

电子枪组焊中激光焊接工艺参数 与方法的研究

黄维玲 游立德 李家伟 陈泽民 刘耀兰

(华中理工大学激光技术国家实验室, 武汉 430074)

提要 简要地叙述了脉冲 YAG 激光焊接技术在显像管电子枪生产中的应用特点, 探讨了电子枪激光组焊的理论依据及工艺参数选择方法。

关键词 激光焊接, 显像管, 多点同时焊

1 引 言

目前, 激光加工系统已成为许多工业生产的加工工具, 用激光加工不仅可解决部分常规加工工艺无法解决的问题, 而且在生产中显示出生产效率高, 易于实现自动化, 且经济的特点, 已越来越受人们的重视。

一个电子枪由数十个小而薄的零件组成, 传统工艺主要用电阻焊。然而这种工艺已越来越不能满足高品质电子枪的要求。

利用 YAG 激光器组成的焊接设备替代电阻焊的优点是: 1) 可进行无飞溅焊接; 2) 不产生压畸变与热畸变, 栅极平行度提高; 3) 焊接质量稳定, 仅需控制激光能量; 4) 自动化程度高, 易实现多点同时焊, 可在很窄的空间施焊。

本文将从理论与实验两方面, 探讨电子枪零件激光焊接的特点与规律, 阐述激光工艺参数选择方法, 并通过大规模生产证实了理论与实验结果。

2 激光组焊电子枪的特点

电子枪组件数量多而小, 多用不锈钢、镍及其合金材料制成对称元件。纯镍及镍合金的热物理特性大多类似, 但导热系数相差较大, 镍合金的导热率更低。在常温下为 $12.68 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, 而纯镍的导热率为 $90.02 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, 镍合金比纯镍约低 7 倍。由于镍合金导热率低, 与激光耦合良好。因此, 镍合金是激光易焊的材料之一。

从冶金特性看, 大多数镍合金由于高熔融粘度, 在深熔焊中易产生气孔。某些镍合金有热脆性、易龟裂。镍及其合金对油、黄油和某些化合物污染敏感, 焊缝产生龟裂的主要原因之一是

污染。

从零件组装要求看,大多需采用中心穿透熔化焊。大量文献指出^[1,2],为获得良好效果,施焊时需满足:1)焊接过程若从薄层向厚层进行,焊接参数范围宽、易于实现。因此在不同零件焊接时,应将较薄的材料焊至厚材料上;2)穿透焊时,零件间的间隙严格控制着焊接质量。良好焊接应要求零件装配间隙(空气隙)小于下层材料壁厚的 25%(见图 1)。

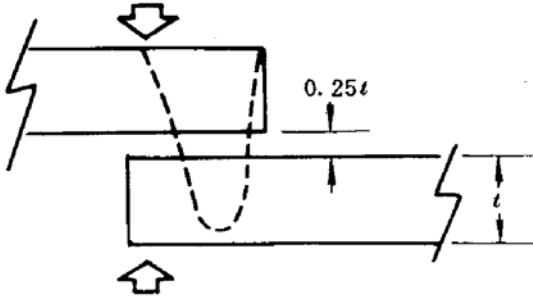


Fig. 1 The maximum allowable gap between welded parts in penetration welding is indicated as $0.25t$, t is the thickness of the underneath part

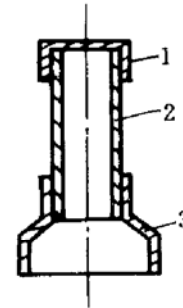


Fig. 2 The structure of the cathod core of an electron gun. 1: cap; 2: bushing and 3: flare

