

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0262

飞秒脉冲激光冲击强化中等离子体压力 时空演化规律*

倪 辉^{1,2}

(1. 中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;
2. 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 为研究飞秒脉冲激光冲击强化中等离子体压力时空演化规律, 利用考虑电子态密度(DOS)效应的模型计算了电子热容和电声耦合系数随电子温度的演化规律, 并与采用 QEOS(quotidian equation of state)模型计算结果进行了对比; 提出 DOS 飞秒脉冲激光冲击强化模型, 计算得到电子温度、晶格温度、等离子体羽位置时间演化规律和等离子体压力时空演化规律, 并与 QEOS 飞秒脉冲激光冲击强化模型结果进行了对比。结果表明: DOS 飞秒脉冲激光冲击强化模型计算得到的等离子体羽位置随时间的演化规律与实验结果吻合程度更好; 增加激光能量或功率密度、考虑电子 DOS 效应会增加电子、晶格温度和等离子体压力。

关键词: 飞秒脉冲激光冲击强化; 双温度方程; 态密度; 等离子体压力; 电子热容; 电声耦合系数; 等离子体羽位置; 电子温度; 晶格温度

中图分类号: O383; O539

国标学科代码: 13035; 14055

文献标志码: A

Plasma pressure over time-space evolution law for femtosecond pulses laser shock peening

NI Hui^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and
Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

2. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, HFIPS, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China)

Abstract: The purpose of this research work is to look into the time-space evolution of plasma pressure for femtosecond pulse laser shock peening (fs-LSP). In this study, propose a model to understand plasma pressure over time-space process in fs-LSP based on the first principle, improved two temperature equations, and plasma hydrodynamic equations. Firstly analyze the plasma plume front location with respect to time by solving the plasma hydrodynamic equations. The simulated results by the electron DOS (density of state) femtosecond pulse laser shock peening model are in better agreement with the experiment results than the QEOS (quotidian equation of state) femtosecond pulse laser shock peening model. The DOS femtosecond pulse laser shock peening model was shown to be effective and superior. Then use the DOS model to calculate how the electron heat capacity and electron-phonon coefficient with respect to electron temperature. Electron heat capacity calculated by the QEOS model is larger than calculated by the electron DOS model, whereas the electron-phonon coefficient is the reverse. Moreover, the electron-phonon coefficient calculated by the QEOS model shows linear variation with respect to the electron temperature, which is the reverse of that calculated by the electron DOS model. Therefore, the electron DOS effect should be considered in two-temperature equations. Next see a graph of electron and lattice temperature with respect to time using the modified two-temperature equations to calculate. Increasing laser energy, decreasing pulse width, and considering the electron DOS effect

* 收稿日期: 2023-08-02; 修回日期: 2023-12-15

第一作者: 倪 辉(1999—), 男, 硕士研究生, nihui@mail.ustc.edu.cn

will increase the electron's peak temperature, and equilibrium temperature of electron and lattice systems, and reduce the electron-phonon relaxation time. Finally, we utilize the results of the two temperature equations as the initial condition to substitute into the plasma hydrodynamic equations to compute the plasma pressure. plasma peak pressure will rise as laser energy is increased, the pulse width is decreased, and the electron DOS effect is taken into account.

Keywords: femtosecond pulse laser shock peening; two-temperature equations; density of state; plasma pressure; heat capacity of electron; coupling coefficient of electron and phonon; plasma plume; electron temperature; lattice temperature

激光冲击强化技术与机械喷丸、低塑性抛光、高压水冲击强化等传统表面工程技术相比,能够在材料表面形成更深的塑性层和更高、更稳定的残余压应力,并且可以处理一些材料难以处理的部位。因此,激光冲击强化技术在航空工业、石油船舶、医疗器械等领域得到广泛研究与应用^[1-2]。

为了优化冲击过程、提高强化效果,激光冲击强化技术的相关研究大多围绕着涂层、约束层、激光参数等方面开展,并取得了一些理论和实验成果^[3-7]。纳秒脉冲激光冲击强化方面,理论和实验均取得了一定的成果。而飞秒脉冲激光冲击强化相关研究则主要局限在实验领域,有关理论模型、数值模拟的工作较少^[8]。

