

偏振激光束对激光加工的影响

范永昌

陆冬生

周凤晴

(华中理工大学激光技术研究所)

本文综述了激光加工中偏振效应的基本原理及相关的实验结果,展望了偏振效应的可能应用前景。

The influence of polarization laser beam on laser processing

Fan Yongchang, Lu Dongshen, Zhou Fengqing
(Huazhong University of Science and Technology)

Abstract

In this paper the basic principles of polarization effects in laser materials processing and some related experimental results is summarized. And Prospective application of the polarization effects is given.

一、引言

随着大功率CO₂、YAG激光器在刻蚀、切割、钻孔以及焊接等工业加工中的应用日益广泛和普及,人们对激光在材料加工过程中光与物质相互作用基本机理和实验的研究也越来越深入。近年来的研究表明,激光加工的速度和质量除了与光束的功率、模式、聚焦后的束斑直径有关外^[1~3],还与激光束的偏振状态密切相关。在许多情况下,激光束的偏振状态甚至起着决定性的作用^[4~7]。这一研究结果,导致了选用圆偏光作为激光加工的最佳激光束^[8],使激光加工的质量大为改善,速度显著提高,充分显露出激光器在工业加工应用中的巨大优势和潜力。本文综述激光加工中偏振效应的基本原理、有关的实验结果和某些应用方面的展望。

二、基本原理

自激光器用于工业加工以来很长的一段时期内,在研究和分析激光加工过程中光与物质相互作用的时候,激光束偏振状态的影响都被忽略而未加考虑。当时人们普遍认为,在激光打孔、刻蚀、切割等加工过程中,激光束是以法线方向入射于加工材料表面的,光能在材料中耦合的大小与光束的偏振状态没有关系。这种先入为主的主观臆断持续了将近二十年,直到80年代初,才为丹麦大学材料加工实验室的F.O.Olsen教授首先在激光切割方面所做的一系列实验所否定^[4]。F.O.Olsen等人发现,激光切割过程光束法线入射于材料表面的这一假设仅在相互作用的最初阶段是正确的。一旦切口形成以后,光束实际上是以接近于90°的切线方向入射于加工材料表面的,如图1所示。在这种情况下,材料对入射激光光能的反射和吸收将会受到光束偏振状态的强烈制约,其材料表面的光能反射系数应由下面的菲涅耳公式给出

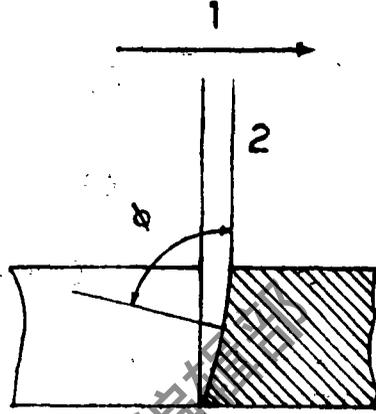


图1 激光切割过程光束的入射角。
1. 切割方向; 2. 激光束

$$R_p = \frac{\tan^2(\varphi_2 - \varphi_1)}{\tan^2(\varphi_2 + \varphi_1)} \quad (1)$$

$$R_s = \frac{\sin^2(\varphi_2 - \varphi_1)}{\sin^2(\varphi_2 + \varphi_1)} \quad (2)$$

式中, R_p 是偏振面平行于入射面的偏振光的反射系数, R_s 是偏振面垂直于入射面的偏振光的反射系数, 角 φ_1 和 φ_2 分别为光束的入射角和折射角, 折射角可由Snell定理解出:

$$\sin\varphi_2 = \sin\varphi_1/n \quad (3)$$

并且认为, 若假定透过材料表面的光能全部被材料所吸收, 则吸收系数 A_p 和 A_s 可以表示为:

$$A_p = 1 - R_p \quad (4)$$

$$A_s = 1 - R_s \quad (5)$$

由以上诸式的求解, 可以获得偏振影响激光加工过程的定性解释。但是由于加工材料的折射率 n 一般为复数, 并且随温度的升高而有较大的变化, 使得反射系数的精确计算十分困难, 仅能在某些特定的条件下, 借助于数值方法对(1)至(5)式加以求解。

