

力学与工程应用

(第十四卷)

本书编委会 编

执行主编 孙利民

 郑州大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

力学与工程应用. 第14卷/孙利民主编. —郑州:郑州大学出版社,
2012.8
ISBN 978-7-5645-1018-3

I. ①力… II. ①孙… III. ①力学-文集②工程力学-文集
IV. ①O3-53②TB12-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第173155号

郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路40号

出版人:王 锋

全国新华书店经销

河南省公安厅文印中心印制

开本:850 mm×1168 mm 1/16

印张:29.25

字数:1216千字

版次:2012年8月第1版

邮政编码:450052

发行部电话:0371-66966070

印次:2012年8月第1次印刷

书号:ISBN 978-7-5645-1018-3

定价:70.00元

本书如有印装质量问题,请向本社调换

《力学与工程应用》 编审委员会

主任委员 姚振汉

委 员 佟景伟 施惠基 刘 波 邢永明

梁醒培 陈维毅 周慎杰 隋允康

李鸿琦 孙利民 杨 强 陈永强

李林安 范慕辉 桑建兵 王 晔

执行主编 孙利民

前 言

第十四届北方七省市区力学学会学术会议将于 2012 年 8 月 10 ~ 13 日在山东威海召开。自 1986 年开始,北京、天津、河北、河南、山东、山西、内蒙七省、市、自治区的力学学会联合召开学术会议,每两年一次,从未间断,此次是第十四届。这个系列会议的目的是加强北方七省市区力学工作者之间的联系,促进交流和合作,既包括七个省、市、区力学工作者之间的交流,也包含高校老师、研究生和来自研究院所和工程单位的力学工作者之间的交流。除了交流力学基础研究、应用基础研究以及力学的工程应用方面的最新成果之外,还着重交流在力学教学和教改方面的经验。同时会议特别鼓励年轻力学工作者在科研及教学方面取得成果,并鼓励为所在省市区的发展作出贡献。

本论文集收录会议交流的全部学术论文,包括流体力学、固体力学、动力学与振动、实验力学、计算力学等各分支学科,以及力学与工程应用,同时包括力学教学内容和教学方法改革的经验体会和力学科普论文,共 131 篇,在篇数上超过以往各届。

此系列会议由北方七省市区力学学会及联合组成的学术工作委员会负责组织,列入中国力学学会主办的学术活动目录。本届会议的筹备会议于 2011 年由北京力学学会承办,本届会议由山东力学学会承办,会议论文集由河南省力学学会负责联系出版。

感谢为本次学术会议提供论文的、出席会议的各位学者和研究生,感谢为本次会议的召开作了大量工作的论文编审委员会的成员,感谢为本论文集的出版付出辛勤劳动的郑州大学出版社的领导和编辑同志们,感谢为会议提供了服务和重要支持的朋友们。

孙利民
二〇一二年七月

目 录

第一部分 力学研究与工程应用

【流体力学】

斜激波到斜爆轰波的过渡区结构及其转变准则研究	
滕宏辉 姜宗林	3
超声速边界层对扰动波反射的研究	
高 军 罗纪生	9
超声速补燃室流场数值模拟	
张永芝 傅 安	12
亚声速自由剪切混合层群并作用相差分析	
杨武兵 沈 清 王 强	16
三维亚声速气动声场无反射边界条件数值分析	
冯 峰	21
基于可压涡方法的旋涡合并研究	
黄 国 刘 宇 黄海明	25
羽流对月尘运动影响的计算方法研究综述	
崔玉红 马月聪	29

【固体力学】

弹性体中两相交裂纹的断裂问题	
张琳楠 秦太验	34
轴向冲击载荷下三角形网格圆柱结构的吸能性能研究	
林晓虎 杨庆生	38
固体力学中的拟时间:哈密顿体系与内蕴时间理论研究进展	
褚洪杰 王世斌 崔国起 李林安	42
球向均匀各向异性压电介质的特殊性质	
高 阳 张亮亮	45
考虑应变梯度影响的 Kirchhoff 微板的尺寸效应研究	
王炳雷 赵俊峰 周慎杰	50