与纳秒脉冲激光相比,飞秒脉冲激光脉宽更短,激光功率密度更高,进行冲击强化时产生的等离子体压力更高,热影响区域更小^[8]。Nakano 等^[9]在水约束条件下,首次对 SUS304 不锈钢进行了飞秒脉冲激光冲击强化处理实验,显著提高了 SUS304 不锈钢的硬度,从实验上直接证实飞秒脉冲激光冲击强化技术具有可行性;同时研究表明,SUS304 不锈钢硬度随激光强度和冲击次数增加而增加。Lee 等^[10]以水为约束层,对镀锌钢进行了飞秒脉冲激光冲击强化处理实验,发现激光能量对材料硬度的提升效果有显著影响。Ageev 等^[11]采用双脉冲飞秒脉冲激光冲击强化实验,成功使铝合金 AA5038 材料的硬度显著增加,并分析了两束脉冲激光时间间隔对等离子体羽流和最终表面硬度影响。Sano 等^[12]在大气环境中通过飞秒脉冲激光冲击强化实验,有效提升了 2024 铝合金材料的疲劳寿命和疲劳强度,验证了飞秒脉冲激光冲击强化的巨大潜力。Hoppius 等^[13]通过对 AISI 316 不锈钢进行飞秒脉冲激光冲击强化处理,研究了激光冲击强化、激光诱导表面周期性结构和表面氧化在使材料强化方面的竞争性关系,结果表明:激光冲击强化使材料硬度得到增加,但是在某些加工参数条件下,激光诱导表面周期性结构和表面氧化强化占主导地位,为达到最佳冲击强化效果,涂层厚度和约束层材料选取尤为重要。Wang 等^[14]采用飞秒脉冲激光冲击有效强化了 NiTi 记忆合金的硬度,并通过表面形貌分析和划痕实验,得出激光扫描速度会影响产生的冲击压力,进而影响材料表面粗糙度和硬度。Ageev 等^[15]研究了飞秒脉冲激光冲击强化 AA5083 铝合金表面过程中,冲击波压力、硬度增加、残余应力和烧蚀化学过程之间关系。Chen 等^[16]进行了纯铜的飞秒脉冲激光冲击强化实验,通过观测表面形貌、微结构、残余应力和硬度,发现塑性变形、晶粒细化和残余压应力有利于材料表面强化。

Wu 等^[8]采用 QEOS (quodidian equation of state) 模型计算了双温方程中的电子热容和电声耦合系数,建立了包含双温方程和一维等离子体流体力学方程的 QEOS 飞秒脉冲激光冲击强化模型,将双温方程计算结果作为等离子体流体力学方程的初始条件,求解一维等离子体流体力学方程,得到等离子体羽位置 and 等离子体压力时空分布特性,计算结果与实验结果有较好的一致性,该研究从理论上证明了飞秒脉冲激光冲击强化能够产生更高的等离子体压力。Tan 等^[17]建立了考虑等离子体屏蔽和非傅里叶热传导效应超短脉冲激光烧蚀金属模型。Kiran 等^[18]利用 COMSOL 软件求解双温方程,模拟超短脉冲激光与 Ti6Al4V 合金的相互作用,计算了激光烧蚀陨石坑深度和直径大小。

本文基于 Wu 等^[8]提出的 QEOS 飞秒脉冲激光冲击强化物理模型,构建考虑态密度(density of state, DOS)效应的飞秒脉冲激光冲击强化模型:通过求解考虑电子态密度效应的双温方程和一维等离子体流体力学方程,计算电子温度、晶格温度、等离子体羽位置的时间演化规律和等离子体压力的时空演化规律,并通过与文献 [8] 模型的计算结果进行对比来验证本文模型的适用性。

1 DOS 飞秒脉冲激光强度冲击模型

飞秒脉冲激光冲击强化 (femtosecond pulses laser shock peening, fs-LSP) 模型如图 1 所示。飞秒脉冲激光冲击强化主要分为 2 个阶段: 第 1 阶段, 飞秒脉冲激光与靶材表面进行相互作用, 在靶材表面产生高温高压等离子体, 等离子体对外膨胀过程中, 挤压周围空气, 同时在靶材料中产生一个反方向的冲击波; 第 2 阶段, 材料表面在冲击波作用下, 发生晶粒细化, 位错等物理化学变化, 材料表面产生残余压应力和形成塑性变形层, 从而改善了材料性能^[19-22]。飞秒脉冲激光冲击强化第 1 阶段可以通过双温方程和等离子体流体力学方程分析。

1.1 双温方程

高功率短脉冲激光与物质相互作用产生的等离子体中各粒子热平衡弛豫时间在皮秒量级^[23-24]。因此, 纳秒脉冲激光冲击强化过程中, 可以假设等离子体中各粒子温度相同, 处于局部热平衡^[22]; 而飞秒脉冲激光冲击强化过程中, 等离子体中各粒子具有不同的初始温度, 需要经历一段弛豫时间才能达到热平衡^[23]。等离子体主要是由电子和离子组成的准中性气体。对于飞秒脉冲激光冲击强化中的等离子体, 电子和离子(晶格)温度的时间演化方程^[25-26]为:

$$\begin{cases} C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = k_e \nabla^2 T_e - G(T_e - T_l) + Q(z, t) \\ C_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = G(T_e - T_l) \end{cases} \quad (1)$$

