

文章编号: 1001-1455 (2000)04-0373-06

激波喷出过程和在林带中的传播^{*}

常熹钰¹, 易仕和¹, 罗俊荣¹, 周勇为¹, 文定元², 邓湘雯²

(1. 国防科技大学航天技术系, 湖南 长沙 410073;

2. 中南林学院资源环境系, 湖南 株洲 412006)

摘要: 运用激波管技术研究了激波从管口喷出和在林带中传播这两个基本问题。给出了三方面的结果: 揭示了激波从管口喷出时的复杂流场, 显示了主激波弯曲和衰减, 二次激波的形成和合拢, 涡环的长大和发展, 以及涡环前缘出现正激波等基本物理现象; 显示了激波在林带中的传播过程, 取得了激波遇林地的反射, 马赫杆形成, 激波与林冠的相遇, 林冠对涡环的阻滞效应等纹影照片; 沿激波在林地的传播方向测量了地面压力, 证实林带有明显的消波效应。

关键词: 激波; 森林; 模拟

中图分类号: O382.1 文献标识码: A

1 引 言

激波与林火作用时, 将发生一系列复杂的物理、化学过程, 其中激波的高压阵面及紧随着的负压将撕落并清除树林中的细枝、枯叶等森林可燃物。在林火阵面地带, 强度足够大的激波有可能使热解气体与氧充分混合并完全燃烧, 耗尽可燃气体^[1]。认识和研究激波对林火阵面的这些作用, 有可能提出一种森林灭火的新方法。

本文报告的是激波猝灭林火的原理与技术探索的先期工作。主要目的是认识激波从管道中喷出及其在林地中的传播规律, 为研究激波与林火的作用提供技术和知识基础。研究工作在实验室条件下进行, 在激波管技术的基础上, 运用光学纹影和瞬态信号测量技术, 显示激波从管口喷出及在林地中传播的过程和主要物理现象, 建立起概念并作初步分析。

2 实验装置与方法

实验装置由激波管、瞬态信号测量系统、纹影仪等构成, 装置和系统布置见图 1。激波管由不锈钢管制成, 内径 24mm, 全长 24m, 高压段长 0.6m, 低压段端部开口。高低压段之间由聚脂薄膜分开, 当高压段充以高压气体达到一定压力时, 膜片完全破裂, 形成一道激波从低压段推出并在模拟林地中传播。

沿低压段布置压电传感器 T_1 、 T_2 测量激波沿管运动的速度, $T_1 \rightarrow T_2$ 为 0.4m, T_2 离激波管出口 40mm。由理想激波管理论给出的压力平台 (p_2) 校核传感器的压电系数。在模拟林地沿中心对称线装置压电传感器 T_3 、 T_4 、 T_5 , 测量激波诱导的林地压力场, 了解激波在林地的传播和

* 收稿日期: 1999-07-26; 修回日期: 1999-12-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (39770623)

作者简介: 常熹钰 (1941—), 男, 教授。

衰减过程。 T_3 距激波出口 60mm, $T_3 \rightarrow T_4$, $T_4 \rightarrow T_5$ 均为 60mm。所有传感器信号经电荷放大器放大, 由双踪记忆示波器或多通道瞬态记录仪记录并显示。纹影仪视场直径 200mm, 视场中心距低压段出口 70mm。纹影照相在黑暗中运行, 取垂直刀口, 由火花光源提供闪光, 由脉冲触发器延时控制闪光时刻, 激波到达传感器 T_2 时刻为计时起点, 最小延时间隔为 $5\mu\text{s}$ 。“林地”由多株模拟树排列构成, 行距与列距均为 30mm, 林地前沿距激波管出口 60mm。单株“树”高 60mm, 树冠高 30mm, 树冠直径 30mm。 F_1 为火焰传感器, 其测量结果在以后的报告中讨论。

