

激光冲击强化数值计算中的光滑粒子法

周留成 李应红 何卫锋 周 磊 陈东林

(空军工程大学航空等离子体动力学实验室, 陕西 西安 710038)

摘要 为研究激光冲击强化(LSP)过程中激光诱导冲击波的时空分布规律,在对比分析有限元仿真的基础上,探索采用光滑粒子流体动力学(SPH)对激光冲击强化的物理过程进行仿真,并设计了冲击波测试平台,对仿真结果进行了初步试验验证。结果表明,SPH模型演化物理过程明显,计算结果和试验结果相似度高,为激光冲击强化物理仿真提供了一种新的研究思路和方法。

关键词 激光技术; 激光冲击强化; 光滑粒子流体动力学; 数值仿真

中图分类号 TG665; TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0803003

Computations of Laser Shock Processing by Smoothed Particle Hydrodynamics

Zhou Liucheng Li Yinghong He Weifeng Zhou Lei Chen Donglin

(Aero-Plasma Dynamic Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

Abstract Propagation of detonation waves and space-time regularities of distribution in laser shock processing is investigated, a new numerical simulation model of laser shock processing (LSP) is established by smoothed particle hydrodynamics (SPH) in contrast to finite element simulation method, and verified by experiments. Results show that SPH model has obvious physical process and good similarity to experimental results, providing a new mean for laser shock processing.

Key words laser technique; laser shock processing; smoothed particle hydrodynamics; numerical simulation

OCIS codes 140.3390; 240.6690; 350.3850

1 引言

激光冲击强化(LSP)是一种新型的材料表面改性处理技术,它利用高功率脉冲激光与金属材料相互作用过程中产生的高压冲击应力波,使冲击后的材料具有残余压应力和高的位错密度,从而大大提高材料的表面硬度和抗疲劳寿命等性能,其本质是利用激光诱导等离子体爆炸产生爆轰波的力学效应进行材料表面强化^[1~3]。

当前关于激光冲击强化的物理模型还不能清晰地描述约束条件下激光诱导等离子体爆轰波的时空分布规律^[4~8]。为了促进激光冲击强化技术的更好发展,需要进一步研究激光诱导等离子体爆轰波的产生机制和爆轰波约束条件下的多维发展模型。本文在对比分析基于有限元的激光冲击强化数值仿真的基础上,探讨采用光滑粒子流体动力学(SPH)法对

激光冲击强化的物理过程进行数值仿真,研究约束条件下激光诱导等离子体爆轰波的时空分布规律。

2 SPH 模拟

2.1 SPH 算法与有限元算法的对比分析

目前国内外对于激光冲击强化物理仿真模型主要基于有限元分析方法,但激光诱导的冲击波对材料的力效应,在很短的时间内会产生很大的塑性变形,而有限元分析方法解决大塑性变形时,划分的网格会产生扭曲,导致分析精度不高。冲击波传播过程中,会涉及自由表面和运动边界面的问题,同时也产生大变形。传统的拉格朗日法,如有限元法,能够捕获与物质点联系的冲击波形成传播过程。但是,由于冲击波会产生大变形,即会令网格发生严重变形,从而导致无效的极小时间步长产生,有时甚至会

收稿日期: 2011-03-02; 收到修改稿日期: 2011-04-13

基金项目: 国防预研基金(5132701)资助课题。

作者简介: 周留成(1987-),男,博士研究生,主要从事装备损失修复与表面强化技术等方面的研究。

E-mail: happyzlc@163.com

导师简介: 李应红(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事航空等离子体动力学与表面强化技术等方面的研究。

E-mail: yinghong_li@126.com

导致计算崩溃,所以很难将传统的拉格朗日法应用于实际中。传统的欧拉法,如有限差分法或有限元法,能很好地求解在全局运动中的大变形问题,但由于固定于空间的欧拉网格不能对粒子的时间历程进行追踪,且对粒子的信息记录很模糊,故应用传统的欧拉法很难分析冲击波传播的细节^[9]。

光滑粒子流体动力学方法在对大变形问题的模拟上具有明显的优势^[10]。最初是由 Gingold 等^[11]于 1977 年提出来的一种纯 Lagrange 粒子方法。该方法最初主要是用于解决天体物理在流体质团无边界情况下的三维空间任意流动的计算问题,其基本思想是将整个流场的物质离散为一系列具有质量、速度和能量的粒子,然后通过核函数估值,求得流场中不同位置在不同时刻的各种动力学量。由于该方法避免了拉格朗日网格方法中的网格缠绕和扭曲问题,可以广泛应用于大变形计算分析中^[12~14]。