压载作用下复合材料孔板强度预测研究

周龙伟 刘丰睿 支 杰 赵丽滨 54

刚性颗粒增强锌铝基复合材料界面损伤研究

李 磊 张 丽 王桂珍 57

纤维增强复合材料本构关系分析

李冠鹏 59

材料各向异性对薄壁圆管屈曲行为的影响

孙玉周 张志增 孙耀龙 62

承受自身重力的两端铰支杆的后屈曲构型

刘建林 65

【动力学与振动】

基于附加质量处频率偏移曲线的结构损伤检测方法

向志海 张 尧 陆秋海 70

桥梁动力检测及模型试验

刘习军 袁小钦 张素侠 73

带边角裂纹悬臂矩形板的振动特性研究

陈丽华 孙 玥 张 伟 77

水电机组振动的起因及其力学分析

陈贵清 郝婷月 杨雪梅 贾培强 81

覆冰输电线横向自激振动的两种近似解及舞动原因分析

段巧巧 闫安志 84

微结构固体中孤立波形成过程的数值模拟

那仁满都拉 额尔敦仓 韩元春 87

【实验力学】

电化学腐蚀对铝合金疲劳性能的影响

李 理 付 明 施惠基 91

基于 AFM 探针测量材料近表层的力学性能

苏东川 李喜德 94

SNOM 系统中光纤探针的动力学性能研究

高峰利 李喜德 97

基于弱磁检测的损伤判据及参数识别

姚 凯 王正道 沈 锐 黄 亭 99

环氧树脂基形状记忆聚合物黏弹性实验研究

宋卫宾 王正道 103

太赫兹波时域光谱下应力双折射现象的研究

宋 威 王志勇 106

风力发电机组的无线远程监控系统

孙利民 魏 然 108

钢结构长期实时应力监测的电测技术研究

孙士刚 李林安 曹爽秋 郑子辉 尚逊聪 112

离心混凝土输电杆塔弯曲试验

梁醒培 王 辉 段 军 115

浅圆仓动态压力及偏心卸料试验研究

原 方 李晓东 宋要辉 119

【计算力学】

复合材料模拟快速边界元法的若干研究

姚振汉 124

纳米非均质半平面问题的边界元分析

董春迎 128

结构安定上限分析的自然单元法

周书涛 刘应华 131

基于基本解的杂交有限元法及特殊孔洞单元的构造理论

王 辉 赵新娟 白 杨 韩明月 137

附加-凝聚的平面四边形八节点热传导单元

段 军 杜 丽 梁醒培 王建伟 141

加筋圆柱壳屈曲与后屈曲分析

龙连春 李 洋 赵 斌 145

横向均布载荷作用下扁球壳跳跃的有限元数值模拟

胡文飞 陈昭怡 王宝俊 149

不同地质边坡稳定性数值分析及加固措施

杜春志 王亚东 153

超高强钢点焊结构优化设计

王伟伟 宇慧平 刘跃华 157

钢套筒施工中的有限元分析

王 帅 孙士刚 李林安 李鸿琦 161

形状记忆聚合物环氧热变形机理的分子动力学模拟

杨 华 王正道 165

应用蒙特卡洛模拟预测多部位损伤的发生概率

赵金龙 张建宇 169

基于粒子随机游动的水交换计算模型的效率分析及应用

李原仪 刘 博 袁德奎 173

预应力 LNG 储罐在地震作用下的流固耦合数值模拟

杜显赫 沈新普 刘应华 178

大展弦比无人机机翼有限元分析

王 静 李洪来 辛 靖 183

碳纤维/环氧树脂基复合材料层合梁力学行为的有限元分析

李 晔 邢永明 郎凤超 姜爱峰 185

微谐振器品质因子的有限元分析	
姜 燕 孙玉鑫 杨嘉陵	188
基于 ANSYS 的二维漏磁有限元数值模拟	
沈 铠 王正道 姚 凯 黄 亭	191
思林铁路隧道力学行为分析	
杨尚阳	195

