

烧蚀后的C-SiC隔离段内流场精细测量试验^{*}

丛 凯¹, 曹学斌², 满延进², 朱守梅²

(1. 海装驻北京地区第三军事代表室, 北京 100074;

2. 北京动力机械研究所 激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 100074)

摘 要: 为了获得极度粗糙内壁面对激波串流动特性的影响规律, 通过基于纳米粒子示踪的平面激光散射技术和高频动态压力测量技术测量了 Ma_2 来流下烧蚀后的C-SiC隔离段中激波串流场结构, 获得了激波串初始激波形态、激波后附面层发展形态以及激波串动态特性。结果表明, 烧蚀后的C-SiC隔离段中激波串结构与光滑不锈钢隔离段相似。但是极度粗糙的内壁面深刻影响了近壁区流动, 附面层增厚效应非常明显。前者激波串内的附面层比后者厚约50%, 前者激波分叉点比后者更接近唇口约30%。极度粗糙的内壁面也提高了附面层的分形维数, 加剧了拟序结构的破碎程度。烧蚀后的C-SiC隔离段中附面层的分形维数在1.548~1.649, 比光滑不锈钢隔离段高6.7%~8.9%。烧蚀后的C-SiC隔离段极度粗糙内壁面对激波串振荡频率几乎没有影响。激波串前传过程中的振荡频率约20Hz。

关键词: 隔离段; 粗糙度; 激波串; 流场; 复合材料; 烧蚀; 附面层

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2020) 10-2180-10

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 190813

Fine Measurement Experiment of Internal Flow Field in Ablated C-SiC Isolator

CONG Kai¹, CAO Xue-bin², MAN Yan-jin², ZHU Shou-mei²

(1. Beijing Bureau of Naval General Armaments Department, Beijing 100074, China;

2. State Key Laboratory of Laser Propulsion and Application, Beijing Power Machinery Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: In order to obtain the influence rule of the extremely rough inner wall on the flow characteristics of the shock train, the flow structure of the shock train in the ablated C-SiC isolator under Mach number 2 flow was measured by nanoparticle-tracer planar laser scattering technology and dynamic pressure measurement technology, the initial shock wave shape of the shock train, the development pattern of the boundary layer after shock wave and dynamic characteristics of the shock train were obtained. The results show that the flow structure of the shock train in the ablated C-SiC isolator is similar to the isolator with stainless steel materials. But the extremely rough inner wall profoundly affects the flow in the near wall area, and the thickening effect of the boundary layer is very obvious. The former's boundary layer in the shock train is about 50% thicker than the latter, and the former's shock bifurcation point is 30% closer to the lip than the latter. The extremely rough inner wall also increases the fractal dimension of the boundary layer, and exacerbates the fragmentation of the pseudo-sequence structure. The fractal dimension of the boundary layer in the ablated C-SiC isolator is 1.548~1.649, and is

^{*} 收稿日期: 2019-11-25; 修订日期: 2020-02-26。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (11502262)。

作者简介: 丛 凯, 硕士, 助理工程师, 研究领域为吸气式发动机气动热力学。E-mail: 464979589@qq.com

通讯作者: 曹学斌, 博士, 高级工程师, 研究领域为内流气体动力学。E-mail: xuebincao@126.com

引用格式: 丛 凯, 曹学斌, 满延进, 等. 烧蚀后的C-SiC隔离段内流场精细测量试验[J]. 推进技术, 2020, 41(10):2180-2189. (CONG Kai, CAO Xue-bin, MAN Yan-jin, et al. Fine Measurement Experiment of Internal Flow Field in Ablated C-SiC Isolator[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(10):2180-2189.)

6.7%~8.9% higher than that of the stainless steel isolator. Extremely rough walls of the ablated C-SiC isolator have almost no effect on the oscillation frequency of the shock train. The oscillation frequency is about 20Hz when the shock train travels forward.

Key words: Isolator; Roughness; Shock train; Flow field; Composite material; Ablation; Boundary layer

1 引言

长时间飞行时,隔离段既要承受高焓气流气动加热,又要承受下游燃烧室的高热量释放,因此隔离段内壁面存在比较严重的烧蚀状况,烧蚀后内壁面变得凹凸不平、非常粗糙。针对这种极度粗糙情况,国内研究人员^[1]开展了C-SiC隔离段直连性能试验,结果表明烧蚀后的C-SiC隔离段的耐反压能力大幅下降。与之对比,砂纸级粗糙度的隔离段的耐反压能力介于光滑不锈钢和烧蚀后的C-SiC隔离段之间^[1-2]。烧蚀后的C-SiC内表面不平度一般是砂纸级粗糙度的4倍以上,因此对激波串的流动特性的影响更大,也很难用常规的砂纸级粗糙度的影响规律描述。隔离段的耐反压能力是衡量隔离段性能的最重要指标。烧蚀后的C-SiC隔离段耐反压能力大幅下降对发动机的稳定工作带来很大的隐患,也制约着发动机性能的提升,因此需要更加清晰地认知烧蚀后的C-SiC隔离段中激波串流动特性,为工程应用提供基础技术支撑。

从国内外研究情况看,试验研究一直是隔离段研究的主要手段。最早的隔离段试验主要用于激波串壁面压升规律研究。1973年,Waltrup等^[3]通过大量实验数据拟合,获得圆形隔离段激波串长度公式(Waltrup公式)。由于有很强的工程应用价值,Waltrup公式被广泛用于隔离段设计。此后,研究人员继续沿着这个方法拓展了Waltrup公式的适应性,比如矩形^[4]和弯曲隔离段^[5]内激波串长度预测,非均匀流动^[6]、气动加热^[7]和壁面严重烧蚀^[8]等因素对激波串

长度影响等。这方面的试验测量方式主要为壁面稳态压力测量,通过压力数据分析激波串流动特性。除了稳态特性外,研究人员采用动态压力测量方式获得激波串振荡特性,获得了激波串自激振荡频率特征以及阐述了激波串自激振荡机理^[9-11],在此基础上,通过模拟低频的振荡反压获得了激波串受迫振荡特征及机理^[12-13],丰富了激波串非定常特征的认识。随着非接触激光测量技术的普及,很多研究人员将其应用于隔离段内激波串流动现象的研究。1990年,Carroll等^[14]用激光多普勒测速技术测量了矩形隔离段对称面的马赫数分布,获得了矩形隔离段内典型的激波串结构。而后粒子图像测速技术、基于纳米示踪的平面激光散射技术等也应用于矩形隔离段内激波串研究^[15-18],获得了激波串前传过程中激波串流动特征,发现了“激波切换”现象,捕捉了激波串精细结构等。可见,不同类型的试验具有很好的互补性,可以从不同方向揭露激波串流动特征。对于烧蚀后的C-SiC隔离段而言,前期大量的稳态压力测量试验仅获得了隔离段稳态特性,烧蚀后极度粗糙的隔离段内壁面如何影响激波串与附面层相互作用?激波串的动态特性变化是否明显?这些问题需要通过隔离段精细测量试验来了解。通过本文精细测量试验获得烧蚀后的C-SiC隔离段内部激波串流动形态、附面层发展和振荡特性等,加深极度粗糙内壁面对激波串影响规律的认识。