大多数电子枪零件组装无法满足以上两点,如组焊阴极芯,它由阴极内套管、阴极帽和阴极喇叭组成(见图 2 和表 1)。根据组装要求,必须从阴极帽和阴极喇叭向套管进行穿透焊。阴极喇叭与帽的壁厚分别为 0.15 mm 和 0.10 mm,内套管仅为 0.019 mm。根据零件制造公差,层间隙已远大于 0.02 mm,有的达 0.065 mm,已超过下层厚的 2~3 倍,且间隙在每次施焊时都在变化,为此研究薄壁材料在这种特定条件下的规律是解决该零件焊接工艺的关键。

Table 1 The typical material and thickness of the cathode core of an electron gun

Symbol	Name of part	Thickness (mm)	Material
1	Cap	0.1	Alloy Ni
2	Bushing	0.019	Rd
3	Flare	0.15	Ni

3 电子枪激光组焊工艺参数的选择

3.1 工件上光斑尺寸的选择

工件上光斑尺寸决定了对工件上的光功率密度的要求,而后又决定了对激光能量、脉宽、离焦量等重要参数的要求。因此首先必须根据零件的尺寸及组焊要求决定工件上的光斑尺寸。

薄片间的焊接,在保证强度要求的前提下,形成牢固焊接的光斑尺寸取决于片厚与空气隙之比。当气隙的片厚比相对大时,光斑应选得大些,这既有利于能量均匀分布,又使熔融金属足以填充气隙。但不宜取得太大,因受零件可焊区尺寸和激光能量的限制,对于阴极芯的组焊,在阴极帽处,光斑尺寸为 0.35 mm,测得单点抗拉强度为 1.5 kg(实质为阴极套管母材的抗拉强度);在阴极套管处,光斑尺寸为 0.5 mm,测得单点抗拉强度为 1.5 kg(也是阴极套管的抗拉强度)。

3.2 激光能量的选择

对于特定的焊接对象与焊接方式,所需的焊接能量可通过特定条件下的热传导方程求得^[3]。在非理想接触条件下的热传导方程,须在常规方程下作如下假设:

- 1) 两层金属之间隙由空气组成,因空气的热传导率比金属小得多,则用等效热阻表示间隙作用。定义热阻系数为 $\alpha_1 = 2k_3/h$, 式中 k_3 为空气热导系数; h 为间隙厚度。热量在间隙中的传导表现为对流效应。
- 2) 当上层金属的下表面熔化时,由于液态金属的流动,间隙消失,即 $h = 0, \alpha_1 = \infty$ 。
- 3) 金属的其余两个外表面与外界发生对流换热。

根据以上假设,可获得有间隙条件下的热传导模型:

$$\left. \begin{aligned} c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} &= k_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + Q_1 & H_1 > x > 0 \\ c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} &= k_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + Q_2 & H_1 + H_2 > x > H_1 + h \\ -k_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} &= k_3 T_1 & x = 0 \\ -k_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} &= k_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} & x = H_1 \quad \text{当 } h = 0 \text{ 时} \\ -k_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} &= \alpha_1 (T_1 - T_2) & x = H_1 \quad \text{当 } h \neq 0 \text{ 时} \\ -k_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} &= k_3 T_2 & x = H_1 + H_2 \\ T_1 = T_2 = 0 & & \text{当 } t = 0 \text{ 时} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 T_1, T_2 分别为上、下两层金属的温度, c_1, c_2 为比热, ρ_1, ρ_2 为密度, k_1, k_2 为热导系数, H_1, H_2 为两层材料的厚度, Q 为单位体积材料吸收的热能,且

$$Q = E_0(1 - R) \exp(1 - \alpha x) f(\tau) / (\Delta t \cdot \Delta x \cdot s) \quad (2)$$

式中, α 为材料对 $1.06 \mu\text{m}$ 光波的吸收系数, E_0 为激光能量, R 为材料表面反射率, $f(\tau)$ 为激光脉冲时间函数, Δt 为脉宽, Δx 为单位材料厚度, s 为材料表面光斑面积。