式中: C_e 为电子热容; C_l 为晶格热容; T_e 为电子温度; T_l 为晶格温度; G 为电声耦合系数 (electron-phonon coupling coefficient); k_e 为电子热导率; $Q(z, t)$ 为激光能量项, 代表电子和光子相互作用过程; $k_e \nabla^2 T_e$ 为电子和电子相互作用过程; $G(T_e - T_l)$ 为电子和晶格相互作用过程。

Wu 等^[8] 没有考虑电子态密度效应的影响, 适用于电子温度低于 1 eV 情形, 并且电声耦合系数直接通过电子热容除以固定值 1 ps 得到, 并不符合相关物理实验结果, 因为不同物理参数条件下, 电声弛豫时间是不同的。本文采用文献 [27] 中的考虑了电子态密度 (density of state, DOS) 效应的模型 (简称 DOS 模型) 计算电子热容和电声耦合系数。电子热容 C_e 可以通过电子总能量对电子温度 T_e 求得^[27]

$$C_e = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial f(E, \mu, T_e) g(E)}{\partial T_e} E dE \quad (2)$$

式中: $f(E, \mu, T_e)$ 为 Fermi-Dirac 分布函数, E 为能级, $g(E)$ 为电子态密度, μ 为化学势能。对于本文中的 Al 靶, 采用文献 [27] 的计算结果。

电子热导率 k_e ^[28] 为:

$$k_e = 20 \left(\frac{2}{\pi} \right)^{3/2} \frac{(k_B T_e)^{5/2} k_B \tau}{m_e^{1/2} e^4 Z \ln \Lambda} \quad (3)$$

式中: $\ln \Lambda \approx \ln (T_e^{3/2} / e^2 n_e^{1/2})$ 为 Coulomb 对数, 在通常的等离子体范围内, $\ln \Lambda$ 取值范围为 10~20; n_e 为电子数密度; e 为元电荷; k_B 为玻尔兹曼常数; Z 为电荷序数; $\tau = 3 \sqrt{\pi} / (4\nu)$, ν 为电子碰撞频率。

电声耦合系数 G 表征电子和晶格之间的能量交换速率, 可简单表达为^[27]

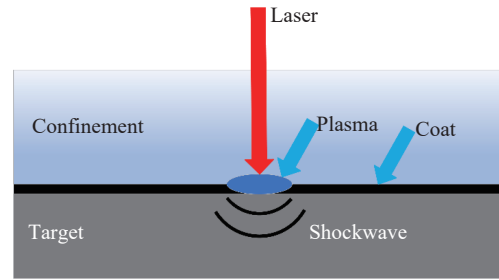


图 1 飞秒脉冲激光冲击强化示意

Fig. 1 Schematic illustration of femtosecond pulses laser shock peening

$$G = \frac{\pi \hbar k_B \lambda \langle \omega^2 \rangle}{g(E_F)} \int_{-\infty}^{\infty} g^2(E) \left(-\frac{\partial f}{\partial E} \right) dE \quad (4)$$

式中: \hbar 为约化 Planck 常数, λ 为无量纲电声耦合常数, $\langle \omega^2 \rangle$ 为声子谱的二次矩, ω 为声子频率, E_F 为费米能级。对于本文 Al 靶, 采用文献 [27] 计算结果。

激光能量项为:

$$Q(z, t) = (1 - R) I(t) \alpha \exp(-\alpha z) \quad (5)$$

式中: R 为表面反射率, $I(t)$ 为到达靶材表面的激光能量密度, α 为吸收系数, z 为沿靶材表面的纵向距离。

使用 Drude 模型来计算吸收系数^[29]:

$$\alpha = 2 \frac{\omega_L}{c} n_i \quad (6)$$

$$n_r^2 - n_i^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega_L^2 + \nu^2} \quad (7)$$

$$2n_r n_i = \frac{\nu \omega_p^2}{\omega_L (\omega_L^2 + \nu^2)} \quad (8)$$

$$\nu = \frac{n_e e^2}{m_e \sigma} \quad (9)$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0}} \quad (10)$$

式中: ω_L 为激光频率, c 为光速, n_r 和 n_i 分别为折射率实部和虚部, ω_p 为等离子体频率, σ 为电子电导率, ϵ_0 为真空介电常数, m_e 为电子质量。

