

文章编号: 1001-3806(2005)03-0270-05

激光切割板材表面质量研究综述

鄢 铨, 李力钧*, 李 娟, 谢小柱, 张 屹
(湖南大学 激光研究所, 长沙 410082)

摘要: 从激光切割的优点、表面质量内容及其影响因素和激光切割板材表面质量研究进展进行了综述, 最后说明了激光切割板材表面质量机理的研究将更加深入和透彻, 尤其对于激光切割动态行为和在线监测以及三维切割的研究将倍受重视。

关键词: 激光切割; 板材; 表面质量; 研究进展

中图分类号: TG485 文献标识码: A

Review of surface quality study on laser sheets cutting

YAN Cuo, LI Li-jun, LI Juan, XIE Xiao-zhu, ZHANG Yi
(Institute of Laser Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract The advantages and contents of surface quality of laser sheets cutting and its affecting factors, its research advances were reviewed. Deeper mechanism research of surface quality on laser sheets cutting, especially investigation of dynamic behavior, on-line monitoring and control and 3-D cutting will be emphasized in the near future.

Key words laser cutting sheets; surface quality; research advances

引 言

1967年5月, HOULDCROFT 第1次成功实现用300W CO₂激光并辅以氧气在1m/min速度下切割厚度2.5mm以内的高碳工具钢和不锈钢,从而为激光应用开辟了一个新的加工领域。激光切割是以激光的巨大能量(功率密度)直接聚焦在被切零件的表面,产生足以使切割材料熔化甚至汽化的温度,再辅以喷射气体吹化,从而达到分离材料的目的。与传统的板材加工方法相比,激光切割具有诸多优点:(1)精度高,激光切割切口狭窄(一般为0.1mm~1.0mm)且较光洁,无圆角及机械下料常有的毛口;热影响区(为0.1mm数量级)、热应力及热变形均小;(2)速度快,用1200W CO₂激光切割2mm厚的低碳钢板切割速度可达5m/min~6m/min,切割5mm厚的有机玻璃速度可达12m/min;(3)效率高,激光切割为非接触加工,无机械冲裁时的冲击力,不存在刀具、模具的磨损现象,无需机械冲裁下料时的塔边,工件紧密排列,可节省20%~30%的材料,切割一次成型,无需后续加工;(4)柔性好,无需刀具和模具,结合计算机控制技术,可切割任意形状、尺寸的板材,尤其适合多品种、小批量、形状复

杂零件的切割;(5)范围广,几乎可切割任何金属、非金属材料。

1 激光切割表面质量内容及其影响因素

激光切割被认为是激光应用中最成熟的工艺,因而近年来,人们把激光应用研究热点投入到激光焊接、热处理、标记、快速成型等方面,而对激光切割的研究则相对较少。但随着汽车工业的全面发展,以及精细切割和良好焊接性能的需求,必须进一步提高和控制切割质量。激光切割质量的优劣是指切割尺寸精度高和切割表面质量的好坏,切割表面质量一般以以下4个指标衡量:(1)切口宽度及切口表面粗糙度;(2)热影响区的宽度;(3)切口断面的波纹;(4)切口断面或下表面有无挂渣。下面分析影响激光切割表面质量的主要因素。

1.1 切割用激光

激光应有高的光束质量。激光切割是基于热效应的加工,为得到高的功率密度和精细切口,聚焦光斑直径要小,同时,为保证沿不同方向切割时的质量的一致性,激光束应有良好的绕光轴旋转对称性和圆偏振性以及高的发射方向稳定性,以保证聚焦光斑位置稳定不变。现代激光器还应具备连续和高重复输出快速切换功能,以保证复杂轮廓的高质量切割。

