组合激光诱导熔石英等离子体及燃烧波演化 机制研究

李 忆,李 顺,张百杰,金 乐

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2025年2月26日; 录用日期: 2025年4月2日; 发布日期: 2025年4月10日

摘要

本研究旨在探讨磁场对毫秒-纳秒组合激光诱导熔石英产生等离子体及燃烧波动力学行为的影响。通过 构建磁场环境下组合激光辐照熔石英的数值模型,并基于磁流体动力学(MHD)理论建立多物理场耦合模 型,我们进行了系统的理论分析与仿真研究。研究重点分析了等离子体及燃烧波的温度演化和速度分布 特性。结果表明,磁场显著改变了等离子体的热力学特性与膨胀动力学。具体而言,在磁场作用下,等 离子体峰值温度提升至2611 K,且峰值温度出现时间提前至0.59 ms;同时,等离子体膨胀速度显著降 低,峰值速度为162 m/s,并在0.85 ms达到峰值。这些现象主要归因于磁场通过洛伦兹力约束带电粒子 运动,抑制等离子体横向扩散,增强能量局域化,并通过焦耳加热效应提升温度,从而限制了燃烧波速 度的增长。本研究揭示了磁场与组合脉冲激光的协同作用机制,阐明了磁场调控下等离子体及燃烧波的 演化规律,为高抗损伤光学元件设计、激光加工工艺优化以及等离子体控制与应用提供了重要的理论依 据。

关键词

磁场,激光,熔石英,动力学特性

Study of Combined Laser-Induced Fused Silica Plasma and Combustion Wave Evolution Mechanism

Yi Li, Shun Li, Baijie Zhang, Le Jin

School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Feb. 26th, 2025; accepted: Apr. 2nd, 2025; published: Apr. 10th, 2025

Abstract

This study investigates the influence of magnetic fields on the dynamics of plasma and combustion waves induced by millisecond-nanosecond combined laser irradiation in fused silica. By constructing a numerical model of combined laser irradiation on fused silica under a magnetic field environment and establishing a multi-physics coupling model based on magnetohydrodynamics (MHD) theory, we conducted systematic theoretical analysis and simulation research. The study focuses on the temperature evolution and velocity distribution characteristics of plasma and combustion waves. The results indicate that the magnetic field significantly alters the thermodynamic properties and expansion dynamics of the plasma. Specifically, under the influence of the magnetic field, the peak plasma temperature increases to 2611 K, and the time to reach the peak temperature is advanced to 0.59 ms. Simultaneously, the plasma expansion velocity is significantly reduced, with a peak velocity of 162 m/s occurring at 0.85 ms. These phenomena are primarily attributed to the magnetic field's constraint on charged particle motion through the Lorentz force, which suppresses transverse plasma diffusion, enhances energy localization, and increases temperature through Joule heating effects, thereby limiting the growth of combustion wave velocity. This research reveals the synergistic mechanism between magnetic fields and combined pulsed lasers, clarifies the evolution mechanisms of plasma and combustion waves under magnetic field regulation, and provides critical theoretical support for the design of high-damage-threshold optical components, optimization of laser processing techniques, and future plasma control and applications.

Keywords

Magnetic Field, Laser, Fused Silica, Plasma and Combustion Wave Dynamics

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). <u>http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</u> COPENACCESS

1. 引言

熔石英因宽光谱透过率等优异光学特性,广泛应用于高功率激光系统。然而,高能激光辐照下,材 料表面因非线性吸收、多光子电离等效应形成高温高压等离子体,并伴随燃烧波产生与传播,导致瞬时 热应力集中、材料损伤及激光能量传输效率下降,影响光学元件功能稳定性与寿命[1]-[3]。传统单脉冲激 光(毫秒或纳秒)存在局限性:毫秒脉冲瞬时功率密度不足,难以触发有效电离;纳秒脉冲能量耦合深度有 限。为此,毫秒 - 纳秒组合脉冲激光技术通过时序协同与能量互补,在毫秒脉冲预加热软化材料表面后, 利用纳秒脉冲实现高效电离与能量渗透,突破单一脉冲时空能量耦合瓶颈,但等离子体膨胀过程中的无 序扩散与能量耗散仍制约其应用效果。