根据计算得到的折射率, 靶材表面反射系数为:

$$R = \frac{(n_r - 1)^2 + n_i^2}{(n_r + 1)^2 + n_i^2} \quad (11)$$

到达靶材表面的激光能量密度为:

$$I(t) = I_0 e^{-\frac{(4 \ln 2)t^2}{\tau_p^2}} \quad (12)$$

式中: I_0 为最大激光能量密度, τ_p 为激光脉宽。

利用 Debye 模型计算晶格热容, 记 $\Theta_D = \hbar \omega_D / k_B$ 为 Debye 温度, ω_D 为 Debye 频率, 定义 $x_D = \Theta_D / T$, T 为温度, 则可以得到晶格热容表达式:

$$C_1 = 9Nk_B \left(\frac{T}{\Theta_D} \right)^3 \int_0^{x_D} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx \quad (13)$$

式中: N 为原子数目, 本文中 Al 元素的 Debye 温度 Θ_D 为 428 K。

1.2 一维等离子体流体力学方程

本文只考虑等离子体流体力学方程一维形式, 这在激光光斑尺寸相对较大时是合理的。一维等离子体流体力学方程由质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程和状态方程构成。具体表达式为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + p)}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \rho (u^2/2 + q)}{\partial t} + \frac{\partial u [\rho (u^2/2 + q) + p]}{\partial z} = -k \frac{\partial T^2}{\partial z} \\ p = (\gamma - 1) \rho q \end{cases} \quad (14)$$

式中： ρ 为密度， u 为速度， p 为压力， γ 为绝热指数， k 为热导率， q 为内能。

飞秒脉冲激光冲击强化中，电子和晶格温度达到热平衡的时间约为皮秒量级，等离子体动力学行为发生在该特征时间尺度之后^[8, 23-24]。因此，把双温方程(式 (1))的结果作为一维等离子体流体力学方程(式 (14))的初始条件，通过求解方程 (14)，可以获得等离子体参数时空演化规律。

1.3 模型验证

根据文献 [8, 30] 的条件，设置激光脉宽为 50 fs，波长为 800 nm，能量密度为 40 J/cm²，根据式 (14) 求解等离子体羽位置时间演化规律，并与实验结果^[30]和 Wu 等^[8]计算结果对比，如图 2 所示。可以看出考虑 DOS 的模型计算结果与实验结果吻合程度更高，同时能明显地体现出绝热膨胀时先快后慢的特征。

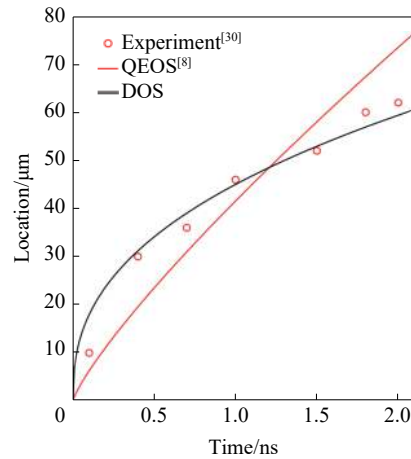


图 2 等离子体羽的位置随时间的演化规律
Fig. 2 Plasma plume front location at different times

2 数值模拟结果

2.1 电子热容和电声耦合系数

图 3 给出了由 DOS 模型^[27]和 QEOS 模型^[8]计算的电子热容和电声耦合系数随电子温度演化规律。

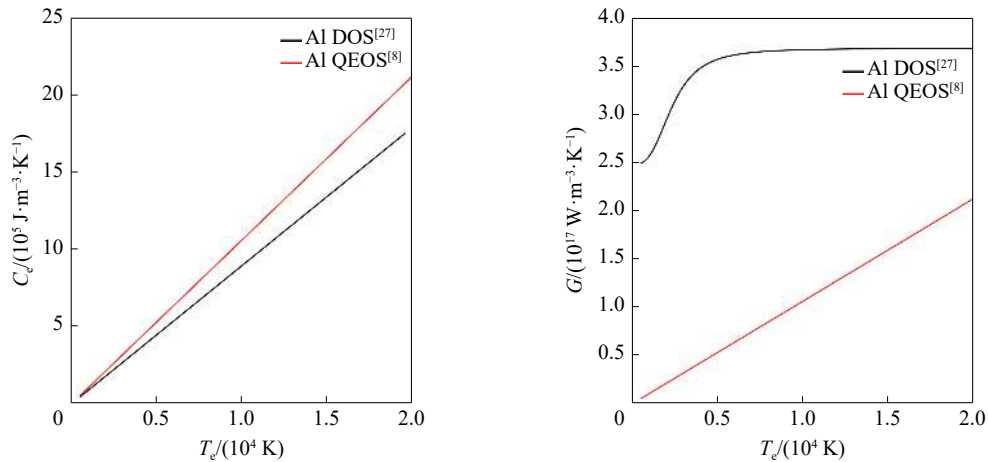


图 3 电子热容(C_e)和电声耦合系数(G)随电子温度演化规律

Fig. 3 Electron heat capacity (C_e) and electron-phonon coefficient (G) versus electron temperature