【生物力学】

生物软组织纳米压痕测试方法的最新进展	
杨庆生 刘志远 李 熙	198
软骨含水量对其纳米硬度及动态纳米力学性能的影响	
刘志远 杨庆生 李 熙	202
非围限压缩载荷作用下关节软骨的力学行为研究	
高丽兰 张春秋	206
用于软骨组织工程的双频加载装置研制	
门玉涛 刘海英 徐 强 董 心 张春秋 叶金铎	209
主动脉夹层动脉瘤血流动力学数值分析	
彭红梅 杨德全	212
单个细胞在剪切流场中的跳跃现象	
崔玉红 翟雅斌 李文娇	215

【力学的工程应用】

基于 LabJackU12 的载荷自动控制系统设计	
薛秀丽 王世斌 贾海坤 李林安	220
无砟轨道后张法预应力混凝土简支箱梁预应力损失计算	
谢东海 叶曙光 冯松山	223
双工字钢混凝土柱界面的滑移位移研究	
梁 斌 毛 蕊	226
轻质复合墙板的抗弯承载力试验与理论研究	
臧海涛 侯和涛 陈 璐	230
钢结构杆件拆除施工方法的有限元分析及工程应用	
周俊龙 李林安 曹爽秋 郑子辉 尚逊聪	236
混凝土桥梁的系杆梁端部损伤的仿真分析	
郝士科	240
吊杆损伤对郑州黄河二桥影响分析	
张光耀	242
利用 db3 小波包分解技术进行移动载荷下桥梁响应的损伤识别	
张伟伟 赵子龙	245
基于遗传支持向量机的烟海高速解家河隧道围岩分类研究	
吕国仁 邱道宏	249

挤密砂桩在南水北调穿黄工程中的应用	
刘起霞 白 杨	253
基于蠕变模型的轴载作用下沥青路面车辙分析	
郭成超 肖丽霞 乐金朝	257
固体火箭发动机静止试验推力架优化设计	
李 铁 李 卓	263
深海载人球观察窗的优化设计及应力分析	
宗宇显 刘道启	267
固体火箭发动机药柱基于 POLYFLOW 的黏弹性流动分析	
邓高明 张永芝	270
镁合金薄壁承压头罩有限元分析	
马震宇 任福民 夏玉龙	272
夹钳式钢坯吊具动力学分析	
张 鹏 赵怀璧 安利强 王璋奇	276
捻距对钢丝绳绳丝力学性能影响数值模拟	
唐守政 段中强 赵子龙	281
一种新型组合钻具引孔技术在基础工程中的运用	
刘起霞 陈 丽	284
雅砻江锦屏一级电站高边坡稳定性分析	
郭 斐	288

第二部分 力学教学与科普

【力学科普】

洗碗池中的流体力学问题	
朱克勤	293

【力学教学与改革】

工科研究生创新能力培养的实践	
张建宇 赵丽滨 费斌军	296
谈力学类课程对大学生分析问题能力的培养	
刘起霞 陈俊旗	301
本科生学习兴趣浅谈	
张素侠	304
天津城市建设学院与 UC 伯克利结构工程专业课程设置模式的比较研究	
杜欣新 毛 巍	306
创新力学工科教育、教学课程体系	
贾启芬 张素侠 刘习军 袁德奎	309



理论力学 & 材料力学 & CAE 的工科基础力学课程体系构建与实践

李建宇	311
教学团队建设评估体系的研究与实践	
刘起霞 赵 阳	314
工程力学毕业论文质量保障体系的研究与实践	
白新理 张多新 杨开云 何 伟 郑恒祥 周 娟	320
力学应用的可视化案例教学	
刘小红 刘建秀	323

【理论力学】

土木工程专业理论力学课程实验教学改革探索

刘 燕 魏建国	326
工科理论力学课程教学内容改革的几点体会	
马英忱 倪新华 张淑琴 谷青华	328
浅议理论力学课程的混合式教学	
张淑琴 倪新华 程兆刚 曹洪娜 张莹莹	329
理论力学教学改革初探	
郎凤超 姜爱峰	331
理论力学教学中对学生工程素质培养的思考与措施	
梁清香 戴保东 赵子龙	334
讲好理论力学课的几点体会	
曹洪娜 张淑琴 王凌英 张莹莹 赫万恒	336
"刚体平面运动"教学的几点体会	
张淑琴 马英忱 韩保红 谷青华 赫万恒	338
理论力学课程运动学的教学实践	
阮江涛	341
理论力学中三力平衡汇交定理的推广	
郭俊宏 马瑞平	345
关于速度合成定理证明的问题	
邵 兴	348
力学课程中的几何瞬变体系	
赵子龙 张伟伟 梁清香	350
协同仿真技术在机器人轨迹控制教学研究中的应用	
王继燕 胡庆泉	353
关于理论力学双语教学的几点思考	
晋艳娟 李兴莉 陈艳霞 张俊婷	358
理论力学试题库系统开发与研究	
王 毅 刘铁军 冯锡兰 陈小霞	361