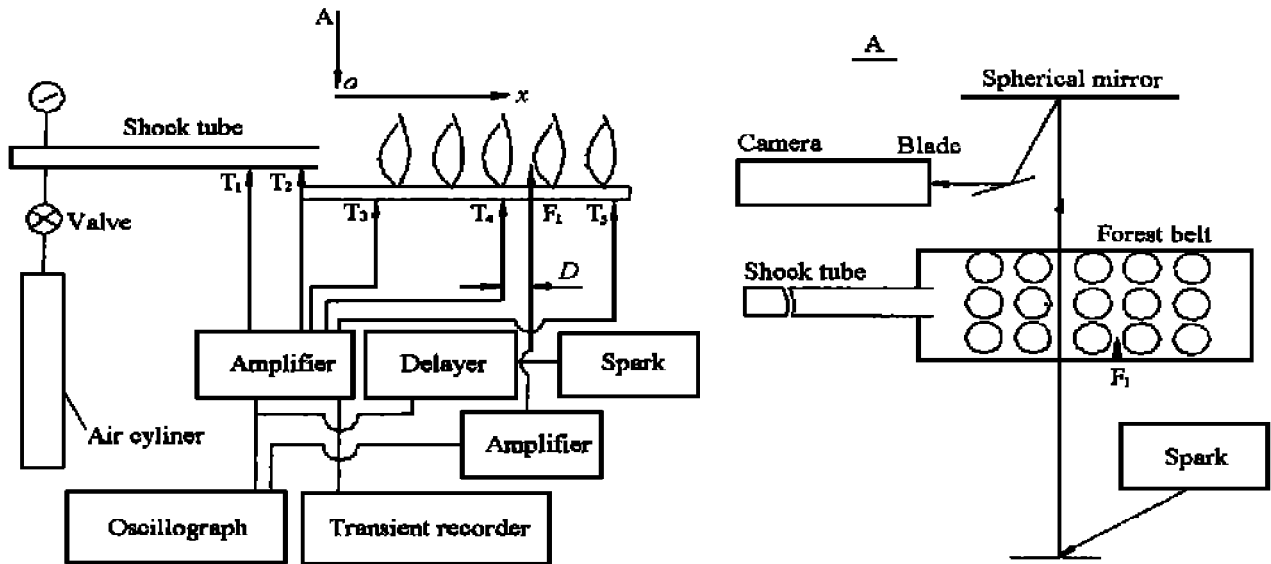


图 1 实验装置和系统布置

Fig.1 Experiment equipment and system arrangement

3 实验结果与分析

3.1 激波在管道中传播

图 2 为 $p_4 = 1.125\text{MPa}$, 传感器 T_1 、 T_2 记录的的压力波形, 根据当时的室温算出 $Ma = 1.63$ 。 T_1 信号(上线)有十分规则的压力平台(p_2), 平台宽度约 2.4ms, 平台幅度为 0.293MPa, 与理论分析基本一致^[2]。

传感器 T_2 靠近激波管出口, 在主激波掠过之后, T_2 信号(下线)也有明显的压力突跃, 但没有形成压力平台。这是因为传感器离出口仅 40mm。在它刚刚感受激波后的高压(p_2)时, 激波又很快离开管口, 进入大气, 波后高压与大气压连通, p_2 只能维持很短的时间, 然后迅速下降。根据激波运动速度估算, 其维持时间不超过 0.07ms。其后的压降过程约为 2.4ms, 与 T_2 信号的平台宽度相当。这里简单的分析与图 2 的观察基本相符。

3.2 激波从管口喷出

图 3 为激波从管口喷出并在大气中传播的一组照片, $p_4 = 0.617\text{MPa}$, 取激波到达 T_2 为 0 时刻。由图可以看到: 由于进入大空间的绕射现象, 激波阵面发生弯曲, 强度逐渐弱化; 主激波之后的减速流动诱导产生二次激波, 二次激波作用的流体增压减速, 与主激波后的流动相适

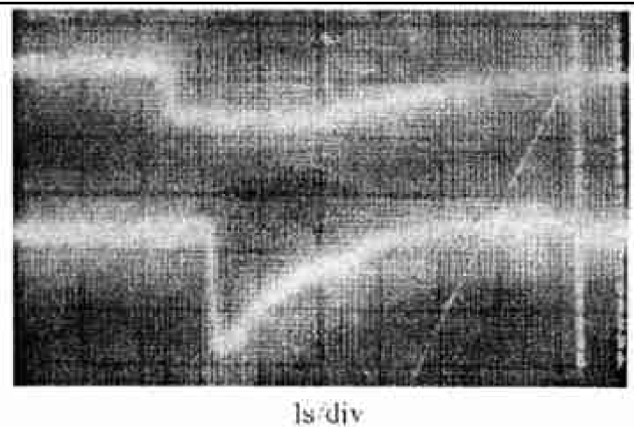


图 2 管内压力波形

Fig.2 The pressure pulse of shock wave in tube

配；二次激波的形成与发展有十分明显的“合拢”过程，起初其阵面是断开的，以后逐渐合拢形成球形阵面，在 $t=150\mu\text{s}$ 时刻，已形成十分明显的涡环，贴近涡环前缘有一道正激波；以后涡环直径逐渐增大，厚度也不断增加，推进速度比主激波小，与主激波的距离不断被拉大，涡环之后的黑白条纹可能是管口流动过膨胀的斜激波系，它们是驻波系统。

