

超短脉冲激光微孔加工(上)——理论研究

赵万芹^{1,2},梅雪松³,王文君³

- (1. 上海工程技术大学 材料工程学院,上海 201620;
2. 上海市激光先进制造技术协同创新中心,上海 201620;
3. 西安交通大学 机械制造系统国家重点实验室,陕西 西安 710049)

摘要:自 20 世纪 60 年代激光器被发明以来,其脉冲宽度被不断压缩至亚皮秒及飞秒量级,使得激光加工技术进入到了超短脉冲阶段。为了进一步优化超短脉冲激光的微加工,理论研究必不可少。主要论述了超短脉冲激光与不同类型材料之间的相互作用机制。简述了超短脉冲激光微孔加工中的典型物理特性,如等离子体效应、自聚焦和光丝效应及锥形辐射等。分析了超短脉冲激光微孔加工的理论研究现状,并得出了目前理论研究中存在的问题。

关键词:超短脉冲激光; 微孔加工; 机制; 物理特性

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0106008

Ultrashort pulse laser drilling of micro-holes (part 1) -- theoretical study

Zhao Wanqin^{1,2}, Mei Xuesong³, Wang Wenjun³

- (1. School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;
2. Shanghai Collaborative Innovation Center of Laser Advanced Manufacturing Technology, Shanghai 201620, China;
3. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Since the invention of lasers in the 1960s, the pulse duration has being continuously shorten down to the sub-picosecond and even femtosecond regime. It makes the laser processing technology to the ultrashort pulse laser era. In order to further optimize the ultrashort pulse laser micro-machining, theoretical study is indispensable. The interaction mechanism between ultrashort pulse laser and different types of materials were presented. The typical physical properties, such as plasma effect, self-focusing and filamentation, and conical radiation, were discussed. The theoretical studies for ultrashort pulse laser drilling of micro-hole were analyzed. Furthermore, the challenging issues were obtained.

Key words: ultrashort pulse laser; micro-hole drilling; mechanical; physical property

收稿日期: 2018-08-05; 修订日期: 2018-09-03

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1104602); 长江学者和创新团队发展计划(IRT_15R54)

作者简介: 赵万芹(1983-), 女, 讲师, 博士, 主要从事超短脉冲激光微纳精密制造方面的研究。Email: linazhaolinazhao@foxmail.com

0 引言

1960年5月,第一台人造激光器在美国纽约的Hughes研究所诞生^[1]。此后,激光技术进入到快速的发展阶段,其脉冲宽度从毫秒、纳秒被进一步压缩到亚皮秒、飞秒量级,使得激光加工技术进入到了超短脉冲激光阶段。超短脉冲激光普遍是指亚皮秒(≤ 12 ps)和飞秒脉冲激光。基于其极短的脉冲宽度和极高的峰值能量,几乎能够加工所有的材料。再者,超短脉冲激光可以轻松地加工微米甚至纳米量级的微孔,其深径比也可在几到几百之间进行精确的调控。

为了进一步优化超短脉冲激光的微加工,需要明确超短脉冲激光与材料之间的相互作用机制,需要通过理论和实验研究的方法探索超短脉冲激光的微加工。主要论述了超短脉冲激光与材料之间的相互作用机制、超短脉冲激光微孔加工中的典型物理特性以及超短脉冲激光微孔加工的理论研究现状和存在的问题。

1 超短脉冲激光与材料的相互作用机制

普遍而言,短脉冲激光是指脉冲宽度小于100 ns的激光,并根据激光脉冲宽度与材料电子-声子弛豫

时间 τ_{ei} 的大小关系,将短脉冲激光进一步分为短和超短两个范畴。以金属的短脉冲激光加工为例,激光照射时,能量首先被材料内的自由电子吸收,导致热载流子气体(电子或电子空穴对)的形成。在极短的时间内,电子碰撞并迅速升温,此后,电子通过向外辐射声子传递能量给晶格。最终,自由电子和晶格在时间尺度 τ_{ei} 内获得平衡^[2]。 τ_{ei} 可通过公式(1)获得^[3]:

$$\tau_{ei} = 30\rho c_i d_0 \epsilon_F / \pi^2 m_e' V_F k_0 n_s^2 \quad (1)$$

式中: ρ 为晶格密度; c_i 为晶格的比热容; d_0 为晶格常数,其值约为 10^{-8} cm; m_e' 为电子的有效质量,对于金属其等于真实电子质量^[4]; s_u 为声速。由公式(1)可知,不同材料的电子-声子弛豫时间有很大的不同,金属材料电子-声子弛豫时间约为 $10^{-12} \sim 10^{-11}$ s,该时间也是实际烧蚀开始的时刻。此后,在 $\sim 10^{-10}$ s时,由于声子-声子之间的弛豫,热量开始逐渐向材料内部扩散,热传导效应开始^[5]。总之,在超短脉冲激光与材料的相互作用开始后,随着时间的进化,将会出现多种不同的相互作用机制,如图1所示^[6]。正是由于这些机制的相互作用,使得材料以粒子态、气态和液态等多种形式被去除。

总之,不同脉冲宽度的激光和材料之间有不同的相互作用机制,且该时间尺度主要由材料的电子-声子碰撞弛豫时间决定。如果脉冲宽度 $\tau_m \geq \tau_{ei}$,即