1.2 聚焦透镜与板材厚度

透镜焦距根据被切材料厚度选取,兼顾聚焦光斑

作者简介: 鄢 铨(1970-),男,在职博士研究生,主要从事激光加工、机械制造方面的教学和科研工作。

* 通讯联系人。E-mail: lijunli@hotmail.com

收稿日期: 2004-05-25,收到修改稿日期: 2004-09-02

直径和焦深,材料厚,焦距宜大,反之,则焦距宜小。聚焦光斑位置应靠近工件表面,一般使焦点落在板材上表面偏下约 $1/3$ 板厚处。

1.3 气流与喷嘴

激光切割中气流具有吹除熔融材料、保护聚焦透镜甚至提供部分切割能量的作用。气体压力、流量是影响切割质量的重要因素,压力过低,吹不走切口处的熔融材料;过高,易在工件表面形成涡流,反而削弱了气流去除熔融材料的作用。实践证明,不同结构的喷嘴对切割也会产生不同的影响。

1.4 切割速度

切割速度取决于激光的功率密度和被切材料的热物理性质及其厚度等。对于一定切割条件下,有一合理的切割速度范围,切割速度过高,切口清渣不尽,甚至切不透,切割速度太低,则材料过烧,切口宽度和热影响区大。

1.5 切割轨迹

对于复杂轮廓或具有拐点的零件的切割,由于加速度的变化,容易使拐点处过热熔化而形成塌角,因而合理的切割轨迹是避免这一现象的有效办法之一。

2 激光切割板材表面质量研究进展

人们围绕激光切割参数、材料等对切割表面质量的影响不同侧面地开展了各种不同的研究。

HOULDCROFT 试验发现,切口宽度大约比聚焦光斑直径(当时宣称为 0.4mm)大 $1/3$ 即 0.5mm 左右,且认为它与光斑直径有关,而与辅助气体喷嘴尺寸无关。DULEY 等研究了氧辅助激光切割钢板时切割速度、激光功率密度、氧气流速、切口宽度和板材厚度等参数间的关系,结果发现,当保持激光功率密度不变,随着氧气流速的增加,切割速度增加,板材越薄,则切割速度更高,但到了某一最佳值时,随着氧气流速的继续增加,切割速度不再增加,当氧气流速超过某一极限时,由于冷却效应,切割速度又开始降低。当保持切割板厚不变,氧气流速与切割速度间也有同样的变化规律,且激光功率密度越大,则切割速度越快。在以上两种情况下的最高切速下,所获板材切口最窄,切口质量最好,同时对此进行了初步理论分析,重点解释了氧气流速与切割速度间的变化关系。POWELL 通过一个简单的模型说明了在激光切割或焊接过程中,随着板材厚度增加,效率减小,但不按直线关系递减,且存在一个板材厚度值极限,超过这个极限,则一定功率的激光无法切透板材。SCHRENER-MOHR 等将切割过程视为二维均质半无限体,切割前沿为直径等于切口宽度的半圆,模拟计算得出,虽然材料对圆偏振光的吸收小于线偏振光,但由于局部热传导原因,利用圆偏振光

