

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513847

大口径两相流单脉冲汇聚激波管研制及性能评估^{*}

白世杰, 王昆, 王明磊, 李世龙, 梁兴雨

(天津大学先进内燃动力全国重点实验室 天津 300350)

摘要:为探究临界或超临界压力条件下,先进发动机内喷雾流动、燃料基础燃烧反应特性等关键参数,研制了一套大口径TSCST试验台。该试验台主体由机械结构和配套气路组成,其创新设计包括:首先,设计了一种具有多扩散通道的新型卸载盘结构,有效调节了激波脉冲二次升压;其次,基于激波动力学理论,构建了具有特殊曲线轮廓的三维汇聚结构,显著提升了反射激波的强度;再次,设计了活塞式气溶胶雾化及进气系统,以实现对气相燃料、低饱和蒸气压、宽馏程、多组分真实液态燃料的进样控制;最后,为降低甚至消除壁面边界层效应,设计了内径为210 mm的大口径驱动段和被驱动段激波管结构,为国内外最大口径化学激波管之一。基于上述创新设计,搭建了两相流单脉冲汇聚激波管试验台,在双隔膜条件下开展了重复性试验,验证了该试验台的激波生成和强化能力。结果表明:该激波管的大口径设计可实现近乎理想的压力曲线,测试最长时间可达14.5 ms;汇聚结构显著提升了激波马赫数(强度),优于常规等径激波管的理论计算值;卸载盘结构有效抑制了二次反射激波,降低脉冲压力近1/4。综上所述,该新型激波管试验台在生成高强度激波、抑制二次反射激波、实现长时测量、低饱和蒸气压燃料基础燃烧特性表征等方面表现出色,为高压喷雾流动和基础燃烧反应动力学的研究提供了重要实验平台。

关键词:单脉冲激波管;气溶胶激波管;汇聚激波管;二次激波卸载盘;高压燃烧特性

中图分类号: TH73 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4030

Development and performance evaluation of a large-diameter single-pulse converging shock tube

Bai Shijie, Wang Kun, Wang Minglei, Li Shilong, Liang Xingyu

(State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: To explore the key parameters of spray flow and fuel combustion characteristics under critical or supercritical pressure conditions in advanced engines, a novel TSCST experimental setup was developed. The main components include a mechanical structure and an integrated gas flow system, featuring several innovative designs: First, a shock dumper with multiple diffusion channels replaces the conventional single-pulse shock tube dump tank, effectively regulating secondary pressure rises caused by additional shock pulses. Second, leveraging shock wave dynamics theory, a three-dimensional converging structure with a specialized curved contour was constructed, substantially enhancing the intensity of the reflected shock wave. Third, an aerosol inlet end cap structure was designed to precisely control the injection of gas-phase fuels as well as low-saturation vapor pressure, high-boiling point, or multi-component complex liquid fuels. Finally, to reduce wall boundary layer effects, the shock tube features a large diameter of 210 mm for both driver and driven sections, making it one of the largest external chemical shock tubes nationwide. Extensive repeatability tests under single- and double-diaphragm conditions have validated the shock wave generation and enhancement capabilities of this setup. Results show that the large-diameter design produces near-ideal pressure profiles lasting up to 14.5 ms. The converging contraction section increases the Mach number of planar shock waves by a factor of 1.6. Additionally, the shock dumpers reduce the pulse pressure of secondary reflected shock waves by over 20% compared to traditional dump tank designs. Overall, this innovative shock tube system exhibits excellent performance

in generating high-intensity shock waves while suppressing additional shock pulse effects, offering a powerful experimental platform for investigating high-pressure spray flow dynamics and fundamental combustion reaction kinetics.

Keywords: single-pulse shock tube; aerosol shock tube; converging shock tube; secondary shock dumper plate; high pressure combustion properties

0 引言

激波管反应器因其能够提供兼具普适性与高效性的超临界试验环境,已广泛应用于多个科学领域^[1-8]。在燃烧化学研究中,激波管能够模拟接近实际航空发动机工况的条件,为航空燃料动力学的研究提供了重要的技术手段^[9-10]。其中,单脉冲激波管通过位于隔膜附近的卸载罐吸收反射激波,确保反应混合物仅承受单次反射激波的加热作用^[11-13]。通过反射稀疏波对反应物进行“冻结”,结合采样诊断技术,可获取研究过程中物质分布的丰富数据,进而支持对各项参数的深入分析^[14-15]。

在实际试验中,单脉冲激波管的压力水平显著低于理论计算值,这主要受初始气体参数的限制及压力容器自身承压能力的影响^[16-17]。驱动段与被驱动段初始压力比(P_4/P_1)的提升受限于膜片强度和管道承压能力的制约。尽管采用氦气等轻质驱动气体能够提高试验性能,但会显著增加试验成本。并且,在内径<10 cm 的小口径激波管中,边界层效应显著增强,进一步影响了试验数据的精确性^[18]。