【材料力学】

材料力学混合循环体系的研究与教学实践	
叶金铎 门玉涛 张春秋	364
材料力学教学改革尝试	
高保凤	367
材料力学教学中学生作业创新实践	
李冬霞 孙玉周 王锦燕	370
浅谈材料力学教学方法	
李红梅 任小强	373
浅谈材料力学的教学	
张永芝 李 卓	376
求解超静定梁的快速解析法	
李银山 刘 波 桑建兵 吴艳艳	379
Maple 在材料力学中的应用(五)——绘制复杂载荷下梁的剪力图和弯矩图	
李银山 李铁军 范慕辉 潘文波	383
MATLAB 在材料力学中的应用	
王 晔 杨 姝 谢将龙	386
基于判别最大正应力方向的教学感悟	
张晓燕 姜爱峰 郎凤超	389

【工程力学】

高职工程力学教学应注重实际应用	
王晓波	392
浅谈工程力学教学方法改革	
刘雯雯 孙利民 王 志 杜云海	394
工程力学课程教学方法改革探索	
王 晔 杨 姝	398
数值模拟在工程力学课程教学中的应用研究	
桑建兵 于文英 焦永树 范慕辉	401

【力学实验】

强化实验环节 培养学生综合能力	
于文英 桑建兵	404
力学虚拟实验系统在实验力学教学中的应用	
马少鹏 水小平 马沁巍 严 冬 李江城 刘战伟 谢惠民	407
材料力学电子实验报告系统的构建与实现	
常利武 孙玉周	410
材料力学实验教学改革的思考及探索	
李 琳	414

浅析如何利用力学实验室更好地培养学员的工程素质

程兆刚 倪新华 张淑琴 曹洪娜 王凌英 416

浅谈实验力学课程教学与学生综合素质的提高

姜爱峰 于丽英 康补晓 朱 红 418

CFRP 约束预压混凝土方柱轴压性能试验研究

刘宝会 刘铁峰 王洪奇 华 玉 420

摆锤式冲击试验机的示值不确定度分析

李万升 423

【专业课程】

提高力学专业“弹性力学”课程教学质量的研究和实践

李 磊 张 丽 王桂珍 425

塑性力学课程教学的探索与实践

王 晔 杨 姝 428

 J_2 弹塑性分析的二阶锥互补法

李建宇 张洪武 431

工程振动与测试——国家精品课建设

刘习军 张素侠 435

振动力学课程的实践教学改革尝试

张晓燕 姜爱峰 郎凤超 439

“有限单元法”教学方法探讨与实践

韦广梅 冀国俊 441

航空航天概论公共选修课教学初探

马震宇 王林林 443

少学时建筑力学课程教学改革探讨

王 志 孙利民 杜云海 刘雯雯 姚姗姗 445

结合 CDIO 理念的飞行器动力工程专业导论课程设置与教学实践

王林林 赵 辉 马震宇 高长银 赵 怡 449

第一部分 ▶▶▶

力学研究与工程应用

【流体力学】

斜激波到斜爆轰波的过渡区结构及其转变准则研究

滕宏辉 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 100190)

摘要 采用三步链支化反应模型对斜爆轰波进行了数值模拟, 研究了化学动力学参数和气体动力学参数对过渡区结构的影响。研究表明存在突变和渐变两种过渡区结构, 它们受到来流马赫数、链支化反应温度比、活化能和放热量的影响, 但是过渡区结构对这些参数的依赖关系和爆轰波不稳定性对这些参数的依赖关系明显不同。在极曲线分析的基础上, 提出了判定斜爆轰波过渡区结构类型的角度差准则, 即斜激波/爆轰波角的差别大小是导致不同过渡区结构的内在原因。较小的角度差导致渐变过渡区, 较大的角度差导致突变过渡区, 研究表明过渡区转变发生在角度差 15° 到 18° 之间。最后还与以前提出的时间比准则进行了对比分析, 进一步论证了角度差准则的优越性。