在 SPH 方法中,应用离散化的粒子来表示物质,这样,流体粒子的运动历程就能很自然地捕获,并且能很容易地描绘出物质交界面、自由表面以及运动交界面^[10]。主要表现在:1) 自适应性,即场变量的估计可以在任意分布的颗粒中取得;2) “真正的无网格方法”,不需要积分背景网格;3) 拉格朗日特性,该方法中的颗粒不仅作为积分点参与计算,更重要的是这些颗粒还携带着材料的变形特征。它通过携带质量的粒子离散计算域,粒子本身便代表材料,不同材料的粒子自然地构成界面,不同材料粒子的相对运动便形成所谓界面的滑移,因此从理论上说,可以比较“自然地”模拟高速碰撞、大变形、侵彻贯穿等物理现象。

2.2 SPH 方法

SPH 计算过程要比有限差分法和有限元法简洁,基础是插值理论,在 SPH 中任一宏观变量能方便借助于一组无序点上的值表示成积分插值计算得到^[15]。各质点的相互作用借助插值函数来描述。利用插值函数给出量场在一点处的核心估计值,将连续介质动力学的守恒定律由微分方程形式转换成

积分形式,进而转换为求和。

2.2.1 核函数

在 SPH 中任意宏观变量(如密度、压力、温度等) $f(x)$ 在空间某一点 x 上的核估计可以通过在域 Ω 中的积分获得

$$\langle f(x) \rangle = \int_{\Omega} f(x') W(x-x', h) dx', \quad (1)$$

式中 $W(x-x', h)$ 为插值核函数,它有两个自变量 $|x-x'|$ 和光滑长度 h ,且满足 3 个条件:

- 1) 归一化条件, $\int_{\Omega} f(x') W(x-x', h) dx' = 1$;
- 2) 在 $x = x'$ 处, W 是一个强尖峰函数, $\lim_{h \rightarrow 0} W(x-x', h) = \delta(x-x')$;
- 3) W 具有局域性,只在其影响区域(一般取 $|x-x'| = 2h$) 内有非负值,在影响域之外为零。

本文采用的核函数为三次 B 样条函数,其定义为

$$W(R, h) = \alpha_d \times \begin{cases} \frac{2}{3} - R^2 + \frac{R^3}{2}, & 0 \leq R < 1 \\ (2-R)^3/6, & 1 \leq R < 2 \\ 0, & R \geq 2 \end{cases} \quad (2)$$

在一维、二维和三维空间中分别有

$$\alpha_d = \frac{1}{h}, \frac{15}{7\pi h^2}, \frac{3}{2\pi h^3}.$$

2.2.2 光滑长度

光滑长度 h 在 SPH 方法中非常重要,它能在计算过程中确保计算的有效性、实用性和可靠的适应性。在物理模拟过程中,问题域内会产生极大的密度不均匀,并且在此过程中粒子运动非常激烈,文中选取的光滑长度为 Benz 提出的一种对光滑长度 h 进行动态变换的方法^[16],即在连续性方程中将光滑函数对时间求导,为

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{1}{d} \frac{h}{\rho} \frac{d\rho}{dt}. \quad (3)$$

2.2.3 控制方程

应用带有人工粘度的离散化欧拉方程组进行数值模拟

$$\begin{cases} \frac{d\rho_i}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j (v_i - v_j) \nabla_i W_{ij}, \\ \frac{dv_i}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i} + \frac{p_j}{\rho_j} + \Pi_{ij} \right) \nabla_i W_{ij}, \\ \frac{de_i}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i} + \frac{p_j}{\rho_j} + \Pi_{ij} \right) (v_i - v_j) \nabla_i W_{ij}, \\ \frac{dx_i}{dt} = v_i. \end{cases} \quad (4)$$