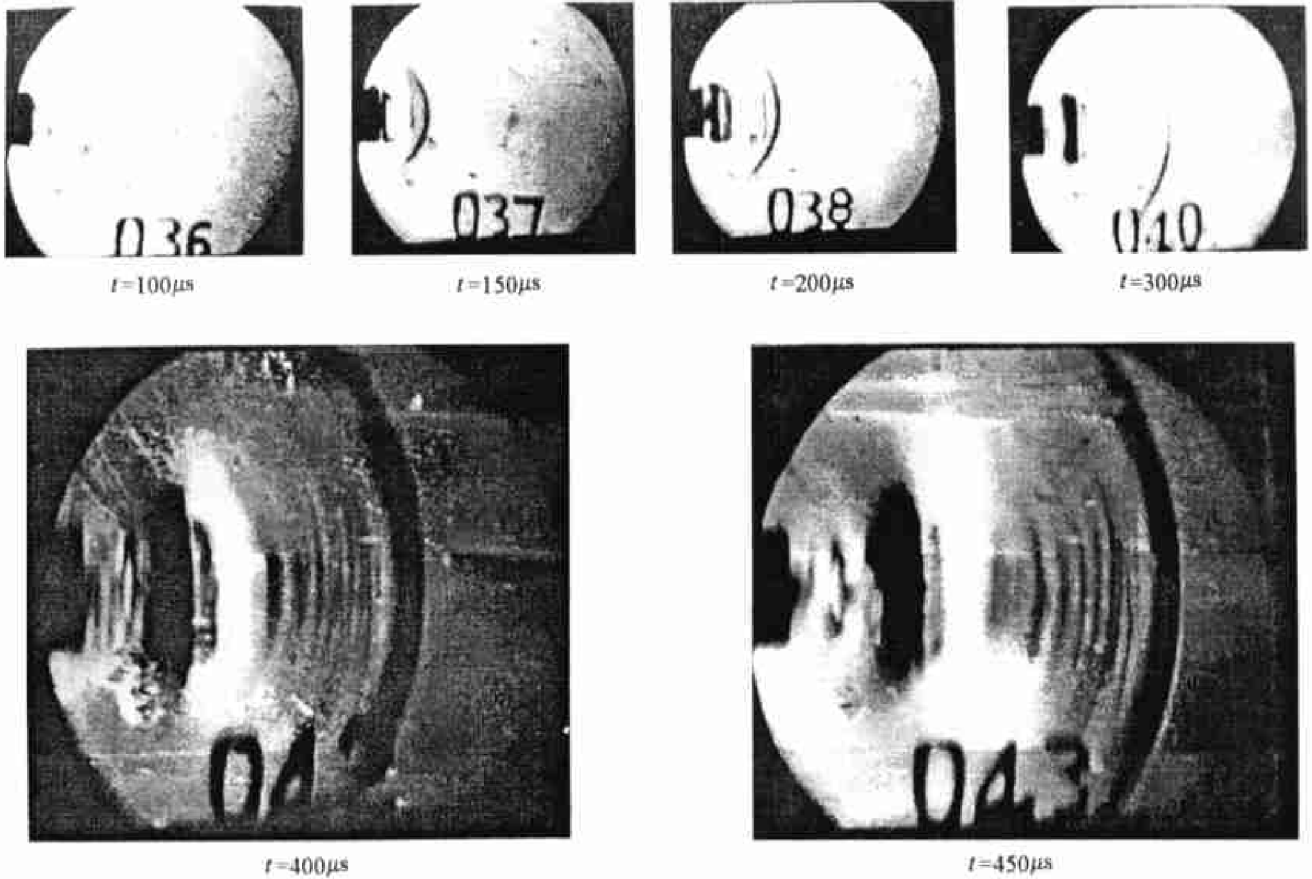


图3 激波推出喷口及在大气中传播 ($Ma=1.43$)

