

用于爆震引燃的激波聚焦无反应流场数值模拟

王 春¹, 司徒明², 韩肇元¹

(1. 中国科技大学 力学与机械系, 安徽 合肥 230027; 2. 航天科工集团公司 31 所, 北京 100074)

摘 要: 通过对用于脉冲爆震引燃的内楔表面激波聚焦冷态流场的数值模拟, 分析了不同角度内楔表面在激波聚焦时流场结构的不同特点。数值计算的结果表明: 对于大内楔角的情况, 激波进入内楔角之后产生规则反射, 温度的大幅度升高发生在激波于内楔顶点反射之后; 对于小内楔角的情况, 激波进入内楔角之后产生马赫反射, 温度的升高在入射激波到达内楔顶点之前就已经发生, 而在入射激波于内楔顶点反射之后得到进一步的提升。同时, 还对不同角度内楔的反射激波后气流温度进行了比较。

关键词: 脉冲爆震发动机; 激波聚焦; 冷流; 流动分布; 数值仿真

中图分类号: V235.221 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2003) 02-0156-04

Numerical investigations on cold flowfields of shock focussing for ignition of pulse detonation

WANG Chun¹, SITU Ming², HAN Zhao-yuan¹

(1. Dept. of Mechanics & Mechanic Engineering, China Univ. of Science and Technology, Hefei 230027, China;

2. The 31st Research Inst., Beijing 100074, China)

Abstract: The cold flowfield of shock focussing for ignition of pulse detonation was numerically investigated for different geometric structures. The results show that the flowfields of inner wedge with different angle have different features when applied to shock focussing. For the case of large-angle inner wedge, regular reflection was observed, and the temperature rising takes place just after the reflection of shock wave front. For the case of small-angle inner wedge, Mach reflection was observed, and the temperature has been raised before the reflection of shock wave front and been raised higher after the reflection of shock wave front. The temperatures after the reflection of shock wave front with different inner angles are also compared.

Key words: Pulse detonation engine; Shock focussing; Cold flow; Flow distribution; Numerical simulation

1 引 言

脉冲爆震发动机(PDE)具有循环热效率高、比冲高、结构简单紧凑、零启动等优点^[1], 这使它在总体设计和性能价格比优于其他类型的吸气式发动机, 引起关注, 并相继进行实验研究^[2,3]。激波聚焦最早应用于气体热核聚变的点燃和控制以及医疗上的肾结石治疗^[4]。激波聚焦应用于脉冲爆震发动机的点火尚属新课题。脉冲爆震的直接点燃需要非常高的能量输入, 如目前广泛采用的高压电火花点燃爆震。激波聚焦技术的应用有可能简化脉冲爆震发动机的点火

系统, 从而进一步提高整个推进系统的性能。本文对内楔表面激波聚焦点燃脉冲爆震的冷流场进行了数值研究, 比较了不同内楔角度时内楔表面激波聚焦的流场结构, 为下一步的试验设计和实验分析奠定理论基础。

2 数值研究模型

实验模型如图 1 所示, 试验设备为激波管, 内通道 $94 \times 94 \text{ mm}^2$, 试验段长 1m, 高压段充入高压氮气, 低压段用真空泵抽低压至所需的压力, 然后充入一定量的汽油使油气比接近汽油燃烧的化学恰当比。待

• 收稿日期: 2002-04-20; 修订日期: 2002-06-15。基金项目: 航天支撑基金和科学院力学所 LHD 开放课题。
作者简介: 王 春 (1975—), 男, 博士生, 研究领域为流体力学。