此外,加热气化的方式能够实现对低沸点、单组分液态燃料的燃烧特性测定,然而由于分馏现象的存在,加热激波管并不适用于高沸点、多组分真实液态燃料^[19];同时,气溶胶激波管的壁面吸附和沉积作用仍然是影响数据精度的主要因素^[20]。因此,亟需研制一种适用于多组分真实液态燃料,能够提升试验压力并有效抑制边界层影响的新型激波管试验台架。

针对上述需求,天津大学先进内燃动力全国重点实验

室研制了一款两相流、单脉冲汇聚激波管试验台(two-phase flow single-pulse converging shock tube, TSCST),可在宽温度和压力范围(500~4 000 K, 0.01~150 atm)内开展空气动力学、流体力学及两相流化学反应动力学研究。TSCST 试验台采用双隔膜结构,确保激波条件具有较高的重复性;全新设计的卸载盘取代传统卸载罐,可实现对反射激波扩散的有效控制;汇聚结构的曲线轮廓基于激波动力学原理进行优化设计,能够有效增强反射激波强度,并维持恒定的压力区间;活塞式气溶胶进气结构采用大孔径、小斜角进气方式,以弱化气溶胶进气阶段的壁面吸附作用,实现对高沸点、低饱和蒸汽压的真实复杂液态燃料基础燃烧特性测定。此外,TSCST 试验台采用模块化设计,可灵活重构以适应多种试验需求及不同分析技术的应用。

1 激波管关键结构研制

1.1 新型卸载盘结构

在单脉冲激波管中,传统的卸载罐与主管道由较小的端口相连,导致激波扩散受到限制,无法有效实现对反射激波的抑制效果,且过去激波管无法实现对入射激波的精确控制。基于上述问题,本研究全新设计了带有多扩散通道的卸载盘结构替代传统卸载罐,以实现对激波管内部波系的精确调控。

卸载盘在不破坏内部流场的前提下,通过改变主管道与外腔体的通道面积以实现对激波管内部波系的调控。如图 1 所示,卸载盘由外法兰、主管道、六角头螺栓、弹簧锁紧垫圈、平垫圈和六角螺母等组件构成。

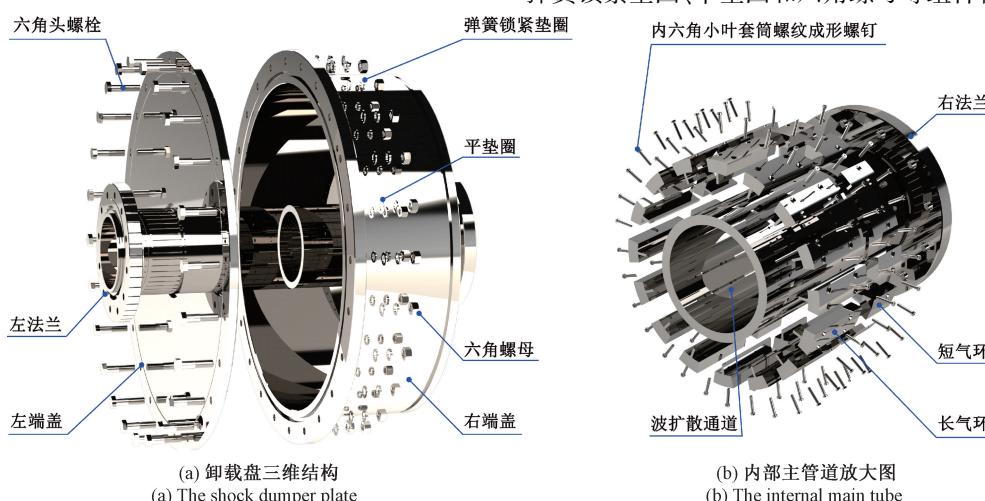
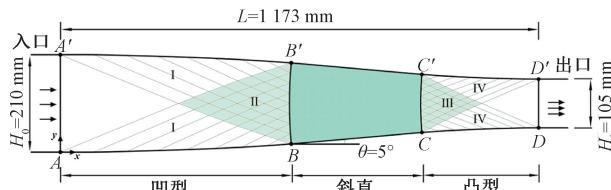


图 1 卸载盘及内部主管道爆炸示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the explosion of the shock dumper and the internal main tube

卸载盘位于双膜段结构附近,通过主管道两侧的法兰与 TSCST 试验台连接,左右端盖有效确保了外部环形腔体的密封性能。主管道上环形分布 16 条波扩散通道,为反射激波从主管道向卸载盘腔室扩散提供了有效通路。内六角叶状螺钉确保气环与主管道的稳固连接,通过改变气环的数量和分布位置,可控制反射激波的扩散程度,从而有效抑制和调控后续激波的再升温效应。