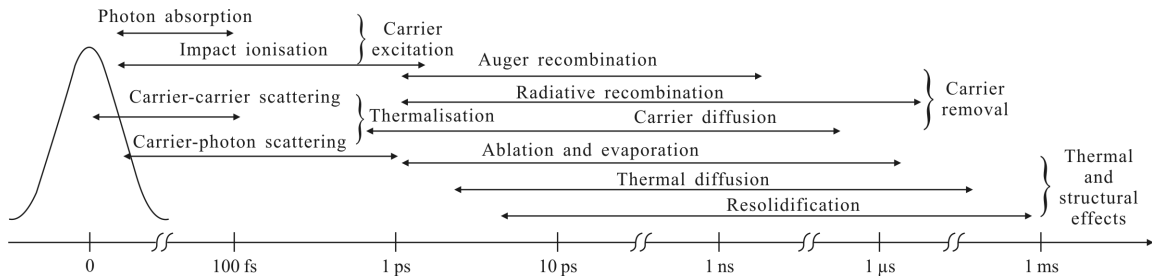


图1 激光和材料相互作用过程中随时间变化的多种机制

Fig.1 Processes and associated timescales taking place in the target following the absorption of the laser pulse

“短”脉冲激光加工,热作用时间由脉冲宽度决定;对于“超短”脉冲激光, $\tau_m \leq \tau_{ei}$,热作用时间由材料自身的属性决定。即脉冲宽度与材料电子-声子弛豫时间之间的关系决定了激光加工中是否有热机制出现,从而将短脉冲激光分为普通“短”脉冲激光和“超短”脉冲激光^[7]。上面是通过材料的自身特性与激光脉冲宽度之间的关系来区分激光脉冲的“短”和“超

短”。在实际加工中,超短脉冲激光本身并不是一个非常严格的学术概念,其涉及的脉冲宽度普遍在亚皮秒(≤ 12 ps)到飞秒量级。

1.1 超短脉冲激光与金属材料的相互作用

金属的超短脉冲激光烧蚀是一个复杂的跨越几个时间数量级的过程。首先,由于强烈的逆韧致辐射以及金属内电子的比热容较小,激光能量在趋肤深

度范围内被自由电子吸收^[8],在约 100 fs 的时间尺度内热化,且电子呈现费米-迪拉克分布^[9]。此时,电子系统具有明显的热温度,但金属的晶格依然处在低温状态,而晶格的加热主要是通过和热电子的碰撞。同时,由于电子相对于晶格具有很小的质量,因此普遍需要较长时间的碰撞才能使晶格升温,该时间主要由电子-声子碰撞弛豫时间决定。对于带有强力的电子-声子耦合的金属,如铁,弛豫时间为~0.5 ps,在一些弱耦合金属中,如铝或铜,弛豫时间高于铁金属一两个数量级^[10]。一段时间后,在电子-声子弛豫和声子系统的热化完成后,材料将达到热平衡态。然而,由于生成的电子空穴对仍然存在,且它们的再结合将引起一种特别的现象即延迟螺旋加热,该现象多发生在~100 ps 时间尺度内,但也可能随着持续速率的降低,时间将达到几百皮秒^[11]。

1.2 超短脉冲激光与非金属材料的相互作用

非金属材料本身并不像金属那样存在大量的自由电子,所以激光的吸收机制完全不同。在超短脉冲激光作用下,加工区域受到强电场光致电离产生种子电子,并进一步通过电子间相互碰撞导致雪崩电离,产生大量的自由电子,从而使非金属材料表面的薄层转变为具有金属特性的吸收等离子体^[12]。此后,激光-等离子体相互作用,激光光子被材料中电子吸收,导致材料融化、剥落和膨胀沸腾等现象,实现材料的去除^[13]。

1.2.1 光致电离

光致电离是依靠激光电场直接激发电子。根据激光频率和强度的不同,光致电离分为多光子电离和隧道电离。图 2 是单光子吸收和多光子吸收示意图^[14]。具体而言,传统的吸收机制是线性的单光子吸收,当激光带有高于材料能带隙的光子能量入射到材料内部时,能量被吸收,通过单光子吸收机制,电子被激发从价带到导带。当激光能量小于材料能带隙时,激光不能激发电子,没有相应的吸收发生。然而,当高强度超短脉冲激光入射到材料内部时,即使在光子能量小于材料能带隙的情况下,电子也可以通过多光子吸收的机制被激发,该现象被称为多光子吸收。超短脉冲激光由于极短的脉冲宽度导致极高的峰值能量,能够诱导强烈的多光子吸收,因此,即使是对于激光频率透明的材料也能够实现高质量的微加工,如玻璃等^[14-15]。

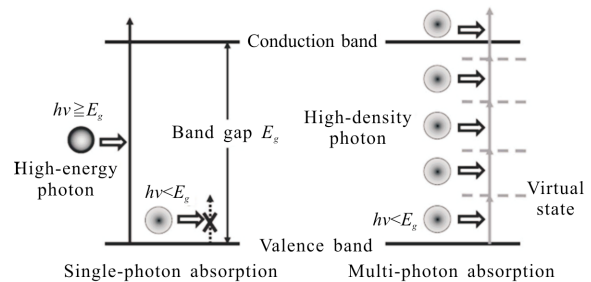


图 2 单光子和多光子吸收的电子激发

Fig.2 Electron excitation by single and multiphoton absorption

对于隧道电离,普遍发生在激光电场非常强且激光频率较低时,此时,电场可以使束缚价带电子的库仑势阱发生弯曲,价带和导带间的势垒变薄,从而电子可以从价带隧穿到导带中。

1.2.2 雪崩电离^[16]

