

国外激光切割实时监测技术的最新进展^{*}

王春明 胡伦骥 胡席远

(华中科技大学材料学院焊接研究所,武汉,430074)

摘要:近年来,国外对激光切割实时监测技术进行了大量的研究,多数采用在切割前沿的正上方采集其近红外辐射信号的监测方法。详细介绍了几种较为典型的实时监测方法及其研究成果,并按工业化应用的要求分析了各自的利弊。

关键词:激光切割 实时监测 信号采集与分析

The latest overseas development of real time monitoring technology for laser cutting

Wang Chunming, Hu Lunji, Hu Xiyuan

(Department of Materials, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: A large number of studies concentrate on laser cutting real time monitoring in recent years. The emitted near infrared radiation from cut front is usually used as the detected signal, which is collected co-axially with the path of laser beam on the cut front. Several typical monitoring methods are presented in the paper. In terms of industrial application, their advantages and disadvantages are analyzed.

Key words: laser cutting real time monitoring signal sample and analysis

引 言

激光切割是一种高生产效率的柔性加工方法,在工业生产的许多领域得到了广泛的应用,目前,在所有激光加工应用中,激光切割所占的比例大约为 40%。但激光与材料的相互作用对各种内外部条件非常敏感,为了获得最佳的切缝质量,激光切割过程中各个工艺参数被限制在一个很窄的范围内。对激光切割而言,如何在不同的切割条件下寻找最优的切割参数并使之在整个切割过程中保持稳定显得尤为重要。因此,必须采取某种方法对激光切割质量进行实时监测并进而对其进行实时控制。

目前,国内对激光切割质量实时监测技术的研究基本上处于空白,鲜有这方面的报道。而国外从 80 年代末开始有人从事这方面的研究,虽然与工业化应用还有一段距离,但已积累了较丰富的经验,笔者的目的在于介绍国外在这方面研究的最新进展,以供国内同仁借鉴参考。

1 激光切割实时监测简介

激光切割过程中所产生的不同类型的光、声信号可以直接或间接的反映切割过程的稳定性以及切缝的质量(见图 1),实时采集这些信号并分析比较不同条件下的信号特征即可实现对激光切割质量的实时监测(控)。

^{*} 国家自然科学基金资助项目。

激光切割实时监测的最早研究是德国 Braunschweig 工业大学焊接研究所在 1986 年开始进行的,所采用的方法是用光敏器件观测切缝底部的由切割区域的热辐射和吹落的熔渣组成的火花簇射,该方法的主要问题在于监测的位置在加工工件的下部(激光束入射的反面),不仅监测系统的装夹定位不易,在复杂的三维切割中更是很难实现。

如图 1 所示,除了火花簇射以外,激光切割过程还会产生其它各种发光、发声现象,各种光声信号中都能直接或间接地反映切缝质量。目前,利用切割前沿的光辐射作为被检测信号是研究激光切割质量实时监测的主要方向。激光切割过程中,切割前沿是激光与材料直接进行相互作用的区域,其形貌、宽窄、温度分布等特征与切缝质量密切相关,观测到的切割前沿光辐射信号主要来自 3 个辐射源:(1)切割前沿的高温热辐射,切割前沿的温度据估计在 1800 ~ 2500 K,据普朗克黑体辐射公式可以大致算出辐射谱线主要集中于近红外区域;(2)激光束在切割前沿的反射,激光与材料的相互作用、切割前沿的表面状况、温度,以及材料成分决定了激光束的反射比例;(3)切缝中等离子体以及高温辅助气体的热辐射,切缝中的等离子体被高压气流冷却和向下吹除,应该是很稀少的,切割辅助气体温度较低,因此,这部分的热辐射信号相对而言较弱。

故观测到的切割前沿光辐射信号主要是切割前沿的近红外热辐射信号,其中蕴含着丰富的与切割质量相关的信息。国外近年来主要沿着这个方向研究激光切割质量的实时监测技术,其研究成果最为丰富,沿着工业化应用方向的进展也最大。