Fig.3 Shock wave ejecting from tube and spreading in atmosphere

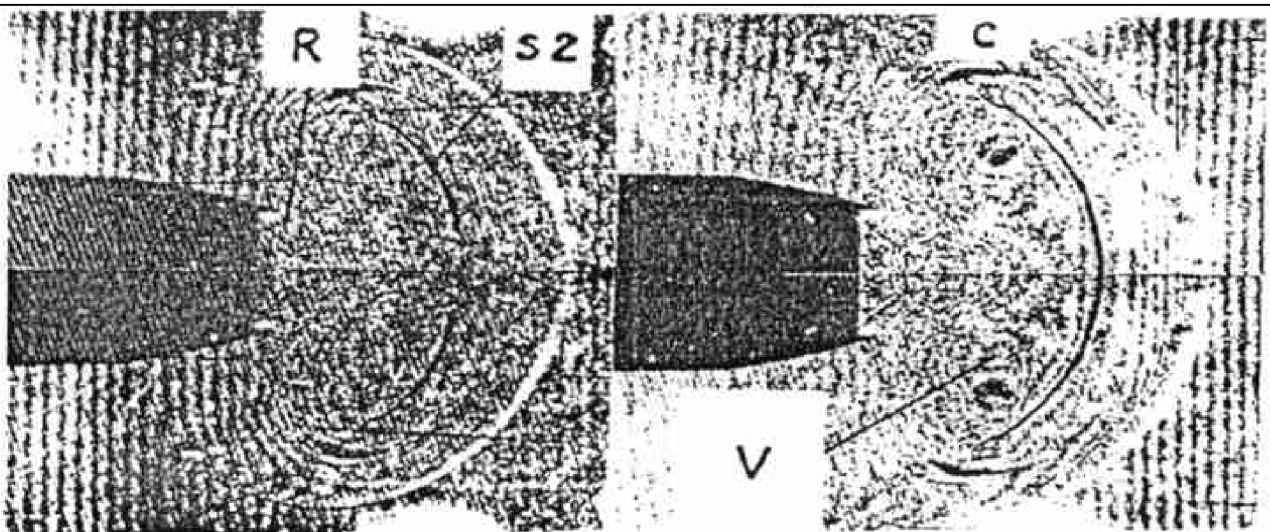


图4 从管口喷出的激波绕射的全息干涉图^[3]

Fig.4 Holographic interference pattern of shock wave diffracting when ejecting from tube

从 S. B. Bazarov 等^[3]的研究可以看到,主激波和二次激波之间还有接触面,二次激波之后也有一对旋涡,见图 4。K. Takayama 等^[4]的实验和数值结果也十分清晰地显示出涡环。

M. Brouillette 等^[5]的研究指出涡环前方形成正激波的条件是涡环足够强大, $Ma \geq 1.34$ 。这时经过涡环回流区的流动可能是超声速,从而形成一道与主激波运动反向的正激波。比较图 3 ($t=200\mu\text{s}$)和图 5 ($t=200\mu\text{s}$)可以看到提高激波马赫数的影响:提高 Ma , 涡环的尺寸与形态变化不大,但前方正激波与涡环的距离已相对拉开,二次激波与主激波相距也增大,阵面变化不明显。静压探头测到的压力波形中,涡环经过的时间段,有十分明显的负压尖峰^[5]。