为提升激光与物质相互作用可控性,外部磁场作为主动调控手段受到关注[4][5]。磁场通过洛伦兹力 约束带电粒子运动,抑制等离子体横向扩散,并诱导环向电流产生焦耳加热效应,优化能量局域化与动 态演化行为。例如,Harilal等人[6]发现磁场作用下等离子体羽流温度因焦耳加热显著升高;张彦明等人 [7]研究表明不同磁场条件可改变等离子体羽流形态,证实磁场对等离子体空间分布的调控能力。目前, 磁场条件下组合脉冲激光与熔石英相互作用的研究仍处于起步阶段,磁场对等离子体温度-速度耦合机 制的影响尚不明确。本文聚焦等离子体及燃烧波动力学演化,系统研究毫秒-纳秒组合脉冲激光在无/有 磁场条件下诱导等离子体及燃烧波的温度演化、速度分布及相互作用机制,揭示磁场与组合脉冲激光的 协同作用规律,为高抗损伤光学元件设计与激光加工工艺优化提供理论支撑。

2. 数值模型



Figure 1. Schematic diagram of the combined laser irradiation model for fused silica under magnetic field conditions 图 1. 磁场条件下组合激光辐照熔石英模型示意图

图 1 模型示意图构建了磁场环境下毫秒 - 纳秒组合脉冲激光辐照熔石英的动态作用系统。其中,能量为 20,脉宽为 1 ms 的毫秒脉冲激光器与 110 mJ 的 10 ns 的纳秒脉冲激光器通过分束镜耦合至同轴传输路径,并经偏振镜调节激光偏振态后,由聚焦透镜汇聚于熔石英样品表面。样品置于永磁体构建的 0.3 T 均匀背景磁场中,磁场方向垂直于激光传播轴线,以实现对等离子体膨胀行为的轴向约束。表 1 为熔石英参数。

 Table 1. Material parameters used in the numerical simulation

 表 1. 材料参数

参数名称	数值及单位
密度	2.20 g/cm ³
吸收系数	0.19×10^{-3}
杨氏模量	$7.2 imes10^{10}\mathrm{pa}$
泊松比	0.16
软化点	1600 K
反射率	0.3

在激光支持燃烧波的传播过程中,因为初始时刻燃烧波内部的压强远大于标准空气压强,因此在数 值仿真中能够简单的假设等离子体是不可压缩流体。理想情况下,组合脉冲激光辐照熔石英产生等离子 体及燃烧波的过程中,物质的总质量保持不变,包括燃烧波的扩散过程中没有质量的损失或增加。质量 守恒方程可简化为:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \tag{1}$$

其中, ρ和 ν 是组合脉冲激光辐照熔石英生成等离子体及燃烧波的密度和速度。在质量守恒的前提下,

等离子体及燃烧波随磁场的时空演化过程需要利用流体力学、热力学和磁流体力学 MHD (Magnetohydrodynamics)来表征,动量守恒方程和能量守恒方程为:

$$\rho\left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \left(\vec{v} \cdot \nabla\right)\vec{v}\right) = \nabla \cdot \left(-P_n + \vec{\kappa}\right) + \vec{J} \times \vec{B} + F_{ext}$$
(2)

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho E_n + \frac{1}{2} \vec{B}^2 \right) + \nabla \cdot \left[\vec{v} \left(\rho E_n + P_n + \frac{1}{2} \vec{B}^2 \right) - \vec{\kappa} \cdot \vec{v} - k \nabla T \right] = \eta \cdot \left| \vec{J} \right|^2 + \alpha E_{las}$$
(3)