也有利用激光切割过程中的声发射信号对切割质量进行实时监测,但与切割前沿的辐射信号相比,声信号不能很好的反映切割质量,利用声信号进行实时监测的研究在激光打孔,激光挖槽等不穿孔方面报道较多^[1,2]。

2 几种较为典型的激光切割质量实时监测方法简介

几种典型的较为成功的激光切割实时监测方法都是采集切割前沿的辐射信号,并对其进行分析以寻求与不同切割质量相对应的信号特征。虽然切割前沿的辐射信号作为被检测信号较为理想,但由于激光切缝非常狭窄(0.2mm),并且切割过程中切割前沿温度很高,在切割过程中对其进行直接观察较为困难。为了解决这一问题,一般都是采取在激光束的传输通路加上特殊反射镜或透镜的方法从切割前沿的正上方采集信号,也有在切缝的斜上方对切割前沿进行观测。

不同的方法中,所用的光电传感器也很不相同,有用单个的光电管,双波长的光电管以及 CCD 热成像头等,所采集的热辐射波长也不尽相同,根据采集的信号不同,所用的信号分析方法也各异。

下面对几种较为典型的激光切割质量实时监测方法进行详细的介绍。

2.1 在切割前沿的正上方用单个光电管实时监测切割质量^[3,4]

这种实时监测方法如图 2 所示。该方法中,切割前沿的热辐射信号是逆激光束传输的方向导出的,其导出位置即为激光器外光路的反射镜,该反射镜的基体材料是 ZnSe,对其进行了特殊的多层镀膜,使之可以全反或大部分反射 10.6 μm 激光束,而对可见光及近红外辐射有较

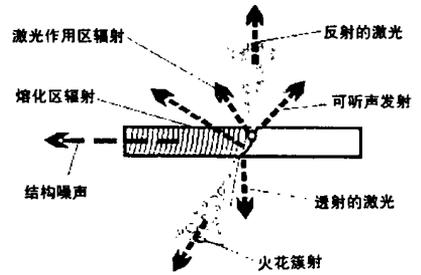


图 1 激光切割过程中产生的各类发光、发声现象

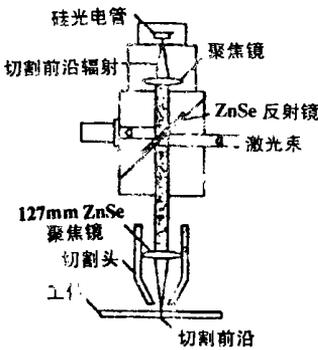


图2 正上方用光电管实时监测切割质量

量相对应的信号特征值。

德国的 Decher 等人研究在时域和频域上信号分析表明^[4],切割前沿辐射信号与不同切割质量有着明显的对应关系。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,其频谱图上明显存在一特征主频(见图3),该主频与切边辉纹出现的频率(striation frequency)近似相等(见图4),信号的标准偏差(standard deviation)与切边的粗糙度(R_z)也成线性关系(见图5)。直接将不同切割质量下的信号比较还发现:切边挂渣时信号强度明显高于无挂渣时的信号,未切穿时的信号不仅强度较高,而且剧烈动荡。

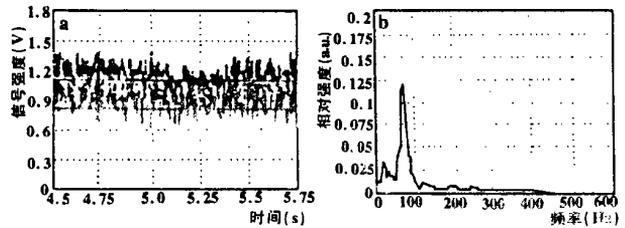


图3 切割过程中的光电信号强度(左)及其频谱(右)