切割反而可获得更高的切割速度和更好的切割质量,这与实际切割相吻合^[1]。KAEBERNICK 等建立了脉冲激光三维切割模型,并计算了工件上表面、切割前沿和切口处温度分布,发现了脉宽与切口宽之间的关系^[2]。陈继民等研究了激光入射角对切口宽度和切口表面粗糙度值的影响,获得了一些有益结论,为解决三维激光切割时由于干涉等原因无法保证激光束垂直入射而出现的质量问题,提出了应采取的相关措施^[3]。黄开金等研究了曲率半径和切割方式(直线和圆周)对无缝钢管切割时切缝宽度的影响,发现散热和曲率半径是导致以上因素影响切缝宽度的原因。同时,还研究了空间曲率半径对管材激光三维螺旋切割后切缝宽、切口表面粗糙度、热影响区影响和横截面半垂直度的影响,认为热积累和预热效应是造成切割质量发生变化的内在原因^[4]。李力钧等运用移动线热源理论建立了基于小孔效应的激光切割过程的等温曲线方程,并由它决定了熔化区域,得出切口宽度是等温曲线在垂直于切割方向的最大熔化伸展宽度而非光斑尺寸的结论。李祥友利用脉冲 Nd:YAG 激光器对不锈钢薄板切割工艺及机理开展了研究,发现相邻脉冲的重叠度直接影响切缝宽度^[5]。ROTHE 利用线状热源理论获得优化切割参数下切口宽 $b = \sqrt{ks}$ (k 为聚焦数, s 为板材厚)。同时计算出用氧气作辅助气体激光切割钢材时最低激光功率为 $80\text{W}/\text{mm}$ 。MOLIAN 分别研究了分别用氧气、乙炔和二者混合作辅助气体激光切割不同厚度金属板材(钢板 $3.2\text{mm} \sim 25\text{mm}$, 铝合金 $3.2\text{mm} \sim 6.4\text{mm}$)时所获切口切割表面质量,对钢板,切口宽为 $0.25\text{mm} \sim 1.5\text{mm}$,热影响区为 $0.2\text{mm} \sim 0.6\text{mm}$,上表面粗糙度值达 $0.025\text{mm} \sim 0.125\text{mm}$,且发现用氧气、乙炔混合作辅助气体可提高切割速度和板材厚度,但对铝合金则作用不明显。RAJARAM 研究了激光功率和进给速度对切割 4130 钢件的质量影响,发现前者对切口宽影响最大,而后者较小,降低激光功率,提高进给速度可以减小切口宽和热影响区宽;而进给速度对切口表面粗糙度和波纹频率影响最大,增加进给速度,则切口表面粗糙度和波纹频率随着增加,激光功率对切口表面粗糙度影响较小,而对波纹频率没有影响,并建立了激光功率和进给速度对切割质量影响的回归模型^[6]。

激光切割切口断面表现为周期性的波纹,它是介于加工精度(宏观)和表面粗糙度的周期性几何形状特征,它的出现严重影响激光切割的表面质量,目前,研究和提高表面质量,很大程度上针对波纹的抑制。不论是采用反应气体还是采用惰性气体,激光切割的切口均呈现这种典型的条纹状表面,其它热作用过程也显示同一倾向,对于波纹的形成,有各种不同的解

释。

ARATA 的横向燃烧理论认为由于切割速度滞后于氧化反应而在切口形成波纹^[7]。SCHUOCKER 提出的液体层振动理论认为激光吸收功率的瞬时波动会诱导液层厚度和温度的波动,切口周期性波纹的形成是熔化液层振动先于熔化层被气流从切缝中吹走所致^[8]。有的作者认为周期性的波纹由烧蚀前沿熔化层厚度的波动和振荡产生,熔化层以切割速度运动,其厚度若有变化,将在切口留下波纹,熔化层厚度的波动可能是激光切割过程自激振荡的结果,人们早就发现,由于等离子体的形成和其对激光的吸收,在连续不变的激光功率辐照下,工件表面所吸收的激光功率呈周期性的变化。熔化层厚度的波动也可能是由于外部扰动因素引起的切割过程的受迫振荡。同时还观察到,由于激光器激励电源的波纹系数引起激光功率周期性的变化,频率为 300 Hz 左右,在激光切割的板材切口上留下同一频率的波纹。JORGENSEN 通过测量从切口发射的光信号,利用快速傅里叶转换建立了切口波纹频率与该信号间的关系式^[9]。SCHULZ 等研究了激光熔化切割中的动态特性,利用相关的微分变量替换,建立了简化的非线性微分方程,通过理论与试验发现韦伯数、毛细数(韦伯数与雷诺数之比)及熔化前沿几何形状和熔流是影响挂渣的主要因素,同时,由于加工中存在的不可避免的工艺参数(如激光功率密度)的变化所引起的切割前沿宽度随时间的变化是形成切口波纹的内在原因^[10-11]。POPRAW E 重点研究了切口波纹形成机理,监测到了切口波纹存在 3 个不同特征区域(划分为第 1、2、3 类波纹),分析认为第 1 类波纹直接与热吸收和扩散有关,由于表面薄层厚度小、含热少、质量流微小,因而切割前沿熔流影响不大。而第 2 类波纹直接与热对流有关,主要因第 1 类波纹导致的轴向传播波及随后而来的热传递间的不一致引起,并提出了控制措施^[12]。黄开金等研究了激光有氧切割过程和切割表面条纹(即波纹)形成模型,认为激光加热特性和热平衡过程的建立是造成切割过程存在非稳态和稳态两过程的主要原因,并提出了一种基于铁和氧气扩散反应管材切口条纹形成模型^[13]。VÍ CANEK 等建立了激光熔化切割气流吹除熔化材料的动态数学模型,认为材料的去除是气流与熔化前沿间的摩擦力而导致的剪切力和切口上气流压力梯度所引起,压力梯度的出现导致稳定熔化材料的切除不稳定,计算表明只有它相对剪切应力十分小的时候才能得到抑制,然而,实际工艺中,两者均大,因而熔池流必不稳定,从而导致切口波纹产生。MASON 等发现利用脉冲激光切割不锈钢时,切割速度可提高 15%,切口波纹频率与激光频率大致相等,认为波纹形成由钢的氧