图2给出了在室温条件下, 被CO₂激光照射的铁质材料表面反射系数与入射角的函数关系^[4]。由图中看出, 仅当激光束以法线方向($\varphi=0$)入射于材料表面时, R_s 才等于 R_p , 即光能的耦合才与偏振状态没有关系。当激光束以小于30°的小角入射时, R_s 近似等于 R_p , 偏振状态的影响仍可忽略。但当光束以接近90°的切线方向入射时, R_s 和 R_p 产生了显著的差异, 此时, 入射光光能在材料中耦合的大小强烈地依赖于激光束的偏振状态。

为了更直观地说明不同偏振光光能的耦合效应，图3、图4分别给出了高反射率材料钢

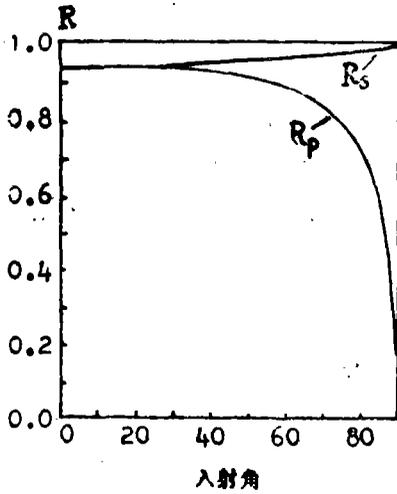


图2 反射系数的数值计算结果

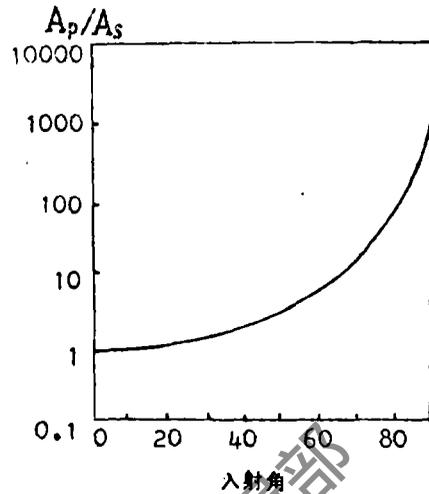


图3 CO₂激光照射的钢表面吸收系数比A_p/A_s与入射角的函数关系

和低反射率材料聚乙烯塑料吸收系数比值A_p/A_s与入射角的函数关系曲线[7]。显而易见，随着入射角的增加，材料对平行于入射面的偏振光的吸收远远大于对垂直于入射面的偏振光的吸收。这种偏振效应对光能耦合的影响在反射率较高的金属、合金类材料的加工中表现尤为突出。例如，用一适当功率输出、聚焦后光斑直径小于0.15mm的CO₂激光器切割0.7mm厚的钢板，当激光束对加工材料表面的入射角近似为80°时，由图3查出吸收系数的比值A_p/A_s大约为20。这意味着，在切割的过程中，材料对偏振面平行于入射面的偏振光的吸收为对偏振