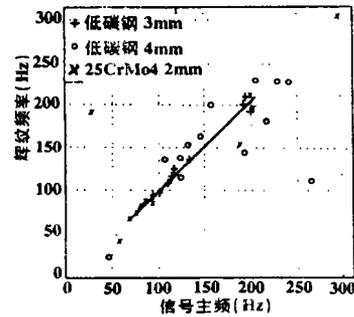


图4 不同切割条件下信号的主频和切边辉纹频率的关系

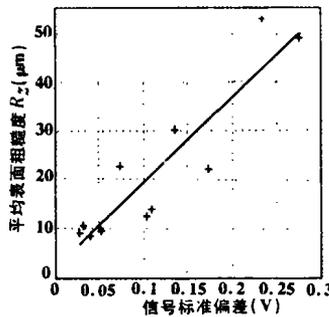


图5 不同切割条件下信号的标准偏差和切边粗糙度的关系

频率的方法对切边辉纹进行实时控制,进而达到实时控制切割质量目的。

2.2 在切割前沿的正上方用双波长光电管实时监测切割质量^[5]

这种实时监测也是采取与图2相似的方法,在外光路的反射镜上取出切割前沿的辐射信号,所不同是传感器为一种双波长的光电二极管(two color photodiode),该光电管有两层光敏面,外面的是硅管,敏感波长范围为400~1000nm,里面的是锗管,敏感的波长范围为1000~2000nm,其特殊的结构使得该光电管可以同时响应两种波长的光辐射。这种光电管的两敏感波段分别对应着温度约2000K的切割前沿近红外辐射和高达4000K的光致等离子体的光辐射(如图6),可对激光切割前沿及其表面的金属蒸气行为进行更为全面的观测。

Kaebnick 等人的研究^[3]也证实了上文的部分结论,他们采用分析研究了前沿辐射信号的功率谱,发现功率谱的主峰频率与切边的辉纹频率相一致。而实践中发现辉纹频率越高,切边的粗糙度越小,切边质量越好,因此,他们还采用了调节激光器脉冲

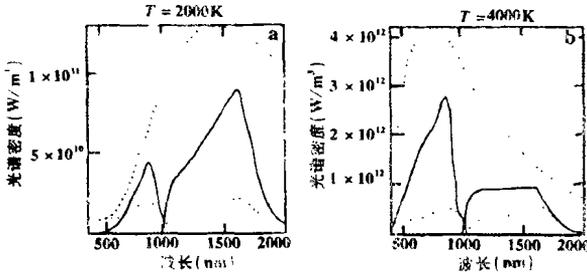


图 6 双波长光电管检测的理论光谱强度(对两种温度的辐射)

时监测方法不仅可以用于激光切割,也可应用于激光焊接。

2.3 用热成像仪实时监测切割质量^[6]

这种监测方法采用高温摄像机在切割前沿的正上方直接获取激光与材料相互作用区域的温度分布图像,然后对图像进行分析处理,取得图像的灰度值(grey scale value)以及将温度图像分解



图 8 工件表面状况及焦点位置改变时的温度图像

切缝的两条切边质量明显不同,这一点也可以在温度分布图像上有明显的反映;另外,温度分布图像还可以反映激光束空间分布状况,切缝宽度以及切割方向改变时的拐角切割状况等。

2.4 在切缝的斜上方采集切割前沿辐射信号^[7]

这种方法的最大特点是信号采集系统与激光束传输系统完全无关,但斜轴方向对切割前沿的观测十分不容易,同时,还要考虑飞溅对探测头的污染问题,为此,有人用特制的光纤头拾取切割前沿辐射信号,这样,光电传感器就可以远离切割头,避免飞溅影响。其实时监测装置如图 9 所示,采集的也是近红外波段的辐射信号。

Chen 的研究表明^[7],采集到的信号由高频和低频两部分组成,其中低频信号频率与切割辉纹的频率有大致相等的对应关系,高

Fazeny 等人的研究表明^[5]:随着切割速度的增加,切边的底部挂渣增多,采集到两种光信号的强度增加,他们对此的解释是切割前沿相对工件表面的倾角减小,对光电管而言即是观测到的辐射热源面积增大,故采集到的信号强度增加;另一方面,切割速度增加,切边的辉纹变细,光信号的波动也较小。这种实