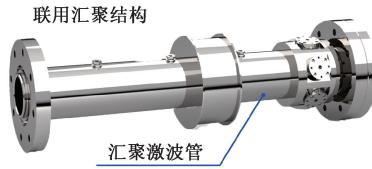
当所有气环安装时,TSCST 试验台的特性与传统激波管相似;而在移除部分或全部气环时,TSCST 试验台则可实现单脉冲模式的运行。气环数量的变化不仅会调节 TSCST 试验台对反射激波的抑制效果,还会改变激波管内部的流动特性,对其波系发展及边界层的演变产生重要影响。因此,通过合理调配卸载盘中长、短气环的数量及位置,可优化管道内部流体与激波的流动特性,以实现 TSCST 试验台在不同试验条件下的测试性能。



(a) 汇聚结构内部曲线轮廓
(a) Internal curve contour of the converging structure



(b) 汇聚结构实物图
(b) Physical diagram of the converging structure



(c) 与汇聚结构联用/不联用的试验区
(c) Test sections for combined /non-combined use with converging structure

图 2 激波汇聚结构及多功能试验区

Fig. 2 Converging structure and multifunctional test sections

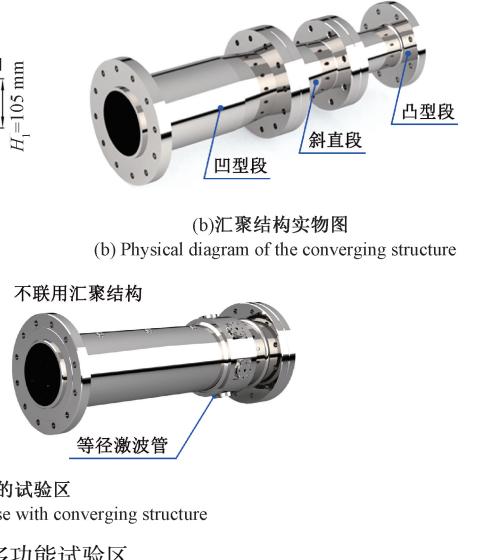
在此前进行了数值模拟工作,结果表明收缩比对激波的增强效果具有关键作用^[21]。较小的收缩比无法实现激波的有效增强,而较大的收缩比则易形成汇聚激波,这会导致反射激波后的恒压区缩短甚至消失。因此,选择 4:1 的横截面收缩比,以确保反射激波波形及其作用后恒压区的形成。

汇聚结构实物图如图 2(b) 所示,该汇聚结构由凹型、斜直和凸型 3 部分构成,通过理论计算确定了近 100 个精确定位点,以便于数控机床的高精度加工。汇聚结构采用三维同步收缩的方式,有效增强了激波强度,同时保持激波进入汇聚结构后的平面形态。

1.2 三维汇聚结构

激波马赫数会随着横截面的变化有所增加,而其内部轮廓是影响激波强度和波形的重要参数。以往采用的斜直线、抛物线等简单曲线能够有效促使汇聚激波的形成,但上述方法并不适用于平面激波的增强及反射激波后恒压区的生成。本研究基于激波动力学原理,构建了二维汇聚曲线轮廓;结合有限元分析方法,进一步约束其特征参数,使之适配三维激波管。该设计显著增强了激波强度,并创新性形成了反射激波后的恒压区,提升了激波管的化学测试性能^[21-22]。

激波汇聚结构及多功能试验区如图 2 所示,其中图 2(a) 为汇聚结构的内部曲线轮廓及三维实物图。基于横截面积与马赫数的关系方程,采用激波特征线的计算方法,以确定汇聚曲线在各阶段的轮廓变化。在前期结构设计阶段,从理论上揭示了倾斜角、取点数和修正因子对内部轮廓形状的耦合效应^[22]。该方法也被用于入射激波与界面相互作用的研究^[23-25]。



管道的内径和内壁面曲线是影响试验区内激波形态分布及其边界层生长的重要因素。如图 2(c) 所示为与汇聚结构联用/不联用的试验区,内径分别为 105 和 210 mm。该试验区侧壁设有 3 个传感器接口,通过测定激波到达各传感器的时间,可以预估实际激波速度。在靠近管道末端的位置设置了 2 或 3 组相对视窗,以便于原位诊断和采样分析。

如图 2(c) 所示,大口径和小口径试验区分别构成了等径激波管和汇聚激波管,便于对比三维汇聚对内部激波及气体流动的影响。小口径试验区结构用于生成较高强度的激波,适宜于高压实验;而大口径试验区结构则延长了测试时间,满足低温试验的需求。

1.3 气溶胶雾化装置

加热激波管通过在低压段或混气罐外壁包覆加热带蒸发液体燃料,适用于高饱和蒸气压燃料试验,但不适合低饱和蒸气压燃料及混合碳氢燃料,因加热时组分易分馏,且只能测定气相燃料燃烧特性,无法反映雾化燃料的真实燃烧情况。斯坦福大学等机构的气溶胶激波管采用超声乳化器和表面吹扫,难以形成均匀两相流或精确控制当量比,且因进气管道直径小、气流速度高,两相流易在弯曲处聚集,影响低压段分布均匀性。本研究采用与拉瓦尔喷管类似的雾化喷嘴实现对液体燃料的定量雾化,基于“大口径、小斜角、等高度”的设计思路,通过增大气流传输面积、减少途中转弯、保证同一水平高度等方式,优化液滴壁面吸附现象,减少试验误差。