汽油充分挥发后破膜,在管道中产生运动马赫数约为2.5~2.7的运动激波。

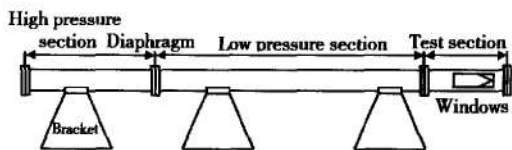


Fig.1 Experimental setup of shock focussing for ignition of pulse detonation

本文研究了不同内楔角度的激波聚焦的流场结构。图2显示了内楔角分别为90°和53°两个例子。平面激波沿横向运动,在内楔斜表面发生反射和绕射,并在到达内楔的尖顶时发生向左的反射。这些激波反射和绕射的相互作用,可在尖顶附近局部区域形成高温高压点。如果此容积内充满可燃的混合气体且温度足够高,将直接点燃可燃混合气的爆震或形成爆燃转爆震过程,无疑,激波聚焦的效果对爆震的形成起着决定性的作用。

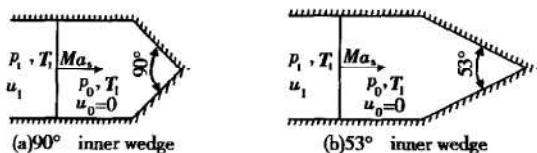


Fig.2 Two cases of shock focussing for numerical simulation

Gelfand 等人也曾采用过激波聚焦点燃氢气/空气爆震过程的试验研究。研究结果表明,如果激波马赫数、油气混合比合适,激波聚焦能成功地引发氢气/空气爆震^[5]。

尽管试验结果证实激波聚焦能够引发爆震过程,但对其详细的机理尚需进一步的研究,尤其是在激波聚焦过程中常常发生激波多次反射和绕射的过程。这些机理的探讨将为设计更有效的激波聚焦构型提供理论依据。对于复杂的流场结构,数值模拟成为非常有效的研究工具。

3 数值计算方法

本文采用 NND 格式求解二维非定常 Euler 方程,格式取时间二阶精度、空间二阶精度。物理区域变换到计算区域无量纲化后的方程为

$$\frac{\partial \tilde{U}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{F}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{G}}{\partial \eta} = 0 \quad (1)$$

其中:

$$\tilde{U} = J[\rho, \rho u, \rho v, \rho E]^{-1}$$

$$\hat{F} = J[\rho \tilde{U}, \rho u \tilde{U} + p \xi_x, \rho v \tilde{U} + p \xi_y, (\rho E + p) \tilde{U}]^{-1}$$

$$\hat{G} = J[\rho \tilde{V}, \rho u \tilde{V} + p \eta_x, \rho v \tilde{V} + p \eta_y, (\rho E + p) \tilde{V}]^{-1}$$

总能量 E 与压力的关系式:

$$p = (\gamma - 1) \left[\rho E - \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) \right] \quad (2)$$

对方程(1)进行矢通分裂处理得到:

$$\frac{\partial \tilde{U}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{F}^+}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{F}^-}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{G}^+}{\partial \eta} + \frac{\partial \hat{G}^-}{\partial \eta} = 0 \quad (3)$$

NND 差分格式如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{U}}{\partial t} = & -\frac{1}{\Delta \xi} (\hat{F}_{i+\frac{1}{2},L}^+ - \hat{F}_{i-\frac{1}{2},L}^+ + \hat{F}_{i+\frac{1}{2},R}^- - \hat{F}_{i-\frac{1}{2},R}^-) \\ & -\frac{1}{\Delta \eta} (\hat{G}_{j+\frac{1}{2},L}^+ - \hat{G}_{j-\frac{1}{2},L}^+ + \hat{G}_{j+\frac{1}{2},R}^- - \hat{G}_{j-\frac{1}{2},R}^-) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\hat{F}_{i+\frac{1}{2},L}^+ = \hat{F}_i^+ + \frac{1}{2} \min \text{mod} \{ \Delta \hat{F}_{i-\frac{1}{2}}^+, \Delta \hat{F}_{i+\frac{1}{2}}^+ \}$$

$$\hat{F}_{i+\frac{1}{2},R}^- = \hat{F}_{i+1}^- + \frac{1}{2} \min \text{mod} \{ \Delta \hat{F}_{i+\frac{1}{2}}^-, \Delta \hat{F}_{i+\frac{3}{2}}^- \}$$