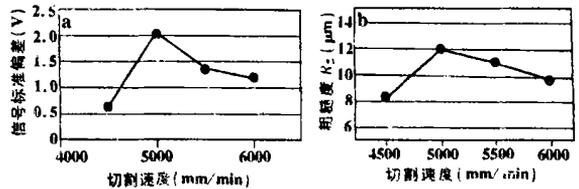


图 7 不同切割速度时信号的标准偏差以及切边粗糙度

成红绿蓝(red, green, blue)三色图像,从中提取了迄今为止最为全面的反映切割质量的信息。研究表明,切割前沿的温度分布图像可以很好的反映切边的粗糙度,图像灰度值的标准偏差(standard deviation)与切边粗糙度(R_z)有着良好的对应关系(如图 7);当工件表面状况改变,焦点位置变化而引起切割质量改变时,其温度场分布也有较明显的改变(如图 8);当辅助气流与光束不同轴时,同一

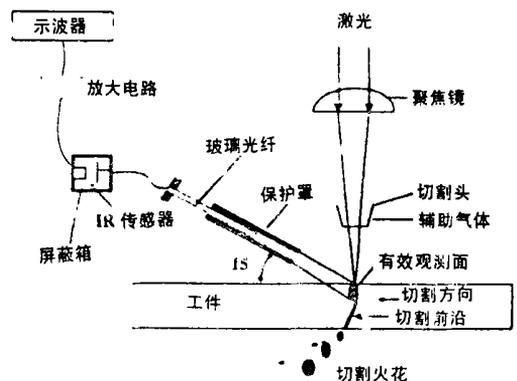


图 9 切缝斜上方采集切割前沿辐射装置示意图

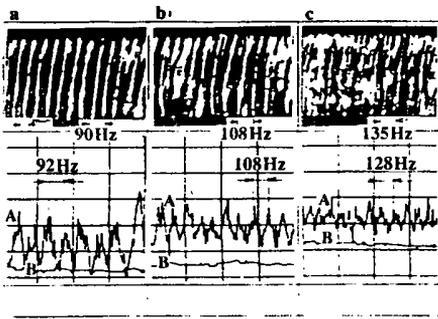


图 10 不同辉纹的切边与相应的低频信号

频信号在幅值上振荡较小(如图 10)。

3 工业生产中实际应用前景分析

无论哪一种激光切割质量实时监测方法,要达到工业化应用目的,必须满足如下几个要求:

(1) 实时监测系统不能影响激光束的传输或改变光束质量;(2) 监测系统能够很容易地与现有的激光加工装备集成一体;(3) 激光切割是一个高速过程,监测系统信号采集与分析速度必须足够快,实

时性好;(4) 由于激光切缝很窄,必须解决好信号拾取问题,且在不同的条件下有较好的通用性;(5) 信号与切割质量的对应关系简单,判据容易给定。

在切割前沿的正上方采集其辐射信号的方法,满足三维切割实时监测的需要,但必须对部分外观路镜片作特殊的改变,一般都是让反射镜既反射激光又透过前沿热辐射信号,该镜片一般难以做到对激光束 100% 反射,因此,激光功率有一定的损失,并且必须对透过的激光进行处理;采用图 9 所示的偏轴信号拾取方法可以做到对不干涉激光束的传输,但这种方法的致命缺点在于当切割方向改变或三维切割时,探测头已无法拾取切割前沿的辐射信号,且拾取切割前沿的辐射信号也不容易。

各种监测方法中使用传感器可以分成两类,点传感器和面传感器,即单个光电管和红外摄像机。单个光电管采集的信号与红外摄像机摄取的温度分布图像相比,其中蕴含的质量信息少,但光电管的响应速度很快,一般响应时间小于微秒级,这意味着可以用很高的数据采样频率,实时性较好;红外摄像机虽然可以获取非常丰富的有关切割质量的信息,但响应速度较慢,响应时间一般在几十或几毫秒,因此,在高速激光切割中其实时性不可能很好。双波长的光电管不仅响应速度快,采集到信号也较多一些,其中蕴含的质量信息应该可以进行进一步的发掘,而且该装置可以不加任何改变应用于激光焊接的实时监测(只需改变软件部分)。