2 试验模型及测试系统

烧蚀后的C-SiC隔离段风洞试验在图1(a)所示

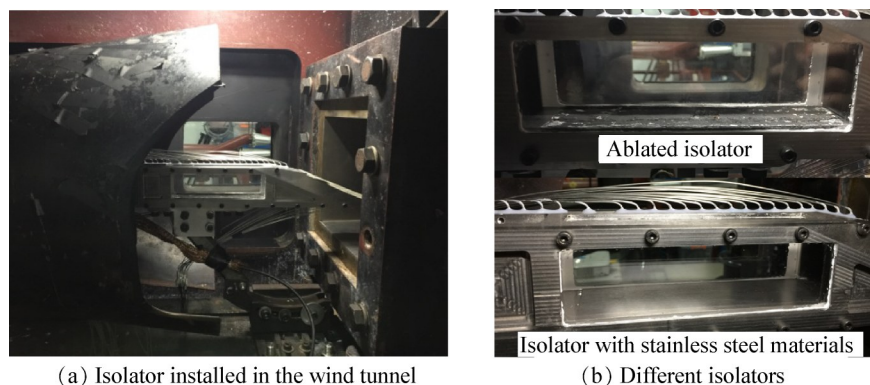


Fig. 1 Experimental model photo

的试验台开展。试验台喷管出口 Ma_2 , 来流总压 102.610 kPa, 来流总温 283 K。试验模型包含压缩斜楔、光学玻璃、可更换嵌入块、侧板、唇口板、底板和尾锥等。斜楔角度为 4° , 隔离段为等直构型, 长 200 mm, 宽 40 mm, 高 40 mm。唇口板一侧和左右两侧为光学观测窗口, 压缩面一侧底部嵌入块为可更换件, 分别为烧蚀后的 C-SiC 复合材料嵌入块和光滑不锈钢嵌入块。C-SiC 复合材料的高温烧蚀深度随着时间非线性渐进, 本文的不平度是发动机典型工作时间内各个时刻不平度的时间积分结果。按照不平度测量方法^[1]测得不平度为 0.5 mm, 不锈钢嵌入块表面粗糙度为 $6.3\mu\text{m}$, 前者为后者的 79.4 倍, 如图 1(b) 所示。 Ma_2 自由来流经单楔斜激波和唇口激波压缩后进入隔离段的主流 Ma 降低为 1.7, 如图 2, 图 3 所示。

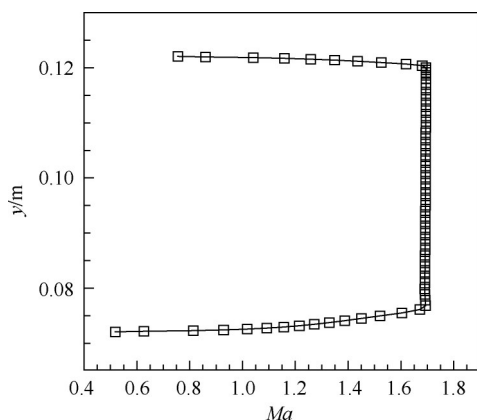


Fig. 2 Mach number distribution at the entrance of the isolator

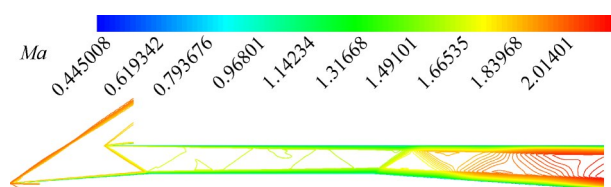


Fig. 3 Mach number isolines on the symmetry plane

NPLS (Nanoparticle-tracer planar laser scattering) 技术是一种基于纳米粒子示踪的平面激光散射精细

测试技术, 前期研究^[19-22]表明, NPLS 测量技术能够准确反映超声速流场中的斜激波、分离、附面层、滑移等复杂结构。本文采用的 NPLS 系统包括光源系统、成像系统、存储、控制系统以及纳米粒子发生器等。NPLS 测量系统的激光片光位置如图 4 所示, 包含中心对称面 (图 4 中截面 1)、偏置中心 5 mm 截面 (图 4 中截面 2), 偏置中心 8 mm 截面 (图 4 中截面 3)。动态压力传感器测点布局如图 5 所示。在唇口板布置了 23 个测点, 其中 7, 10, 13, 16, 18 和 21 号测点为动态压力测点, 其余为稳态压力测点。由于唇口板中心位置布置光学玻璃, 因此测点整体偏置, 距离侧壁 3 mm。动态压力传感器量程 $-0.1\text{MPa} \sim 0.1\text{MPa}$, 精度 0.05%, 采集频率 20 kHz。

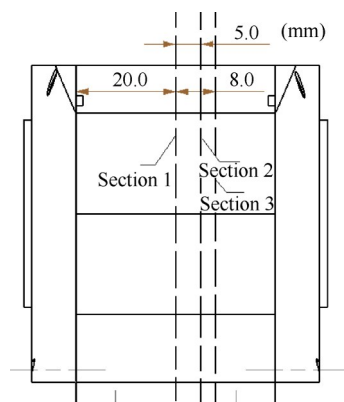


Fig. 4 Measuring section

3 试验结果分析

3.1 激波串流动分析

图 6 为烧蚀后的 C-SiC 隔离段内部流场 NPLS 测量结果, 图 7 与图 8 为光滑不锈钢隔离段内部流场 NPLS 测量结果, 图中流场方向从右至左。从测量结果看, 烧蚀后的 C-SiC 隔离段激波串形态与光滑不锈钢隔离段基本相同, 都是分叉激波, 只是 C-SiC 隔离段激波分叉点更偏向唇口。典型的初始激波结构包含分叉的前后腿、马赫杆、分离以及马赫杆后的滑移