雪崩电离包含自由电子吸收和碰撞电离两个过程。当导带中的电子连续吸收多个光子后,将进入导带中的高能态。当电子连续吸收 n 个光子后,且电子能量至少超过导带底一个带隙的能量,电子就可以通过碰撞使另一个价带电子进入到导带内,称为碰撞/雪崩电离,其结果是两个电子都位于导带底附近,从而使得它们又都可以通过吸收足够的激光能量再碰撞电离价带内的其他电子。总之,只要激光持续时间足够长,导带内的电子数密度 N 将按公式(2)不断增多:

$$d_n/d_t = \eta N \quad (2)$$

式中: η 代表雪崩电离速率。

超短脉冲激光与电介质材料之间的相互作用机理研究主要有等离子体吸收模型^[17]和福克-普朗克动力学方程及相关模型^[18]。前者是由 Longtin 在 2002 年以超短脉冲激光的传输过程为基础提出的,主要用来描述超短脉冲激光与电介质相互作用时的等离子体吸收机制。后者是以福克-普朗克动力学方程为基础的一些简化、修正或类似的模型,其基础是考虑离子雪崩、多光子离化以及焦耳热效应等机制,从电子分布函数的动力学方程出发,用以描述电子数密度的变化情形,并对比任意时刻和位置的电子数密度是否达到阈值电子数密度,从而判断该时刻和位置是否发生烧蚀,即通过电子数密度的求解,可以求解出激光烧蚀材料的形貌^[19-20]。

2 超短脉冲激光微加工中的典型物理现象

2.1 等离子体效应

超短脉冲激光诱发金属等离子体的过程如下：激光能量最初通过自由电子的形式在飞秒时间尺度内被吸收，此后，在几皮秒内，吸收的电子通过光电和热电子的影响从材料表面激发出来，从材料蒸发开始 5~10 ps，包含电子、原子和离子等的等离子体羽出现，等离子体作用开始^[21-22]。因此，即使对于超短脉冲激光，等离子体在能量从激光束转化给材料的过程中亦产生很大的影响。进一步地，根据被电离的材料及所处的位置，共有三种等离子体，如图 3 所示^[23]。

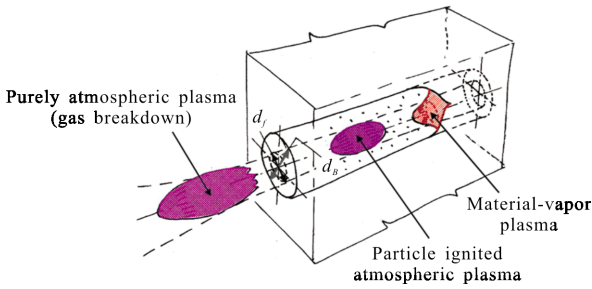


图 3 超短脉冲激光烧蚀中诱发等离子体示意图

Fig.3 Schematic of the types of plasma that could occur during drilling with ultrashort laser pulses

首先，当材料在大气中加工时，如果聚焦后的超短脉冲激光能量强度水平达到大气等离子体激发水平，每一个脉冲都将在烧蚀样品表面之上产生一个微弱的、短暂的且可观测的等离子体云，汇聚后形成大气等离子体。需要指出的是，激发大气等离子体的能量要比激发金属烧蚀等离子体的能量高一两个数量级^[24]。第二，激光和材料相互作用，材料被蒸发后将产生材料蒸发等离子体，其主要存在于烧蚀腔体内距离烧蚀作用面不远的位置。第三类等离子体为激发粒子等离子体，主要存在于烧蚀腔体内距离烧蚀底部作用面一定距离处，因此，它的存在强烈地增加了腔体内局部的压力，引起气压梯度使材料向着底部的方向流动，阻碍了材料的喷出，使得材料留在孔壁或孔底形成重铸层。

2.2 自聚焦和光丝效应

自聚焦是指超短脉冲激光通过一些媒介如固

体、液体和气体等传播时材料折射率变化导致的一种非线性光学作用。主要包括克尔诱导自聚焦和等离子体自聚焦。

2.2.1 克尔诱导自聚焦

超短脉冲激光束在空气中传输时，激光场强内空气的折射率 n 将发生变化，见公式(3)：

$$n = n_0 + \delta n = n_0 + n_2 I \quad (3)$$

式中： n_0 为空气的线性折射率； δn 为激光诱导的变化的折射率； n_2 为非线性折射率系数，其代表非线性克尔效应，是克尔诱导自聚焦的基础； I 为激光强度。此时，辐射功率需要大于临界功率 P_{crit} ，由公式(4)给出^[25]：

$$P_{crit} = \partial \lambda^2 / 4\pi n_0 n_2 \quad (4)$$

式中： λ 是激光波长； ∂ 为常数，由光束最初的空间分布决定，对于高斯光束， $\partial \approx 1.8962$ ^[26]。需要指出的是，激光功率决定自聚焦的阈值，激光强度决定折射率和自聚焦的位置^[27]。

