综　述

激光切割板材切口波纹和挂渣研究综述

□鄢　锉　李力钧　李　娟　张　屹　谢小柱

摘要　综述激光切割表面质量内容及其影响因素和激光切割板材切口波纹和挂渣研究进展。

关键词:激光切割板材　表面质量　波纹　挂渣

中图分类号:TH16,TG456　**文献标识码**:A　**文章编号**:1671—3133(2004)10—0100—04

Review of research on surface striation and adherent dross in laser sheets cutting

□Yan Cuo, Li Lijun, Li Juan, Zhang Yi, Xie Xiaozhu

Abstract　The contents of surface quality and its affecting factors, review of research on surface striation and adherent dross in laser sheets cutting are presented. Deeper mechanism research of surface quality on laser sheets cutting, especially on-line monitoring and controlling of dynamic behavior will be emphasized in the near future.

Key words: Laser sheets cutting　Surface quality　Striation　Adherent dross

一、激光切割表面质量内容及其影响因素

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、快速成形等方面,而对激光切割的研究则相对较少。而激光切割仍然是服务对象最广的特种加工手段。激光切割质量的优劣是指切割尺寸精度高低和切割表面质量的好坏,切割表面质量一般以以下指标衡量: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。显然,在这4个指标中,切口波纹和挂渣最为突出。影响激光切割表面质量的因素主要有:

1. 切割用激光　激光切割时所需功率由材料的性质和切割机理决定,切割反射率高、导热性好及熔点高的材料,需较大的激光功率和功率密度。对于汽化切割,所需功率最大,熔化切割次之,反应熔化切割则最小。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。

2. 聚焦透镜与板材厚度　透镜焦距根据被切材料厚度选取,兼顾聚焦光斑直径和焦深。材料厚,焦距宜大。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。

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,气体又有冷却作用,会从切割区带走一部分能量。实践证明,不同结构的喷嘴对切割也会产生不同的影响。

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。对于一定的切割条件,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。

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。

二、激光切割板材切口波纹和挂渣研究进展

激光切割切口断面表现为周期性的波纹(见图1),它是介于加工精度(宏观)和表面粗糙度两者之间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,其他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。

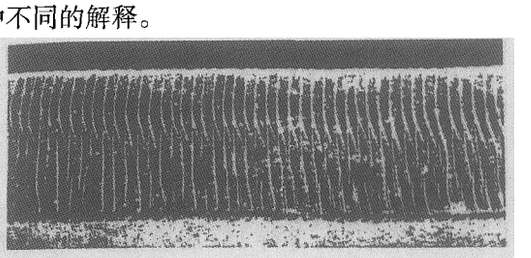


图1　激光切割板材切口表面波纹

Y. Arata最早提出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,并将氧气

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

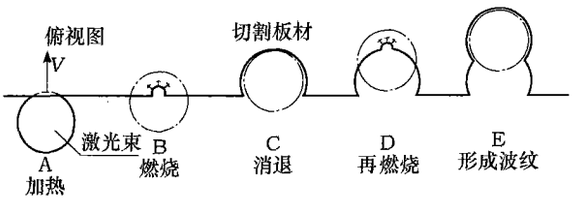


图 2　激光切割板材切口波纹形成过程示意

辅助激光碳钢切口波纹形成划分为加热、燃烧、消退、再燃烧、形成波纹等阶段(见图 2)。D. 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。N. 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,降低激光功率和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。有的学者认为,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。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搅动因素引起的切割过程的受迫振荡。P. Di. Pietro 等通过研究分析认为,波纹形成是横向燃烧理论和液体振动理论的综合,在反应气体辅助激光切割中,两种都起重要作用,而在惰性气体辅助激光切割中,后者则起主要作用,前者几乎不存在。S. Bierman 等试验发现,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 300Hz 左右,在激光切割的板材切口上留下同一频率的波纹。Jorgenson 通过测量从切口发射的光信号,利用快速富立叶转换建立了切口波纹频率与该信号间的关系式。Wolfgang 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,通过理论分析与试验发现韦伯数、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。R. Poprawe 重点研究了切口波纹形成机理,监测到了切口波纹存在三个不同特征区域(划分为第一、二、三类波纹)(见图 3),并分析认为,第一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。而第二类波纹直接与热对流有关,主要因第一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。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)形成模型后认为,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。F. O. Olsen 等认为,在切割前沿极薄的熔化层内的熔化物由于被气流从切缝中周期地吹掉而形成波纹,但不能解释靠近切口上表面波纹细,而靠近下表面波纹粗同时存在的原因。M. Vicanek 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后认为,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。G. Simon 等试验研究了激光熔化切割和激光反应气体辅助切割后同样发现,辅助气体气流可引起熔化流的不稳定,分析认为,这种不稳定是切口波纹产生的原因。A. Ivason 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并认为,波纹形成由钢的氧化性质决定。S. L. 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即使小于 5% 以下时,最大切速降低,切口底部挂渣现象依然严重。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。Shangliang 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并发现,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,但未建立相应数学关系式。M. 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