从图 3 可以看出：DOS 模型和 QEOS 模型计算得到的电子热容都是随着电子温度升高而线性增大，但是 QEOS 模型计算得到的电子热容随电子温度升高的增大速度高于 DOS 模型；而 DOS 模型计算得到的电声耦合系数大于 QEOS 模型，且 DOS 模型计算得到的电声耦合系数随着电子温度升高而非线性增大，最后趋于平稳，而 QEOS 模型计算得到的电声耦合系数随着电子温度升高而线性增加。DOS 模型和 QEOS 模型计算得到的电声耦合系数随电子温度的变化规律存在较大差异，主要是由于 QEOS 模型是直接粗略估计了一个电声弛豫时间 1 ps，再通过电子热容除以该电声弛豫时间得到电声耦合系数，该方法没有考虑相应物理过程，计算结果只能作为量级上的估计。通过图 3 还可以知道，考虑电子 DOS 效应会影响电子热容和电声耦合系数随电子温度的演化规律，因此也会进一步影响双温方程和一维等离子体流体力学方程计算结果。

2.2 电子温度和晶格温度

求解式 (1) 得到电子温度和晶格温度的时间演化规律, 如图 4 所示。可以看到电子温度先迅速增加达到最大值, 再缓慢下降, 经过一段电声弛豫时间, 最后和缓慢增加的晶格温度达到热平衡。可以看出: 随着激光能量密度增加, 电子和晶格可以吸收更多激光能量, 电子和晶格温度的最大值以及热平衡值都增大, 电声弛豫时间减小, 原因是电子温度增加, 电声耦合系数增大(如图 3 所示), 所以电子和晶格温度达到热平衡的时间变短, 即电声弛豫时间减小; 考虑电子 DOS 效应会增加电子温度最大值、电子和晶格温度热平衡值, 减小电声弛豫时间; 电声弛豫时间在 1 ps 数量级左右, 因此 Wu 等^[8] 的 QEOS 模型采用电子热容直接除以 1 ps 作为电声耦合系数的近似值, 有一定依据, 但是并没有考虑更多物理过程, 因此计算结果有一定误差。

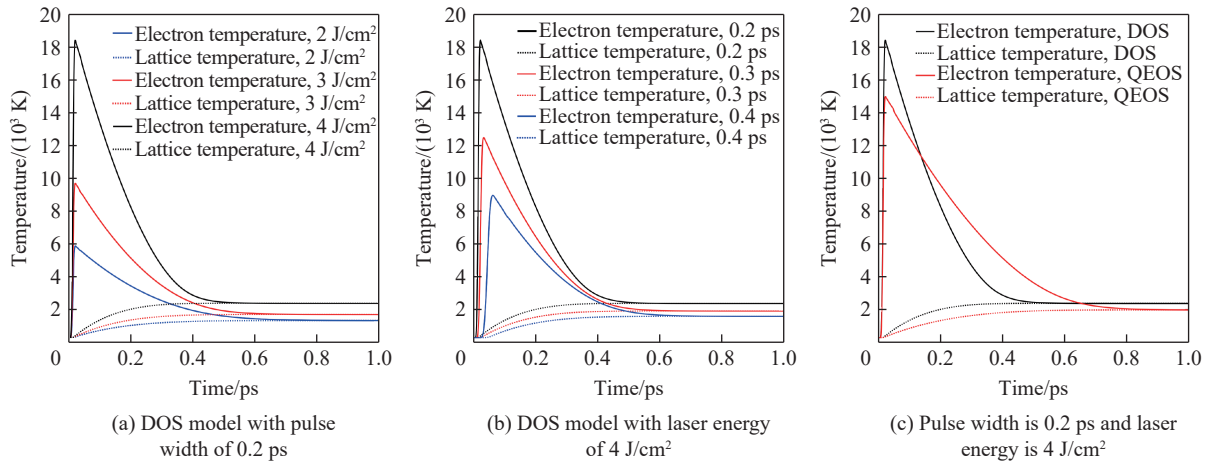


图 4 电子温度和晶格温度的时间演化规律

Fig. 4 Electron temperature and lattice temperature histories

2.3 等离子体压力

根据式 (14), 计算等离子体压力时间演化规律, 结果如图 5 所示。等离子体压力先迅速增加到最大值, 后迅速下降, 最后缓慢减小。随着激光能量密度增加, 靶材吸收更多激光能量, 产生的等离子体峰值压力增大。考虑电子 DOS 效应会增加等离子体峰值压力约 17 GPa。