基于激光强度的空间高斯分布，激光光轴线上折射率最大，且以轴线为中心向外扩延折射率逐渐减小。最终，激光能量在空间上不均匀的高斯强度分布导致在空气中形成了中心折射率高、边缘折射率低的通道，并使其具有类似正透镜的作用使光束发生会聚。同时，由于自聚焦效应导致的高强度激光将激发非线性多光子电离并形成准透明态等离子体，此时，电子密度 $n_e \ll n_{crit}$ 等离子体的临界密度 n_{crit} 。空气的线性折射率可通过 Drude model 获得，且 $n_e < 1$ ，见公式(5)，空气的总折射率见公式(6)^[28]：

$$n_0 = \sqrt{1 - n_e / n_{crit}} \quad (5)$$

$$n = n_0 - n_e / 2n_{crit} \quad (6)$$

随着激光束被聚焦，强度增加，克尔效应进一步增强。且当光束会聚时，更高的光场强度将引起空气的电离并形成等离子体通道，该通道具有类似负透镜的作用使光束发散。此时，空气中的折射率 n' 见公式(7)：

$$n' = n_0 + n_2 I - n_e / 2n_{crit} \quad (7)$$

当激光功率 P 大于等离子体的临界功率 P_{crit} 时，光束将发生会聚作用，光束半径缩小，激光功率密度变大，空气电离产生电子的密度将变大，使等离子体的散焦作用变得更明显，最终会聚和散焦达到平衡，形成光丝^[29]，如图 4 所示^[30]，此时有如下关系，见公式(8)^[25]：

$$n_2 I = \Delta n_{\text{kerr}} = \Delta n_{\text{plasma}} \cong n_e / 2n_{\text{crit}} \quad (8)$$

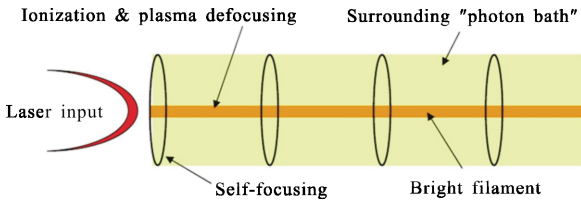


图4 激光光丝及光子池示意图

Fig.4 Scheme of laser beam filament and surrounding photon bath

1995年,激光的光丝效应第一次被报道^[30]。光丝外的区域被称为光子池,其带有很大一部分激光能量并负责能量传输,同时,其作为一个能量存储库与光丝之间会进行不间断的能量传递,使得光丝可以渗透很长的距离^[31]。光丝可被应用在激光雷达测量上,但是对于材料的精确去除,应尽可能地抑制光丝的形成。

2.2.2 等离子体自聚焦

当强烈的激光脉冲和等离子体相互作用时产生的自聚焦现象称为等离子体自聚焦,其主要通过热效应、相对和有质动力来影响折射率的变化^[32]。首先,热自聚焦是由于电磁辐射作用下等离子体的碰撞加热导致温度的上升诱导了流体动力学扩张从而导致折射率的进一步增加。其次,相对和有质作用自聚焦是由于电子的大规模增加使得其能够以接近于光速的速度运动,从而导致等离子体折射率 n_{rel} 的变化,见公式(9):

$$n_{\text{rel}} = [1 - (\omega_p / \omega)^2]^{1/2} \quad (9)$$

式中: ω 为辐射的角频率; ω_p 为相对等离子体频率^[33]。此时,自聚焦由电场力引起,其推动电子远离激光束较强的区域,因此增加了折射率并诱导了自聚焦效应。

2.3 锥形辐射

基于聚焦后较强的超短脉冲激光能量和能量在空间上的高斯分布,将导致光束在传播方向上渗透速度的不同,从而产生瞬时的相位变化,最终导致光束瞬时的形状变化。以上述变化为基础,激光在传播方向上会在原有频率的基础上产生一个新的激光脉冲频率,这种激光频谱范围的复杂化将导致激光轮廓的拓宽和严重变形,见图5^[34],称为锥形辐射^[35]。锥形辐射现象最早是在1996年被Nibbering等发现的^[36]。此后的研究表明,锥形辐射会导致能量散射及光束轮廓的扩大、变形,导致锥形辐射的非线性相互影响

发生在实际聚焦面前一定的距离处^[37],激光和大气气体的非线性相互作用是锥形辐射的根源^[23]。

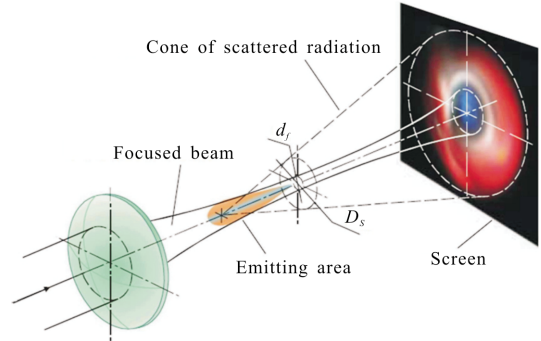


图5 锥形辐射导致的光束变形和能量散射

Fig.5 Schematic image of the geometry of energy scattering and beam-profile deformation due to conical emission

3 超短脉冲激光微孔加工的理论研究

3.1 双温模型

早在1957年,Kaganov等就提出了材料加工中电子和晶格间的能量传递^[38]。随后,在20世纪六七十年代,Anisimov等将这一过程引入到短脉冲激光金属烧蚀中,并在假设电子和声子的能量传输能够被经典的傅里叶定律描述的前提下提出了一个用来描述金属材料电子温度和晶格温度的两步模型,双温模型^[39]。1993年,Qiu和Tien从玻耳兹曼输运方程也推断出了双温模型^[40]。双温模型内的能量传递如图6所示^[41]。激光能量首先被金属中的自由电子吸收,电子被瞬时加热并导致电子和晶格暂时的非热平衡,此时,电子温度可达几千度而晶格温度仍处于较低的状态。此后,电子系统和晶格系统间进行能量交换。最后,晶格间建立热平衡并引起晶格温度和动能的增加,导致烧蚀的发生^[42-43]。