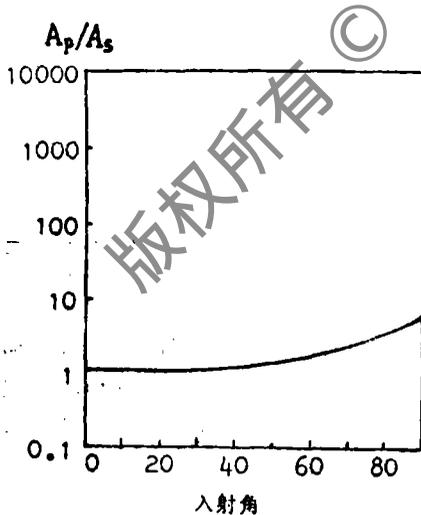


图4 聚乙烯塑料表面吸收系数比A_p/A_s与入射角的函数关系

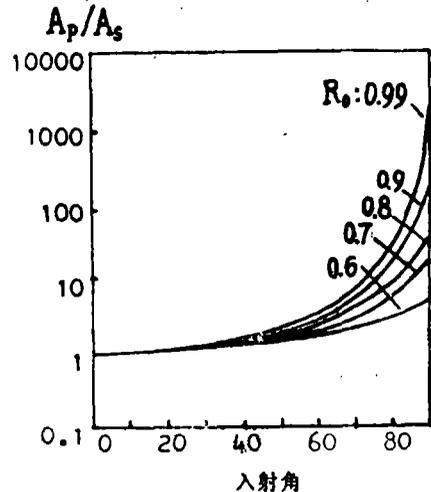


图5 不同温度下(对应不同的垂直入射反射系数R₀) A_p/A_s与入射角的函数关系

面垂直于入射面的偏振光的吸收的20倍。然而在真实的切割过程中还必须考虑到反射系数 R 随着温度的升高而减小的现象，它导致了吸收系数 A_P/A_S 比值的减小，如图5所示。因而，在实际的加工中，考虑温度影响的吸收系数比值 A_P/A_S 要比图3中未考虑温度变化预测的结果低得多。

由以上分析可以看出，由界面反射和折射的经典电磁波理论可以定性地说明确实激光束偏振特性对激光加工的影响。但是这种理论解释是不完善的，粗浅的。因为在激光加工的过程中，光能决不是在单一的界面上被固体材料所反射和吸收，固体表面形成的高温蒸气、等离子体、熔融液体均参与和影响光能的耦合，这种复杂的光与物质相互作用过程，可望采用半经典或全量子理论获得完满的解释。

三、实验结果

1. 线偏振激光切割

大量的实验表明，用线偏振激光束切割具有较大反射率的材料时，切割的质量和速度随着光束的偏振方向 p 和切割方向 c 之间夹角 θ 的不同而有着较大的差异，如图6、7所示。当角度 θ 为 0° 时，偏振面与入射面平行，由前述的理论分析可知，切口前沿对入射光具有较大的吸收，较小的反射。因此，在这种偏振方向与切割方向一致的情况下，能够获得最大的切割速度和最窄的切割缝宽。

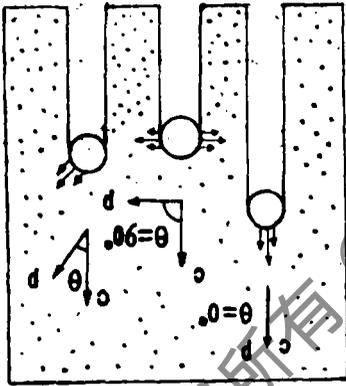


图6 线偏振激光切割

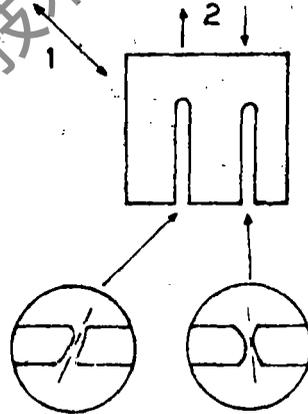


图7 不对称的切割轮廓。1.偏振方向；
2.切割方向

当 $\theta = 90^\circ$ 时，切割速度最慢，切缝最宽。这是由于当偏振面与入射面垂直时，切割前沿表面光能的吸收较边部小，相当部分的光能被反射而损失掉的原因。用适当功率输出的 CO_2 激光器对铁、钢等金属板材的切割实验表明，此时切割的最大速度仅为 $\theta = 0^\circ$ 时的最大切割速度的一半。

以上两种情况虽然导致了不同的切割速度和切缝宽度，但它们所获得的切缝垂直于材料表面，并与入射光束的传播方向是相同的。然而当 θ 不等于 90° 或 0° 时，切出的切缝会向一侧倾斜，并随着切割方向的反向而改变倾斜方向，如图7所示。显然这是由于反射和吸收的不对称造成的，其更为深入的解释还有待于进一步的探讨。

由此可以看出,采用线偏振激光束切割金属板材时,若始终保持偏振方向与切割方向一致,可以获得最大的切割速度和最佳的切割质量。

2. 线偏振脉冲激光刻蚀

在用高能脉冲激光进行电子和机械元件的精密刻蚀实验中,每个光脉冲将在硬质材料(如陶瓷)表面上烧出一个小孔。如果光束相对于刻蚀材料静止,烧出的孔洞是垂直向下且边缘对称^[6],见图8a。当光束相对于刻蚀器件以一定的速度平移,使下一个光脉冲恰好落在小孔的前部边缘,且脉冲光的偏振方向与光束刻蚀方向一致时,形成孔洞的过程如图8b所示,烧出的孔洞也是对称的。当光束的偏振方向与光束刻蚀方向不一致时,实验上所得到的刻蚀孔洞如图8c,烧出的孔洞浅且向后倾斜。这是由于前沿光能反射到后沿,使后沿光能吸收过多造成气化率大于前沿气化率的缘故。