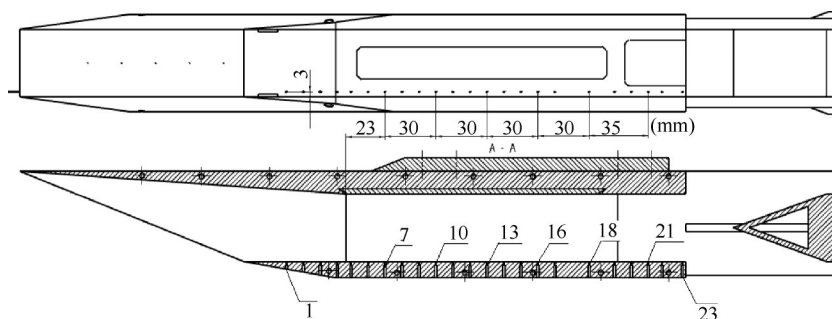
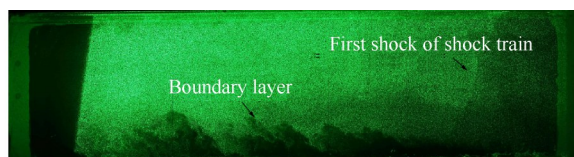


Fig. 5 Dynamic pressure sensor layout

线。从照片可以看出,激波与下壁面的附面层相互作用非常明显,初始激波前后腿处有大范围分离,分离造成了附面层急剧增长,湍流附面层的卷涡结构和湍流脉动非常明显,尾部附面层厚度超过主流中心线高度的一半。整个拍摄区域内,下壁面附面层的厚度明显厚于上壁面,而且上壁面的分离流范围很小。这是因为上壁面附面层由唇口发展而来,附面层相对薄,而下壁面附面层由进气道压缩斜楔的前缘发展而来,附面层发展的距离比上壁面长很多,进入隔离段的附面层更厚。总体来看,烧蚀后的 C-SiC 隔离段的激波串结构、分离的形态和附面层发展情况与光滑不锈钢隔离段基本类似,只是烧蚀后的 C-SiC 隔离段内的分叉激波诱导分离范围更大,附面层发展得更厚。在试验的不平度条件下,内表面粗糙程度的变化(比较大范围的凹凸不平)不会根本上改变激波串结构,不过加剧了附面层发展与分离程度。对照图 9,图 10 所示的纹影结果,可以看出初始激波也为分叉激波,且分叉点偏向唇口,与 NPLS 测量结果基本一致,不过由于纹影为空间积分的结果,因此测量结果显示了更多的斜激波(外部干扰斜激波)。

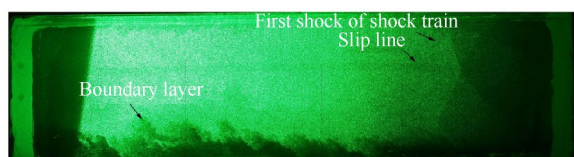
从 NPLS 观测的附面层形态看,附面层有很强的涡流特征,很难用传统的几何方法表征,但是为了横



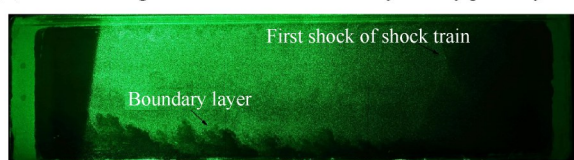
(a) F1-symmetry plane



(b) F2-measuring section deviated from the symmetry plane by 5mm

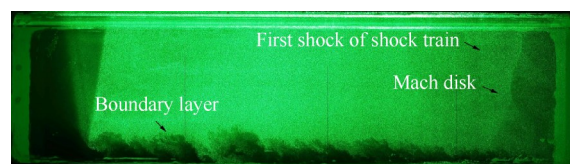


(c) F3-measuring section deviated from the symmetry plane by 5mm

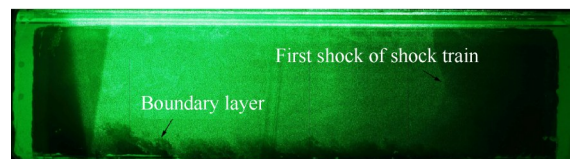


(d) F4-measuring section deviated from the symmetry plane by 8mm

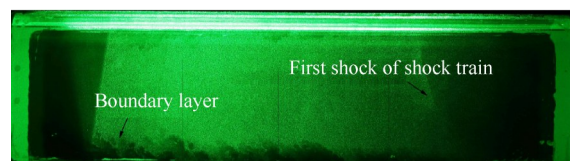
Fig. 6 NPLS images of the ablated isolator's flow field (flow field direction from right to left, $p_b/p_m=3.40$)



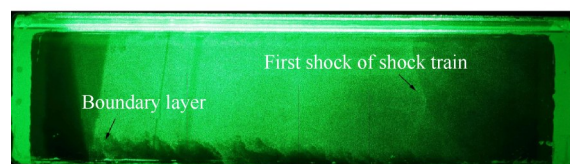
(a) N1-symmetry plane ($p_b/p_m=3.69$)



(b) N2-measuring section deviated from the symmetry plane by 5mm ($p_b/p_m=3.60$)

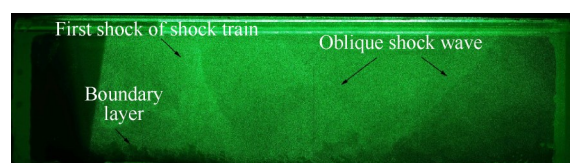


(c) N3-measuring section deviated from the symmetry plane by 8mm ($p_b/p_m=3.60$)

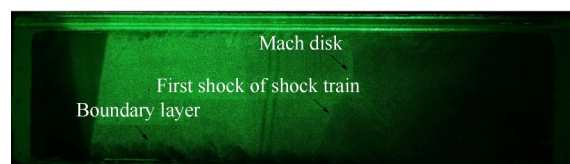


(d) N4-measuring section deviated from the symmetry plane by 8mm ($p_b/p_m=3.60$)

Fig. 7 NPLS images of the flow field of the isolator with stainless steel materials (flow field direction from right to left)



(a) Symmetry plane ($p_b/p_m=3.12$)



(b) Measuring section deviated from the symmetry plane by 5mm ($p_b/p_m=3.40$)

Fig. 8 NPLS images of the flow field of the isolator with stainless steel materials under different pressure (flow field direction from right to left)

向对比烧蚀后的 C-SiC 隔离段与光滑不锈钢隔离段内附面层发展情况,在隔离段不同位置测出当地的附面层厚度,进行横向对比,以此分析烧蚀后的 C-SiC 粗糙表面如何影响附面层的发展,需要说明的是这样测量的附面层厚度为瞬时厚度。表 1 为 NPLS 测