关键词 斜激波; 斜爆轰波; 过渡区; 转变准则

一、引言

利用超声速气流中的楔面滞止可燃气, 能够形成斜爆轰波。斜爆轰波能够诱导剧烈的燃烧反应, 并且在斜爆轰超燃冲压喷气推进系统和冲压加速器中得到了应用^[1]。对斜爆轰的研究目前还处于基础研究阶段, 主要关注斜爆轰的结构特征和稳定性。早起的实验和数值结果^[2,3]揭示了激波、爆轰波和接触间断的复杂相互作用。后来的研究^[4]还采用基元化学反应模型, 研究了斜爆轰波形成的非定常过程, 讨论了压力、温度、马赫数等对形成过程的影响。然而, 由于涉及复杂的强弱间断及其相互作用, 对斜爆轰波的结构和稳定性还缺乏规律性的认识。通常在楔面作用下, 首先会形成斜激波, 经过激波压缩的气体会发生化学反应, 在下游形成斜爆轰波, 因此整个斜爆轰波结构的波面是由无反应的斜激波面和有反应的斜爆轰波面两部分组成的。从斜激波过渡到斜爆轰波的过程可以看成斜爆轰波的形成过程, 其过渡区的结构是影响整个斜爆轰结构的核心问题之一。以前的研究表明^[5], 斜爆轰波的过渡区结构有两种——渐变和突变, 而后者更为常见。然而, 对这两种结构的内在形成机制还缺乏深入的研究, 其受到哪些因素的影响还不清楚。本文采用链支化反应模型对斜爆轰波进行了数值模拟, 研究了不同的化学动力学和气体动力学参数对过渡区结构的影响, 并通过斜激波/斜爆轰波的极曲线进行了理论分析和探讨。

二、数学物理模型

超声速可燃混合气流中的斜爆轰波模拟区域示意图如图 1 所示。由于气流超声速传播, 首先会在楔面上方形成以顶点为起点的斜激波, 其与楔面的夹角取决于来流马赫数。进而由于斜激波诱导了可燃混合气体的燃烧反应, 在下游会形成复杂的斜爆轰结构。为了数值模拟方便, 坐标系进行了旋转使之和楔面方向一致。以前的研究表明这种结构受到黏性和边界层影响较小, 因此控制方程采用了 Euler 方程, 结合理想气体的状态方程。本文的燃烧模拟采用了三步链支化反应模型^[6]。这个模型由三个并行的反应, 即链起始反应、链支化反应和链终止反应。

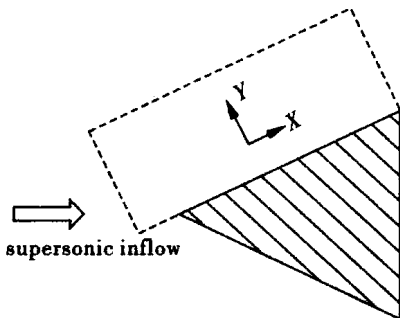
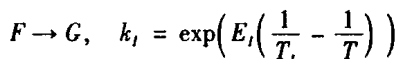
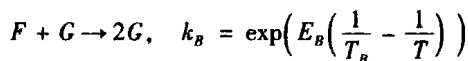


图 1 斜爆轰波模拟示意图

1. 链起始反应

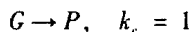


2. 链支化反应





3. 链终止反应



其中 F 、 G 和 P 分别表示燃料、中间粒子和燃烧产物。链支化反应模型是介于传统的两步反应模型和基元反应模型之间的一种化学模型,能够很好地表示燃烧的化学动力学过程,在爆轰波不稳定性和起爆等方面得到了应用。结合上述模型,可以得到两个质量守恒方程,即:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho f}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u f)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v f)}{\partial y} &= -\rho(w_l + w_B) \\ \frac{\partial \rho g}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u g)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v g)}{\partial y} &= \rho(w_l + w_B - w_C) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} w_l &= f \exp\left(E_l\left(\frac{1}{T_l} - \frac{1}{T}\right)\right) \\ w_B &= \rho f g \exp\left(E_B\left(\frac{1}{T_B} - \frac{1}{T}\right)\right) \\ w_C &= g \end{aligned}$$

