉伸火焰传播速率 S_S，为 238.57 cm/s，已燃气体的马克斯坦长度 L_b 为 0.426 cm。然后，通过式(5)得到无拉伸层流燃烧速率 S_L，关于已燃气体与未燃气体密度的比值可由文献[18]中得知，典型的常压烃/氧火焰，燃烧前后气体的密度比约为 7，油气的主要成分为烷烃、芳香烃等轻质组分，且爆燃初期烃分别与空气和氧气预混燃烧的反应速率差别不大，因为空气中的氧气在初期也处于富足状态，所以本文中采用烃/氧火焰常压爆燃前后气体密度比。最后，汽油蒸气/空气预混气体的 S_L 计算结果为 34.08 cm/s。

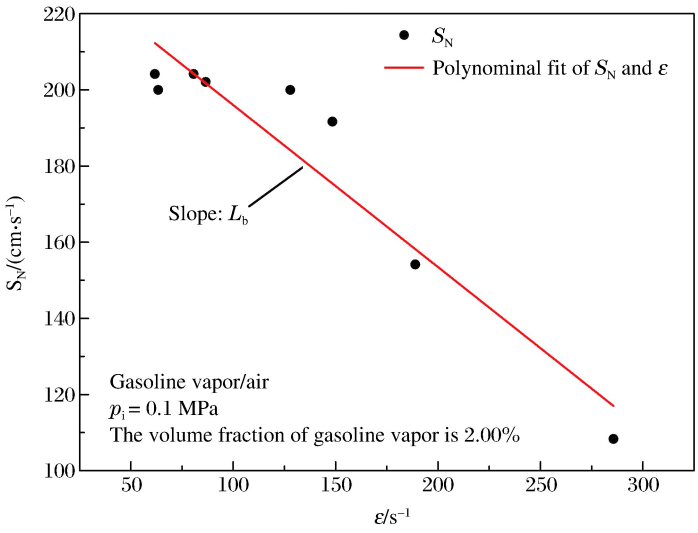

图 6 拉伸火焰速率与火焰拉伸率之间的关系

Fig. 6 Relationship between stretched flame speed and flame stretch rate

由以上方法得到其他几种体积分数下混合可燃气体的无拉伸层流燃烧速率 S_L 和马克斯坦长度 L_b，为便于和其他燃料/空气混合物的 S_L 进行对比，需要将汽油蒸气体积分数换算为当量比 Φ，由于汽油蒸气不同于单一组分可燃气体，如甲烷、氢气等，其化学成分复杂，难以准确确定其化学反应机理和反应组分，根据文献[19]以异辛烷作为汽油蒸气的主要成分，确定了汽油蒸气/空气燃烧反应时的化学当量比 1 在汽油蒸气体积分数 1.65%下取得，通过换算后的当量比 Φ 与无拉伸层流燃烧速率 S_L 之间的对应关系如图 7 所示。