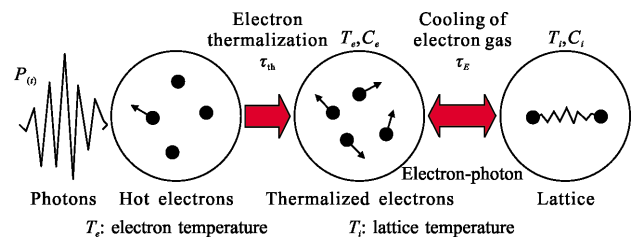


图6 双温模型示意图

Fig.6 Schematic of two-temperature model

然而,经典双温模型仅适用于激光峰值电子温

度低于费米温度的情况，即超短脉冲激光在低能量下的金属烧蚀。针对这一问题，姜澜研究团队指出，当电子温度达到费米温度时，材料热物理属性将发生显著变化，因此在模拟中对双温模型相关的材料属性进行了量子力学修正，建立了改进的双温方程，进一步拓展了双温模型的适用范围^[44]。另外，针对传统的超短脉冲激光烧蚀金属的双温模型中自由电子的数目是固定的，Bévilleon 等利用基于第一性原理计算的特殊准随机结构方法，获得了电子温度与电子热容的关系，以此为基础，探究了电子温度对电子浓度的影响规律，发现自由电子的数目随电子温度增加而增多^[45]。进一步地，Bévilleon 等将上述研究方法应用到超短脉冲激光加工多元素金属不锈钢中，获得了电子温度对材料内部电子浓度的影响规律，并研究了电子温度对电子-声子耦合关系、材料的光学特性如折射率等的影响，最后，以上述研究为基础，对传统双温模型进行了修正，部分研究结果如图 7 所示^[46]。

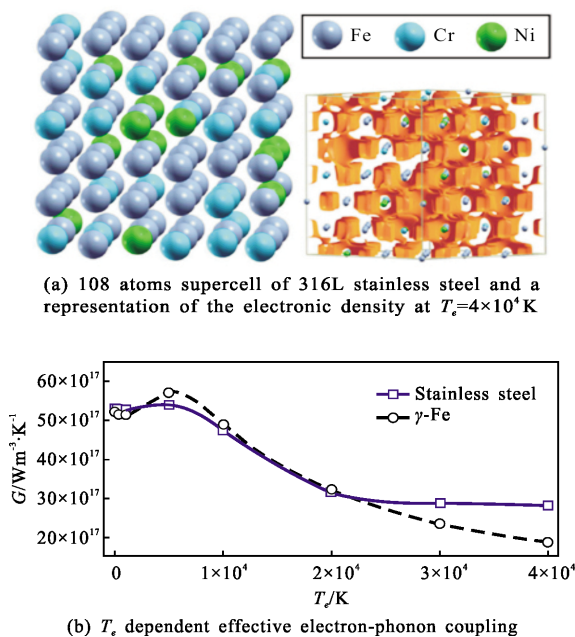


图 7 基于双温模型的超短脉冲激光烧蚀复合金属的研究
Fig.7 Study on ultrashort pulse laser ablation composite metal based on two-temperature model

总之，双温模型能很好地描述激光能量在电子系统中的吸收、传导，电子与声子间的能量交换等，而对烧蚀中的非平衡相变及微观物理机制等不能够给出很好的解释。

3.2 双温模型结合分子动力学模拟

近些年，为了探索超短脉冲激光烧蚀中的微观物理机制，有学者将分子动力学等微观理论引入到超短脉冲激光烧蚀中。如 Nedialkov 等采用分子动力学模拟了 100 fs 激光在铁上烧蚀微孔的过程，发现部分被烧蚀掉的材料在向外喷溅过程中由于侧壁表层原子对其的吸引力，使得材料再次沉积在孔壁上并形成再固化层，如图 8(a)所示^[47]。Urbassek 等采用分子动力学模拟了宽 12.8 nm、厚 12.8 nm 的铝的超短脉冲激光烧蚀，发现当材料内部局部的压力超过材料自身的屈服力时，材料将产生局部断裂，且裂变普遍发生在金属的熔融态下，但当材料处于较高的三相点温度，即液-气相转换时的临界温度时，裂变会使固体金属材料直接发生烧蚀，去除材料，如图 8(b)所示^[48]。

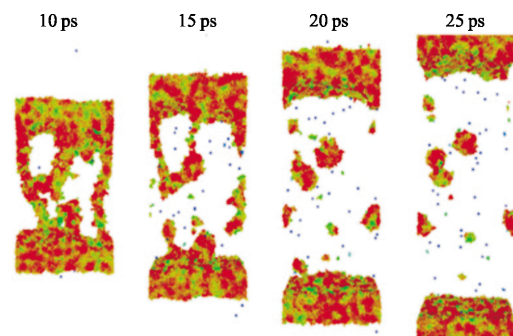
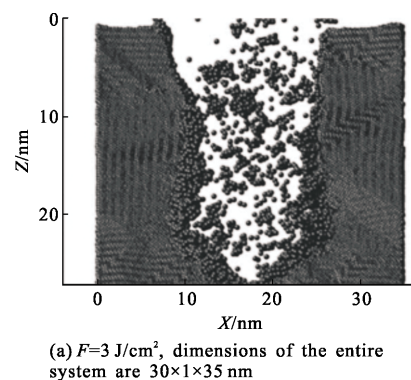