公式(2)中, $\rho(\vec{v}\cdot\nabla)\vec{v}$ 为对流项,表示这一过程中速度的非线性对流效应。 $\nabla \cdot (-P_n + \vec{\kappa})$ 代表压力项和 粘性应力项的贡献,前面的负号表示压力是一个内向的(压缩的)力。 $\vec{\kappa}$ 代表剪切应力张量(黏滞应力张量), 表征这一过程中等离子体及燃烧波内部摩擦力的贡献项。 F_{ext} 是激光作用引入的多光子吸收和韧逆致吸 收对等离子体的其他附加作用力[8] [9]。 $\vec{J} \times \vec{B}$ 是磁场贡献项,代表了带电粒子在磁场中运动时受到的体 积力。

公式(3)中, P_n 是总压强,包括电子、离子、辐射场压强; E_n 是总能量密度,包括离子、电子、辐射场以及动能。 $k\nabla T$ 是傅里叶热传导方程贡献项,描述了导热过程,其中k是热导率,这用于描述热量通过等离子体由高温向低温区域的扩散。 η 是等离子体的电阻率; J是等离子体中的电流密度,表示由等离子体电导率的变化引起的焦耳热。 α 为耗散系数, $E_{\mu\sigma}$ 是激光提供的能量:

$$E_{las} = Q_n + Q_m \tag{4}$$

其中, Q_n、Q_m分别是纳秒和毫秒脉冲激光辐照熔石英产生的能量,表示为:

$$Q_n = (1 - R_n) P_n \cdot \exp\left(\frac{-2r^8}{R_0^8}\right) \cdot \tau_n$$
(5)

$$Q_m = \left(1 - R_m\right) P_m \cdot \exp\left(\frac{-2r^8}{R_0^8}\right) \cdot \tau_m \tag{6}$$

其中, *R_n*、*R_m*分别为纳秒和毫秒脉冲激光辐照熔石英的反射系数,正常情况下的值分别为 0.8 和 0.3; *P_m*和 *P_n*是毫秒、纳秒脉冲激光功率密度; *r*是激光束中心到横截面上某点的距离, *R₀*是高斯光束的光束 半径,表示激光束横截面上强度分布的尺度参数; *τ_m*为毫秒脉冲宽度, *τ_n*为纳秒脉冲宽度。方程中的高 次幂是由于三维热扩散过程和高斯热源剖面的复杂关系导致的,包括了两次平方过程,第一次平方用于 描述球体表面积随着半径的增加而增大(球体的表面积与半径的平方成正比),第二次平方则用于描述高 斯热源剖面中的指数函数,其中半径的平方关系影响了热源在空间中的分布。

3. 仿真结果与讨论

图 2 展示了无磁场及外加磁场条件下,毫秒 - 纳秒组合脉冲激光辐照熔石英时等离子体与燃烧波的 温度分布随时间演化。结果表明,磁场显著改变了等离子体温度场结构与燃烧波传播特性。无磁场时, 等离子体呈对称扩散,温度梯度由中心向外递减,燃烧波前缘传播较快,温度分布呈现高温核心区与外 围快速冷却区。施加磁场后,等离子体扩散受抑制,温度场呈非对称性,高温区沿磁场方向延伸,燃烧 波传播速度降低。此外,磁场下等离子体边缘温度梯度更陡峭,整体温度分布提高。这主要归因于磁场 约束带电粒子横向运动,增强了沿磁场方向的能量输运效率,同时抑制径向热扩散,维持了高温核心区 的稳定性。

图 3 呈现了在毫秒 - 纳秒组合脉冲激光辐照熔石英材料的实验中,无磁场和有外加磁场两种条件下, 等离子体与燃烧波的温度随时间的变化情况。激光能量被材料吸收并转化为等离子体和燃烧波的内能, 从而导致温度升高[10]。无磁场条件下,等离子体温度在辐照后迅速上升,峰值温度达 2447 K,出现于 t = 0.66 ms;而在施加磁场后,峰值温度显著升高至 2611 K,且峰值时间提前至 t = 0.59 ms。这种磁场对 温度变化的影响,揭示了磁场在激光与材料相互作用中对等离子体及燃烧波热动力学行为的调控机制。 首先,磁场通过洛伦兹力抑制了带电粒子的无序扩散,使得等离子体核心区域的能量积累速率加快。这 种局域化效应导致能量更加集中,加速了等离子体核心区域的能量积累速率,从而提高了等离子体的峰 值温度。此外,磁场的洛伦兹力抑制了带电粒子的无序扩散,等离子体中的电子在运动过程中会频繁与 离子以及中性粒子发生碰撞,提升了等离子体温度的同时减少了其内部的机械能。这种加热效应是磁场 调控温度变化的重要机制之一[11]。综上所述,磁场通过强化能量局域化效应、增强焦耳加热效应以及促 进内能与机械能之间的转化,显著调控了等离子体及燃烧波的热动力学行为。这一调控机制为深入理解 并优化激光与材料相互作用的物理过程提供了重要的理论依据和实验参考。