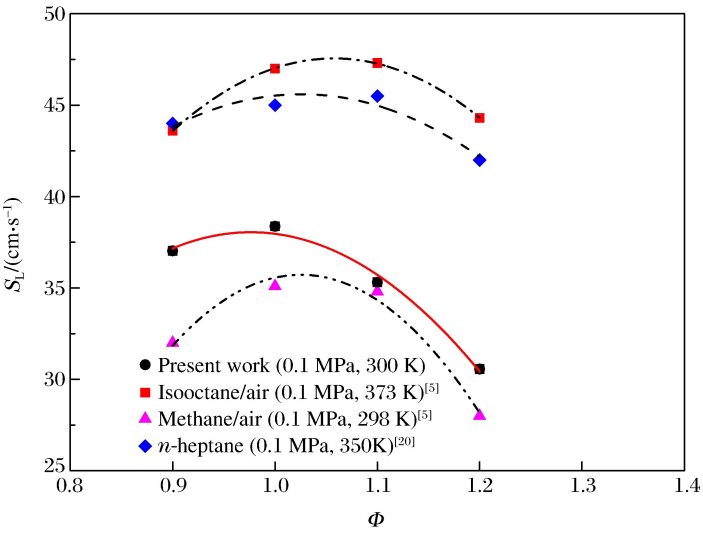

图 7 无拉伸层流燃烧速率随当量比的变化规律

Fig. 7 Unstretched laminar burning velocity varied with equivalence ratio

根据图 7 可知，汽油蒸气/空气预混气体无拉伸层流燃烧速率与文献[5,20]中异辛烷、正庚烷和甲烷与空气的预混气体的无拉伸层流燃烧速率随当量比变化的规律一致，即呈抛物线型变化规律，在当量比为 1 时取得最大值。本文的汽油蒸气由车用 93 号汽油挥发产生，文献[19]中则使用异辛烷代替汽油蒸气的主要成分，但是从无拉伸层流燃烧速率 S_L 来看，汽油蒸气/空气预混气体与异辛烷/空气、正庚烷/空气、甲烷/空气预混气体的燃烧速率具有较大差异，所以不能简单地使用异辛烷或正庚烷与空气的预混火焰无拉伸层流燃烧速率 S_L 代替真实的汽油蒸气/空气预混火焰的 S_L。无拉伸层流燃烧速率是表征可燃气体化学反应剧烈程度、扩散性、放热性的基本参数，所以汽油蒸气与异辛烷、正庚烷、甲烷在化学性质上还存在较大的差异，在研究汽油蒸气/空气预混气体爆炸时不能简单地以异辛烷、正庚烷等

汽油主要成分代替其组分，在研究汽油蒸气/空气预混气体湍流燃烧和汽油蒸气爆炸的等温、绝热反应模型时不能简单地套用异辛烷、正庚烷等燃料的燃烧速率，而应该使用相应的汽油蒸气在特定工况（压力、温度）条件下的燃烧速率，进而得到更符合工程实际的结论。

4　结　论

通过实验与理论分析获得了汽油蒸气初始体积分数为 1.50%、1.65%、1.70%、2.00%时在常温常压下的汽油蒸气/空气混合气体的无拉伸层流燃烧速率，主要结论如下：

（1）采用渐进分析和外推法得到拉伸火焰传播速率与无拉伸火焰传播速率之间的线性关系，进而得到无拉伸层流燃烧速率。为避免浮力作用、点火能及壁面作用的干扰，本文中汽油蒸气/空气预混气体仅适用于汽油蒸气初始体积分数在 1.50%～2.48%，即汽油蒸气体积分数在 1.63～2.70 倍爆炸极限下限之间的无拉伸层流燃烧速率的计算。

（2）层流预混火焰在密闭容器中传播时，容易受到浮力作用的影响，进而形成水母形火焰，导致火焰传播速率也受到影响，尤其在低体积分数时火焰传播速率较慢，火焰传播速率受到浮力作用的影响严重，导致不能使用本文所述方法进行燃烧速率的计算，应该借助于更先进的激光层析摄影技术来测量层流燃烧速率。

（3）汽油蒸气/空气预混火焰无拉伸层流燃烧速率不同于异辛烷、正庚烷等汽油主要组分与空气混合气体的火焰无拉伸层流燃烧速率，但是火焰无拉伸层流燃烧速率随当量比变化的规律与异辛烷、正庚烷和甲烷与空气混合气体的相同，呈现抛物线型变化规律，最大值在当量比为 1 处取得。

参考文献：

[1] 刘文辉，蒋新生，周建忠，等. 不同环境条件油气爆炸极限测试模拟实验系统[J]. 后勤工程学院学报，2013，29(6)：24-25.
Liu Wenhui, Jiang Xinsheng, Zhou Jianzhong, et al. Simulation experimental system for explosion limit measurement of gasolineair mixture under different environmental conditions[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2013,29(6):24-25.

[2] Mannaa O, Mansour M S, Roberts W L, et al. Laminar burning velocities at elevated pressures for gasoline and gasoline surrogates associated with RON[J]. Combustion and Flame, 2015,162(6):2311-2321.

[3] Lipatnikov A N, Shy S S, Li W Y. Experimental assessment of various methods of determination of laminar flame speed in experiments with expanding spherical flames with positive Markstein lengths[J]. Combustion and Flame, 2015,162(7):2840-2854.

