

电磁波在磁化等离子体中 传输机理研究*

李力, 吴寒, 马修泉

(华中科技大学机械科学与工程学院, 武汉 430074)

[摘要] 通过联立电磁波波动方程与磁化等离子体中电子的运动方程,得到了电磁波传播的色散方程,求解色散方程得到了磁化等离子体对电磁波的折射率及逆韧致吸收系数。可以得出,随着外加磁场的增强,等离子体截止波长明显变短,导致低频电磁场无法穿过等离子体。对于 $1\mu\text{m}$ 左右波长的电磁波,等离子体的折射率和逆韧致吸收系数几乎不随外加磁场强度的变化而变化。对于 $10\mu\text{m}$ 左右波长的电磁波,等离子体的折射率随外加磁场强度的增强而减小,而逆韧致吸收系数随外加磁场强度的增强而增大。理论分析和数值结果阐明了电磁波在磁化等离子体中的传输机理,对研究激光复合焊接中磁场和等离子体对激光传播的影响具有指导意义。

关键词: 激光复合焊接; 电磁波; 磁化等离子体; 截止波长; 折射率; 逆韧致吸收系数

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.20.030



李力

博士研究生,研究方向为激光复合焊接技术。

自 20 世纪 70 年代末 Steen 提出电弧辅助激光焊接的概念以来^[1],激光电弧复合焊接技术逐渐成为一种成熟技术并得到了广泛应用,由于其特有的优势,如优秀的桥接能力、更快的焊接速度,良好的焊缝质量等^[2],此项技术在航天、航海、高速列车等高端制造业中受到了越来越多的重视^[3-5]。近年来,磁场作为一种非接触的焊接调控手段,也加入到激光复合焊接中,以提高焊接稳定性^[6]。

可以看出,激光复合焊接包含了激光、磁场、等离子体等多种因素,各物理场之间相互作用非常复杂。现阶段对激光复合焊接的研究工作主要是采用工艺试验和数值模拟的手段,对最终形成的焊缝进行分析,总结规律,并进行工艺参数优化^[7-9],而对激光、磁场、等离子体之间相互作用机理,缺乏相应的理论研究。

高能量密度的激光是焊接时形成“匙孔”的决定性因素,直接关系

到最终焊缝质量,故研究激光电磁场在外加磁场的等离子体中的传输过程,对于深刻理解激光复合焊接机理以及指导工艺参数设置,具有一定的实际意义。本文从波动光学出发,研究激光高频电磁场在磁化等离子体中的传播行为,以得到外加磁场对激光电磁场在等离子体中传播的影响:(1)由折射率变化导致的激光散焦;(2)由逆韧致吸收导致的激光功率衰减。

理论模型

首先,从基础的物理原理出发,将激光与磁化等离子体的相互作用纳入电磁波与一般物质的相互作用的理论框架内,对电磁场在磁化等离子体中传播行为进行定量估算分析。

考虑一束平面电磁波在等离子体中传播,外加磁场方向平行于传播方向。电磁波的电场垂直于 xz 平面振荡,有 $E=E_y \exp(ikz-i\omega t)$, 磁场垂