(4)式与时间相关的常微分方程,可以很容易地进行数值积分,并求解出每一个粒子的变量场。

3 激光冲击强化过程中的 SPH 建模

3.1 激光冲击诱导爆轰波过程分析

高脉冲激光冲击诱导冲击波的产生主要由激光和能量转换体间相互作用诱发等离子体喷射,施于靶面-反冲压力,并在激光能量的作用下维持和传播^[17]。其作用机制一般认为有两种,以亚声速传播的激光吸收(LSA)波称为激光维持燃烧(LSC)波和以超声速传播的 LSA 波即激光维持爆轰(LSD)波,其中 LSD 波为大多数人所认可。

激光冲击材料保护层产生 LSD 波,在激光冲击强化中,冲击波不仅与保护层和靶材发生作用,同时还要受到约束层的影响,使得 LSD 波的研究更加复杂。如图 1 所示,LSD 波形成以后,沿着光束方向被支持住,继续吸收激光能量后,发生爆炸与电离,其体积急剧膨胀,压力增大,又由于 A 交界面的约束层的约束,使得急剧膨胀的等离子体爆轰波向 B 交界面的压力进一步增大,作用于 B 交界面的爆轰波能量是反映激光冲击强化效果好坏的关键,也是研究激光诱导等离子体爆轰波的时空分布规律的重点。

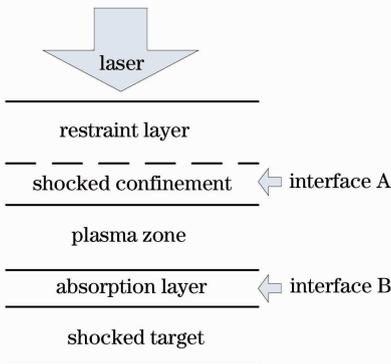


图 1 能量转换界面

Fig. 1 Interface of energy transition

3.2 模型建立

激光诱导的 LSD 波实质上也是铝箔吸收激光能量发生等离子体气体爆炸,这一作用时间非常短暂,并在瞬间产生强大的冲击波。20 世纪初 Chapman 和 Jouguet 对爆轰现象提出了经典的 Chapman-Jouguet(C-J)模型^[18]。根据模型得到,可燃气体中以高速传播的爆轰过程可以看作一个带化学反应区的强间断面的传播过程;并假设强间断面

是严格一维的;炸药和爆轰产物中热传导和粘性等效应可以忽略不计;间断面上化学反应(本处为激光吸收)是一瞬间完成的。C-J 爆轰模型很好地反映了爆轰现象的一些基本特性,在爆轰产生阶段应用该模型进行分析具有较好的效果。

由于激光支持爆轰波的分析需用到很多的试验数据,所以要进行一次准确的分析,需要进行很多的相关试验,很难对分析中的所有参数进行准确的设置,而本文的目的主要是通过 SPH 演化爆轰波的传播细节和分析爆轰波对靶表面的压力在时间和空间上的分布规律,因此可做以下简单假设:

1) 激光冲击强化过程中,铝箔吸收激光能量发生化学反应,产生等离子体冲击波,可假设铝箔为炸药材料,光斑中心为起爆点,炸药的状态方程结合 C-J 模型和激光辐照效应的相关理论以及实测试验数据进行设定。

2) 由于靶面与约束层之间的距离很短,并且铝箔是贴在靶材上的,故假设铝箔炸药在靶材表面直接爆炸,并在炸药上方直接添加水约束层,如图 2 所示。铝箔炸药高度设定为 0.5 mm。为了更好地对比研究有无约束情况下冲击波在材料表面的分布情况,建立一个无约束层的物理模型。

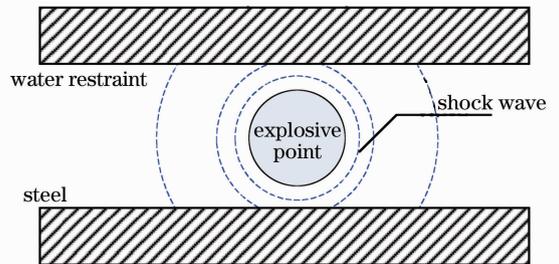


图 2 简化的激光冲击强化物理模型示意图

Fig. 2 Sketch map of simplified laser shock processing physical model

3) 假定约束层对冲击波有较好的约束作用,在 SPH 模型中设定将水约束层厚度增大,以保证水对冲击波的充分约束。

三维激光冲击强化 SPH 模型共设定 3 种粒子,铝箔炸药粒子、水约束层粒子和钢板粒子,具体如表 1 所示。

在此基础上分别进行了有无水约束层三维激光冲击强化 SPH 模拟仿真,如图 3 所示,图 3 的过程发展图中设定了压力显示,并对局部细节进行了放大;图 4 中为了更好地显示不同材料粒子之间的交互界面,没有设定压力显示。