图 8 (a)激光照射在铁金属上后 50 ps 时的烧蚀模型图；
(b)1.2 eV/atom 激光辐照下的铝薄膜
Fig.8 (a) Snapshot of the evolution of the ablation process in Fe 50 ps after the laser pulse onset; (b) Ablating with energy 1.2 eV/atom in Al film

但是，分子动力学的研究中忽略了电子的影响，能量直接传递给材料的原子，即仅考虑金属晶格之

间的相互作用，故而不能够全面地考察超短脉冲激光的烧蚀。为了全面分析超短脉冲激光的烧蚀机制，需结合双温模型和分子动力学。在这方面，华中科技大学的学者有深入的研究，如郑启光教授研究团队结合双温模型和分子动力学方法模拟了飞秒激光烧蚀金属镍的物理过程，模拟尺寸 $1.5 \text{ nm} \times 1.5 \text{ nm} \times 50 \text{ nm}$ ，揭示了在高低不同的两种能量密度下存在两种不同

的烧蚀机制^[49]；刘劲松教授研究团队采用自主开发的双温模型结合分子动力学的模拟软件研究了超短脉冲激光与厚~70 nm 的铜薄膜及厚~365 nm 的铜金属之间相互作用过程中的物理现象和烧蚀机制^[3]。外国学者如 Rouleau 等结合双温模型和分子动力学分析了厚 20 nm 的铂薄膜的超短脉冲激光的烧蚀，如图 9 所示，具体研究了被烧蚀的材料离开基体后

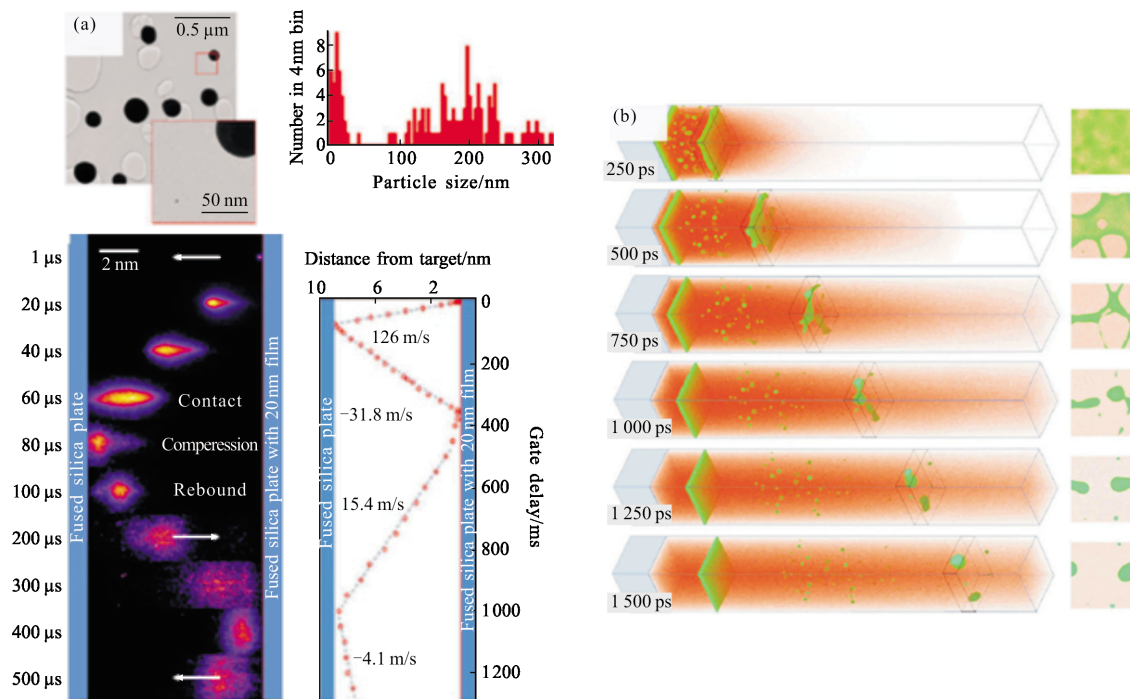


图 9 双温模型结合分子动力学模拟超短脉冲激光烧蚀铂薄膜

Fig.9 Simulation on ultrashort pulse laser ablation platinum film based on the two-temperature model combined with the molecular dynamics

的运动过程，发现有些材料会返回到基体表面，在材料表面形成纳米颗粒^[50]。

然而，目前双温模型结合分子动力学模拟金属烧蚀的尺度普遍在纳米量级。近两年，模拟尺寸被拓展到微米量级，如 Wu 等研究了金属铝的超短脉冲激光烧蚀，模拟总尺寸达 $3 \mu\text{m}$ ，如图 10 所示，其中，