[4] Varea E, Modica V, Renou B, et al. Pressure effects on laminar burning velocities and Markstein lengths for Isooctane-Ethanol-Air mixtures[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013,34(1):735-744.

[5] Varea E, Modica V, Vandel A, et al. Measurement of laminar burning velocity and Markstein length relative to fresh gases using a new postprocessing procedure: Application to laminar spherical flames for methane, ethanol and isooctane/air mixtures[J]. Combustion and Flame, 2012,159(2):577-590.

[6] 赵衡阳. 气体与粉尘爆炸原理[M]. 北京：北京理工大学出版社，1995：43.

[7] Ai Yuhua, Zhou Zhen, Chen Zheng, et al. Laminar flame speed and Markstein length of syngas at normal and elevated pressures and temperatures[J]. Fuel, 2014,137:339-345.

[8] Bonhomme A, Selle L, Poinsot T. Curvature and confinement effects for flame speed measurements in laminar spherical and cylindrical flames[J]. Combustion and Flame, 2013,160(7):1208-1214.

[9] Chao J, Lee J H S, Bauwens C R, et al. Laminar burning velocities of various silanes[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015,36:471-477.

[10] Bosschaart K J, de Goey L P H. 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.

[11] Hayakawa A, Goto T, Mimoto R, et al. Laminar burning velocity and Markstein length of ammonia/air premixed

flames at various pressures[J]. Fuel, 2015,159:98-106.
[12] 齐圣.受限空间油气爆炸与细水雾抑制实验与数值仿真研究[D].重庆:后勤工程学院,2014:107.
[13] Clavin P. Dynamic behavior of premixed flame fronts in laminar and turbulent flows[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1985,11(1):1-59.
[14] Kelley A P, Law C K. Nonlinear effects in the extraction of laminar flame speeds from expanding spherical flames [J]. Combustion and Flame, 2009,156(9):1844-1851.
[15] Huang Zuohua, Zhang Yong, Zeng Ke, et al. Measurements of laminar burning velocities for natural gas-hydrogen-air mixtures[J]. Combustion and Flame, 2006,146(1/2):302-311.
[16] Liao S Y, Jiang D M, Gao J, et al. Measurements of Markstein numbers and laminar burning velocities for liquefied petroleum gas-air mixtures[J]. Fuel, 2004,83(10):1281-1288.
[17] Burke M P, Chen Z, Ju Y, et al. Effect of cylindrical confinement on the determination of laminar flame speeds using outwardly propagating flames[J]. Combustion and Flame, 2009,156(4):771-779.
[18] Turns S R. An introduction to combustion: Concepts and applications[M]. 3ed. Boston: McGraw-Hill Higher Education, 2012:218.
[19] Zhang Peili, Du Yang, Wu Songlin, et al. Flame regime estimations of gasoline explosion in a tube[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015,33:304-310.
[20] Smallbone A J, Liu W, Law C K, et al. Experimental and modeling study of laminar flame speed and non-premixed counterflow ignition of *n*-heptane[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009,32(1):1245-1252.

Gasoline vapor/air premixed flame's unstretched laminar burning velocity

Li Yangchao, Du Yang, Qi Sheng, Li Guoqing, Wang Shimao
(*Department of Petroleum Supply Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing* 401311, *China*)

Abstract: In order to characterize the explosion of the gasoline vapor/air mixture, we introduced the unstretched laminar burning velocity of premixed gasoline vapor/air flame to the research of the mixture. The unstretched laminar burning velocity was experimentally studied and compared with those of two mixture gases consisting of such major compositions of gasoline as isooctane and *n*-heptane, respectively. The results show that the unstretched laminar burning velocity of the prepared gasoline vapor/air mixture is lower than those of the isooctane/air mixture gas and the *n*-heptane/air misture gas, but it takes on a similar tendency to change with the equivalence ratio, i.e. the unstretched laminar burning velocity firstly increases and then decreases with the increase of the equivalence ratio, and the maximum value can be obtained at the equivalence ratio of 1.

Keywords: gasoline vapor; deflgration; premixed flame; overpressure; unstretched laminar; burning velocity

(责任编辑 张凌云)