如图3(a)所示,雾化喷嘴进气端连接高压载气,出气端连接到预先抽真空的混气罐,通过调节喷嘴进口压力使喉道处的气流达到或接近临界声速,形成稳定的流速和流量,同时液体燃料从侧向喷油孔吸入,利用高速气流的剪切作用将燃料射流雾化。

如图3(b)所示为活塞式气溶胶进气系统,在进行两相混合物试验时,需同时从排气端抽气,以确保混合物在驱动段内形成稳定的连续进气状态,直至管内气溶胶状燃料分布均匀。该设计可实现对高沸点、宽馏程生物质航空燃料、RP-3煤油等复杂燃料体系着火特性数据的测量。

2 两相流单脉冲汇聚激波管试验台搭建

2.1 主体结构

基于上述关键结构,设计并搭建了两相流、单脉冲汇聚激波管试验台。如图4所示,TSCST试验台由驱动段、双膜段、卸载盘、被驱动段、汇聚结构及试验区构成,其主体结构为304不锈钢,部分碳钢材料表面均进行了镀镍

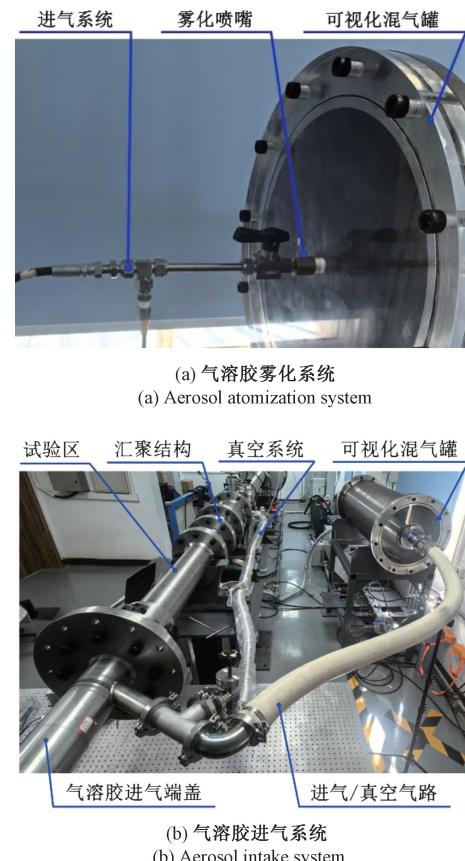


图3 活塞式气溶胶雾化及进气系统

Fig. 3 Piston aerosol atomization and intake system

处理。驱动段长度在3~5 m范围内可调,内径为210 mm,能够根据试验需求灵活调整其长度及内部高压气体的混合比例。双膜段结构负责试验的启动,通过在预设压力下使隔膜破裂,从而有效控制初始破裂压力及试验起始时间。卸载盘由主体管道及其外部的环形腔体构成,取代了传统卸载罐,用于吸收或削弱反射激波。



图4 激波管试验台实物图

Fig. 4 Physical photograph of the single-pulse converging shock tube test setup

被驱动段总长4.4 m,内径210 mm,可确保激波的有效传播及其与试验介质的充分作用。较大的直径与较长的设计有助于维持激波的完整性,同时降低边界层效应的影响。驱动段和被驱动段均采用圆形横截面设计,内

表面粗糙度控制在0.2以下,有效抑制了边界层的生成。汇聚结构则用于提升激波马赫数,同时确保激波的平面性。试验区为反射激波的形成以及传感器和光学诊断设备的安装提供了必要的空间,是进行动态相互作用分析

的关键部件。

2.2 配套系统

如图 5 所示, TSCST 试验台的配套系统包括高压进气系统、性能校准系统、两相流预混系统、参数测量系统、

诊断系统及支撑和导轨系统等。高压进气系统为驱动段提供所需的高压气体, 是激波生成的关键保障。性能校准系统在试验前调节各部件的初始压力, 以评估激波管的实际性能并确保试验数据的准确性。

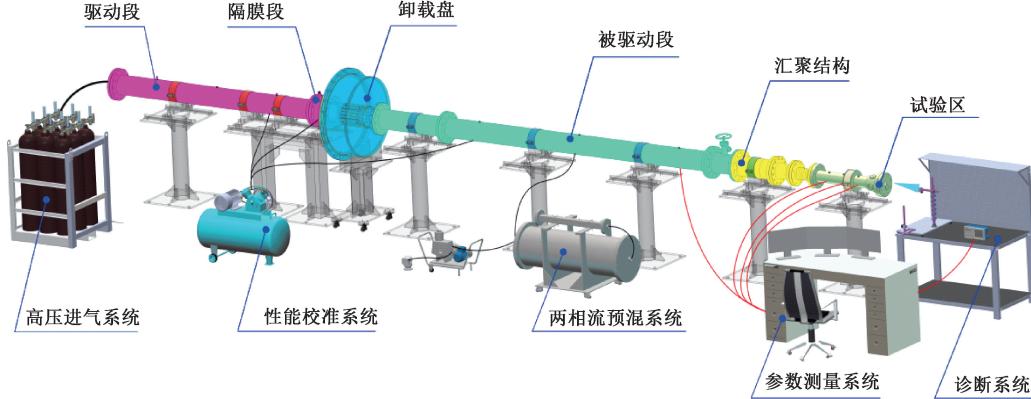


图 5 配套系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the supporting system