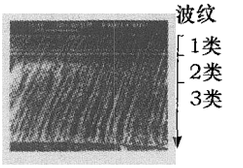


图 3　激光切割板材切口表面存在的三类波纹

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

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。Flemming 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。H. 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，后来作者又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。H. 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。

当采用 CO_2 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（见图4）。Y. 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，可减少挂渣现象。F. N. Birkett 等在前者基础上，设计了在单吹渣喷嘴和多吹渣喷嘴（见图5），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。F. O. 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。W. O'Neil 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。Wolfgang Schulz 等认为，挂渣与熔化前沿下边熔流的性质和几何形状有关，熔化前沿的运动和熔流的参数特征又与系统动态变量有关。Nobert 等利用最大输出功率分别为 3kW 和 18kW 的连续 CO_2 激光研究了不同切速下切割从 0.5～15mm 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，并发现，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次之，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%，这一试验结论为利用 CO_2 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。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、化学成分和形态，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。J_M 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且易于去除的挂渣的切口。A. P. Schwarzenbach 等发现，利用超强脉冲 CO_2 激光加氧或采用超强脉冲 CO_2 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 的 CO_2 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。德国的 Decher 等人在时域和频域研究检测切割前沿辐射信号表明，切割质量与该信号间存在明显的对应关系，他们将 A/D 转换后的时域上的离散信号进行 FFT 转换后发现，其频谱图上的特征主频与切口波纹频率近似相等，同时发现，切边挂渣时信号强度明显高于无挂渣时的信号。

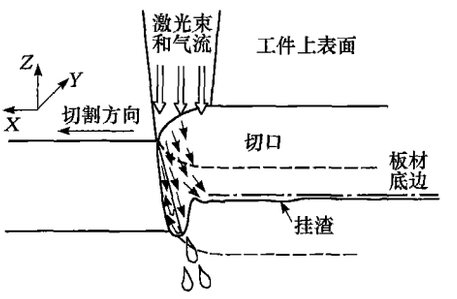


图4　激光切割板材在切口留下的挂渣

R. Poprawe 认为，切割过程中汽化的出现和毛细力的不断增加挂渣，形成紧密相关的两大物理现象。

三、结语

CO_2 激光切割板材是工业中广泛采用的加工方法，在激光切割表面质量的几个衡量指标中，波纹和挂渣对切割质量的影响最大，它们涉及到激光加工过程动态行为研究，如何监测和控制它们的出现是提高激

（下转第 87 页）

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\begin{cases} \min \quad \Phi(x) = 1.2f_1(i_1,i_2,i_3,i_4) + f_2(i_1,i_2,i_3,i_4) \\ \text{Sub} \quad 2.5 \geqslant i_1 \geqslant 1 \\ \qquad 2.5 \geqslant i_2 \geqslant 1 \\ \qquad 2.5 \geqslant i_3 \geqslant 1 \\ \qquad 2.5 \geqslant i_4 \geqslant 1 \end{cases} \quad \cdots\cdots (3)$$

式(3)亦为非线性,有不等式约束极小化问题,仍用复形法求解,初定设计数值不变,再分别取 $\lambda_1 = 1.2, \lambda_2 = 1$,将 $i_1 = 1.547, i_2 = 1.58, i_3 = 1.8, i_4 = 1.21$ 代入式(3)$\Phi(x)$中,得 $\Phi(x_0) = 22.4412$,则优化所得结果为:$i_1 = 1.667, i_2 = 1.732, i_3 = 1.889, i_4 = 2.475, i_5 = 2.37, \Phi(x^*) = 22.3839$。