化性质决定。CHEN 等试验分析得出切口波纹频率为 v/r (v 为切割速度, r 为沿切割方向切割前沿半径)的函数,同时发现当切割辅助气体不纯度哪怕小于 5% 以下时,最大切速降低,切口底部挂渣现象严重^[14]。通过能量和质量平衡方程,得出了激光切割切口波纹频率公式,与试验获取值相近。KAEBERNICK 基于相似的测试原理,利用光谱分析技术研究了切口波纹频率与测量信号间的关系,并发现利用脉冲激光切割时,在中间一定频率范围,切口波纹频率随着激光频率的增加而增加,从而可获得低粗糙度值的高质量切口,而低于这一范围,由于材料的过热和过烧,导致切口宽度增加,波纹频率低,切口粗糙度值高,质量降低,高于这一频率,则导致材料的不完全去除和切口底部明显的挂渣,甚至可能发生切不透的现象^[15]。

ABDULHAD I 等研究了激光切割钢材过程中发生的金相组织转变现象,基于切割前沿金属熔化层温度分布及其熔池粘度,建立了激光切割钢材过程中热影响区宽度数学模型,分析了熔化层处切割参数(气体压力、粘度、激光功率、板材厚度等)对热影响区宽度的影响,并得出以下结论:(1)随着切割速度的降低,熔化区与周围材料的作用时间增加,因而热影响区宽度增加;(2)随着切割辅助气体压力和因此而导致的剪应力的降低,热影响区宽度降低;(3)当沿板材高度方向切口切割前沿的熔化层厚度自上而下逐步增加时,会导致材料热作用时间增加,因而材料热影响区宽度也会自上而下逐步增加,到达切口底部达到最大值。他们研究还发现,随着激光功率的增加,热影响区宽度几乎保持不变,切割中碳钢时其热影响区宽度大于低碳钢^[16]。然而,这一模型不适用于最大切割速度情况,这时,切割前沿上部几乎消耗了全部的激光能量,导致切割前沿下部吸收能量相对较少,因而这一部分温升不高,热影响区宽度不符合上窄下宽的情况。这一模型对金属板材中等速度激光切割过程中气流层和熔化层均很薄的情况很适用。OLSEN 等发现沿切割方向热影响区宽小于切口两边,这是由于切割前沿较短的作用时间和沿切割方向熔材较差的热传导所致。同时,在一定的切割条件下,辅助气体压力低,切口底部易出现挂渣^[17]。

NEL 等研究了氧气流的纯度对激光切割的影响,发现对于 10mm 以内的板材切割,氧气流的纯度影响并不严重,但超过 10mm 以后,则会出现切口宽度和表面粗糙度值增加,切口挂渣甚至切不透等现象^[18]。王昆林等研究了不同辅助气体和工艺参数对激光切割钛合金的影响,发现以氩气为辅助气体时切割质量最好,切缝上表面热影响区较窄,下表面较宽,一定条件下,较低的激光功率和较快的切割速度有利于减小切缝宽