两相流预混系统确保初始反应物的混合比和均匀性, 从而提高试验结果的可靠性。参数测量系统对激波动力学试验进行全历程监测, 记录关键试验参数。诊断系统用于评估气体流动、燃烧特性和反应历程, 为两相流燃料的化学反应动力学研究提供技术支持。这些系统与装置主体协同运行, 构成了一套精密设计的试验装置, 用于复杂的动力学及化学反应试验。

整体结构由一系列高度为 1.1 m 的碳钢立柱支撑, 以确保装置的稳定性。每根立柱的上下表面均经过精密加工, 水平面平行度误差控制在 2° 以内。立柱通过滑轨与夹具连接, 上下两段夹具共同实现对激波管的固定。导轨结构的设计便于双隔膜段在每次试验后快速拆卸, 显著提升了隔膜更换的效率。此外, 试验室地面经过高精度的环氧自流平处理, 以确保激波管装置的水平和精准对齐。

3 试验台性能评估

对两相流单脉冲汇聚激波管试验台的性能进行了系统评估。

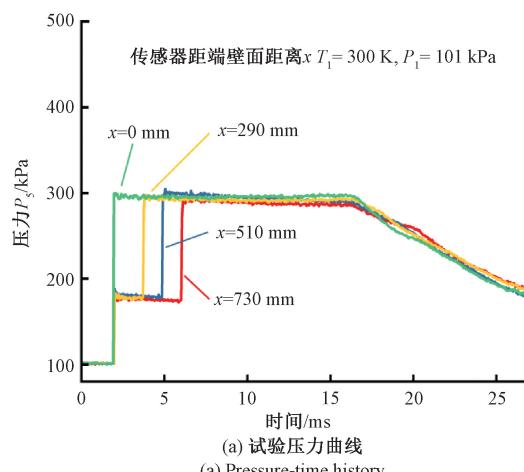
3.1 压力曲线及重复性试验

激波管中反射激波后的区域是研究化学反应动力学的关键, 其压力值及持续时间(即测试时间)为评估激波管化学测试质量的核心参数。此外, 激波管的重复性是评价其可靠性的基本指标。本研究重复性试验包含两部分, 第 1 部分为膜片和初始条件均相同, 进行了 12 次重复性测试, 以评估其稳定性; 第 2 部分为膜片类型变化, 其余初始条件相同, 每一类进行了 2 次及以上重复性测

试, 以评估其可靠性。

试验压力曲线如图 6(a) 所示, 反射激波后的压力区域保持稳定, 测试时间达 14.5 ms, 呈现出近乎理想的压强信号曲线。结果表明, 大口径激波管及其光滑的内表面能够有效减小边界层的影响, TSCST 试验台能够在反射激波后形成一个近乎均质的试验区域。

如图 6(b) 所示, 在初始驱动压强为 350 kPa 的条件下进行了多次双膜重复性试验。结果表明, 采用同一类高韧性膜片时, 12 次重复性试验的压力结果误差不超过 5%, 呈现了较好的稳定性。而采用不同类型的低韧性膜片时, 其压力结果稳定, 表明 TSCST 试验台具备充分的可靠性。此外, 采用高韧性隔膜时, 反射激波后压强约为 365 kPa, 而使用低韧性隔膜时, 压强可达到 410 kPa。这表明, 低韧性隔膜能够生成更强的激波, 主要归因于其较短的破裂时间。



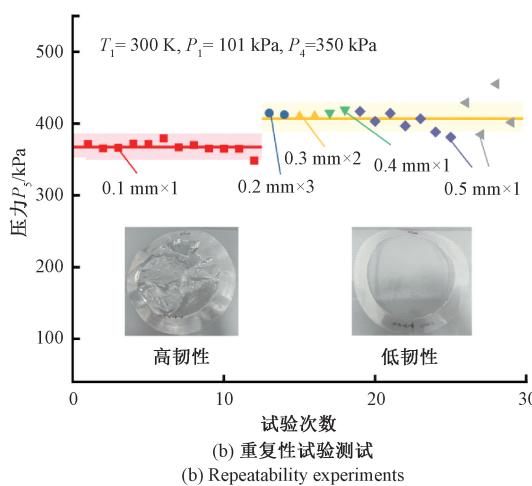


图 6 TSCST 试验台压力曲线和重复性试验

Fig. 6 Pressure-time history and repeatability experiments of the TSCST

图 6(b)中最右侧 4 个左三角数据点与前述数据出现偏离;其差异在于,这些数据点源自驱动段高压作用下的隔膜破裂,而其他试验点则通过双隔膜段的快速减压引发隔膜破裂。破膜流程的变化导致双隔膜试验的重复性出现差异,表明控制隔膜破裂时间和驱动段初始压力对于试验结果可靠性的重要性。综上所述,双隔膜配置在 TSCST 试验台的试验中表现出良好的重复性,满足试验的可靠性需求。