与原设计对比,优化后 $\Phi(x)$值有下降,即 J_C 与 L 的综合关系略有改善,但不明显。

四、结语

以上两种方法所得分传动比,必须进行实用数值处理后,才具有实用价值。

主目标函数法所得,处理后为:$i_1 = 1.5, i_2 = 1.6, i_3 = 1.8, i_4 = 2.2, i_5 = 3.4, k_{1p} = 6.017 \geqslant k_{10}, k_{1p} > k_1^* = 5.9915$。

加权求和法所得,处理后为:$i_1 = 1.7, i_2 = 1.7, i_3 = 1.9, i_4 = 2.5, i_5 = 2.3, \Phi(x_p^*) = 22.407 \leqslant \Phi(x_0)$。$\Phi(x_p^*) > \Phi(x^*) = 22.3839$。

分析两种方法所得结果认为:

1. 两种方法所得分传动比经实用数值处理后,目标函数值虽略有变化,但仍皆优于初始数值。但优化效果并不十分明显,其原因可能是初始值选择比较恰当或所选收敛系数欠妥。

2. 主目标函数法所得结果,虽不如加权求和法所得效果明显,但它保留了原目标函数的物理意义,便于分析、改善、调整。而加权求和法则困难。

3. 两种方法所得结果不能互换,否则可能会使目标函数值劣化。如将加权求和法所得代入主目标函数模型中的目标函数中,得 $k_1^1 = 6.041796 > k_{10}$。反之,如将主目标函数法所得代入加权求和法的目标函数中,得 $\Phi(x)' = 11.6073 > \Phi(x_0)$。

若运算仍使用通用程序 PROGRAM COMPLX,则应按规定模式,依极小化模型,编写出专用子程序 SUBROUTINE OBJ(J)及 SUBROUTINE CONS 即可。

参 考 文 献

1 何献忠等.精密机械零件综合设计.北京:兵器工业出版社,1991

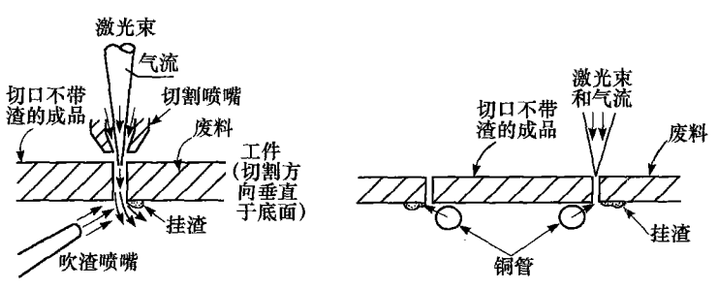
2 吴宗泽,罗定国.机械设计课程设计手册.北京:高等教育出版社,1999

作者简介:郭益友,淮南职业技术学院副教授,从事机械设计与制造方面教研工作,学科带头人。

作者通讯地址:安徽淮南职业技术学院(东区)(232035)

收稿日期:20040610

(上接第 102 页)



a)单吹渣喷嘴　　b)多吹渣喷嘴

图 5　吹除切口挂渣的喷嘴示意

光加工质量的首要问题,针对这两大问题,国外学者开展了广泛研究,有些已经找到了解决这些问题并对波纹和挂渣进行抑制的初步方法,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以及切割后采用辅助去除工序等,但并不彻底,这些结论和成果应用范围有限。同时,由于激光切割过程是一涉及多因素的基于热效应的微小区域的高光束能量和材料的相互作用过程,难于设计和设置在线监测控制仪器,加之国内特种制造业水平所限,因而国内还没有对激光切割切口波纹和挂渣开展系统深入的检测和控制研究,近年来,部分科技工作者已经开始关注这一课题。随着汽车制造业、模具业和精细加工的发展和需要,对于提高激光切割板材表面质量机理的研究将更加深入,尤其对于激光切割动态行为的在线监测和控制研究将倍受重视。

作者简介:鄢铿,湖南大学在职博士生。主要从事激光加工、机械制造方面教学研究工作。

作者通讯地址:湖南大学激光研究所(长沙 410082)

收稿日期:20040622

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net