度和热影响区^[19]。NOBERT 等利用最大输出功率分别为 3kW 和 18kW 的连续 CO₂ 激光研究了不同切速下切割从 0.5mm ~ 1.5mm 厚的铜板, 重点研究了不同切割速度下对材料切口宽度、切口倾斜度、切口表面粗糙度、波纹和挂渣的影响, 发现切口垂直度和挂渣高度对速度最敏感, 速度对切口宽度和表面粗糙度影响其次, 对于一定厚度和切割激光功率, 通过选择合理的速度, 可使切口垂直度提高一倍甚至几倍, 挂渣高度减少 40% ~ 80%, 而使切口宽度减小 5% ~ 15%, 表面粗糙度值减小 10% ~ 30%^[20], 这一试验结论为利用 CO₂ 激光加工高反射率材料提供了工艺参考, 然而作者对此没有开展定量分析和研究。

KANEMATSU 等利用激光切割 Si₃N₄ 陶瓷发现, 由于切口热影响区、表面粗糙度和微裂纹, 导致切口表面的弯曲强度下降到基材的 1/3^[21]。JUNICHI 等通过试验发现脉冲激光由于峰值功率高, 热作用时间短, 因而切割 Si₃N₄ 陶瓷的质量优于连续激光, 切口更窄, 热影响区更小, 同时, 发现切口磨削 100 μ m ~ 150 μ m 后, 弯曲强度才能达到原值, 或者将切割件置于氮气中加热到 1400 $^{\circ}$ C 进行退火处理, 弯曲强度可恢复到基材的 80%。洪蕾等通过理论分析和试验研究, 建立了脉冲激光切割 Si₃N₄ 陶瓷时表面温度与脉冲占空比的关系, 获得了较高切口质量^[22]。WEBBER 对比了用 CO₂ 和 Nd:YAG 两种激光器切割镀锌钢板的切口质量, 发现后者比前者切割所需氧气量少, 而切口表面粗糙度值小, 综合成本低^[23]。

ILIO 等利用 500W ~ 2000W 的连续激光以 0.5m/min ~ 13m/min 速度切割 2mm ~ 4.5mm 的芳香尼龙纤维发现, 由于材料本身的热物理性能, 在一定的切割范围, 切口倾斜度为 6/100, 热影响区为 0.1mm ~ 0.4mm, 还会出现切口衰减、凹坑、分层现象。分析发现, 在一定功率下, 切割速度决定了传入材料的热量及作用时间, 直接影响切口宽度和热影响区, 而激光能量分布及光束模式则影响切口倾斜度^[24]。DLD 等用激光切割碳纤维增强塑料发现对于复合材料, 由于其不同成分及不同的热物理性能, 切割后导致不同方向的热影响区不同, 对于打孔, 发现垂直于纤维方向热影响区宽度远小于纤维方向。SEMRAU 等通过试验研究发现, 同等切割条件下, 采用拉伐尔喷嘴比一般同轴圆形切割速度快, 切口表面粗糙度值小, 波纹不明显^[25]。

当采用 CO₂ 激光以氧气辅助切割不锈钢板材时, 由于氧化反应产生的氧化层有两种负效应: (1) 它的出现降低了切口薄层的抗腐蚀能力; (2) 当这样的切割件切口未经任何处理就焊接在一起后, 焊缝疏松且存在粘结瑕疵, 严重影响焊接质量。由于它的影响在

切口两边会留下需采用辅助工序才能去除的挂渣。ARATA 等采用双喷嘴技术和层叠切割(在不锈钢板材上再覆盖一块碳钢板)技术, 可以减少挂渣现象。BRKETT 等在前者基础上, 设计了在单吹渣喷嘴和多吹渣喷嘴, 利用氮气作辅助气体, 获得了切口几乎无挂渣的简单和复杂轮廓激光切割不锈钢件。黄开金等研究了激光无氧切割不锈钢管材所形成挂渣的组织、成分和形态, 分析其形成原因在于材料含有大量高表面张力的合金元素, 其组织为不同生长方向而交错形成的枝晶组织, 形态由相互连接的薄饼状逐渐过渡到单个球状颗粒^[26]。WEICK 等利用氮气作辅助气体, 优化切割参数, 通过激光切割不锈钢、铝合金等材料, 获得了无挂渣或含软而脆而易于去除的挂渣的切口。SCHWARZENBACH 等发现利用超强脉冲 CO₂ 激光加氧或采用超强脉冲 CO₂ 激光加氮对不锈钢、铝、铜等材料切割可获得无挂渣或易于去除的挂渣的切口, 同时发现, 对于碳钢切割, 切口表面粗糙度为板厚的函数, 距上表面约 1/3 板厚处表面粗糙度值最小, 而在约 3/4 板厚处急剧增加。PETER 等试验研究了高压氮气辅助 1750W CO₂ 激光切割铝合金(厚达 5mm)和不锈钢(厚达 7mm), 获得了热影响区小, 切口无挂渣的良好质量切口, 对于切后需进行焊接的这类材料十分适合^[27]。