表 1 激光冲击强化 SPH 模型中的粒子分配
Table 1 Particle configuration in SPH model

| Model | Particle number | Capacity /mm ³ |
|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Aluminum explosion | 1000 | 1 |
| Water restraint | 50000 | 400 |
| Steel | 62500 | 500 |

从图 3 和图 4 中可看出,SPH 仿真模型较好地反映了激光冲击强化物理的发展过程,在 $t=150\text{ ns}$

时,图 3 中炸药粒子大部分都已消散,而在图 4 中炸药粒子仍然被较好地约束在水和钢板之间。由图可知,在添加水约束层之后,铝箔爆炸在靶材表面所产生的爆轰波被限制在约束层和靶材之间,使大部分粒子的膨胀和传播被限制在垂直于工件的方向上,这样就延长了能量作用时间,使冲击波粒子的密度及温度增加,粒子的逆韧致吸收效应增强,能量吸收效果好,大大地改善了激光冲击强化的效果。

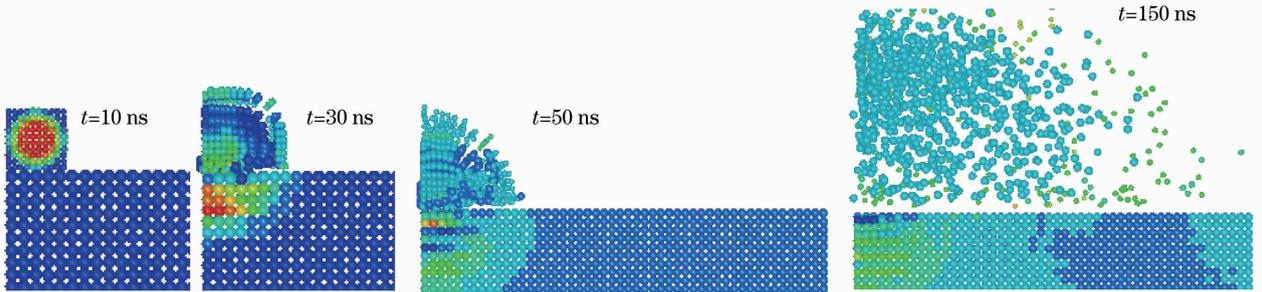


图 3 无约束层时 SPH 模型的发展过程

Fig. 3 Process of SPH model without restraint layer

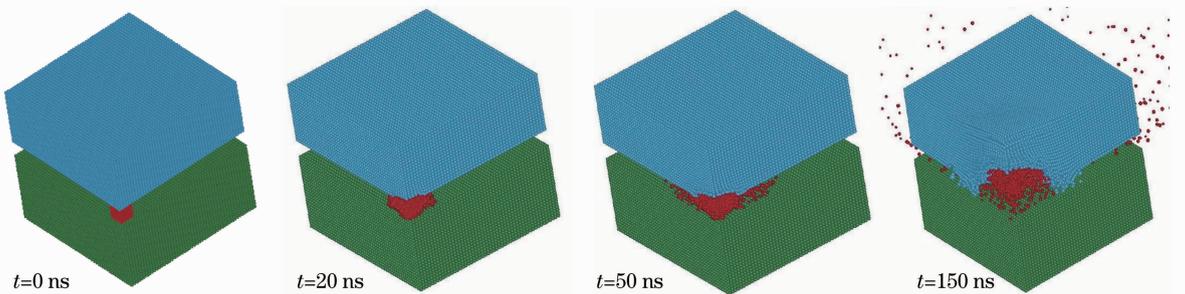


图 4 存在约束层时 SPH 模型的发展过程

Fig. 4 Process of SPH model with restraint layer

4 冲击波测试试验

进行钢板表面冲击波压力测试试验主要是验证 SPH 方法在激光冲击强化仿真应用中的可行性,并通过试验数据修正铝箔炸药的状态方程,使之更加符合试验结果和冲击波传播的真实情况。