* 基金项目: 国家重点基础研究计划项目(973 计划)(2014CB046703)。

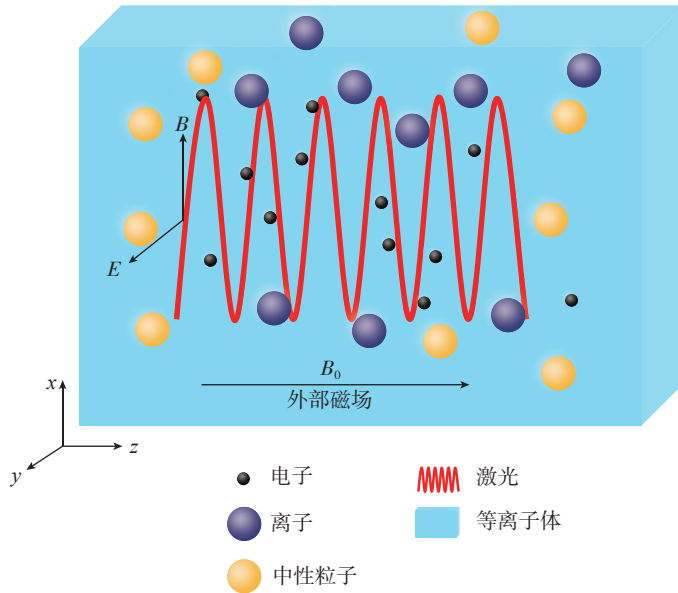


图1 激光在磁化等离子体中的传播模型示意图

Fig.1 Model of laser propagation in magnetized plasma

直于 yz 平面振荡,有 $B=B_x \exp(ikz - i\omega t)$, 电磁波传播方向与外加磁场 B_0 方向均沿 z 方向,如图 1 所示。

从 Maxwell 方程出发:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2)$$

式(1)为“电-环方程”,表述为一个闭合环线上的电场与通过这个环线横截面的磁通量的关系,通常被称为法拉第定律,可以看出,如果外加的磁场是个不随时间变化的恒定磁场,那么这个外磁场就不参加电磁场作用。而式(2)为“磁-环方程”,表述为一个闭合环线上的磁场与通过这个环线的横截面的电流与电位移矢量的关系,通常被称为安培定律。

由 Maxwell 方程可得到波动方程:

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \mu_0 \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} \quad (3)$$

式中, E 为电磁波电场; J 为电流密度; μ_0 为真空磁导率; ε_0 为真空介电常数。 $\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$ 代表电磁波的电场以真空常数为参数的振荡与传播, $\mu_0 \frac{\partial \vec{J}}{\partial t}$ 代表等离子体中的自由电子形

成的电流对电磁波电场进行阻尼衰减的行为。

电流密度 J 可表示为:

$$\vec{J} = -n_e q_e \vec{v}_e \quad (4)$$

式中, n_e 为电子密度; q_e 为电子电量; \vec{v}_e 为电子速度。

由于等离子体中的阳离子和中性粒子质量较大,自由电子质量非常小,故忽略电磁场对阳离子和中性粒子的影响,本文只考虑自由电子对电磁场的响应。若不考虑电子之间的长程库仑力,仅考虑电子与粒子之间的碰撞,则自由电子满足运动方程:

$$m_e \frac{\partial \vec{v}_e}{\partial t} = -q_e (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) - \nu_{ei} m_e \vec{v}_e \quad (5)$$

式中, m_e 为电子质量; ν_{ei} 为电子与离子的碰撞频率,通过公式(6)计算^[10]:

$$\nu_{ei} = \frac{4(2\pi)^{1/2} n_e Z^2 q_e^4 \ln \Lambda}{3(k_B T_e)^{3/2} m_e^{1/2}},$$

$$\Lambda = \frac{3(\varepsilon_0 k_B T_e)^{3/2}}{2\pi^{1/2} q_e^3 n_e^{1/2}} \quad (6)$$

式中, Z 为电离度, T_e 为电子温度, k_B 为玻尔兹曼常数。

将式(5)写成 x 方向和 y 方向的形式:

$$-im_e \omega v_x = -q_e (E_x + v_y B_0) - \nu_{ei} m_e v_x \quad (7)$$

$$-im_e \omega v_y = -q_e (E_y - v_x B_0) - \nu_{ei} m_e v_y \quad (8)$$

$\omega = 2\pi c / \lambda$ 是电磁波角频率,其中 c 为光速, λ 为电磁波波长。

联立式(7)和(8)可解得:

$$v_x = \frac{iq_e}{m_e \omega'} \frac{E_x - i \left(\frac{\omega_B}{\omega'} \right) E_y}{1 - \left(\frac{\omega_B}{\omega'} \right)^2} \quad (9)$$

$$v_y = \frac{-iq_e}{m_e \omega'} \frac{E_y + i \left(\frac{\omega_B}{\omega'} \right) E_x}{1 - \left(\frac{\omega_B}{\omega'} \right)^2} \quad (10)$$

式中, $\omega' = \omega + i\nu_{ei}$; $\omega_B = q_e B_0 / m_e$ 为电子由于外加磁场而产生的回旋频率。由于电场垂直 xz 平面振荡,则有 $E_x = 0$ 。