$$\hat{G}_{j+\frac{1}{2},L}^+ = \hat{G}_j^+ + \frac{1}{2} \min \text{mod} \{ \Delta \hat{G}_{j-\frac{1}{2}}^+, \Delta \hat{G}_{j+\frac{1}{2}}^+ \}$$

$$\hat{G}_{j+\frac{1}{2},R}^- = \hat{G}_{j+1}^- + \frac{1}{2} \min \text{mod} \{ \Delta \hat{G}_{j+\frac{1}{2}}^-, \Delta \hat{G}_{j+\frac{3}{2}}^- \}$$

$\Delta \hat{F}^+, \Delta \hat{G}^+$ 取空间前差, $\Delta \hat{F}^-, \Delta \hat{G}^-$ 取后差。

minmod 函数定义为

$$\min \text{mod}(x, y) = \text{sgn}(x) \cdot \max \{ 0, \min[|x|, \text{ysgn}(x)] \}$$

4 计算结果与讨论

初始流场波前为静止气流, $p_0 = 0.007 \text{ MPa}$, $T_0 = 300 \text{ K}$, $u_0 = 0$ 。波后气流参数按激波马赫数 $Ma_s = 2.5$ 由运动激波关系式计算得出: $p_1 = 0.0499 \text{ MPa}$, $T_1 = 641 \text{ K}$, $u_1 = 608.9 \text{ m/s}$ 。

图3显示了内楔角度为90°时的冷态流场结构。图3(a)为初始流场的密度场等值线。图3(b)为给定初始流场后7000步(约56.6μs)的流场密度分布图,运动激波向前运动了约35.3mm。由于内楔内表面的倾斜角度较大,为45°,运动激波在壁面上发生的反射为规则反射。根据激波动力学,在此过程中,激波的强度和运动速度不变,激波后压力和温度升高,同时沿横向方向,流场具有自相似特性。由此可知,激波在内楔顶角反射之前,激波前后的压力比和温度比保持一定常值,而在绕射反射波与壁面之间的区域,压力和温度得到进一步的升高。

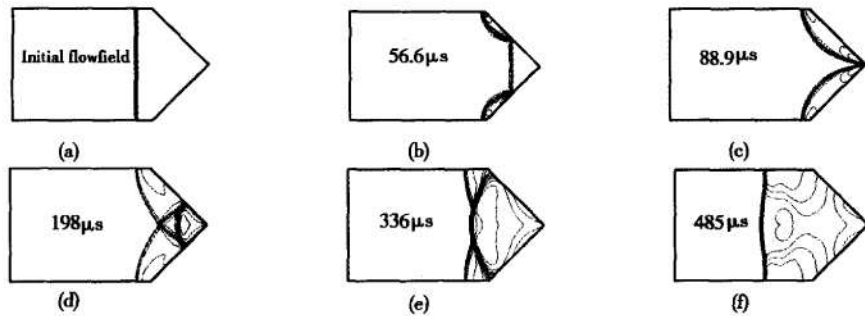


Fig.3 Density contours of the cold flowfield of shock focussing (90°)

当激波运动到内楔顶点,上下的绕射反射波将发生相交,如图 3(c)所示。然后激波在顶点处反射,逆横向前进,并与原绕射反射波相互作用,将在顶点附近局部区域形成高温高压区,如图 3(d)所示,从理论上讲,此区域最可能成为爆震或爆燃的点燃区域。

受壁面的限制,反射后的激波面接近扇形激波面,这样,随着向横向方向逆向的传播,激波的强度逐渐减弱,波后区域的温度和压力逐渐降低。虽然反射激波传播的速度有所减慢,但它仍快于先前绕射产生的反射波,于是产生了反射激波追赶绕射反射激波的现象,如图 3(e)所示。进入等直通道后,反射波逐渐与绕射反射波融合,形成一道较强的反射激波,沿横向逆向方向传播,如图 3(f)所示。