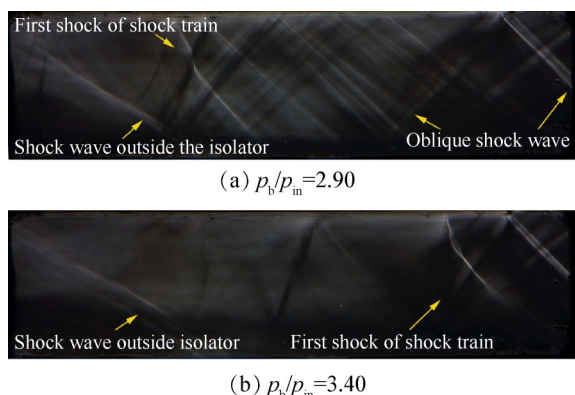


Fig. 9 Schlieren picture of the ablated C-SiC isolator (flow field direction from right to left)

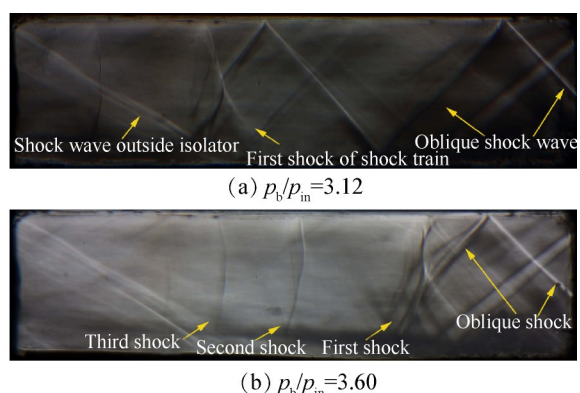


Fig. 10 Schlieren picture of the isolator with stainless steel materials (flow field direction from right to left)

量的烧蚀后 C-SiC 隔离段和不锈钢隔离段附面层厚度及激波分叉点高度。表中 p_b/p_m 为隔离段反压与来流静压之比, $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 分别为图 6, 图 7 中第一、二、三道黑线处下壁面附面层厚度(图中从左往右数), η_1, η_2, η_3 为相应的附面层厚度与隔离段高度之比, h 为靠近下壁面的激波分叉点高度, ε 为靠近下壁面的激波分叉点高度占隔离段高度的百分比, 具体如图 11 所示。需要说明的是, 表中数据的计算方法为: 根据灰度阈值和图像像素大小, 获得图中黑线所在位置的附面层图像高度和分叉点的图像高度, 再换算成实际附面层瞬时厚度和激波分叉点高度。为了统一对比附面层厚度和激波分叉点高度, 选用激波串初始激波接近喉道的 NPLS 测量结果, 在图 6, 图 7 中为激波串初始激波靠近右侧玻璃边缘状态。从测量结果看, 烧蚀后的 C-SiC 隔离段附面层厚度普遍厚于光滑不锈钢隔离段, 比如第一道黑线处的附面层, 烧蚀后 C-SiC 隔离段附面层占比在 24% 以上, 而不锈钢隔离段附面层最大占比仅 22%, 第二道黑线附面层也是如此, C-SiC 隔离段附面层占比在 16% 以上, 但是光滑隔离段附面层最大占比仅 15%, 第三道黑线也是如

此。为了对比沿流向的附面层厚度, 将不同截面的同一黑线处的瞬时附面层厚度进行算术平均, 发现第一道黑线处的 C-SiC 隔离段平均附面层厚度占比 29.9%, 不锈钢隔离段平均附面层厚度占比 19.8%, C-SiC 隔离段比不锈钢隔离段厚了 51.0%; 第二道黑线处的 C-SiC 隔离段平均附面层厚度占比 21.1%, 不锈钢隔离段平均附面层厚度占比 14.0%, C-SiC 隔离段的平均附面层厚度厚了 50.7%; 第三道黑线处的 C-SiC 隔离段平均附面层厚度占比 13.75%, 不锈钢隔离段平均附面层厚度占比 9.35%, C-SiC 隔离段的平均附面层厚度厚了 47.1%。可见烧蚀后 C-SiC 隔离段的表面不平度过大导致附面层沿程增厚了约 50%, 增厚的附面层进而加深了激波与附面层相互作用, 分叉激波诱导的分离范围增大, 影响了激波串初始激波分叉点的位置, 导致分叉点偏向唇口的程度更严重。从表 1 可知, 不同测量截面的烧蚀后 C-SiC 隔离段算术平均处理后激波分叉点高度占比为 65.58%, 偏向唇口 15.58%, 光滑隔离段算术平均处理后激波分叉点高度占比 50.53%, 偏向唇口 0.53%, 可见烧蚀后的 C-SiC 隔离段激波分叉点偏向唇口程度更严重, 比光滑隔离段偏高 29.8%。从这些数据可以获得烧蚀后 C-SiC 隔离段性能下降的本质原因, 即烧蚀后 C-SiC 复合材料表面不平度太大, 导致附面层增厚非常明显, 激波附面层相互作用程度加深, 动量损失厚度增大, 分离区变大, 初始激波的偏置程度增大, 压升起始位置提前, 耐反压能力下降。引起附面层厚度大幅增大的主要原因在于烧蚀后的内壁面非常粗糙, 其表面摩擦系数大幅增大(摩擦系数与不平度成对数正比关系)。从目前的试验结果可知隔离段内壁面不平度不小于 0.5mm 时, 附面层沿程增厚效应非常明显, 达到 50% 以上。这些规律可以用于解释文献[1]中烧蚀后 C-SiC 隔离段性能大幅下降的原因(不平度约 1.82mm)。因此, 在设计 C-SiC 复合材料隔离段时, 需要考虑烧蚀导致激波串内附面层增厚的情况, 必须在耐反压能力上留余量。对于类似的烧蚀后 C-SiC 隔离段或者其他原因导致隔离段内壁面极度粗糙情况, 可以推广此规律: 较高的内壁面不平度确实影响了激波串内附面层的发展, 相对光滑壁面而言, 附面层增厚明显, 加剧了激波/附面层相互作用程度。

上述分析是从传统的附面层厚度几何度量方法展开的, 在上述隔离段流场中, 由于存在激波串与附面层相互作用的复杂流动结构, 附面层与主流的分界面曲线极不规则且非常复杂, 这使得传统的几何