这个模型引入了两个活化能和两个跃变温度 E_l 、 E_B 、 T_l 、 T_B 。在本文计算中,如果没有特别指出,则默认的参数值为 $Q = 8.33$, $E_l = 37.5$, $E_B = 10.0$, $T_l = 3T_s$, 其中 T_s 为激波后的温度。

控制方程的离散采用标准正交化 Cartesian 网格,激波捕捉格式采用 MUSCL-Hancock 格式,在时间和空间上都达到二阶精度,在网格边界上采用 HLLC 算子求解近似 Riemann 问题得到数值通量^[7]。在上边界和左边界为来流条件,在下边界 $x=0.5$ 之后为滑移壁面边界条件,其余为出口边界条件。楔面角度固定为 30° , CFL 数为 0.15。

三、数值结果分析

图 2 显示了在给定的控制方程和化学反应模型下一维爆轰波的振荡传播过程,其中链支化反应的跃变温度和波后温度之比 T_B/T_s 为可变参数。可以看到,对于不同的跃变温度比,一维爆轰波呈现出不同的稳定性特征。温度比 0.88 时,一维爆轰波是稳定的,初始扰动造成的振荡会逐渐衰减;温度比 0.90 时,一维爆轰波发展成为单模态振荡的传播形式;温度比 0.92 时,一维爆轰波发展为双模态振荡的传播形式。继续增加温度比,振荡模态会继续增加,并最终导致爆轰波的熄爆。这些模拟结果和以前的研究结果是类似的,在计算中诱导区网格约为 60~80 个,说明这种精度的网格能够对爆轰波的稳定性进行模拟,也为二维爆轰波的结构研究奠定了基础。

图 3 显示了来流马赫比 M_{in}/M_{CJ} 为 1.40 时得到了斜爆轰波流场,其中 M_{in} 表示来流马赫数, M_{CJ} 表示在给定参数下爆轰波的 CJ 马赫数。可以看到斜激波到斜爆轰波的过渡是通过一个三波点完成的,除了斜激波和斜爆轰波,在燃烧产物中还形成了一道向壁面延伸并反生反射的激波。这种结构是一种常见的斜爆轰波结构,称为斜激波到斜爆轰波的突变结构。

图 4 显示了来流马赫比 M_{in}/M_{CJ} 为 1.50 时得到了斜爆轰波流场,可以看到斜激波到斜爆轰波过渡是通过一段弧形的波面完成的,并没有形成三波点,在燃烧产物中也没有形成激波。这种结构称为斜激波到斜爆轰波的渐变结构。在以前的数值模拟和实验观察中,突变结构已经得到了证实,但是渐变结构仅仅出现在数值模拟中,其存在与否仍然存在争议。为此,需要对数值模拟的结果进行分析,找出渐变结构出现的条件,进而才能设计合适的实验进行观测验证。

为了研究斜爆轰波结构的变化规律,首先需要定义一个临界马赫数 M_c 。图 3 和图 4 的数值结果表明较低的来流马赫数会导致突变的过渡区结构,而较高的马赫数导致渐变的过渡区结构。因此,临界马赫数 M_c 定义为出现突变结构的最大马赫数,在本文的计算中精确到 0.01。保持图 3 和图 4 的计算中采用的化学动力学参数不变,改变来流马赫比对 1.40 到 1.50 之间的斜爆轰波进行数值模拟,发现马赫数比 1.44 时仍为突变结构,马赫数 1.45 时为渐变结构,因此临界马赫数 M_c 为 1.44。本文总共进行了 12 个算例的模拟,研究了跃变温度比、活化能和放热量对于临界马赫数的影响,见表 1。其中“mode 1”表示其参数对应的一维 CJ 爆轰波是稳定的,如图 2(a) 所示;