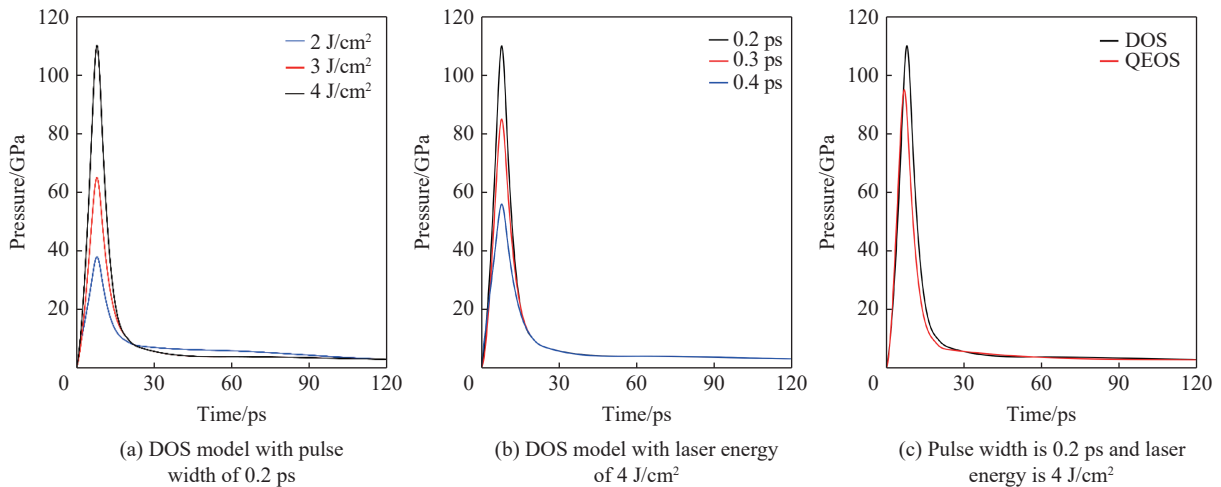


图 5 等离子体压力时间演化规律

Fig. 5 Plasma pressure histories at the ablative coating surface

从图 5 可以看到, 尽管飞秒脉冲激光冲击强化中等离子体压力脉宽很短, 但是等离子体压力具有很长“尾巴”, 直到 0.1 ns 时, 等离子体压力仍然可以高达数吉帕。纳秒脉冲激光冲击强化中等离子体压力脉宽通常只有激光脉宽的几倍到十倍之间, 从图 5 可以看到, 飞秒脉冲激光冲击强化中等离子体压力脉宽是激光脉宽的几十倍。

设置激光参数为脉宽 191 fs、波长 800 nm、能量密度为 5 J/cm^2 , 计算压力在 z 轴方向上的分布。如图 6 所示, 飞秒脉冲激光冲击强化中等离子体压力分别传播到靶材表面两侧, 能够达到靶材内部约 $0.1 \mu\text{m}$, 约在靶材内部约 $0.07 \mu\text{m}$ 达到峰值。DOS 飞秒脉冲激光冲击强化模型和 QEOS 飞秒脉冲激光冲击强化模型计算得到的靶材内部等离子体峰值压力分别约是 119 和 108 GPa。结合图 5 可知, 不考虑电子 DOS 效应导致计算的等离子体压力偏低。图 6 显示, 飞秒脉冲激光冲击强化中等离子体峰值压力可以达到几十吉帕, 甚至百吉帕左右, 远远大于纳秒脉冲激光冲击强化产生的几个吉帕等离子体压力。

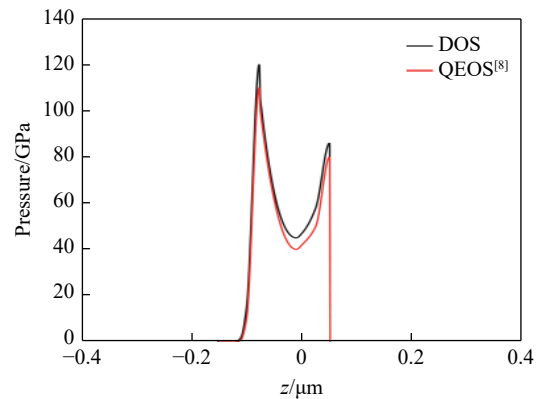


图 6 压力在 z 轴方向上的分布 ($t=4 \text{ ps}$)