这些实验表明,脉冲激光刻蚀的对称性同样受到激光束偏振状态的强烈影响。

3. 线偏振激光焊接

激光焊接时,在大多数情况下,激光束是近似以法线方向入射于焊接材料表面的,然而对一些铰节处,激光束往往需要以偏离于法线的方向入射,此时,焊接过程就会受到激光束偏振状态的影响^[6]。图9给出了采用200W连续CO₂激光器在不同的入射角下,焊接0.5mm厚的不锈钢板所得的结果。从图中可见,正如理论分析的,当入射角增大时,平行于入射面的偏振光和垂直于入射面的偏振光在同一入射角的条件下,其最大焊接速度有着显著的差异。

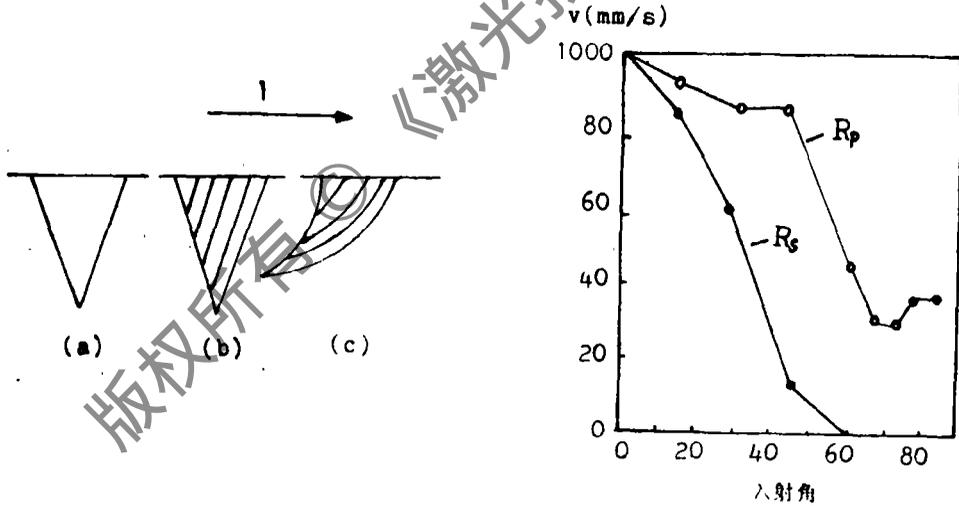


图8 脉冲激光刻蚀孔洞的形成。

1. 刻蚀方向

图9 最大焊接速度与入射角的关系

4. 圆偏振——激光加工的最佳偏振态

通过理论分析和大量的实验研究,人们逐步认识到,采用线偏振激光进行材料的加工是十分不利的。首先,当线偏振的方向与加工方向不一致时,会造成切割、钻孔、刻蚀的不对称性,致使加工质量低下,这在曲线切割、刻蚀过程尤为严重。其次,在某些加工条件下,

会造成光能的大量损失,降低加工速度,提高加工成本。克服这些弊病,若采用时时保持偏振方向在入射面内且与加工方向一致,这是行不通的。因此,唯一的途径就是要消除激光束偏振的方向性。显然,圆偏振光在偏振特征上符合这一基本要求。M.W.Sasnett 等人的实验研究表明,采用圆偏振光可以完全消除线偏振光在加工中造成的不对称性,具有最佳的加工质量,而且其最大的加工速度也与采用线偏振激光所能达到的最大加工速度相差无几^[6]。图10为圆偏振光在材料表面上切割或刻蚀的示意图,显而易见,圆偏振光可以用来进行任意曲线型的切割而给出一致的切边质量,使这一长期未能解决的最佳质量曲线切割问题获得了解决。