CHENG 等利用信号发生器产生的调制信号来调整和控制激光功率, 研究了其变化对切口质量的影响, 发现切割过程受调制信号频率和信号调制深度的影响, 切口波纹的振幅和频率受激光功率波动的影响极大^[28]。但未建立相应数学关系式。HANSMANN 等利用硅光电二极管检测了激光氧化切割碳钢过程中, 从切割前沿通过切割小孔, 然后再经光路中设置的分光镜反射回来的近红外和可见光范围的信号, 比较切口表面几何结构形状发现, 信号频率与切口形成波纹频率吻合一致, 通过改变不同切割工艺参数试验, 得出可以通过在线检测切口反射信号频率来监测切口表面粗糙度及其表面质量。OLSEN 等分别拾取了切口下方和上方的光谱信号, 并对产生过烧、切不透、切口质量好的光谱信号进行了比较分析。KAEBERNICK 等利用实验装置在线检测了激光切割过程中切口发射的光谱, 研究了其频率与切口波纹频率之间的关系^[15]。这些都为激光切割过程的在线监测和控制提供了有益参考。

3 结 论

CO₂ 激光切割板材是工业中广泛采用的加工方法, 国内外学者对提高激光切割质量, 诸如减小表面粗糙度值, 减小切口宽度、切边热影响区宽度, 抑制切口

波纹、挂渣等等,从不同的侧面开展了广泛的研究,有些已经找到了解决这些问题的办法,如利用脉冲激光切割、高压氮气辅助切割或者优化切割工艺参数等等,但并不全面彻底,所获得的成果和结论局限于特定的工艺条件,普遍性不够,适用性受限。鉴于此,今后仍应继续重视和推进以下几方面的研究工作:(1)深入开展激光切割板材机理的普遍性研究,结合有关学科理论,建立切割过程中有关电、光、热、气、声等与材料物性参数间的普遍耦合关系模型,为全面彻底揭示激光切割这一复杂特种加工工艺建立合理科学的理论基础;(2)在此基础上探索切割工艺参数对切割表面质量的影响规律,并建立健全完善的商用激光板材切割工艺数据库以供企业选用;(3)为满足汽车制造业、模具业和精细加工的全面发展和需要,大力开展激光切割动态行为、在线监测以及三维切割机理和关键技术的研究;(4)进一步开展激光切割厚板和难加工材料的理论和试验研究,开辟激光切割应用新领域。