将式(3)、(4)、(10)联立可得电磁波在磁化等离子体中的色散方程:

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \left(1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega \omega' \left(1 - \frac{\omega_B^2}{\omega'^2} \right)} \right) \quad (11)$$

式中, $\omega_{pe}^2 = n_e q_e^2 / \varepsilon_0 m_e$ 为等离子体振荡频率,也是电磁波在等离子体中传播的截止频率,即满足 $\omega > \omega_{pe}$ 的电磁波才能在等离子体中传播。假设自由电子碰撞频率远小于电磁波频率 $\nu_{ei} / \omega \ll 1$, 可将式(11)简化并展开,得到 k 的实部与虚部, k 的实部与折射率 η 直接相关,而 k 的虚部与逆韧致吸收系数 k_{ib} 直接相关^[11]:

$$\eta = \frac{c}{\omega} \text{Re}(k) = \left(1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} \frac{1}{\left(1 - \frac{\omega_B^2}{\omega^2} \right)} \right)^{1/2} \quad (12)$$

$$k_{ib} = 2\text{Im}(k) = \frac{\nu_{ei}}{c} \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} \frac{1}{\left(1 - \frac{\omega_B^2}{\omega^2} \right)}$$

$$\left(1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} \frac{1}{\left(1 - \frac{\omega_B^2}{\omega^2} \right)} \right)^{-1/2} \quad (13)$$

当回旋频率 ω_B 不为零时,磁化等离子体的折射率减小,而等离子体为光疏介质(折射率小于1),可认为磁场的加入,增大了等离子体对入射电磁波的折射作用;等离子体的逆

韧致吸收系数增大,即增大了等离子体对激光能量的吸收作用。同时,磁场的加入造成了磁化等离子体截止频率变化,电磁波需要满足角频率 ω 大于截止角频率 $\omega_c = (\omega_{pe}^2 + \omega_B^2)^{1/2}$ 才能在磁化等离子体中传播。

结果与讨论

通常的燃烧等离子体、气体高压放电^[12]等离子体和激光烧蚀等离子体均属于低温、稠密等离子体,电子温度在 10^4K 左右、电子密度在 $10^{21}\sim 10^{24}\text{m}^{-3}$ 左右。选取两组典型的等离子体电子温度和密度,对电磁波在外加磁场的等离子体中传输时的折射率和吸收系数进行计算。

首先采用文献[13]中的试验数据,采用光纤激光进行焊接时等离子体温度 5583K 、等离子体电子密度 $2.13 \times 10^{21}\text{m}^{-3}$,计算得到等离子体截止波长 $\lambda_c = 2\pi c/\omega_c$ 、折射率 η 和逆韧致吸收系数 k_{ib} 随外加磁场强度变化的关系,如图2、图3和图4所示。

采用二氧化碳激光进行焊接时产生的光致等离子体的电子密度一般为 10^{22}m^{-3} ,等离子体温度在 11600K 左右,由此计算得到等离子体截止波长 λ_c 、折射率 η 和逆韧致吸收系数 k_{ib} 随外加磁场强度变化的关系,如图5、图6和图7所示。

由图2、图5可以看出,随着外加磁场强度的增大,等离子体截止波长逐渐降低,即等离子体允许通过的最小电磁场频率阈值逐渐提高,频率低于此阈值的电磁场会被磁化等离子体完全屏蔽。

由图3、图6可以看出,外加磁场降低了等离子体的折射率,由于等离子体为光疏介质,则外加磁场提高了等离子体对电磁波的折射作用,对于激光焊接来说,理论上外加磁场会导致激光束产生一定的散焦。同时也可以看出,外加磁场对 $1\mu\text{m}$ 波长的光纤激光的散焦作用较小,在 100T 时产生的影响仍远小于