信号处理的方法总的来说分时域上和频域上的信号分析,具体地说,有直接观测心原始信号曲线、取平均值、求方差、FFT、求功率谱以及图像分析等手段,时域上的分析形象直观,频域上的分析则可更深入本质。

目前,各种激光切割质量的实时监测系统之所以尚未到达工业化应用阶段,是因为每种方法都难以做到同时满足上文述及的几个要求,其中最关键的问题有两个:实时性和通用性。这是今后进一步研究的主要方向。

4 结 论

(1) 切割前沿的辐射信号能够较好的反映切边辉纹的频率(striation frequency)、粗糙度、挂渣等指标,作为激光切割实时监测的被检测信号较为理想。

(2) 对激光器外光路作适当改进,在切割前沿正上方直接采集前沿辐射信号是目前研究最为活跃的、理论和实践也表明是最有希望到达工业化应用阶段的实时监测方法。

(3) 双波长的光电管(two color photodiode)应用前景较好,不仅可以用于激光器切割,也可以用于激光焊接。

(4) 目前尚无到达工业化应用阶段的激光切割实时监测方法。

Nd YAG 单程激光放大器的设计方法

曹三松 张向阳 黄燕琳 李光荣 苏心智

(西南技术物理研究所,成都,610041)

摘要: 高平均功率 Q 开关固体激光器具有较多的应用需求,Nd YAG 激光器只有采用振荡-放大结构才能获得 Q 开关高平均功率激光输出。对单程 Nd YAG 激光放大器进行了理论分析,并从实验上进行了验证。

关键词: 放大 贮能 提取效率

Design methods for single pass Nd YAG laser amplifiers

Cao Sansong, Zhang Xiangyang, Huang Yanlin, Li Guangrong, Su Xinzhi

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, 610041)

Abstract: There is an application requirement for Q-switched solid state laser systems with high average power, which can be achieved with a Nd YAG oscillator-amplifier system. Theoretical analysis is executed for single pass Nd YAG lasers and the analytical results are tested through experiments.

Key words: amplifier storage energy extracted efficiency

引 言

高平均功率 Q 开关窄脉冲固体激光器具有较多的应用需求,例如远距离激光测距、激光跟踪、激光雷达、激光武器和激光加工等,因此,对这种类型的固体激光器进行研究具有实际意义。从目前激光材料研究的现状看,适合高平均功率 Q 开关窄脉冲激光运转的固体激光材料仍然很少,通常只能选择 Nd YAG 晶体作为激光工作物质。由于 Nd YAG 激光材料的亚稳态能级粒子寿命较短,贮能不高,单级器件难以实现高平均功率窄脉冲激光输出,为此,人们采用激光放大技术来提高 Q 开关 Nd YAG 激光器的输出平均功率。对振荡/放大结构形式的 Q 开关 Nd YAG 激光器,国内外的一些学者曾作过研究^[1,2]。我们在此基础上,对 Q 开关 Nd YAG 激光放大器作了进一步的研究和探索,我们提出采用测量激光放大器泵浦系数 K 和

参 考 文 献

- 1 Lee J M, Watkins K G, Steen W M. J Laser Applications, 1999; 11(5): 199 ~ 205
- 2 Kurita T, Ono T, Morita N. J Materials Processing Technology, 2000; 97: 168 ~ 173
- 3 Kaebnick H, Jeromin A, Mathew P. Annals of the CIRP, 1998; 47: 137 ~ 140
- 4 Decher I, Heyn H, Martinen D *et al.* SPIE, 1997; 3097: 29 ~ 37
- 5 Fazeny S, Penz A, Bohrer M *et al.* SPIE, 1998; 3268: 279 ~ 287
- 6 Haferkamp H, Goede M, von Busse A. SPIE, 1999; 3824: 383 ~ 391
- 7 Chen S L. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1997; (13): 685 ~ 691

作者简介:王春明,男,1975年2月出生。博士研究生。主要从事激光焊接、切割加工及其监测方面的研究。