参 考 文 献

- [1] SCHREINER-MOHR U, DAUSINGER F, HÜGELH. New aspects of cutting with CO₂ lasers [A]. CALEO [C]. San Jose LIA, 1991. 263~271
- [2] KAEBERN EK H, BICLEANU D, BRANDT M. Theoretical and experimental investigation of pulsed laser cutting [J]. Annals of the CRP, 1999. 48(1): 163~165
- [3] 陈继民,左铁钊. 激光切割中入射角对切割质量的影响 [J]. 中国激光, 2001, A28(11): 1037~1040
- [4] 黄开金,谢长生,许德胜. 空间曲率半径对三维物体激光切割质量的影响 [J]. 中国激光, 2001, A28(5): 471~475
- [5] 李祥友,曾晓雁,刘勇. 激光精密切割不锈钢薄板的工艺研究 [J]. 中国激光, 2001, A28(12): 1125~1129
- [6] RAJARAM N, SHEKH-AHMAD J, CERAGHLSH. CO₂ laser cut quality of 4130 steel [J]. Int JMach Tools Manufact 2003, 43(4): 351~358
- [7] ARATA Y, MARUOH, M YAMOTO. Dynamic behavior in laser gas cutting of mild steel [J]. Trans WRJ 1979. 8(2): 15~26
- [8] PIETRO P D, YAO Y L. An investigation into characterization and optimizing laser cutting quality [J]. Int JMach Tools Manufact 1994, 34(2): 225~243
- [9] DRGENSEN H, OLSEN F O. Process monitoring during CO₂ laser cutting [J]. SPIE, 1991. 1412: 198~208
- [10] SCHULZ W, KOSTRYKIN V, N ISSEN M. Dynamics of ripple formation and melt flow in laser beam cutting [J]. J Phys 1999. D32. 1219~1228
- [11] MICHEL J, SCHULZ W, N ISSEN M. Advances in dynamical modeling or line monitoring and control in high quality cutting [J]. SPIE, 2001. 4407: 112~122
- [12] POPRAW E R. Modeling monitoring and control in high quality laser cutting [J]. Annals of the CRP, 2001. 50(1): 137~140
- [13] 黄开金,谢长生,邵可然. 管材激光切割过程和条纹形成模型的研究 [J]. 应用激光, 2001, 21(1): 31~34
- [14] CHEN S L, STEEN W M. The theoretical investigation of gas assisted laser cutting [A]. ICALEO [C]. San Jose LIA, 1991. 221~227
- [15] KAEBERN EK H, JEROM N A, MATHEW P. Adaptive control for laser cutting using frequency analysis [J]. Annals of the CRP, 1998. 47(1): 137~139
- [16] ABDUIHAD E, PELLETIER JM, LAMBERTIN M. Development in laser cutting of steel analytical modeling and experimental validation of the metallurgical effects [J]. SPIE, 1997. 3097: 17~25
- [17] OLSEN F O, EMMET A, BERGMANN H W. Contribution to oxygen assisted CO₂ laser cutting [A]. Proc 6th Int Conf Lasers in manufacturing [C]. Birmingham, UK, 1989. 67~79
- [18] NEIL W O, STEEN W M. A three-dimensional analysis of gas entrainment operating during the laser-cutting process [J]. J Phys 1995. D28(1): 12~18
- [19] 王昆林,藏东红,朱允明. 钛合金的激光切割 [J]. 稀有金属材料与工程, 1994, 23(1): 62~65
- [20] BARTAL N L, BERGMAN H W. Influence of processing speed on cut quality in laser beam gas cutting of copper [J]. SPIE, 1997. 3097: 70~77
- [21] KANEMATSU W, SAKA I S. Laser machining of hot-pressed silicon nitride [J]. Yogyo Kyokai Shi 1986. 94(7): 671~675
- [22] 洪蕾,李力钧. 工程陶瓷激光切割工艺的试验研究 [J]. 中国机械工程, 2000, 11(12): 1410~1413
- [23] WEBBER T. Laser cutting of galvanized steel CO₂ vs NdYAG [A]. ICALEO [C]. San Jose LIA, 1991. 273~279
- [24] LID A D, TAGLIAFEBRIV. Laser cutting of aramid FRP [A]. Proceedings of LAMP [C]. Osaka Sariv, 1987. 291~295
- [25] SEMRAU H, NSHOF H K T. Laser gas cutting using Laval nozzle [A]. ICALEO [C]. Santa Clara LIA, 1988. 157~170
- [26] 黄开金,谢长生,曾大文. 激光切割 1Cr18Ni9Ti 不锈钢管材挂渣和飞渣的研究 [J]. 应用激光, 2001, 21(3): 159~163
- [27] ATANASOV P A. Some aspects of high pressure N₂ assisted CO₂ laser cutting of metals [J]. SPIE, 1992. 1810: 628~631
- [28] CHENG H, NEIL W O. The effects of power rippling on CO₂ laser cutting [J]. Opt Technol 1997. 29(3): 125~134