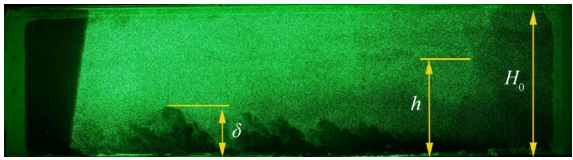


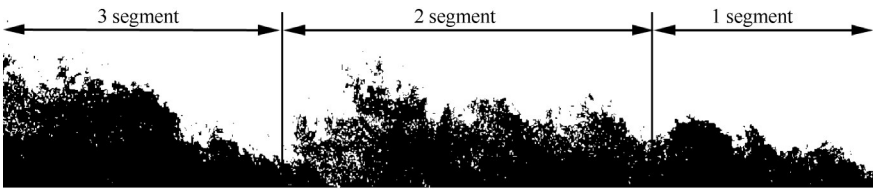
Fig. 11 Schematic diagram of δ, h and H_0

度量方法很难完整地描述该附面层,而分形分析非常适合用于描述复杂的附面层,分形维数可以很好地度量一条不规则曲线的破碎程度。本文采用盒维数方法^[23]确定激波串区域中的附面层分形维数。为了计算附面层的分形维数,利用阈值处理方法单独提取附面层,选定图 6(a),图 7(a)所示的激波串接近隔离段入口时工况。图 12 分别给出了烧蚀后的 C-SiC 隔离段和光滑不锈钢隔离段中激波串区域内的附面层 NPLS 图像,大小为 1027 pixel×346 pixel,图像的分辨率为 0.073 mm/pixel,与相关研究对比^[24-25],可以认为本次试验图像满足湍流分形度量的空间分辨率要求。图 13 分别为烧蚀后的 C-SiC 隔离段和光滑不锈钢隔离段中附面层区域采用盒维数法得到的分形维数计算结果,其中,横坐标为计算尺码的负

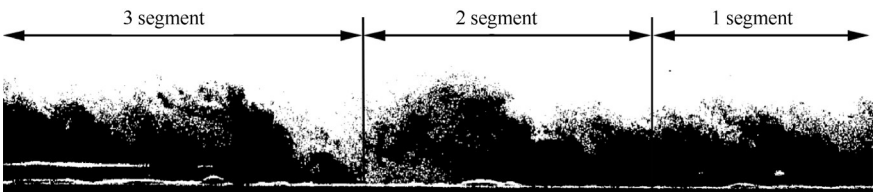
对数 $-\lg r$,纵坐标为对应的盒子数对数 $\lg N$ 。从图 13(a)可以看出,在双对数坐标系下,计算尺码负对数与盒子数的分布可以近似拟合为一条直线,直线的斜率就是这一区域附面层的平均分形维数。在计算分形维数的空间分布时,将流场区域沿流向划分为 3 个区域进行分段计算。烧蚀后的 C-SiC 隔离段中激波串区域的附面层在图像最右侧区域的分形维数为 1.548,与文献[26]得出的湍流附面层的平均分形维数 1.36 对比可知,此时附面层已经完全发展为湍流,附面层与主流的分界线非常不规则,而且拟序结构遭到破坏,随着流动向下游发展,附面层受到逆压梯度的影响逐渐增大,分离区外部的拟序结构逐渐破碎,边界曲线的不规则程度逐渐增加,分形维数不断上升,2 段区域的分形维数为 1.623,3 段区域的分形维数为 1.649。从图 13(b)可以看出,光滑不锈钢隔离段中激波串区域的附面层在图像最右侧区域的分形维数也达到 1.451,大幅超过文献[26]得出的湍流附面层的平均分形维数,因此光滑不锈钢隔离段内的附面层也已经完全发展为湍流,随着流动向下游发展,逆压梯度逐渐增大,分离区逐渐增大,外部的

Table 1 Measurement results of boundary layer thickness and the height of the shock bifurcation point

Isolator	Measuring section	p_b/p_{in}	δ_1/mm	$\eta_1/\%$	δ_2/mm	$\eta_2/\%$	δ_3/mm	$\eta_3/\%$	h/mm	ε
Ablated C-SiC isolator	F1	3.40	14.88	37.2	11.28	28.2	6.64	16.6	26.64	66.6
	F2	3.40	9.72	24.3	7.72	19.3	4.88	12.2	24.60	61.5
	F3	3.40	10.52	26.3	6.40	16.0	5.36	13.4	26.72	66.8
	F4	3.40	12.76	31.9	8.36	20.9	5.12	12.8	26.96	67.4
Isolator with stainless steel materials	N1	3.69	7.96	19.9	6.16	15.4	3.36	8.4	20.76	51.9
	N2	3.60	8.96	22.4	5.36	13.4	4.88	12.2	22.00	55.0
	N3	3.60	7.40	18.5	5.76	14.4	3.84	9.6	18.60	46.5
	N4	3.60	7.36	18.4	5.12	12.8	2.88	7.2	19.48	48.7



(a) Ablated C-SiC isolator ($p_b/p_{in}=3.40$)



(b) Stainless steel isolator ($p_b/p_{in}=3.69$)