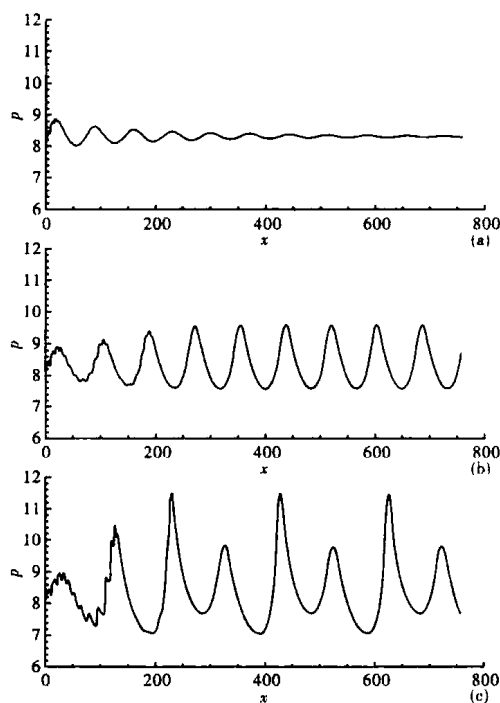


图 2 不同跃变温度下一维爆轰波稳定性
0.88(a)、0.90(b)和 0.92(c)

“mode 2”表示爆轰波是单模态振荡的,如图 2(b)所示;“mode 3”表示爆轰波是单模态振荡的,如图 2(c)所示。从算例 1~3 可以看到,随着跃变温度比的增加,爆轰波逐渐失稳,同时临界马赫数也略有增加。算例 4~6 由于活化能较低,对应的临界马赫数也较小,但是其变化规律是类似的。再对比相同温度比的算例 1、4 和 7~9,可以看到随着活化能的升高,爆轰波越来越不稳定,但是临界马赫数会逐渐减小。上述算例说明临界马赫数受到化学动力学参数的影响,这和爆轰波的不稳定性是类似的。但是临界马赫数对这些参数的依赖关系和不稳定性不同,跃变温度比升高和活化能升高都会导致爆轰波更加不稳定,但是临界马赫数并没有统一的变化规律。因此,临界马赫数和过渡区结构的决定因素并不是爆轰波的不稳定性,这和以前研究的结论^[5]是不同的。