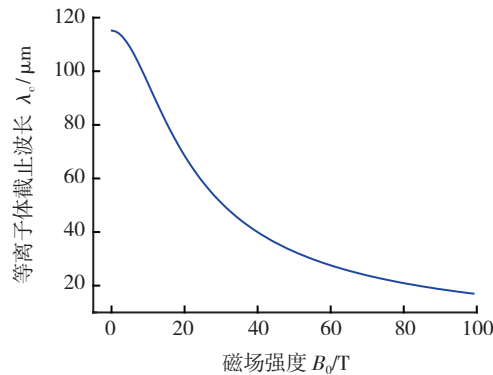


图2 电子温度 5583K 、电子密度 $2.13 \times 10^{21}\text{m}^{-3}$ 的等离子体截止波长随外加磁场强度变化情况

Fig.2 Variations of cut-off wavelength of plasma (electron temperature 5583K , electron density $2.13 \times 10^{21}\text{m}^{-3}$) with intensity of external magnetic field

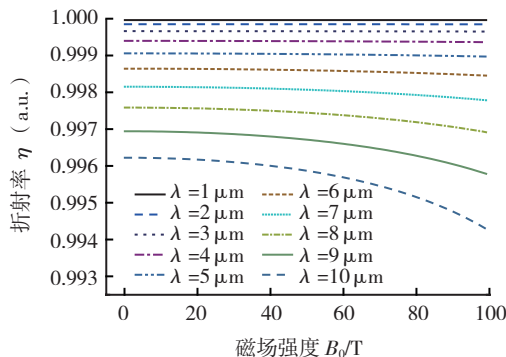


图3 电子温度 5583K 、电子密度 $2.13 \times 10^{21}\text{m}^{-3}$ 的等离子体对不同波长电磁波的折射率随外加磁场强度变化情况

Fig.3 Variations of refractive index of plasma (electron temperature 5583K , electron density $2.13 \times 10^{21}\text{m}^{-3}$) for electromagnetic waves with different wavelengths with intensity of external magnetic field

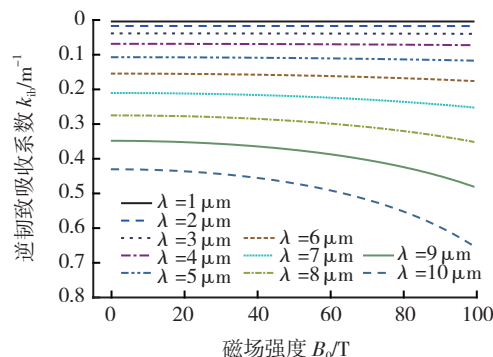


图4 电子温度 5583K 、电子密度 $2.13 \times 10^{21}\text{m}^{-3}$ 的等离子体对不同波长电磁波逆韧致吸收系数随外加磁场强度变化情况

Fig.4 Variations of inverse bremsstrahlung absorption coefficient of plasma (electron temperature 5583K , electron density $2.13 \times 10^{21}\text{m}^{-3}$) for electromagnetic waves with different wavelengths with intensity of external magnetic field

0.001%,而对 $10\mu\text{m}$ 波长的二氧化碳激光的散焦作用相对明显,在 100T 时产生的影响可以达到 0.9%。

图 4 和图 7 显示出外加磁场会提高等离子体的逆韧致吸收系数,即会提高等离子体对电磁波功率的吸收作用。等离子体产生逆韧致吸收的主要原因是等离子体中自由电子由于受到电磁场激励而发生碰撞,从而产生能量耗散,故可以认为由于外加磁场的加入,加剧了等离子体中自由电子的碰撞程度,从而增大了电磁波在其中传播时的能量损失。由图 4 和图 7 的对比也可以看出,等离子体对 $1\mu\text{m}$ 波长的光纤激光的逆韧致吸收几乎可以忽略不计,每厘米厚度等离子体的吸收率仅在 0.001% 的数量级,100T 磁场使逆韧致吸收系数提高 0.2%,但对 $10\mu\text{m}$ 波长的二氧化碳激光来说,等离子体的逆韧致吸收相对明显,每厘米厚度等离子体的吸收率可达 6.4%,而 100T 磁场可使逆韧致吸收系数提高达 53%。基于这一考虑,可以认为光纤激光比二氧化碳激光更适合做激光复合焊接。

结论

本文从波动光学出发,研究激光电磁场在磁化等离子体中的传播行为,建立了理论模型,并定量计算了磁化等离子体对激光散焦及能量吸收作用。得到结论如下:

(1) 外加磁场会减小等离子体对激光的折射率,从而增大对激光的散焦作用。

(2) 外加磁场会提高等离子体对激光的逆韧致吸收,从而增大对激光能量衰减作用。

(3) 对于几种常用于焊接的激光来说,磁化等离子体对 $1\mu\text{m}$ 左右波长的激光(如光纤激光, Nd:YAG 激光)的折射率和逆韧致吸收系数几乎不随外加磁场的改变而改变,而对 $10\mu\text{m}$ 左右波长的激光(如二氧化碳激光),折射率和逆韧致吸收系数

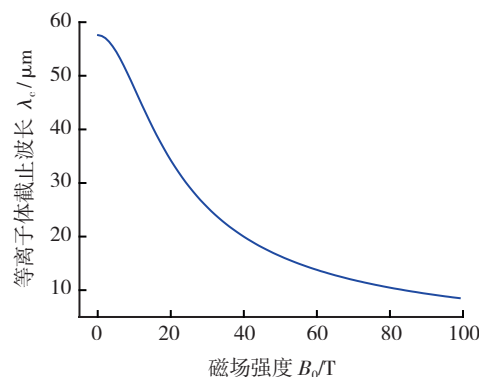


图5 电子温度11600K、电子密度 $1 \times 10^{22}\text{m}^{-3}$ 等离子体截止波长随外加磁场强度变化情况

Fig.5 Variations of cut-off wavelength of plasma (electron temperature 11600K, electron density $1 \times 10^{22}\text{m}^{-3}$) with intensity of external magnetic field

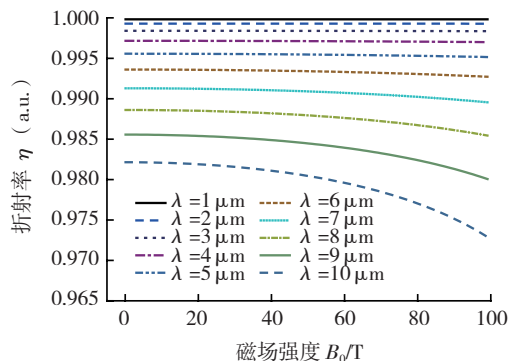


图6 电子温度11600K、电子密度 $1 \times 10^{22}\text{m}^{-3}$ 等离子体对不同波长电磁波折射率随外加磁场强度变化情况

Fig.6 Variations of refractive index of plasma (electron temperature 11600K, electron density $1 \times 10^{22}\text{m}^{-3}$) for electromagnetic waves with different wavelengths with intensity of external magnetic field

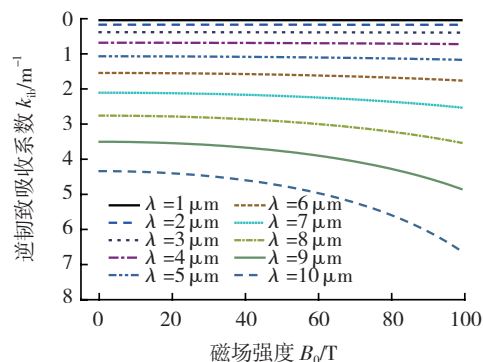


图7 电子温度11600K、电子密度 $1 \times 10^{22}\text{m}^{-3}$ 等离子体对不同波长电磁波逆韧致吸收系数随外加磁场变化情况

Fig.7 Variations of inverse Bremsstrahlung absorption coefficient of plasma (electron temperature 11600K, electron density $1 \times 10^{22}\text{m}^{-3}$) for electromagnetic waves with different wavelengths with intensity of external magnetic field

的改变较为明显。

(4) 现阶段在激光复合焊接中,外加磁场一般在数十毫特数量级,此时外加磁场对激光电磁场在等离子体中传播的折射率和逆韧致吸收系数的改变几乎可以忽略,故可以不考虑外加磁场对激光的影响。

参考文献

- [1] STEEN W M. Arc augmented laser processing of materials[J]. Journal of Applied Physics, 1980, 51(11): 5636-5641.
- [2] RIBIC B, PALMER T, DEBROY T. Problems and issues in laser-arc hybrid welding[J]. International Materials Reviews, 2009, 54(4): 223-244.
- [3] 刘春宁, 胡文浩. 激光-MIG 电弧复合焊接技术在高速列车铝合金车体焊接中的应用研究[J]. 金属加工: 冷加工, 2016(S1): 555-560.
- LIU Chunqing, HU Wenhao. Study on application of laser-MIG hybrid welding technology in welding aluminum alloy body of high speed train[J]. Metal Working: Cold working, 2016(S1): 555-560.
- [4] 陈彦宾, 冯杰才, 李俐群. 高强钢厚板激光-GMAW 复合双面同步横焊特性研究

[J]. 机械工程学报, 2016, 52(2): 47-55.