因上述方程组的非线性,很难求出解析解,可利用差分法求其数值解^[4]。经运算,可求出在一特定脉冲作用下,工件上温度场的分布与时间的变化关系,以焊接阴极喇叭为例,当激光能量 $E = 3.5 \text{ J}$, 脉宽 $\Delta t = 3.5 \text{ ms}$, 工件表面光束直径为 0.5 mm , 两层金属间隙 $h = 0.02 \text{ mm}$ 时, 上层上表面、下表面及下层上表面的温度随时间的变化如图 3 中实线所示。若认为下层上表面熔化,是焊接所需要的最小能量,在其它参数不变时,激光所需的最小能量随气隙的变化关系示于图 4。理论计算表明:

1) 由于非理想接触,上层下表面和下层上表面在间隙消失前,温度随时间变化曲线不同。由于激光热源的能量传导受阻,上层表面温度呈现一急剧上升过程。参数选择不合理,在焊接完成前,表面温度易超过沸点,形成材料气化,严重的会出现孔洞,难以形成良好的熔化。

2) 随着间隙增加,形成熔融焊接所需最小能量增加。当间隙小于上层材料厚度的 $1/10$ 时,能量增加不明显,间隙影响可忽略。当间隙厚度为上层厚度的 $1/10 \sim 1/2$ 时,所需最小能量随间隙的增加呈线性关系,如图 4 中 AB 段。超过 B 点,间隙增加最小能量呈指数上升。能量增高,导致表面光功率密度增高;间隙加大,使上层材料向下层材料的热量传递变缓。共同效应

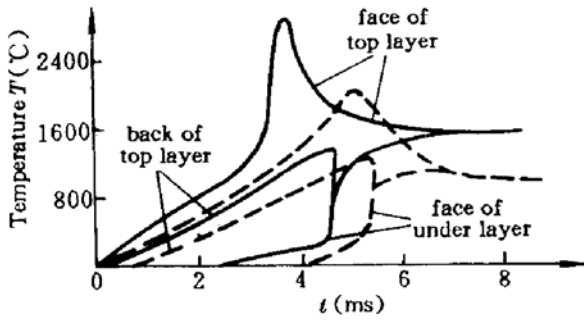


Fig. 3 Temperature distribution at surfaces of welded parts when heated by a pulsed YAG laser. The solid curves represent a laser pulse duration was 3.5 ms and the dotted curves represent a pulse duration of 5 ms

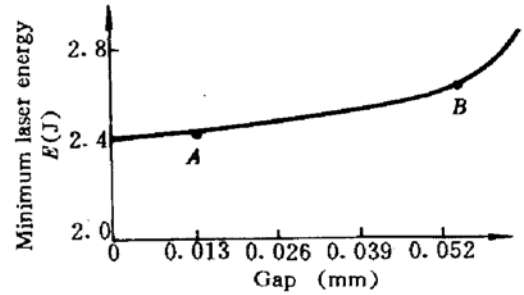


Fig. 4 Minimum laser energy needed for welding as a function of the gap between two welded parts

造成表层温度急剧上升,超过沸点形成坑孔。实验表明:当间隙大于上层材料厚度的 $1/2$ 时,上层形成孔洞的几率大大增加。因此,在薄壁材料中施行激光焊接,应特别注意层间间隙,若间隙相对上层材料厚度较大,则应在间隙控制上采取其它措施。

根据以上理论分析,所选择的激光能量为:当脉宽为 5 ms 时,焊接阴极帽的最小能量为 2.5 J,焊接阴极喇叭为 3.5 J。

3.3 脉宽的选择

脉宽是激光焊接的重要参数之一,它既是区别于材料去除和熔化的重要参数,也是决定加工设备造价及体积的关键参数。在多数情况下,应根据熔深要求确定脉宽。按照热传导方程推导,其最大熔深既是光功率密度的函数,也是材料热力学参数的函数,即