然而，目前双温模型结合分子动力学模拟金属

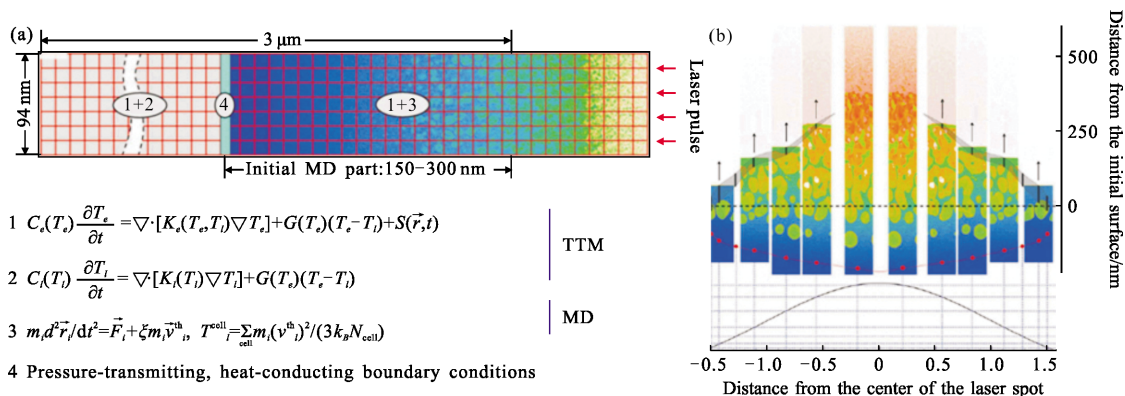


图 10 双温模型结合分子动力学模拟超短脉冲激光烧蚀金属铝

Fig.10 Simulation on ultrashort pulse laser ablation aluminum based on two-temperature model combined with molecular dynamics

分子动力学部分的尺寸 150~300 nm,同时,获得了单脉冲冲高斯能量分布下整个辐照域内的烧蚀情况^[51]。

4 结 论

超短脉冲激光微孔加工的理论研究主要是基于双温模型以及双温模型和分子动力学的结合。其中,双温模型能很好的描述激光能量在电子系统中的吸收、传导,电子与声子间的能量交换等,而对烧蚀中的非平衡相变及微观物理机制等不能够给出很好的解释。相对而言,双温模型结合分子动力学既可以描述激光能量在材料中的传递,又可以模拟烧蚀中的微观物理现象及烧蚀机制,能够在一定程度上展示超短脉冲激光烧蚀金属的过程机理。但是,给予其探索的是材料内部微观粒子间的作用,因此模拟尺寸仅可达到微米到纳米尺度,而此时的微观粒子数量也达到百万个之多,计算量非常大,计算时间较长,对模拟设备的要求也较高。

总之,现如今超短脉冲激光理论方面的研究仅能涉及较小尺度的微孔烧蚀,很难实现对多脉冲超短脉冲激光的微孔特别是微深孔的烧蚀过程的探索。因此,一方面需要探索新的理论研究方法实现微深孔的理论研究,另一方面,微孔特别是微深孔实验方面的研究就显得尤为重要,可以通过实验进一步优化工艺,进而实现超短脉冲激光微孔的高效率高质量加工。

参 考 文 献:

- [1] Maiman T H. Stimulated optical radiation in ruby[J]. Nature, 1969, 187(4736): 134-136.
- [2] Siegal Y, Glezer E N, L Huang A, et al. Laser-induced phase transitions in semiconductors [J]. Annual Review of Materials Research, 1995, 25(1): 223-247.
- [3] Wang Xiaodong. Ablation and micromachining of metals with short and ultra-short laser pulses[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- [4] Lu Shiji. A course on solid physics [M]. Beijing: Peking University Press, 1990. (in Chinese)
- [5] Chichkov B N, Momma C, Nolte S, et al. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids [J]. Applied Physics A Materials Science & Processing, 1996, 63(2): 109-115.
- [6] Sundaram S K, Mazur E. Inducing and probing non-thermal transitions in semiconductors using femtosecond laser pulses [J]. Nature Materials, 2002, 1(4): 217.
- [7] Linde D V D, Sokolowski-Tinten K, Bialkowski J. Laser-solid interaction in the femtosecond time regime [J]. Applied Surface Science, 1997, s109-110: 1-10.
- [8] Bäuerle D. Laser Processing and Chemistry [M]. Berlin: Springer, 2000: 291-292.
- [9] Shah J. Ultrafast Spectroscopy of Semiconductors and Semiconductor Nanostructures[M]. Berlin: Springer, 1999.
- [10] Hüttner B, Rohr G. On the theory of ps and sub-ps laser pulse interaction with metals I. Surface temperature [J]. Applied Surface Science, 1996, 103(3): 269-274.
- [11] Downer M C, Shank C V. Ultrafast heating of silicon on sapphire by femtosecond optical pulses [J]. Physical Review Letters, 1986, 56(56): 761-764.
- [12] Kaiser A, Rethfeld B, Vicanek M, et al. Microscopic processes in dielectrics under irradiation by subpicosecond laser pulses[J]. Physical Review B, 2000, 61(17): 11437-11450.
- [13] Jiang L, Tsai H L. Prediction of crater shape in femtosecond laser ablation of dielectrics[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2004, 37(10): 1492.
- [14] Sugioka K, Cheng Y. Ultrafast Laser Processing: from Micro to Nanoscale[M]. Singapore: Pan Stanford Pub, 2013.
- [15] Küper S, Stuke M. Ablation of polytetrafluoroethylene (Teflon) with femtosecond UV excimer laser pulses [J]. Applied Physics Letters, 1989, 54(1): 4-6.
- [16] Li Yi. Heat accumulation in high repetition rate femtosecond laser micromachining and its applications [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [17] Fan C H, Sun J, Longtin J P. Plasma Absorption of Femtosecond Laser Pulses in Dielectrics[J]. Journal of Heat Transfer, 2002, 124(2): 275-283.
- [18] Zhang Wentao. Research on the interaction between femtosecond and the silicon nitride crystal film [D]. Xi'an: Northwest University, 2009. (in Chinese)
- [19] Stuart B C, Feit M D, Herman S, et al. Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics [J]. Physical Review B Condensed Matter, 1996, 53(4): 1749.
- [20] Jiang L, Tsai H L. Plasma modeling for ultrashort pulse laser ablation of dielectrics [J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(2): 729.
- [21] Russo R E, Mao X L, Liu H C, et al. Time-resolved plasma diagnostics and mass removal during single-pulse laser ablation[J]. Applied Physics A, 1999, 69(1): S887-S894.
- [22] Mao S S, Mao X, Greif R, et al. Initiation of an early-stage plasma during picosecond laser ablation of solids[J]. Applied Physics Letters, 2000, 77(16): 2464-2466.