图 2. 有无磁场条件下等离子体及燃烧波温度分布



Figure 3. Temporal evolution of plasma and combustion wave temperatures under different magnetic field configurations 图 3. 有无磁场条件下等离子体及燃烧波温度随时间变化

图 4 展示了在无磁场及施加磁场条件下,毫秒 - 纳秒组合脉冲激光辐照熔石英所诱导的等离子体与

燃烧波动态速度分布特征。实验数据显示,无磁场时,随着时间推移,等离子体及燃烧波速度分布区域 逐渐扩大,高速区域(红色部分)向远离激光辐照点方向延伸。有磁场时,等离子体及燃烧波的速度分布区 域相对较小,且速度增长相对缓慢,高速区域的扩展也受到限制。主要原因是在无磁场环境中,激光辐 照熔石英产生的等离子体在向外膨胀过程中,主要受自身热膨胀力以及与周围介质相互作用的影响,其 运动相对自由,使得等离子体及燃烧波能够较为快速地向远处扩散,速度分布区域也随之增大。当引入 磁场后,磁场对等离子体中的带电粒子施加洛伦兹力。这使得带电粒子的运动轨迹发生改变,限制了等 离子体的扩散方向和范围。等离子体难以像无磁场时那样自由膨胀,能量在相对较小的区域内聚集,导 致其速度增长受限,分布区域也明显小于无磁场情况。



Figure 4. Velocity profile comparison of plasma and combustion waves in magnetic/non-magnetic environments 图 4. 有无磁场条件下等离子体及燃烧波速度分布



Figure 5. Time-dependent velocity variations of plasma and combustion wave propagation with magnetic field intervention 图 5. 有无磁场条件下等离子体及燃烧波速度随时间变化

图 5 展示了毫秒-纳秒组合脉冲激光辐照熔石英实验中,有磁场和无磁场条件下等离子体及燃烧波速度随时间的变化。横坐标为时间(ms),纵坐标为速度(m/s)。初始阶段,两者速度均快速上升,随后达到峰值后逐渐下降。有磁场条件下,速度在 0.85 ms 时达到峰值(162 m/s);无磁场条件下,速度在 0.88 ms时达到峰值(232 m/s)。无磁场时,激光能量被迅速吸收,材料表面电离形成等离子体,等离子体膨胀产生燃烧波,其速度因激光能量输入快速增加,随后因能量耗散与环境相互作用逐渐下降。存在磁场时,磁场通过洛伦兹力作用于等离子体中的带电粒子,改变其运动轨迹与扩散方式,从而影响燃烧波传播速度。