3.2 卸载盘特性分析

反射激波后二次升压会改变激波管内部反应物的温度历程,从而影响数据的精确性。如图 7 所示对比了传统卸载罐和新型卸载盘对压力曲线的影响,以凸显新型卸载盘的优势。

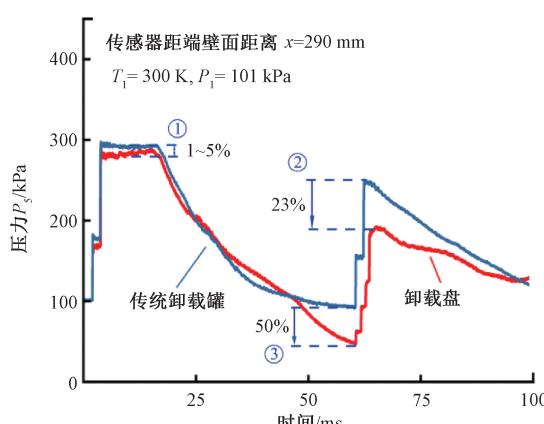


图 7 本卸载盘结构与传统卸载罐的压力曲线比较

Fig. 7 Comparison of pressure curves of shock dumper structure and the traditional dump tank

如图 7 中点①处所示,卸载盘可以实现对反射激波后恒压区在 1% ~ 5% 间的微调,这在后续化学测试中实现等压力下的宽温度范围极为重要。如点②所示,二次反射激波后导致的压力上升从 330 kPa 降至 252 kPa,表明卸载盘对二次反射激波具有显著的抑制作用。如点③所示,最低压力值从 123 kPa 降至 60 kPa,表明卸载盘相较于传统卸载罐,对反射稀疏波的“冻结”作用更加明显,更有助于获取精确的中间产物分布等测试数据。

综上,卸载盘相较于传统卸载罐,不仅能够实现对恒压区压力值的微调,而且可更好的抑制二次反射激波的影响和增强反射稀疏波的“冻结”效果。

3.3 汇聚结构特性分析

激波管生成马赫数的能力是影响其在各类基础研究中实用性的主要因素。图 8 所示为不同压力比下,TSCST 试验台联用汇聚结构(汇聚激波管)、不联用汇聚结构(等径激波管)的试验马赫数和理论计算结果的比较,图 7 中曲线表示在不同压力比下生成的理论马赫数,常作为各类激波管装置性能评估的基准。十字代表等径激波管(I. D. = 210 mm)的试验数据,即不与汇聚结构联用,其整体分布接近理论曲线且位于其下侧,表明等径激波管在接近理想条件下运行,可基本复现预期马赫数。

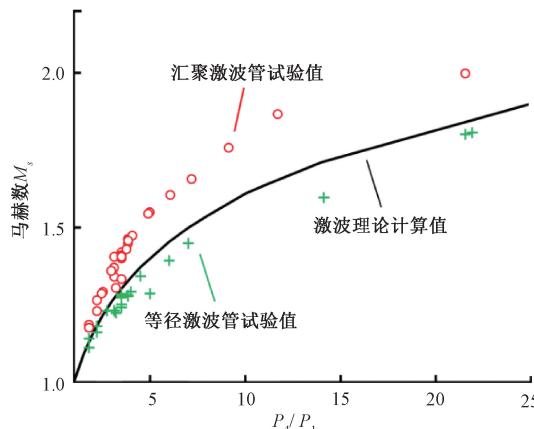
图 8 TSCST 试验台在不同压力比(P_4/P_1)下的马赫数生成能力对比

Fig. 8 Comparison of the energy generated by the Mach number of the TSCST test bench under different pressure ratios (P_4/P_1)

图 8 中圆圈代表汇聚激波管(I. D. = 105 mm)的试验数据,即与汇聚结构联用,其数据点始终位于理论性能曲线之上。相较于等径激波管,汇聚激波管马赫数可实现 1.2 倍的马赫数放大,等效于压力最大可达 1.7 倍。这一趋势表明,汇聚激波管能够产生高于理论模型预测的马赫数,尤其在高压力比条件下更加显著。综上,等径激波管实现的马赫数与理论预测密切吻合,而汇聚激波

管展现出了超越理论预测的潜力,表明了其在高压应用中的优势。

3.4 超临界点火测试

超临界测试在推动清洁能源技术和高效燃烧系统的研发中起着关键作用。如图 9 所示为在 TSCST 试验台上对乙烯/4% 氧气/氩气在 8.3 MPa, 1 300 K 超临界条件下进行的点火测试。反射激波后的几十微秒内出现了明显的点火导致的压力上升信号, 其瞬时点火压力可达 14 MPa, 是目前已知的乙烯在超临界条件下燃烧的最高压力。

