

生物激波管的数值模拟

李馨东 胡宗民 姜宗林

(中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室, 北京海淀区 100190)

一、引言

生物激波管主要模拟爆炸波三个参数: 超压、正压作用时间以及正压作用后的负压。国内外分别在 60 和 90 年代分别研制的生物激波管产生的波形都是通过实验获得的, 与真实的爆炸波形还存在一些差异, 且难以获得典型的负压波形, 模拟的程度较差。利用特征线法的理论和实验可以分析扩张激波管的管内流场, 但这种理论仅适用于简单结构的激波管, 难以对复杂结构的激波管进行整体计算和分析, 具有一定的局限性。另外, 鉴于 90 年代计算机的运行效率还不高, 利用数值方法研究生物激波管的文献至今也很少见。因此, 本文通过数值模拟分析了能产生理想爆炸波形的激波管的几何外形, 为实际应用提供一些参考。

二、模型与计算方法

2.1 物理模型

本文研究的生物激波管主要由驱动段前锥、驱动段、试验段、扩张段 1-4、收缩喉道以及真空段等组成, 如图 1 所示。通过数值模拟分析图 1 中激波管各个组成部分对爆炸波形的影响, 以此判断生物激波管结构的合理性与优劣。典型的爆炸波形如图 2 所示。

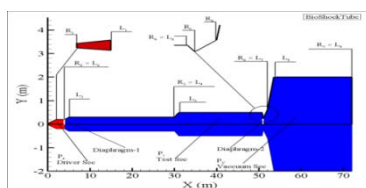


图 1 生物激波管结构示意图

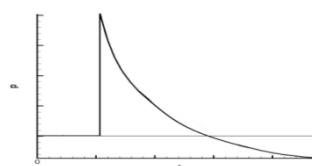


图 2 典型的爆炸波形

2.2 计算方法

假设气体是完全气体, 不考虑体积力, 外部热源和流体热 (汇), 守恒型的二维 Euler 方程组为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial S}{\partial y} = 0$$

S 为几何源项, $i=0, 1$ 分别表示平面和对称的情形。计算区域采用贴体单块网格, 差分方法为 DCD 格式。初始条件预先给定, 边界为刚性壁面, 满足滑移反射条件。

三、数值结果与分析

以下分别是驱动段前端无锥, 有锥, 双扩管, 收缩喉道以及真空段压力值变化的对比结果。

3.1 爆炸波形的比较

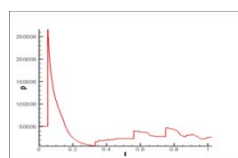


图 3 驱动段无前锥的波形

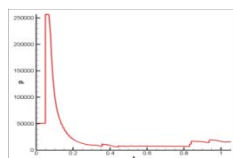


图 4 驱动段增长的波形

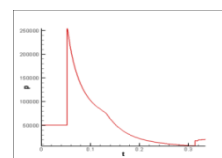


图 5 驱动段有前锥的波形

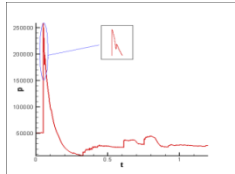


图 6 有双扩张管的波形

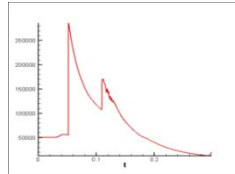


图 7 有收缩道的波形

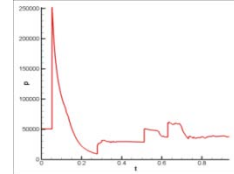


图 8 真空段增压的波形

3.2 纹影图的比较

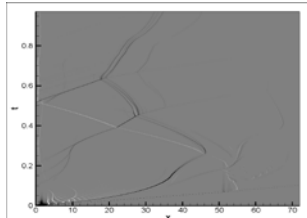


图 9 无前锥的密度纹影图

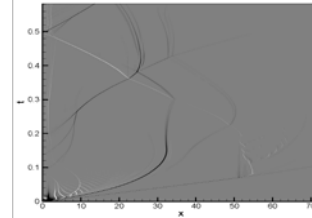


图 10 有前锥的密度纹影图

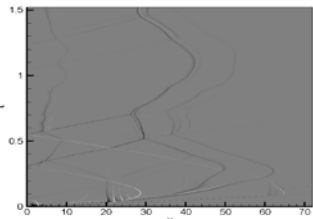


图 11 有双扩张管的密度纹影图

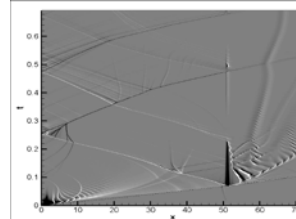


图 12 有收缩喉道的密度纹影图

3.3 密度和压力的流场比较

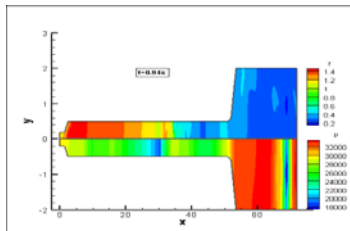


图 13 无前锥的密度和压力分布

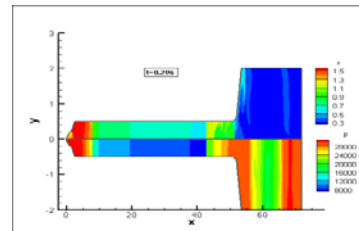


图 14 有前锥的密度和压力分布

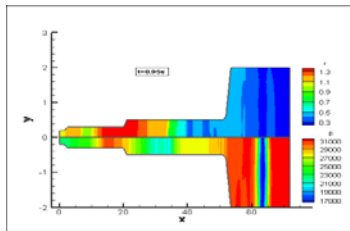


图 15 有双扩张管的密度和压力分布

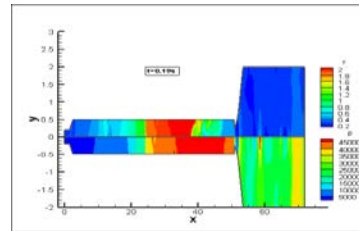


图 16 有收缩喉道的密度和压力分布

四、结论

本文通过大量的数值模拟，分析了生物激波管能产生理想爆炸波波形的几何结构，由于篇幅有限仅给出了激波管主要结构的计算结果，从定性上得出了以下结论：

- (1) 驱动段不能太长，否则爆炸波波形会出现压力平台现象。
- (2) 驱动段长度不变时，其前锥的有无都能获得较理想的爆炸波波形，但正压作用的时间会有所增长。
- (3) 在试验段前端设置双扩张结构会使波形产生不太明显的二次峰值，设计时需要在单、双扩张结构进行权衡。
- (4) 真空段不宜设置收缩喉道，正压区会产生强烈的二次峰值，无法得到理想的波形。
- (5) 通过增加或减小真空段初始压力，可以使爆炸波的负压区随之也增大和减小，当初始压力过大时，负压区可能又会出现正值。