图 5 为试验的基本组成图。试验主要采用聚偏氟乙烯(PVDF)压电薄膜测试冲击波压力,在 PVDF 传感器后采用一个与 PVDF 声阻抗近似的有机玻璃垫具,可以将传至 PVDF 传感器中的大部分冲击波都透射进有机玻璃中,尽量避免冲击波的反射对测试结果以及 PVDF 传感器造成影响;约束层为水;吸收保护层为铝箔;试验时保证吸收保护层、PVDF 传感器以及垫具之间的紧密贴合。示波器采用 Tektronix DPO4014,其带宽为 1 GHz,采样速率 5 GS/s,记录长度 10 m,完全满足试验需要。激光器采用 SGR-60,如

图 6 所示,激光波长为 1064 nm,脉宽 20 ns,功率密度为 1.7 GW/cm^2 。

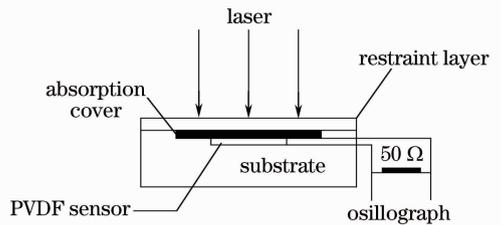


图 5 冲击波测试示意图

Fig. 5 Sketch map of shock wave testing

试验前,应首先检验 PVDF 传感器测试的可靠性,选定一个典型状态下的激光脉冲产生的冲击波压力随时间的变化曲线,其为理想的三角形形状,然后通过 PVDF 传感器测试压力,试验结果与理想结果相近,确定了实验设置对不同工艺参数下激光诱导产生

的冲击波可以进行动态测试。图 7 和图 8 为靶材中心处压力测试结果与仿真结果对比。



图 6 SGR-60 型激光器

Fig. 6 SGR-60 generating laser

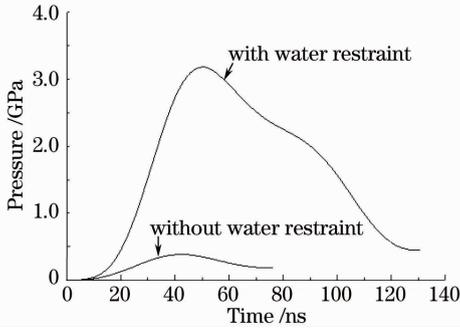


图 7 靶材表面冲击波时间和压力分布

Fig. 7 Pressure and time distribution for shock waves in steel surface

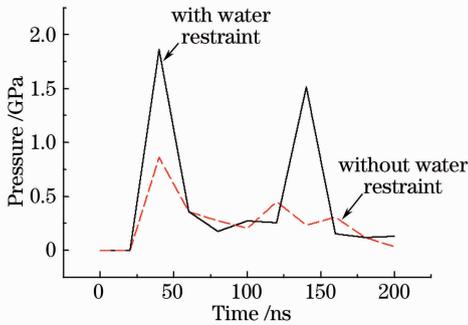


图 8 SPH 仿真结果

Fig. 8 Result of SPH simulation

由图 7 和图 8 可看出, 1) 试验结果和 SPH 仿真结果都表明, 采用约束层可以提高波峰压力, 延长爆轰波作用时间, 并且有约束层的爆轰波压力衰减速度要低于无约束层的爆轰波压力衰减速度; 2) 仿真结果中冲击波压力在靶材表面有较大的振荡, 并且波峰压力和作用时间的量值与试验测试结果也有较大差别。分析原因可能是没有考虑铝箔对激光能量的耦合, 以及对应设定的铝箔爆炸 C-J 模型的不精确所致。

5 结 论

在对比有限元分析的基础上, 采用 SPH 方法对

激光冲击强化过程进行仿真, 建立了简化的三维激光冲击强化 SPH 仿真模型, 并初步做了试验验证。基于无网格粒子的数值模拟能够重现非理想爆轰波的传播行为过程及激光冲击强化过程物理演化, 能够更深层次地了解非理想爆轰波的性质和状态, 而且提供了比传统解析解更直观和全面的信息。SPH 仿真模型直观地诠释了水约束层对冲击波的约束效果, 并可通过粒子信息仿真爆轰波传播细节。SPH 仿真结果与试验结果有一定的相似之处, 但在爆轰波作用时间和压力峰值的量值上仍有较大差别, 模型精度仍需提高。