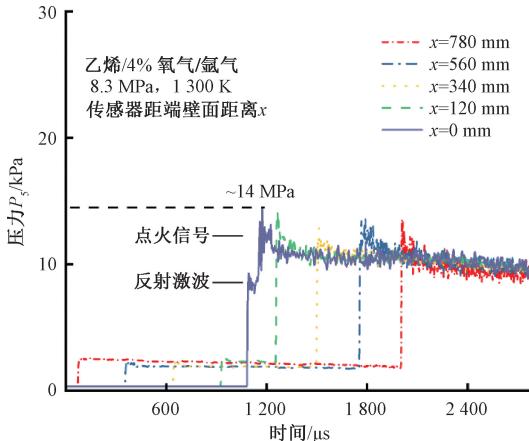


图 9 TSCST 试验台超临界条件下乙烯点火的压力曲线图

Fig. 9 Pressure curve of ethylene ignition under supercritical conditions on the TSCST

综上所述,TSCST 试验台不仅具备实现稳定且可靠的超临界条件的能力,还成功突破了现有试验工况的边界,填补了传统实验设备无法达成的技术空白。该试验台的设计和技术创新,使其能够进行长期且精确的测试,确保了数据的准确性和重复性。借助于强大的测试能力,研究人员可以进一步探讨超临界流体的燃烧特性,优化燃料配方,提升燃烧效率,同时有效减少环境污染。

4 结 论

依托先进内燃动力全国重点实验室,研制了一套大口径两相流单脉冲汇聚激波管试验台。该新型激波管试验台的机械结构包括驱动段、双膜段、卸载盘、被驱动段、汇聚结构、两套试验区和活塞式气溶胶进气结构等,辅助配套系统涵盖高压进气系统、性能校准系统、两相流预混系统、参数测量系统及诊断系统等多个子系统。

1) 创新性设计了环形多扩散通道的新型卸载盘结构,相对传统卸载罐结构,有效抑制了二次反射激波作用 23%,并降低了反射稀疏波后压力近 50%。

2) 创新性构建了具备特殊线型的三维汇聚结构,实现了激波马赫数增强,提升了马赫数近 1.2 倍,反射激波后压力值可放大 1.7 倍。

3) 获得了近乎理想的压力信号曲线,边界层影响几乎完全消除,反射激波后恒压区可实现长达 14.5 ms 的测试时间。

4) 验证了 TSCST 试验台的可靠性及稳定性,并开展了超临界下点火试验测试,多次试验重复性误差不超过 5%,点火试验测试压力可实现 8.3 MPa,点火后峰值压力最高达 14 MPa。

同时,基于“大口径、小斜角、等高度”原理设计的活塞式气溶胶雾化装置和进气结构已完成搭建,下一步将对其开展详细的应用研究。

参 考 文 献

- [1] SINGH D, SHARMA D, SONI S L, et al. A review on feedstocks, production processes, and yield for different generations of biodiesel [J]. Fuel, 2020, 262:116553.
- [2] BALAN G S, RAJ S A. A review on Shock tubes with multitudinous applications [J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 172:104406.
- [3] ZHAI ZH G, ZOU L Y, WU Q, et al. Review of experimental Richtmyer-Meshkov instability in shock tube: From simple to complex [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2018, 232(16):2830-2849.
- [4] 李永生,姚贞建,丁义凡. 激波管反射阶跃压力上升时间高精度估计 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(9):10-18.
LI Y SH, YAO ZH J, DING Y F. High-accuracy estimation of the rise time of shock tube reflection step pressure [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(9):10-18.
- [5] 杨兆欣,顾正华,张文清,等. 基于激波原理的气体动态温度校准装置研究 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5):23-31.
YANG ZH X, GU ZH H, ZHANG W Q, et al. Study on gas dynamic temperature calibration device based on shock wave principle [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5):23-31.
- [6] 孟庆富,涂程旭,杨洪波,等. 微秒级温度传感器动态校准研究进展 [J]. 电子测量技术, 2023, 46(24):54-60.
MENG Q F, TU CH X, YANG H B, et al. Progress on