由此可见,在大角度的内楔表面情况下,激波进入内楔角之后产生了规则反射,温度的升高将主要发生在激波于内楔顶点反射之后的较小区域。

图 4 显示了内楔角度为 53° 时的冷态流场结构。图 4(b)为给定初始流场后 7500 步(约 $60.6\mu\text{s}$)的流场密度分布图。与内楔角为 90° 状态不同,由于楔内表面的倾斜角度较小,为 26.5° ,运动激波在壁面上发生的反射为马赫反射,流场结构相对来说要复杂许多,在激波面上有三波点存在,三波点与壁面之间通过马赫杆相接。由激波动力学可知,为满足壁面边界条

件,在三波点后面,还将同时产生绕射反射波和滑移面,数值模拟的结果基本上验证了这一现象。

当激波继续向前运动,由于两个三波点的汇合和两个马赫杆的相交,同时,绕射反射波也较早地相交,形成透射波,流场结构变得更为复杂,如图 4(c)所示。由于波系之间复杂的相互干扰,原先的初始激波已不复存在,而激波前沿的激波强度有所增强,前沿激波之后的温度和压力将产生大幅度的上升。

当前沿激波运动到内楔顶点,开始反射,逆横向前运动,反射后的温度和压力再次提高。受壁面的限制,反射后的激波面同样接近扇形面,沿着横向方向逆向的传播,激波的强度会有所减弱,如图 4(d)所示,波后区域的温度和压力有所降低。

最后,反射激波逐渐追赶绕射反射波,激波相互融合,形成一道较强的反射激波,沿横向逆向方向传播,如图 4(e),(f)所示。

计算结果可以看出,在小角度的内楔表面情况下,激波进入内楔角之后将产生马赫反射,由于波系间较早地发生了相互作用,使得激波前沿在内楔顶点反射之前,前沿激波强度已逐渐变强,这样就可能使温度和压力上升足以点燃爆震或爆燃,当然,激波前沿在顶点发射之后,温度和压力将进一步升高。

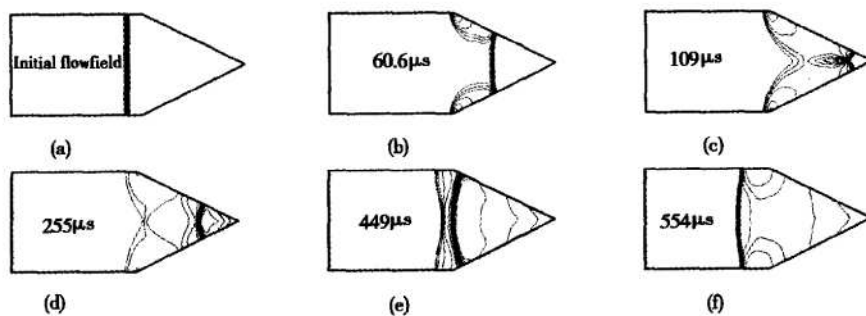


Fig.4 Density contours of the cold flowfield of shock focussing (53°)

图5给出了给定初始流场后随时间变化的中心轴上激波波后温度。图5a为 90° 内楔角的情况,可以看到:在激波反射前后,波后温度有一个非常明显的温升,而在反射之前,温度几乎不变。与之相对比,图5b为 53° 内楔角的情况,可以看到:在激波反射之前,由于波系发生了较早的相互干扰,温度已从641K上升至1050K左右,而激波前沿在顶点反射之后,温度有更为剧烈的升高。由此可以看出,由于流场结构的不同,流场的温度分布及变化有了不同的特点,这将对爆震或爆燃的形成产生不同的影响。