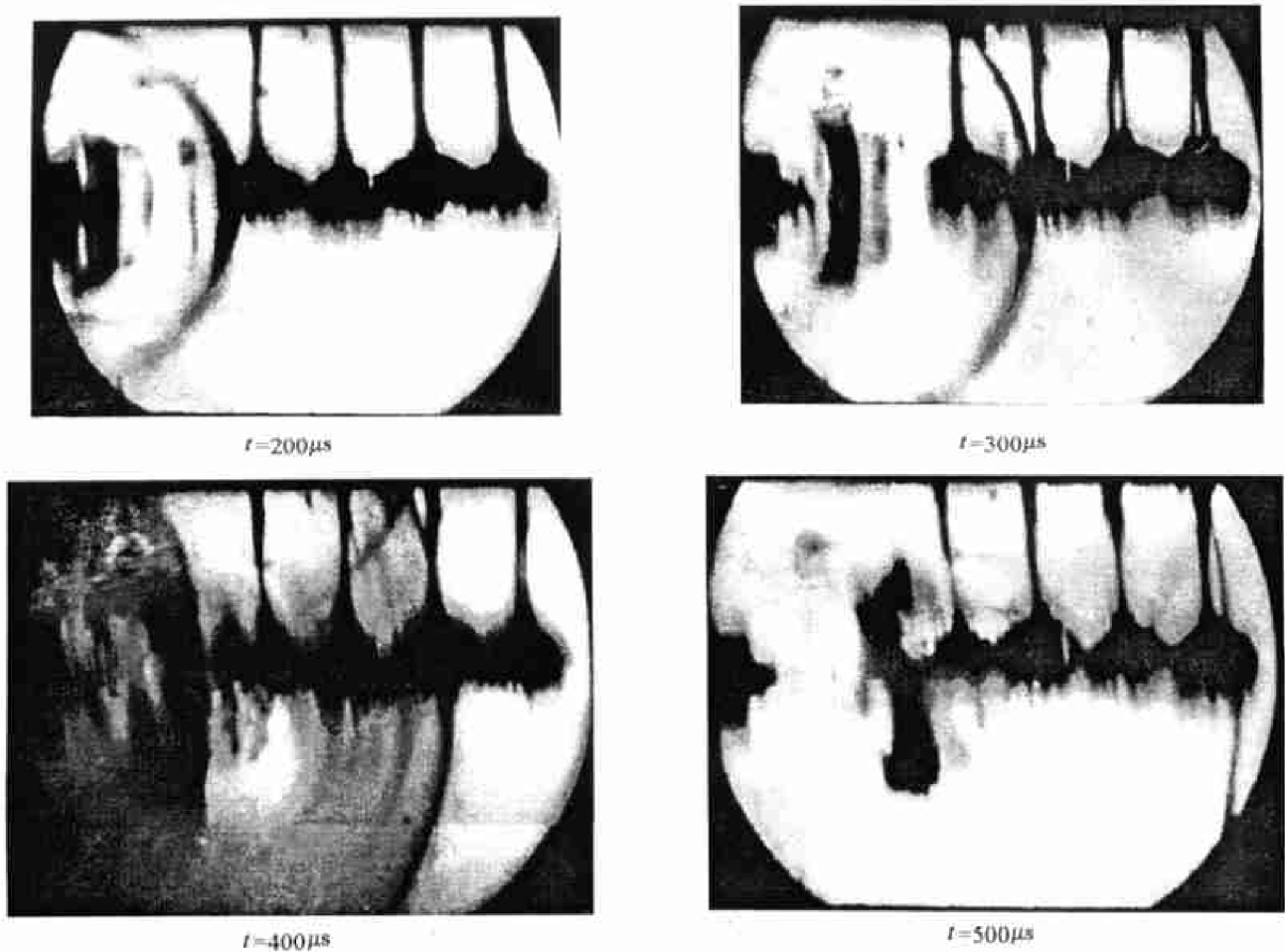


图 5 激波在林带中的传播 ($p_4=1.125\text{MPa}$, $Ma=1.64$)

Fig. 5 Propagation in forest belt of shock wave

3.3 激波在林地中的传播

图 5 为激波在林带中传播的一组照片,可以看到与图 3 基本相同的特征,但激波与林地的作用已很明显。图 5 中, $t=300\mu\text{s}$, 已经看到激波与林地相撞; $t=400\mu\text{s}$, 已经发生激波反射; $t=500\mu\text{s}$, 已形成马赫杆(部分与树干重迭),这与激波在地面的传播现象是一致的^[6]。在与林带相遇之前,涡环基本上维持原来的形态,与林带相碰则发生扭曲与变形,林冠似乎对涡环有阻滞效应。图 6 是林带的压力波形,图中下迹线为 T_2 传感器信号。从图可以到,可能是林带不够稠密,也没有冠木层次,林带对激波的传播速度影响不大,但比较林前(a)、林中(b)和林后(c)的波形幅度,正压和负压的幅度差别逐渐削弱,林带有明显的消波效应。