Fig. 12 NPLS images of the isolator's boundary layer

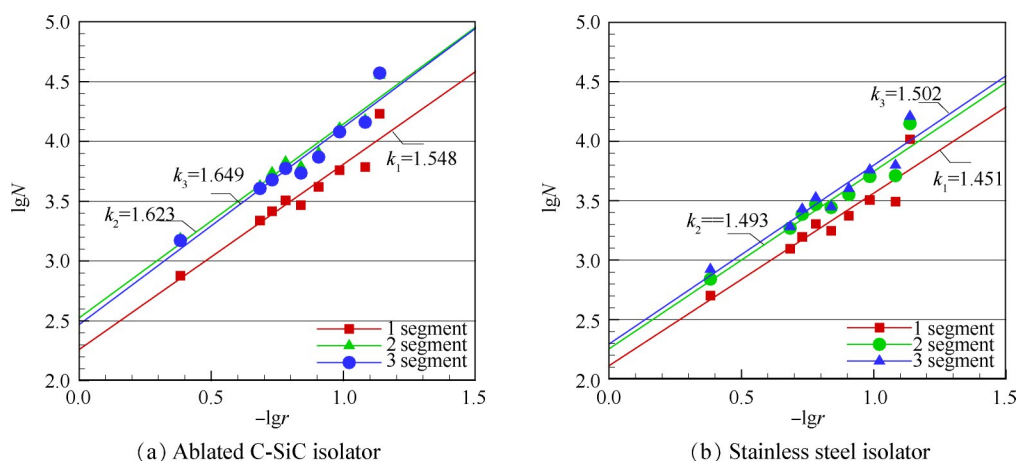


Fig. 13 Fractal dimension of the isolator's boundary layer

拟序结构也逐渐破碎,附面层与主流的边界曲线的不规则程度逐渐增加,分形维数也不断上升,2段区域的分形维数为 1.493,3段区域的分形维数为 1.502。图 14 为 C-SiC 复合材料隔离段与光滑不锈钢隔离段附面层分形维数对比图。由图可知,烧蚀后的 C-SiC 复合材料隔离段附面层的三段区域分形维数均高于光滑不锈钢隔离段,高出比例分别为 6.7%,8.7% 和 9.8%。分形维数可以直观、具体地反映湍流瞬时脉动特征。本次实验测量的分形维数沿流向增加,这说明湍流速度的波动程度从前向后逐渐增大,而且烧蚀后的 C-SiC 隔离段内部湍流区的分形维数高于光滑隔离段,也说明烧蚀后的 C-SiC 极度粗糙壁面确实影响了附面层沿流向的发展,隔离段内湍流脉动由于较大的不平度而增强。不平度提升了湍流脉动强度,导致湍流附面层内湍流输运项增大,此时流场中产生的强湍动能由湍流输运项输运到附面层内,在粘性扩散项和粘性耗散项的共同作用下将其在近壁区耗散掉,进一步降低了湍流附面层的耐反压能力。综上所述,从分形维数也可得出较大的壁面不平度,加深了激波与附面层相互作用,降低了耐反压能力。

3.2 激波串振荡特性分析

前期国内外研究^[9-13]表明,隔离段壁面压力脉动由激波串振荡引起,上、下壁面的压力脉动主频一致,与激波串的振荡频率一致,因此可以由唇口板压力测点的动态压力频率来反映激波串振荡频率是否受到烧蚀后的 C-SiC 复合材料的影响。如果烧蚀后的 C-SiC 内壁面确实改变了激波串振荡频率,唇口板监测点的动态压力主频也会随之变化。本次试验过程中,尾锥运行速率保持一致,约 2mm/s。图 15,图 16 分别为烧蚀后的 C-SiC 隔离段和光滑不锈钢隔离段

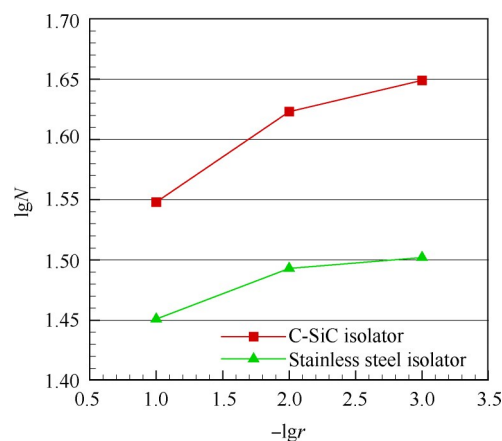
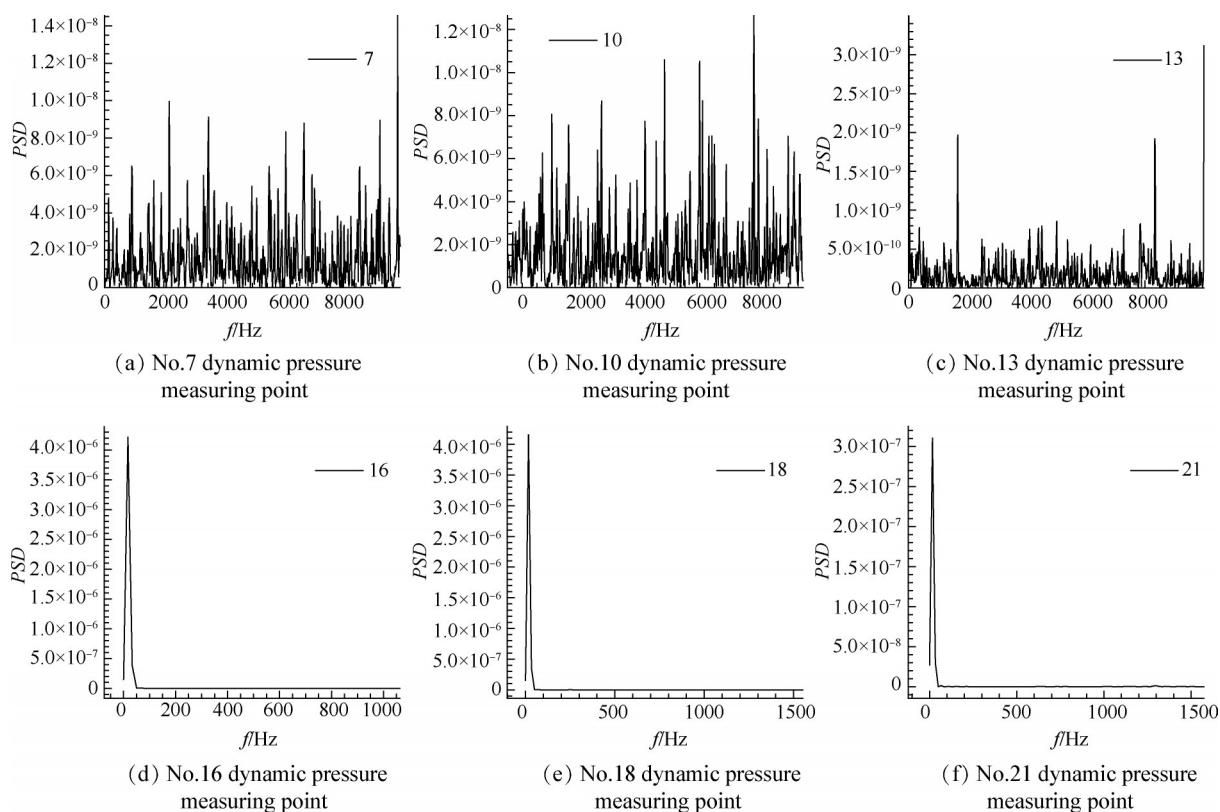
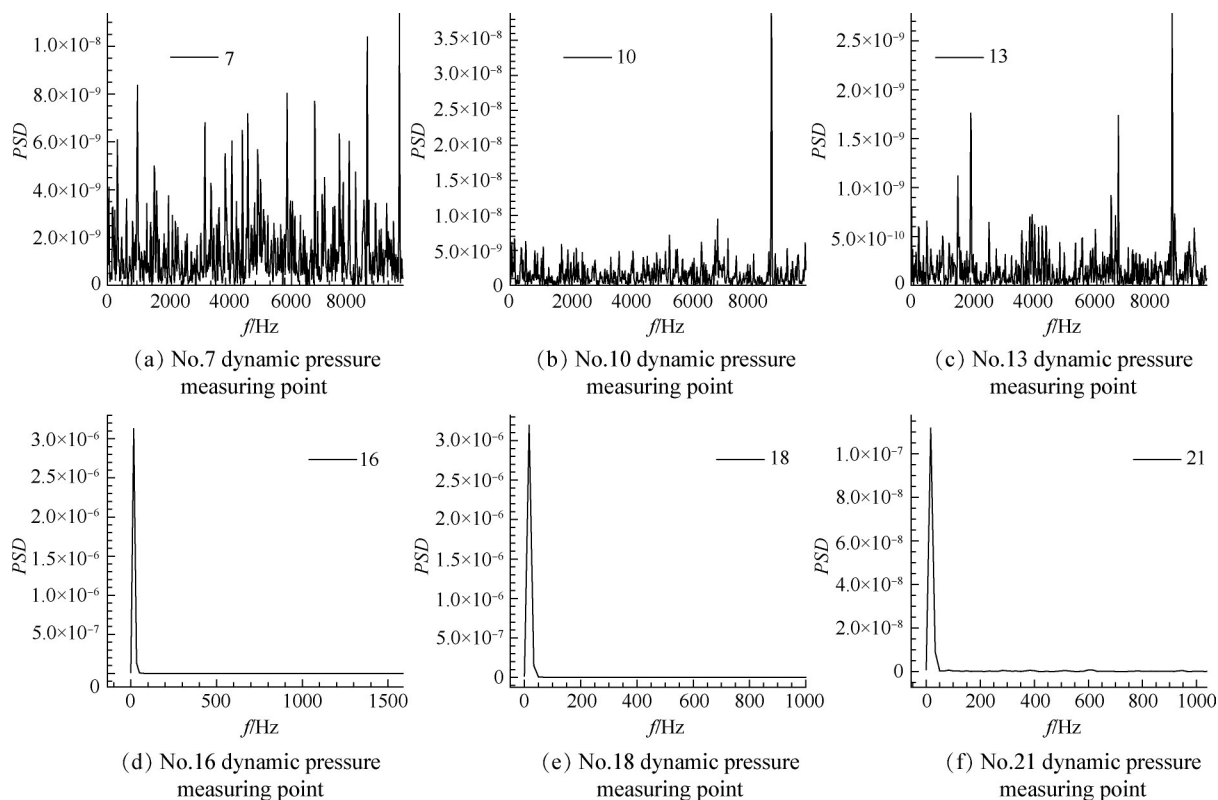