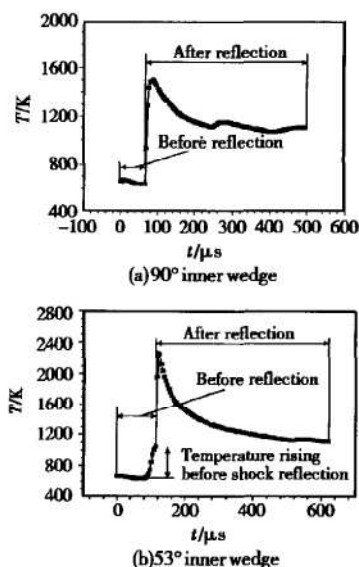


Fig.5 Temperature behind shock front on the axis versus time

图6为不同内楔角度的中心轴上反射激波波后温度与反射激波波面位置的关系,横轴为无量纲距离, x_{corner} 为内楔顶点位置,激波管直通道高度 $h = 94\text{mm}$ 。由图可见:随着内楔角度的减小,反射激波波后温度有递增的趋势,角度越小,可达到的温度越高,而随着激波波面的向左推移,波后温度迅速下降,到最后发射激波在直通道中运动,所有角度情况下的激波波后温度趋于一致,约1150K左右。

需要补充的是:上述图中反射激波后的局部区域温度非常高,这些高温点只是流场中非常小的区域,其热量并不一定足以提供爆震点燃所需的能量。其次,图6中随楔角角度的减小,波后温度有上升的趋势,也不能说明对于爆震点火来说,角度越小越好,在实际过程中,随着楔角角度的减小,内楔的长度逐渐增加,通过壁面的散热也将增加,不利于点火。因此,在实验过程中,需综合考虑多种因素的影响。

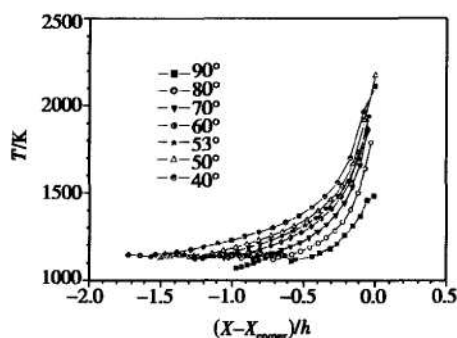


Fig.6 Temperature behind shock front on the axis after shock reflection with different inner wedge angle

5 结论

(1)使用不同内楔角进行激波聚焦时,流场结构显示了不同的特点,这有可能影响到点火区域的位置和激波聚焦的性能。

(2)对于大内楔角的情况,激波进入内楔角之后产生了规则反射,温度的大幅度升高发生在激波前沿反射之后;对于小内楔角的情况,激波进入内楔角之后将产生马赫反射,温度的剧烈升高在激波前沿于内楔顶点反射之前就已发生,而在其反射之后得到了进一步的提升。

(3)对不同内楔角度反射激波波后温度进行了比较,内楔角度减小,反射激波波后温度有递增趋势。

(4)下一步将开展内楔表面激波聚焦点燃汽油爆震的实验研究工作。

参考文献:

- [1] 赵伟,姜宗林,王超. 脉冲爆轰推进机理的激波管试验研究近况[A]. 第九届全国激波与激波管学术讨论会会议文集[C]. 北京 昌平,2000.
- [2] 黄希桥,严传俊,张群,等. 两相脉冲爆震发动机模型试验研究[J]. 推进技术,2001,22(2).
- [3] 范玮,严传俊,张群,等. 点火能量等因素对脉冲爆震室压的影响实验[J]. 推进技术,2002,23(3).
- [4] Alexander G, Haim M. Does the rate of extracorporeal shock wave delivery affect stone fragmentation? [J]. *Adult Urology*, 1999, 54(3).
- [5] Gelfand B E, Khomik S V, Medvedev S P, et al. Visualization of self-ignition regimes in hydrogen-air mixtures under shock waves focussing[A]. 24th international Congress on High-Speed Photography and Photonics[C]. 4183, 688 ~ 695,2001.

(编辑:王居信)