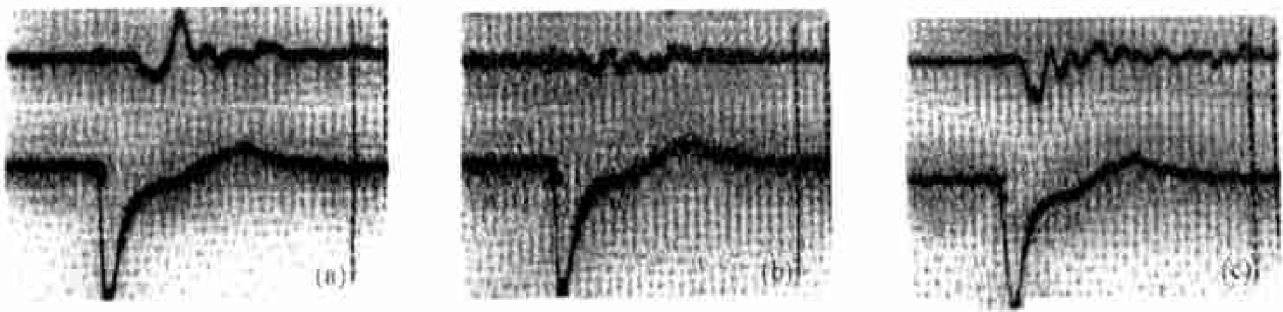


图6 林地的压力波形 ($p_4=0.617\text{MPa}$, $x=265\text{mm}$)
Fig.6 Pressure wave when shock wave sweeping forest ground

4 结 论

激波从管道中喷出进入扩张空间产生的绕射现象, 将导致主激波阵面弯曲、衰减, 二次激波形成与合拢, 以及涡环的长大、前传、贴近前缘出现正激波等一系列复杂过程。如果主激波强度足够大, 管口的喷流将达到过膨胀条件, 管口还会形成复杂的斜激波驻波系统。激波掠过林地其传播速度变化不大, 但正、负压幅度差别缩小, 林带的消波作用明显。涡环以小于主激波的速度前传, 与林带相遇, 其形态发生变化, 林冠对涡环可能有阻滞效应。

参考文献:

- [1] Grishin A M. Interaction of Shock Waves with Tree Crowns and the Front of Crown Forest Fires: III [A]. Brun R. Shock Waves [C]. Berlin Heidelberg: Springer-verlag, 1995. 411—416.
- [2] 常熹钰, 刘石明. 一座激波管参数计算与分析 [A]. 俞鸿儒. 第六届全国激波管与激波学术会议论文集 [C]. [s. n.], 1992. 280—285.
- [3] Bazarov S B, Bazhenova T V, Golub V V. Three-Dimensional Shock Ejection from a Channel: IV [A]. Brun R. Shock Waves [C]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1995: 13—138.
- [4] Takayama K, Jiang Z. Reflection and Focusing of Toroidal Shock Waves from Co-Axial Shock Tubes [R]. AIAA 97-0523, 1997.
- [5] Brouillette M, Tardif J, Gauthier E. Experimental Study of Shock-Generated Vortex Rings: IV [A]. Brun R. Shock Waves [C]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1995. 361—366.
- [6] Brossard J. Pressure Loads on a Plane Surface Submitted to an Explosion [A]. Brun R. Shock Waves [C]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1995. 387—392.
- [7] 常熹钰, 文定元, 易仕和, 等. 激波与森林作用的实验研究 [J]. 火灾科学, 1999, 8(2): 56—61.

Shock Ejection from a Tube and Propagation in Forest Belt

CHANG Xi-yu¹, YI Shi-he¹, LUO Jun-rong¹, ZHOU Yong-wei¹,
WEN Ding-yuan², DENG Xiang-wen²

(1. *National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China;*

2. Department of Natural Resources and Environment,

Central South Forestry College, Zhuzhou Hunan 412006, China)

Abstract: The diffraction process produces a very complex flow field when a moving shock wave emerges from the open end of a shock tube. In this paper, the experiments by using a shock tube and its primary results are presented. Two basic problems are considered: the shock wave ejecting from a tube and propagating in forest belt. The experimental results are: 1. The complex flow field introduced by the shock wave ejecting from a tube was observed, such as the curvature and attenuation of primary shock wave, the formation and joint of the secondary shock wave, the growth and development of the vortex rings, the occurrence of normal shock wave in front of the vortex rings and so on. 2. The propagation process of a shock wave in the forest belt is shown on photographs, such as the shock wave reflection on the forest, the formation of Mach stem, the intersection of a shock wave with the forest crown, the obstruction effect of the forest crown and so on. 3. The ground pressure along the propagation direction of a shock wave was measured; the results show that the wave elimination effect of the forest belt is very obvious.

Key words: shock wave; forest; simulation