- dynamic calibration of microsecond temperature sensors [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(24):54-60.
- [7] CHEN J H, KONG D. Study on the propagation law of shock wave pressure in tunnels with different materials [J]. Instrumentation, 2022, 9(4):1-10.
- [8] 刘宇,廉政,崔春生,等.冲击波压力在分叉管道内的传播规律[J].电子测量技术,2022,45(20):8-14.
- LIU Y, LIAN ZH, CUI CH SH, et al. The propagation law of shock wave pressure in bifurcated pipes [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45 (20) : 8-14.
- [9] KONNOV A A, MOHAMMAD A, KISHORE V R, et al. A comprehensive review of measurements and data analysis of laminar burning velocities for various fuel+air mixtures [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2018, 68:197-267.
- [10] HANSON R K, DAVIDSON D F. Recent advances in laser absorption and shock tube methods for studies of combustion chemistry [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2014, 44:103-114.
- [11] TRANTER R S, BREZINSKY K, FULLER D. Design of a high-pressure single pulse shock tube for chemical kinetic investigations [J]. Review of Scientific Instruments, 2001, 72(7):3046-3054.
- [12] SUN W Y, HAMADI A, ABID S, et al. Influences of propylene/propane addition on toluene pyrolysis in a single-pulse shock tube [J]. Combustion and Flame, 2022, 236:111799.
- [13] NAGARAJA S S, LIANG J H, DONG SH J, et al. A hierarchical single-pulse shock tube pyrolysis study of C2-C6 1-alkenes [J]. Combustion and Flame, 2020, 219: 456-466.
- [14] HAN X, MEHTA J M, BREZINSKY K. Temperature approximations in chemical kinetics studies using single pulse shock tubes [J]. Combustion and Flame, 2019, 209:1-12.
- [15] ZENG P, WANG B Y, HE R N, et al. Single-pulse shock tube pyrolysis study of RP-3 jet fuel and kinetic modeling [J]. ACS Omega, 2021, 6 (16) : 11039-11047.
- [16] SELA P, SHU B, AGHSAEE M, et al. A single-pulse shock tube coupled with high-repetition-rate time-of-flight mass spectrometry and gas chromatography for high-temperature gas-phase kinetics studies [J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(10):105103.
- [17] DÜRRSTEIN S H, AGHSAEE M, JERIG L, et al. A shock tube with a high-repetition-rate time-of-flight mass spectrometer for investigations of complex reaction systems [J]. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(8):84103.
- [18] FULLER M E, SKOWRON M, TRANTER R S, et al. A modular, multi-diagnostic, automated shock tube for gas-phase chemistry [J]. Review of Scientific Instruments, 2019, 90(6):064104.
- [19] WANG S X, MAO Y B, RAZA M, et al. Autoignition of diesel/oxygen/nitrogen mixture under elevated temperature in a heated shock tube [J]. Fuel, 2019, 254:115635.
- [20] DAVIDSON D F, HAYLETT D R, HANSON R K. Development of an aerosol shock tube for kinetic studies of low-vapor-pressure fuels [J]. Combustion and Flame, 2008, 155(1/2):108-117.
- [21] 白世杰,梁兴雨,王昆.用于激波增强的变截面激波管设计[J].燃烧科学与技术,2023,29(4):406-413.
- BAI SH J, LIANG X Y, WANG K. Design of a variable cross-section shock tube for shock wave enhancement[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2023,29(4):406-413.
- [22] 白世杰,李世龙,梁兴雨,等.化学激波管中用于激波增强的汇聚曲线[J].工程热物理学报,2025,46(1):326-335.
- BAI SH J, LI SH L, LIANG X Y, et al. Converging curves for shock wave enhancement in a chemical shock tube[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2025, 46(1):326-335.
- [23] LUO X SH, SI T, YANG J M, et al. A cylindrical converging shock tube for shock-interface studies [J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(1):015107.
- [24] JIANG SH SH, CAI W, XIE J, et al. Realization of a shock-tube facility to study the Richtmyer-Meshkov instability driven by a strong shock wave [J]. Review of Scientific Instruments, 2024, 95(8):085114.
- [25] ZHAN D W, LI ZH F, YANG J T, et al. Note: A contraction channel design for planar shock wave enhancement [J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(5):056104.

作者简介



白世杰,2017 年于山西农业大学获学士学位,2020 年于北京建筑大学获硕士学位,2020 年至今于先进内燃动力全国重点实验室(天津大学)就读博士学位,主要研究方向为激波管理论、建模与实验,燃烧反应用力学、光学诊断、气溶胶、激波管设计等。

E-mail:bsj@tju.edu.cn

Bai Shijie received his B. Sc. degree from Shanxi Agricultural University in 2017, received his M. Sc. degree from Beijing University of Civil Engineering and Architecture in 2020. Now he is a Ph. D. student at the State Key Laboratory of Engines (Tianjin University). His main research interests include shock tube theory, modeling and experiments, combustion reaction kinetics, optical diagnostics, aerosols, and shock tube design, etc.



E-mail:kwang5@tju.edu.cn

王昆(通信作者),2007 年于大连理工大学获学士学位,2010 年于浙江大学获硕士学位,2015 年于美国科罗拉多矿业大学获博士学位,现为先进内燃动力全国重点实验室(天津大学)教授、博导,主要研究方向为燃料技术,燃烧反应动力学,新能源转化与高效利用,火焰合成材料等方面的理论与实验基础研究。

Wang Kun (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Dalian University of Technology in 2007, received his M. Sc. degree from Zhejiang University in 2010, received his Ph. D. degree from Colorado School of Mines in the United States in 2015. Now he is a professor at State Key Laboratory of Engines (Tianjin University). His main research interests include theoretical and experimental studies in the fields of fuel technology, combustion reaction kinetics, new energy conversion and efficient utilization, and the flame synthesis of nanomaterials.