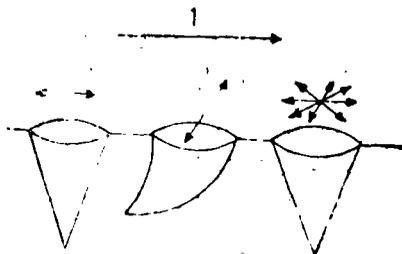


图10 线偏振光、圆偏振光刻蚀、切割示意图。1. 切割方向

四、展 望

上述的研究表明,改变光束的偏振特性可以改变材料对光能吸收的大小。这一重要结论不仅对激光加工最优化的研究意义重大,对其它许多领域的研究也将有着重要的实用价值。

首先,这一研究成果有可能用于激光武器光学系统的设计中,通过激光束偏振特性的最佳选择,在有限输出功率的条件下,可造成袭击目标的最大损伤程度,提高激光武器的打击能力。

其次,在蓬勃兴起的激光制膜技术研究领域中,利用这一研究成果,有可能使一些关键性的技术难关获得突破。例如,采用多组分材料激光蒸镀法镀制超导薄膜时,采用改变光束功率方法控制各组分材料的气化率十分困难^[7],可望利用材料对光能的吸收依赖于光束偏振特性这一规律,寻求用改变激光束的偏振状态来控制镀制材料的气化率以及溅射空间分布微弱变化的新途径,提高镀膜质量。

最后,这一研究成果对改善和提高强激光光学系统的传输效率亦有指导意义。

参 考 文 献

- [1] W.W.Duley, CO₂-laser effects and application, Academic, Press, New York, 1978.
- [2] S.S.Harschan (ed), Lasers in industry, Van Nostrand-Reinhold, 1972.
- [3] M.Jorgensen, Increasing energy absorption during welding, Metal Construction, 1980, Feb., P.88.
- [4] F.O.Olsen, Cutting with Polarized laser beams, DVS Beriche 63, 1980, P.197~200.
- [5] Studies of sheet metal cutting with Plane-Polarized CO₂-laser, Pro.Int Conf, Laser, 1981.
- [6] Studies of sheet metal welding with a plane-polarized

CO₂-laser, Pro.Int Conf, Laser, 1981.

[7] Investigations in optimizing the laser cutting Process,
Asm Conf on Appl.of Laser in Materials Processing, Los
Angeles, Calif., Jan,1983.

[8] U.S.P., 4,336, 439.

[9] R.B.Laibowitz et al., Phys,Rev., B35, 1987, P.8821.

*

*

*

作者简介: 范永昌, 男, 1955年出生。助教, 理学硕士。现从事应用激光方面的研究。

陆冬生, 男, 1942年出生。副教授, 激光技术国家重点实验室副主任。1981~1983年在英国进修, 从事“半导体激光器”、“激光波长精密测量”等方面的研究。

周凤晴, 男, 1961年出生。助教, 理学硕士。现从事光和物质相互作用方面的研究。

收稿日期: 1988年5月27日。

· 简 讯 ·

发蓝光的Nd:YAG激光器

把特定取向的KTP晶体安放进Nd:YAG激光腔内, IBM公司的研究人员成功地产生出了459nm波长的蓝光。这个系统是使809nm的KTP泵浦光与1064nm的Nd:YAG基波输出光进行非线性混频。

1987年10月22日在纽约州罗彻斯特市举行的美国光学学会年会上, IBM公司的William Risk发表了此项实验成果。实验用275mW的染料激光泵浦功率产生了1mW的蓝光输出。

IBM公司证实了使用二极管激光器代替染料激光器泵浦产生蓝光。二极管泵浦的好处包括有可能通过改变二极管电流直接以兆赫频率调制蓝光输出。Risk认为, 通过1W的二极管激光器泵浦Nd:YAG器件可能会产生13mW的蓝光。

美国伊利诺州Naperville的Amoco激光公司在11月13日宣布, 已制成了一种小型的蓝色激光器。Amoco公司制造了二极管泵浦固态激光器(见1987年11月LF/E-O, P.62.)。最新的型号包括红外和绿色激光器, 并且该公司还打算提供其它颜色的激光器。这种Amoco蓝色激光器, 由Doug Anthon和Jeff Dixon研制成的, 能够进行直接高速调制。Amoco公司的研究组由于使用两个二极管激光器而增加了其适应性。一个用于泵浦Nd:YAG, 而另一个则用来混频。

译自L.F., 1987, No.12, P.10.

张贤义 译 封鸿渊 校