Fig. 14 Comparison of fractal dimension between the ablated C-SiC isolator's boundary layer and the stainless steel isolator's boundary layer

中激波串前传过程中动态压力功率谱,图中功率谱密度值用总压无因次化。由图可知,无论烧蚀后的 C-SiC 复合材料隔离段,还是光滑不锈钢隔离段,激波串前传过程中,激波串区域内的动态压力功率谱主频基本在 20Hz 附近,且无谐波现象,激波串上游区域的动态压力功率谱无明显主频,幅值很低。可见,在反压诱导下的激波串前传过程中,极度粗糙的内壁面对激波振荡频率影响很小。图 17 为烧蚀后 C-SiC 隔离段和光滑隔离段中 13 号、21 号传感器的动态压力。由图可知,这两个传感器的动态压力上升起始时间不同,13 号传感器相对于 21 号传感器有一定的时间延迟,因此可以通过测量这两个传感器的沿流向距离和延迟时间就可以计算出激波串前传的平均速度。通过计算可知,烧蚀后 C-SiC 隔离段内激波串前传速度约 1.94m/s,光滑不锈钢隔离段内激波串前传速度约 2.97m/s,考虑人为取值误差等因素,可以认为 C-SiC 隔离段与不锈钢隔离段内激波串的前传速

Fig. 15 Power spectrum of the ablated C-SiC isolator($p_b/p_{in}=2.90$)Fig. 16 Power spectrum of the stainless steel isolator($p_b/p_{in}=3.12$)

度基本一致,激波串前传平均速度为 1.94~2.97m/s,与尾锥运行速率十分接近。激波串前传的原动力为尾锥堵塞气流引起的反压,反压扰动以压强波形式在亚声速附面层以第二特征波速传播,传播速度为

$c-u$, c 为当地声速, u 为当地流速,通过理论计算速度大约为 33m/s。烧蚀后的 C-SiC 复合材料隔离段与不锈钢隔离段的附面层厚度有很大差异,同时激波诱导的分离范围也有较大差异,但是由于总温不变,当地

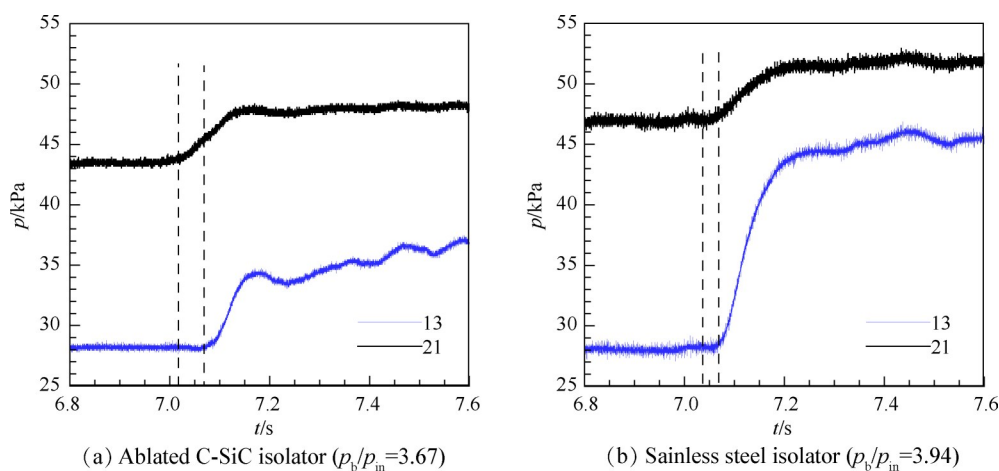


Fig. 17 Dynamic pressure of the isolator

声速一致,当地流速也接近声速,因此两者的第二特征波速非常接近。所以极度粗糙的内壁面虽然影响了附面层的厚度,但是对压力脉动前传速度影响很小。

4 结 论

通过烧蚀后的 C-SiC 隔离段内流场精细测量试验,获得了极度粗糙内壁面条件下的激波串初始激波形态、激波串区域内附面层发展形态以及激波串动态特性,结论如下:

(1)实验条件下,极度粗糙的内壁面不会根本上改变激波串结构,不过深刻影响了近壁区流动,附面层增厚效应非常明显,激波串区域内的附面层厚度平均增加了约 50%,导致初始激波分叉点比光滑壁面更加偏向唇口约 30% 左右。典型的初始激波结构包含分叉的前后腿、马赫杆、分离以及马赫杆后的滑移线。