- [23] Dausinger F, Lubatschowski H, Lichtner F. Femtosecond Technology for Technical and Medical Applications[M]. Topics in Applied Physics, 96. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004.
- [24] Breittling D, Dausinger F. Fundamental aspects in machining of metals with short and ultrashort laser pulses [C]//SPIE, 2004, 5339: 49-63.
- [25] Kasparian J, Sauerbrey R, Chin S L. The critical laser intensity of self-guided light filaments in air [J]. Applied Physics B, 2000, 71(6): 877-879.
- [26] Stafe M, Marcu A, Puscas N N. Pulsed Laser Ablation of Solids[M]. Berlin: Springer, 2014: 758-770.
- [27] Marburger J H, Dawes E. Dynamical formation of a small-scale filament [J]. Physical Review Letters, 1968, 21(8): 556-558.
- [28] Couairon A, Mysyrowicz A. Femtosecond filamentation in transparent media[J]. Physics Reports, 2007, 441(2-4): 47-189.
- [29] Braun A, Korn G, Liu X, et al. Self-channeling of high-peak-power femtosecond laser pulses in air [J]. Optics Letters, 1995, 20(1): 73-75.
- [30] Schaaf P. Laser Processing of Materials: Fundamentals, Applications and Developments [M]. Berlin: Springer, 2010: 15-21.
- [31] Courvoisier F, Boutou V, Kasparian J, et al. Ultraintense light filaments transmitted through clouds[J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(2): 213-215.
- [32] Monot P, Auguste T, Gibbon P, et al. Experimental demonstration of relativistic self-channeling of a multiterawatt laser pulse in an underdense plasma [J]. Physical Review Letters, 1995, 74(15): 2953.
- [33] Pukhov A. Strong field interaction of laser radiation [J]. Reports on Progress in Physics, 2003, 65(1): 1-55.
- [34] Breittling D, Ruf A, Berger P W, et al. Plasma effects during ablation and drilling using pulsed solid-state lasers[C]//SPIE, 2003, 5121: 24-33.
- [35] Golub I. Optical characteristics of supercontinuum generation [J]. Optics Letters, 1990, 15(6): 305.
- [36] Nibbering E T, Curley P F, Grillon G, et al. Conical emission from self-guided femtosecond pulses in air [J]. Optics Letters, 1996, 21(1): 62.
- [37] Sun J, Longtin J P. Effects of a gas medium on ultrafast laser beam delivery and materials processing [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2004, 21(5): 1081-1088.
- [38] Kaganov M I, Lifshits I M, Tanatarov L V. Relaxation between electrons and crystalline lattice [J]. Sov Phys JETP, 1957, 4(31): 173.
- [39] Anisimov S I, Kapeliovich B L, Perelman T L. Electron emission from metal surfaces exposed to ultrashort laser pulses[J]. Zhurnal Eksperimentalnoi I Teoreticheskoi Fiziki, 1974, 66(776): 776-781.
- [40] Qiu T Q, Tien C L. Heat transfer mechanisms during short-pulse laser heating of metals [J]. Journal of Heat Transfer, 1993, 115: 4(4): 835-841.
- [41] Xu Xiaofang. Study on transient reflectivity phenomenon on the surfaces of metal films induced by femtosecond laser [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013. (in Chinese)
- [42] Anisimov S I, Rethfeld B. Theory of ultrashort laser pulse interaction with a metal[C]//SPIE, 1997, 3093: 192-203.
- [43] Kotake S, Kuroki M. Molecular dynamics study of solid melting and vaporization by laser irradiation[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1993, 36(8): 2061-2067.
- [44] Jiang L, Tsai H L. Improved two-temperature model and its application in ultrashort laser heating of metal films [J]. Journal of Heat Transfer, 2005, 127(10): 1167.
- [45] Bévillon E, Colombier J P, Recoules V, et al. First-principles calculations of heat capacities of ultrafast laser-excited electrons in metals [J]. Applied Surface Science, 2015, 336: 79-84.
- [46] Bevillon E, Colombier J P, Dutta B, et al. Ab initio nonequilibrium thermodynamic and transport properties of ultrafast laser irradiated 316L stainless steel [J]. Journal of Physical Chemistry C, 2015, 119: 11438-11446.
- [47] Nedialkov N N, Atanasov P A. Molecular dynamics simulation study of deep hole drilling in iron by ultrashort laser pulses [J]. Applied Surface Science, 2006, 252(13): 4411-4415.
- [48] Urbassek H M, Rosandi Y. Insight from molecular dynamics simulation into ultrashort -pulse laser ablation [C]//SPIE, 2010, 7842(1): 104-104.
- [49] Wang Xinlin. Femtosecond laser ablation of metallic materials and fabrication of micro-components [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [50] Rouleau C M, Shih C Y, Wu C, et al. Nanoparticle generation and transport resulting from femtosecond laser ablation of ultrathin metal films: Time-resolved measurements and molecular dynamics simulations [J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(19): 312-124.
- [51] Wu C, Zhigilei L V. Microscopic mechanisms of laser spallation and ablation of metal targets from large-scale molecular dynamics simulations[J]. Applied Physics A, 2014, 114(1): 11-32.