参 考 文 献

- Li Wei, He Weifeng, Li Yinghong *et al.*. Effects of laser shock processing on vibration fatigue properties of K417 material[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2197~2201
李 伟, 何卫锋, 李应红 等. 激光冲击强化对 K417 材料振动疲劳性能的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2197~2201
- R. H. Michael, T. D. Adrian, G. D. Anne *et al.*. Laser peening technology[J]. *Advanced Materials & Processes*, 2003, **161**(8): 65~71
- Liu Hailei, Long Nidong, He Weifeng *et al.*. Impact of aluminizing on the effects of K417 material by laser shock processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2658~2661
刘海雷, 龙霓东, 何卫锋 等. 渗铝对 K417 激光冲击强化效果的影响[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2658~2661
- William Braisted, Robert Broekman. Finite element simulation of laser shock peening[J]. *International J. Fatigue*, 1999, **21**(7): 719~724
- Abul Fazal, M. Arif. Numerical prediction of plastic deformation and residual stresses induced by laser shock processing [J]. *Materials Processing Technology*, 2003, **136**(1-3): 120~138
- Zhou Jianzhong, Huang Shu, Zhao Jianfei *et al.*. Numerical analysis on fatigue properties of aluminum alloy induced by laser shock peening[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1735~1740
周建忠, 黄 舒, 赵建飞 等. 激光喷丸强化铝合金疲劳特性的数字化分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1735~1740
- Kan Ding, Lin Ye. Simulation of multiple laser shock peening of a 35CD4 steel alloy[J]. *J. Materials Processing Technology*, 2006, **178**(1-3): 162~169
- Chen Ruifang, Guo Naiguo, Hua Yinqun *et al.*. Numerical simulation of effects of laser shock parameters on residual stress field induced by laser shock processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 932~936
陈瑞芳, 郭乃国, 花银群 等. 激光冲击参数对残余应力场影响的三维数值模拟[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 932~936
- Shang Yuejin. Principle of Finite Element and Fingerpost of Ansys Application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005
商跃进. 有限元原理与 Ansys 应用指南[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005
- G. R. Liu, M. B. Liu. Smoothed Particle Hydrodynamics[M]. Han Xu, Yang Gang Transl. Changsha: Hunan University Press, 2005
G. R. Liu, M. B. Liu. 光滑粒子流体动力学[M]. 韩 旭, 杨刚 译, 长沙: 湖南大学出版社, 2005
- R. A. Gingold, J. J. Monaghan. Smoothed particle hydrodynamics: theory and applications to non-spherical stars

- [J]. *Monthly Notices R Astronomy Soc.*, 1977, **181**: 375~389
- 12 Qiang Hongfu, Wang Kunpeng, Gao Weiran. Numerical simulation of high explosive detonation process using SPH method with fully variable smoothing lengths[J]. *Chinese J. Energetic Materials*, 2009, **17**(1): 27~31
 强洪夫, 王坤鹏, 高巍然. 基于完全变光滑长度 SPH 方法的高能炸药爆轰过程数值试验[J]. *含能材料*, 2009, **17**(1): 27~31
- 13 M. B. Liu, G. R. Liu, K. Y. Lam. Investigations into water mitigation using a meshless particle method[J]. *Shock Waves*, 2002, **12**: 181~195
- 14 G. R. Liu, M. B. Liu, K. Y. Lam *et al.*. Smoothed particle hydrodynamics for numerical simulation of underwater explosion [J]. *Computational Mechanics*, 2003, **30**(2): 106~118
- 15 W. Benz. Smoothed Particle Hydrodynamics: a Review[M]. Arcs; NATO Workshop, Les, 1989
- 16 Wang Xiaojun, Zhang Gangming. Computations of elastic plastic waves by smoothed particle hydrodynamics[J]. *Explosive and Shock Waves*, 2002, **22**(2): 97~103
 王肖钧, 张刚明. 弹塑性波计算中的光滑粒子法[J]. *爆炸与冲击*, 2002, **22**(2): 97~103
- 17 Sun Chengwei. Effect of Laser Irradiation[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002
 孙承伟. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002
- 18 Ning Jianguo, Wang Cheng. Explosion and Shock Dynamics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010
 宁建国, 王 成. 爆炸与冲击动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010