(2)实验条件下,极度粗糙的内壁面提高了激波串区域内附面层的分形维数,提升了湍流脉动强度,加剧了拟序结构的破碎程度。烧蚀后的 C-SiC 隔离段中激波串区域内附面层的分形维数在 1.548 ~ 1.649,光滑不锈钢隔离段的分形维数在 1.451 ~ 1.502,前者高于后者 6.7% ~ 9.8%,分形维数沿流向逐渐增加。

(3)实验条件下,极度粗糙的内壁面对激波串振荡频率和前传速度影响非常小。烧蚀后的 C-SiC 隔离段内激波串前传振荡频率与光滑不锈钢隔离段基本一致,约 20 Hz 左右。

致 谢:感谢国家自然科学基金青年基金的资助。感谢南京航空航天大学能源与动力学院谭慧俊教授、李鑫博士对本文试验工作的大力支持。

参考文献

[1] 曹学斌,满延进,李大连,等. 畸变气流影响下 C-SiC

复合材料隔离段稳态特性试验研究[J]. 推进技术, 2018, 39(10): 2329-2339. (CAO Xue-bin, MAN Yan-jin, LI Da-jin, et al. Experimental Study on Steady-State Characteristics of C-SiC Material Isolator Considering Effect of Distorted Flow[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(10): 2329-2339.)

[2] 高亮杰,张堃元,曹学斌,等. 非对称来流下带粗糙度的隔离段实验研究[C]. 三亚:第四届全国高超声速科技学术会议, 2011.

[3] Waltrup P J, Billig F S. Structure of Shock Waves in Cylindrical Ducts [J]. *AIAA Journal*, 1973, 11(10): 1404-1408.

[4] Sullins G, Mc Lafferty G H. Experimental Results of Shock Train in Rectangular Ducts[R]. *AIAA* 92-5103.

[5] Hui-jun Tan, Shu Sun. Preliminary Study of Shock Train in a Curved Variable-Section Diffuser[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2008, 24(2): 245-252.

[6] 王成鹏,张堃元,金志光. 非均匀超声来流矩形隔离段内流场实验[J]. 推进技术, 2004, 25(4): 349-353. (WANG Cheng-peng, ZHANG Kun-yuan, JIN Zhi-guang. Experimental Investigation on Internal Flow in Rectangular Isolator under Non-Uniform Supersonic Flow [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004, 25(4): 349-353.)

[7] 卢洪波. 高超声速进气道典型热负荷区的流动特性研究[D]. 北京:中国科学院力学研究所, 2014.

[8] 曹学斌,满延进,李大连,等. 烧蚀后 C-SiC 复合材料隔离段内激波串长度预测[J]. 推进技术, 2019, 40(2): 285-294. (CAO Xue-bin, MAN Yan-jin, LI Da-jin, et al. Prediction of Shock Train Length in C-SiC Composite Isolator after Thermal Ablation[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(2): 285-294.)

[9] Ikuit T, Mtsuo K, Nagai M, et al. Oscillation Phenomena of Pseudo-Shock Waves[J]. *Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 1974, 17(112): 1278-1285.

- [10] Yamane R, Kondo E, Tomita Y, et al. Vibration of Pseudo-Shock in Straight Duct[J]. *Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 1984, 7(229): 1385-1398.
- [11] Sugiyama H, Takeda H, Zhang J, et al. Locations and Oscillation Phenomena of Pseudo-Shock Waves in a Straight Rectangular Duct[J]. *The Japan Society of Mechanical Engineers International Journal, Series 2*, 1988, 31(1): 9-15.
- [12] 曹学斌, 张堃元, 王成鹏. 非对称来流下隔离段动态压力特性[J]. 推进技术, 2009, 30(1): 57-62. (CAO Xue-bin, ZHANG Kun-yuan, WANG Cheng-peng. Characteristics of Wall Pressure Fluctuations in a Straight Isolator with Asymmetric Incoming Flow[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2009, 30(1): 57-62.)
- [13] 曹学斌, 张堃元. 超燃冲压发动机隔离段非对称来流下激波串受迫振荡流动研究[J]. 空气动力学学报, 2011, 29(2): 135-141.
- [14] Carroll B F, Dutton J C. Characteristics of Multiple Shock Wave/Turbulent Boundary Layer Interactions in Rectangular Ducts[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1990, 6(2): 186-193.
- [15] Wagner J L, Yuceil K B, Valdivia A, et al. PIV Measurements of the Unstart Process in a Supersonic Inlet/Isolator[R]. *AIAA* 2008-3849.
- [16] Wagner J L, Yuceil K B, Clemens N T. PIV Measurements of Unstart of an Inlet-Isolator Model in a Mach 5 Flow[R]. *AIAA* 2009-4209.
- [17] 马 静. 超燃冲压发动机内流通道冷态流场的 PIV 试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [18] 曹学斌, 朱守梅, 满延进, 等. 考虑进气道喉道非均匀流场影响的隔离段直连试验[J]. 推进技术, 2015, 36(4): 547-555. (CAO Xue-bin, ZHU Shou-mei, MAN Yan-jin, et al. Direction Connect Test on Isolator Considering Effects of Nonuniform Flow at Inlet Throat[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(4): 547-555.)
- [19] ZHAO YuXin, YI ShiHe, TIAN LiFeng, et al. Supersonic Flow Imaging Via Nanoparticles[J]. *Science in China: E*, 2009, 52(12): 3640-3648.
- [20] 赵玉新, 易仕和, 田立丰, 等. 基于纳米粒子的超声速流动成像[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(12): 1911-1918.
- [21] 易仕和, 何 霖, 田立丰, 等. 纳米示踪平面激光散射技术在激波复杂流场测量中的应用[J]. 力学进展, 2012, 42(2): 197-205.
- [22] Zhi Chen, Yi Shihe, Zhu Yangzhu, et al. Investigation on Flows in a Supersonic Isolator with an Adjustable Cowl Convergence Angle[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2014, 52: 182-190.
- [23] 朱 华, 姬翠翠. 分形理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [24] 赵玉新, 易仕和, 田立丰, 等. 超声速湍流混合层实验图像的分形度量[J]. 中国科学 G 辑, 2008, 38(5): 562-571.
- [25] 黄真理. 湍流的分形特征[J]. 力学进展, 2000, 30(4): 581-592.
- [26] Sreenivasan K R. Fractals and Multifractals in Fluid Turbulence[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1991, 23: 539-600.

(编辑: 史亚红)