磁场约束等离子体扩散,使能量分布更加集中,抑制了燃烧波速度的增长。

4. 结论

本研究采用理论分析和仿真相结合的方法,系统地探究了有无磁场条件下,毫秒-纳秒组合脉冲激 光辐照熔石英时产生的等离子体及燃烧波的温度和速度变化情况。结果表明:在 0.3 T 均匀磁场作用下, 等离子体温度分布呈现显著非对称性,高温区沿磁场方向延伸,峰值温度由无磁场时的 2447 K 提升至 2611 K,且峰值时间提前 0.07 ms。这一现象归因于磁场的洛伦兹力抑制了带电粒子的无序扩散,增强能 量局域化效应,并通过焦耳加热加速核心区域能量积累。同时,磁场约束热扩散方向,维持高温区稳定 性,导致边缘温度梯度陡峭化。速度变化上,磁场显著降低了燃烧波传播速度,其峰值速度由无磁场时 的 232 m/s 降至 162 m/s,且速度分布区域受限。这是由于洛伦兹力改变了带电粒子的运动轨迹,抑制等 离子体径向膨胀,促使能量在轴向集中。此外,磁场通过约束机械能转化方向,减少了等离子体与外界 环境的能量耗散,进一步延缓燃烧波扩散。基于质量、动量和能量守恒方程构建的 MHD 模型,有效表征 了磁场对等离子体及燃烧波的动态调控过程。数值仿真表明,磁场贡献项和焦耳热项是影响热动力学行 为的关键因素。模型中高斯热源剖面与三维热扩散过程的耦合计算揭示了能量输入与空间分布的关联性, 为理论预测提供了高精度依据。未来研究可进一步探索不同磁场强度与方向的协同效应,以及多物理场 耦合下等离子体不稳定性的抑制策略,为高精度激光制造与材料改性提供理论支撑。

参考文献

- Zhao, D., Sun, M., Wu, R., Lu, X., Lin, Z. and Zhu, J. (2015). Laser-Induced Damage of Fused Silica on High-Power Laser: Beam Intensity Modulation, Optics Defect, Contamination. SPIE Proceedings, 9632, 73-81. <u>https://doi.org/10.1117/12.2192426</u>
- [2] 邱荣, 王俊波, 任欢, 等. 纳秒激光诱导熔石英光学玻璃的损伤增长[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(5): 1057-1062.
- [3] 夏盛强. 毫秒-纳秒组合脉冲激光致熔石英损伤的热应力研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2021.
- [4] Núñez, M. (2003) Dynamic Effects on the Stretching of the Magnetic Field by a Plasma Flow. Journal of Physics A: Mathematical and General, 36, Article 8903. <u>https://doi.org/10.1088/0305-4470/36/33/312</u>
- [5] Pathak, K.A. and Chandy, A.J. (2009) Laser Ablated Carbon Plume Flow Dynamics under Magnetic Field. *Journal of Applied Physics*, 105, Article 084909. <u>https://doi.org/10.1063/1.3116719</u>
- [6] Harilal, S.S., Tillack, M.S., O'Shay, B., Bindhu, C.V. and Najmabadi, F. (2004) Confinement and Dynamics of Laser-Produced Plasma Expanding across a Transverse Magnetic Field. *Physical Review E*, 69, Article 026413. <u>https://doi.org/10.1103/physreve.69.026413</u>
- [7] Zhang, Y., Bhandari, S., Xie, J., Zhang, G., Zhang, Z. and Ehmann, K. (2021) Investigation on the Evolution and Distribution of Plasma in Magnetic Field Assisted Laser-Induced Plasma Micro-Machining. *Journal of Manufacturing Processes*, **71**, 197-211. <u>https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.09.017</u>
- [8] Seely, J.F. and Harris, E.G. (1973) Heating of a Plasma by Multiphoton Inverse Bremsstrahlung. *Physical Review A*, 7, Article 1064. <u>https://doi.org/10.1103/physreva.7.1064</u>
- [9] Grudtsyn, Y.V., Koribut, A.V., Rogashevskii, A.A., Gerasimova, Y.A., Trofimov, V.A., Yalovoi, V.I., et al. (2021) Multiphoton and Plasma Absorption Measurements in CaF₂ and UV Fused Silica at 473 Nm. *Laser Physics Letters*, 18, Article 035401. <u>https://doi.org/10.1088/1612-202x/abdcc0</u>
- [10] 沈超. 高功率纳秒激光诱导熔石英元件损伤动力学研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- [11] Kumar, A., George, S., Singh, R.K., Joshi, H. and Nampoori, V.P.N. (2011) Image Analysis of Expanding Laser-Produced Lithium Plasma Plume in Variable Transverse Magnetic Field. *Laser and Particle Beams*, 29, 241-247. https://doi.org/10.1017/s0263034611000218