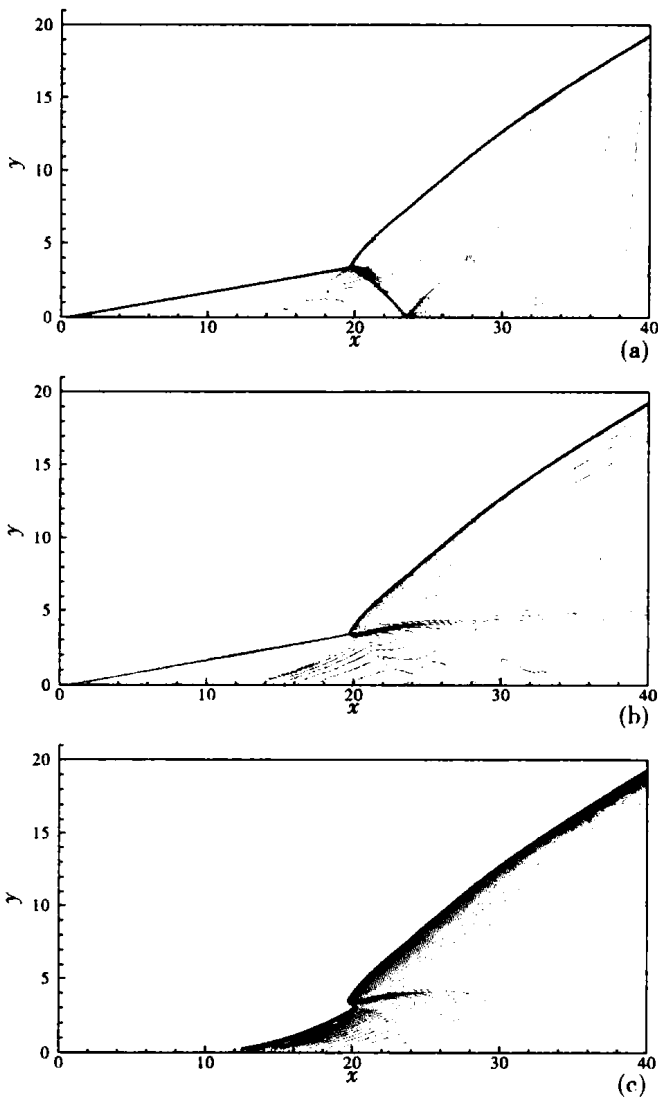


图 3 跃变温度 0.88、来流马赫比 1.4 条件下斜爆轰波的压力(a)、温度(b)和中间粒子密度(c)

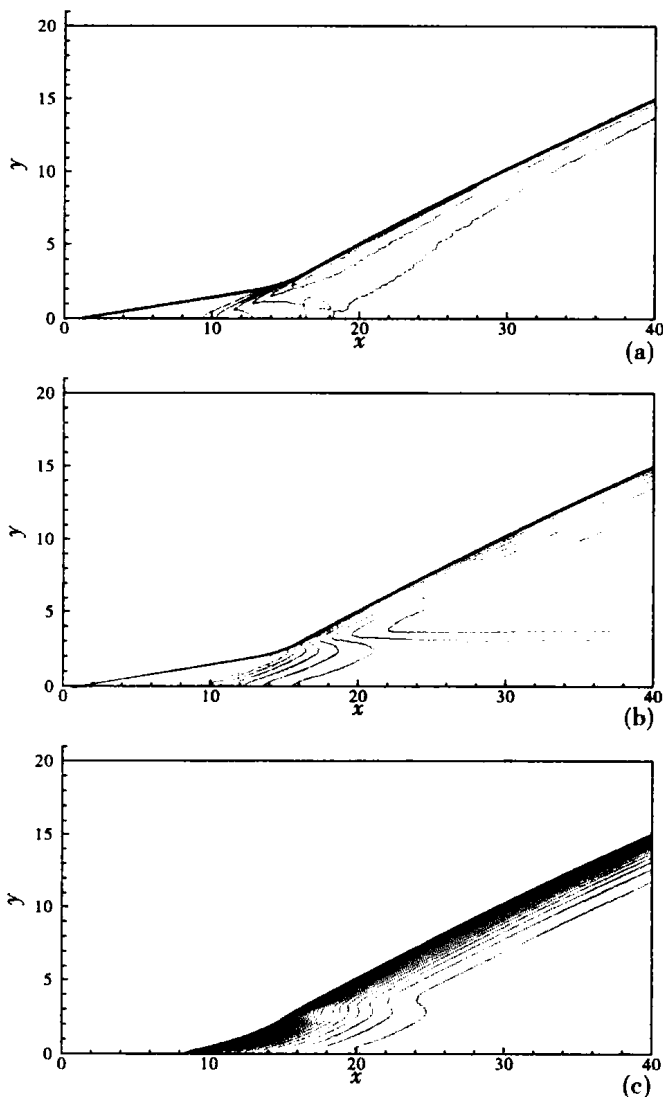


图 4 跃变温度 0.88、来流马赫比 1.5 条件下斜爆轰波的压力(a)、温度(b)和中间粒子密度(c)

为了研究放热量对于斜爆轰波结构和临界马赫数的影响,首先对于给定的活化能,找到对应于单模态振荡爆轰波即“mode 2”的最小跃变温度比,然后采用获得的参数进行模拟,见表 1 算例 10~12。值得注意的是由于化学反应放热量的变化, M_{CJ} 也会发生相应的变化,对应于放热量 10.0、15.0 和 20.0 分别为 3.27、3.89 和 4.42。但是可以看到临界马赫数变化并不大,从 1.47 变化到 1.51。由于 $M_{in} = M_{CJ} \times M_c$,实际来流马赫数变化还是很大的。这说明临界马赫数本身考虑了放热量对于爆轰波的影响,是一个较好的研究斜爆轰波过渡区结构的参数。但是由于临界马赫数具体、明确的物理意义,因此还需要对斜爆轰波过渡区结构的准则进行进一步的讨论。