强激光聚焦爆炸及其效应的研究展望
——激光微爆炸力学的浅识

段祝平　方 新

(非线性力学国家重点实验室，中国科学院力学研究所，北京 100080)

一束强脉冲激光在不同透明介质或金属表面聚焦后会产生强烈的爆炸效应，这种爆炸现象虽与爆轰的 DD 过程具有某种类似的特征，但激光聚焦爆炸形成、发生和演化的发展过程比炸药的 DDT 过程更加复杂。以激光在空气中聚焦爆炸为例，它既涉及到激光的吸收和散射、空气的电离击穿和等离子体的形成和传播等一系列微观过程，又涉及到后继激光与已存在的等离子体相互作用，从而形成 LSC\LSD 波的演化和传播、以及高温高压气体流场演化的宏观过程。又如高功率脉冲激光 ($I>10^9 W/cm^2$)被金属表面吸收产生远大于汽化温度的过热层，进而形成等离子体蒸汽，引起表面爆炸。等离子体屏蔽了金属靶面对后继激光的吸收，形成等离子体吸收层并以 LSC\LSD 波的形式传播。高温高压等离子体的膨胀不仅在周围环境中形成冲击波，而且反作用于金属固体后，在其内部产生固体冲击波。

对各种激光聚焦爆炸效应的研究已经有二、三十多年的历史，归纳起来主要有以下几个方面：

(1) 积极开拓激光爆炸效应的应用研究领域，其中包括激光引爆炸药、激光驱动飞片和固体冲击波、多种模式的激光推进研究、激光冲击硬化和其他激光加工领域、以及空中和水下的激光聚焦爆炸及其形成的冲击波效应等领域。随着这些应用研究的发展，新的研究领域也不断涌现，如飞秒激光的独特物理效应和传播过程产生了许多重要应用课题。在这些研究中，更多关心的是激光聚焦爆炸所产生的物理力学效应和应用价值，而较少关注激光聚焦爆炸的宏微观机理研究；

(2) 激光聚焦爆炸效应的宏微观理论研究。强激光和物质的相互作用是该领域研究的基本内容，激光形成等离子体及其传播的动力学理论，激光参数和等离子体参数，如压力、温度、电子或离子密度分布等的相互关联，高温高压等离子体膨胀在不同介质中形成冲击波和流场的动力学演化过程。如果将强激光看成是电磁波的传播过程，则最近建立的连续介质电动力学成为激光聚焦爆炸研究的重要理论基础。在激光聚焦爆炸的理论研究中，常常遇到的是固体、液体、气体和等离子体的多组分多相共存状态，其中包含有非常规相变、等离子体的快速形成和湮灭、激光支持燃烧波和爆轰波的形成和转化规律、光热效应和化学效应以及力学效应的耦合等。在宏观研究层次上，激光聚焦爆炸效应的研究充分体现了多学科的交叉，如电磁场理论、连续介质热-力学理论、爆轰波理论和爆炸力学、固体弹塑性动力学、化学反应动力学、和辐射流体力学等等。到目前为止，由于激光聚焦爆炸效应的复杂性和多学科性，一般采用逐案 (case by case) 分析对其进行研究，其中数值模拟是一个强有力的研究工具。理论研究成果散见于各个领域中，也许尚未形成一个完备的理论体系。

(3) 激光聚焦爆炸的实验研究。激光诱导产生的等离子体参数测量，如压力、温度、电子密度等分布或演化过程的测量；激光爆炸过程中各物理场及其力学效应的测量。在过去二十多年中，已有大量的实验研究报道。

微尺度、快过程和高功率密度是激光聚焦爆炸及其热-力学效应的三个主要特点，变化范围跨越了从飞秒到亚微秒的时间尺度、从纳米到亚毫米的空间尺度、以及高达 10^8~$10^{13} W/cm^2$ 的功率密度，(在这一功率密度范围内不讨论 ICF 领域的问题)。我们可以将上述三个方面所涉及的物理力学效应和相关研究纳入激光爆炸力学的研究范畴。本综述报告将重点介绍在上述第一重要应用领域所取得的研究进展，并希望围绕激光推进、激光驱动和激光冲击硬化等应用领域研究形成一个较完整的理论分析框架，其中包括非均匀电磁场-Euler 流场-流体弹塑性场相互耦合的本构框架，并简要讨论一下个别问题的数值模拟方法。虽然我们对该领域了解十分有限，但由于该领域在学科发展及国防应用研究中的重要作用，作为抛砖引玉，通过我们的粗浅介绍和对今后研究展望的评述，作为开拓爆炸力学研究的新方向，希望进一步推动和促进激光微爆炸力学在我国的应用和理论研究。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net