Fig. 6 Plasma pressure distribution in z axis ($t=4 \text{ ps}$)

3 结 论

本文进一步发展了 Wu 等^[8]的 QEOS 飞秒脉冲激光冲击强化模型, 考虑电子 DOS 效应, 提出了 DOS 飞秒脉冲激光冲击强化模型, 模型主要由考虑电子 DOS 效应的双温方程和等离子体流体力学方程两部分组成。利用文献 [27] 的 DOS 模型计算结果得到电子热容和电声耦合系数, 进而求解双温方程、等离子体流体力学方程获得电子温度、晶格温度、等离子体羽位置、等离子体压力时空分布, 得到如下主要结论:

- (1) 在飞秒脉冲激光冲击强化模型中, 考虑电子 DOS 效应后得到等离子体羽位置时间演化规律更加准确;
- (2) 考虑电子 DOS 效应, 会影响电子热容和电声耦合系数随电子温度的变化规律; 因此也会影响通过双温方程求解电子温度、晶格温度, 通过等离子体流体力学方程求解等离子体压力的结果;
- (3) 增加激光能量或功率密度, 考虑电子 DOS 效应, 可以增加电子温度、晶格温度和等离子体压力;
- (4) 飞秒脉冲激光冲击强化与纳秒脉冲激光冲击强化产生的等离子体压力相比, 尽管压力脉宽持续时间更短, 但是产生的等离子体峰值压力更高, 可以达到几十吉帕, 甚至高达百吉帕; 此外, 飞秒脉冲激光冲击强化中等离子体压力脉宽是激光脉宽的几十倍, 而纳秒脉冲激光冲击强化则只有几倍。

感谢导师黄晨光研究员和吴先前副研究员的指导和帮助!

参考文献:

- [1] HU Y X, YAO Z Q, HU J. 3-D FEM simulation of laser shock processing [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 201(3/4): 1426–1435. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.02.018.
- [2] 吴先前, 段祝平, 黄晨光, 等. 激光冲击强化过程中蒸气等离子体压力计算的耦合模型 [J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(1): 1–7. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)01-0001-07.
WU X Q, DUAN Z P, HUANG C G, et al. A coupling model for computing plasma pressure induced by laser shock peening [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(1): 1–7. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)01-0001-07.
- [3] DEVAUX D, FABBRO R, TOLLIER L, et al. Generation of shock waves by laser-induced plasma in confined geometry [J]. *Journal of Applied Physics*, 1993, 74(4): 2268–2273. DOI: 10.1063/1.354710.