CHEN Yanbin, FENG Jiecai, LI Liqun. Research on the characteristics of double-sided hybrid laser-GMAW synchronous horizontal welding of high-strength thick steel plates[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(2): 47-55.

[5] 赵耀邦, 徐爱杰, 姜勇, 等. 激光焊接技术研究进展及其在航天领域的应用[J]. 航天制造技术, 2013(3): 55-58.

ZHAO Yaobang, XU Aijie, JIANG Yong, et al. Technology of laser welding-recent advances of research and application in aerospace[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2013(3): 55-58.

[6] ZHANG X, ZHAO Z, WANG C, et al. The effect of external longitudinal magnetic field on laser-MIG hybrid welding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(5-8): 1735-1743.

[7] CHEN R, WANG C, JIANG P, et al. Effect of axial magnetic field in the laser beam welding of stainless steel to aluminum alloy[J]. Materials & Design, 2016, 109: 146-152.

[8] CAO L, YANG Y, JIANG P, et al. Optimization of processing parameters of AISI 316L laser welding influenced by external magnetic field combining RBFNN and GA[J]. Results in Physics, 2017, 7: 1329-1338.

[9] GAO Z, JIANG P, WANG C, et al. Study on droplet transfer and weld quality in laser-MIG hybrid welding of 316L stainless steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(1-4): 483-493.

[10] ELIEZER S. The interaction of high-power lasers with plasmas[M]. Boca Raton: CRC Press, 2002.

[11] DAWSON J, OBERMAN C. High-frequency conductivity and the emission and absorption coefficients of a fully ionized plasma[J]. The Physics of Fluids, 1962, 5(5): 517-524.

[12] WU H, ZHAO Y, CUI H, et al. Diagnostics of electron temperature and density in a capillary predischARGE Ar plasma[C]// Academic International Symposium on Optoelectronics and Microelectronics Technology. IEEE, 2012:130-133.

[13] 王军. 铝合金光纤激光及其复合焊接的等离子体行为与工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.

WANG Jun. Study on the technology and plasma behaviour during the fiber laser and laser hybrid welding of aluminum alloy[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.

通讯作者: 马修泉, 教授, 研究方向为激光加工过程中激光与材料的作用机理, E-mail: xma@hust.edu.cn.

Research on Propagation Mechanism of Electromagnetic Wave in Magnetized Plasma

LI Li, WU Han, MA Xiuquan

(School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

[ABSTRACT] With wave equation of electromagnetic wave and motion equation of electron in magnetized plasma, the dispersion equation of propagation of electromagnetic wave is obtained, through which the refractive index and inverse bremsstrahlung absorption coefficient of magnetized plasma are derived. It can be found that the cut-off wavelength of plasma decreases obviously as the intensity of external magnetic field increases, resulting in the low frequency electromagnetic wave cannot pass through the plasma. For electromagnetic waves with around $1\mu\text{m}$ wavelength, the refractive index and inverse bremsstrahlung absorption coefficient of plasma barely change with the intensity of external magnetic field. For electro-magnetic waves with around $10\mu\text{m}$ wavelength, the refractive index of plasma decreases as the intensity of external magnetic field increases, while the inverse bremsstrahlung absorption coefficient of plasma increases with the rise of intensity of external magnetic field. The theoretical analysis and numerical results reveal the mechanism of electromagnetic wave propagation in magnetized plasma, which has theoretical significance in study of effect of external magnetic field and plasma on laser propagation in laser hybrid welding process.

Keywords: Laser hybrid welding; Electromagnetic wave; Magnetized plasma; Cut-off wavelength; Refractive index; Inverse bremsstrahlung absorption coefficient

(责编 海山)