- [4] WU B X, SHIN Y C. Laser pulse transmission through the water breakdown plasma in laser shock peening [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(4): 041116. DOI: 10.1063/1.2168022.
- [5] WU X Q, DUAN Z P, SONG H W, et al. Shock pressure induced by glass-confined laser shock peening: experiments, modeling and simulation [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(5): 053112. DOI: 10.1063/1.3633266.
- [6] XIONG Q L, SHIMADA T, KITAMURA T, et al. Atomic investigation of effects of coating and confinement layer on laser shock peening [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 131: 106409. DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106409.
- [7] RONDEPIERRE A, ÜNALDI S, ROUCHAUSSE Y, et al. Beam size dependency of a laser-induced plasma in confined regime: shortening of the plasma release. Influence on pressure and thermal loading [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 135(1): 106689. DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106689.
- [8] WU B X, TAO S, LEI S T. Numerical modeling of laser shock peening with femtosecond laser pulses and comparisons to experiments [J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(13): 4376–4382. DOI: 10.1016/j.apsusc.2010.02.034.
- [9] NAKANO H, MIYAUTI S, BUTANI N, et al. Femtosecond laser peening of stainless steel [J]. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 2009, 4(1): 35–38. DOI: 10.2961/jlmn.2009.01.0007.
- [10] LEE D, KANNATEY-ASIBU JR E. Experimental investigation of laser shock peening using femtosecond laser pulses [J]. *Journal of Laser Applications*, 2011, 23(2): 022004. DOI: 10.2351/1.3573370.
- [11] AGEEV E I, BYCHENKOV V Y, IONIN A A, et al. Double-pulse femtosecond laser peening of aluminum alloy AA5038: effect of inter-pulse delay on transient optical plume emission and final surface micro-hardness [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(21): 211902. DOI: 10.1063/1.4968594.
- [12] SANO T, EIMURA T, KASHIWABARA R, et al. Femtosecond laser peening of 2024 aluminum alloy without a sacrificial overlay under atmospheric conditions [J]. *Journal of Laser Applications*, 2017, 29(1): 012005. DOI: 10.2351/1.4967013.
- [13] HOPPIUS J S, KUKREJA L M, KNYAZEVA M, et al. On femtosecond laser shock peening of stainless steel AISI 316 [J]. *Applied Surface Science*, 2018, 435: 1120–1124. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.11.145.
- [14] WANG H, PÖHL F, YAN K, et al. Effects of femtosecond laser shock peening in distilled water on the surface characterizations of NiTi shape memory alloy [J]. *Applied Surface Science*, 2019, 471: 869–877. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.12.087.
- [15] AGEEV E I, ANDREEVA Y M, IONIN A A, et al. Single-shot femtosecond laser processing of Al-alloy surface: an interplay between Mbar shock waves, enhanced microhardness, residual stresses, and chemical modification [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 126: 106131. DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106131.
- [16] CHEN L, WANG Z S, GAO S, et al. Investigation on femtosecond laser shock peening of commercially pure copper without ablative layer and confinement layer in air [J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 153: 108207. DOI: 10.1016/j.optlastec.2022.108207.
- [17] TAN S, WU J J, ZHANG Y, et al. A model of ultra-short pulsed laser ablation of metal with considering plasma shielding and non-fourier effect [J]. *Energies*, 2018, 11(11): 3163. DOI: 10.3390/en11113163.
- [18] KIRAN KUMAR K, SAMUEL G L, SHUNMUGAM M S. Theoretical and experimental investigations of ultra-short pulse laser interaction on Ti6Al4V alloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 263: 266–275. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.08.028.
- [19] FAIRAND B P, CLAUER A H. Laser generation of high-amplitude stress waves in materials [J]. *Journal of Applied Physics*, 1979, 50(3): 1497–1502. DOI: 10.1063/1.326137.
- [20] FABBRO R, FOURNIER J, BALLARD P, et al. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry [J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, 68(2): 775–784. DOI: 10.1063/1.346783.
- [21] PEYRE P, SOLLIER A, CHAIEB I, et al. FEM simulation of residual stresses induced by laser peening [J]. *The European Physical Journal Applied Physics*, 2003, 23(2): 83–98. DOI: 10.1051/epjap:2003037.
- [22] WU B X, SHIN Y C. A self-closed thermal model for laser shock peening under the water confinement regime configuration and comparisons to experiments [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(11): 113517. DOI: 10.1063/1.1915537.
- [23] LAVILLE S, VIDAL F, JOHNSTON T W, et al. Fluid modeling of the laser ablation depth as a function of the pulse duration for conductors [J]. *Physical Review E*, 2002, 66(6): 066415. DOI: 10.1103/PhysRevE.66.066415.
- [24] RETHFELD B, SOKOLOWSKI-TINTEN K, VON DER LINDE D, et al. Timescales in the response of materials to femtosecond laser excitation [J]. *Applied Physics A*, 2004, 79(4): 767–769. DOI: 10.1007/s00339-004-2805-9.

- [25] WU B X, SHIN Y C. A simple model for high fluence ultra-short pulsed laser metal ablation [J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253(8): 4079–4084. DOI: 10.1016/j.apsusc.2006.09.007.
- [26] ALEXOPOULOU V E, MARKOPOULOS A P. A critical assessment regarding two-temperature models: an investigation of the different forms of two-temperature models, the various ultrashort pulsed laser models and computational methods [J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2023, 31(6). DOI: 10.1007/s11831-023-09974-1.
- [27] LIN Z B, ZHIGILEI L V, CELLI V. Electron-phonon coupling and electron heat capacity of metals under conditions of strong electron-phonon nonequilibrium [J]. *Physical Review B*, 2008, 77(7): 075133. DOI: 10.1103/PhysRevB.77.075133.
- [28] ZHANG Z Y, NIAN Q, DOUMANIDIS C C, et al. First-principles modeling of laser-matter interaction and plasma dynamics in nanosecond pulsed laser shock processing [J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 123(5): 054901. DOI: 10.1063/1.5021894.
- [29] WU B X, SHIN Y C. A one-dimensional hydrodynamic model for pressures induced near the coating-water interface during laser shock peening [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(2): 023510. DOI: 10.1063/1.2426981.
- [30] ZHANG N, ZHU X N, YANG J J, et al. Time-resolved shadowgraphs of material ejection in intense femtosecond laser ablation of aluminum [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(16): 167602. DOI: 10.1103/PhysRevLett.99.167602.

(责任编辑 王小飞)