$$I_0 X_{\max} = 1.2k(T_v - T_m) \quad (3)$$

式中 I_0 为工件上的光功率密度, X_{\max} 表示所需达到的最大熔深, k 为材料的导热系数, T_v 和 T_m 分别为材料的沸点与熔点。根据(3)式,当取功率密度为 $0.58 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$, 其脉宽为 3 ms 时,可达到最大熔深为 0.18 mm。若保持 $I \cdot X_{\max}$ 不变,增加脉宽,降低功率密度,其熔深则可增加。在图 3 所示的计算值中,若将脉宽改为 5 ms,其它参数均保持不变,其温度随时间的变化如图 3 虚线所示。对比这两组曲线,可见在同样的输出能量下,脉宽大,功率密度低,上层表面温度变化缓慢,上层与下层间温差小,易形成良好的焊接。小批量生产中成品率与脉宽关系的统计数据示于图 5 中,它表明在其它参数不变的条件下,成品率与脉冲宽度几乎成比例增加。但脉宽也不能无限制增加。因为脉宽的增加,使设备的体积与造价增加,在阴极芯的焊接中,选用的脉宽为 5.4 ms,其不良率已下降至 1% 以下。

3.4 脉冲波形的选择

镍及其合金对于 $1.06 \mu\text{m}$ 的激光为低反射率材料。当高强度激光束入射至材料表面时,金属表面反射率随温度变化,在室温时反射率最高,当光照区温度上升至熔点时,反射率迅速下降。在光照区材料温度到达沸点时,材料表面反射率可降至 0.2。为满足良好的熔融焊接,在材料薄且非理想接触时,按理论计算应选用衰减波形的激光脉冲。为此我们的模拟理论计算所获得的激光波形随时间的变化关系示于图 6。

3.5 焊接工艺方法的选择

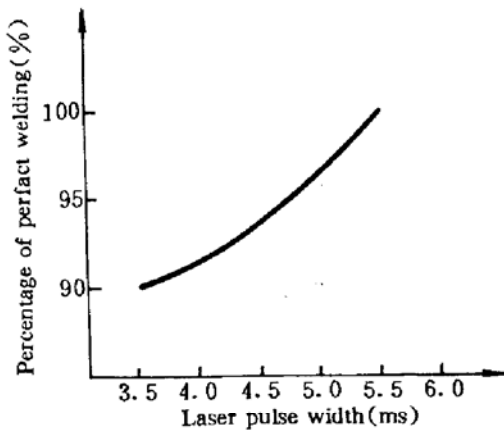


Fig. 5 Percentage of perfect welding vs laser pulse width

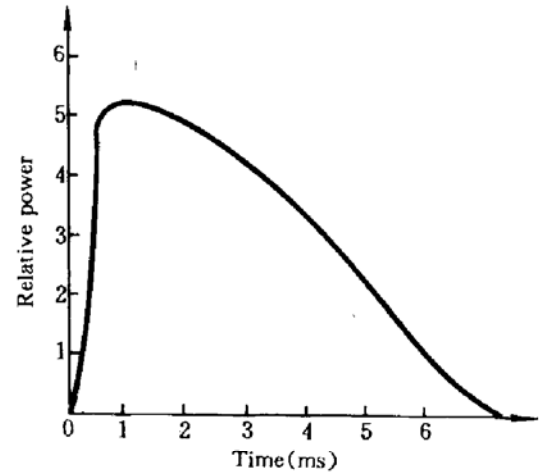


Fig. 6 Simulated laser pulse for perfect welding of thin workpieces

从图 4 可见,气隙变化范围越大,要求激光器输出参数范围越宽,设备的制造越困难。若采用逐点焊接,气隙偏向一边,后焊点间隙总是比较大,零件焊后变形大。为此选用在分度为 120° 的对称位置上,多点同时施焊法,由于熔池在工件上同时形成与固化,气隙在多数情况下分布均匀,焊接后零件变形最小,可大大提高焊件的成品率。实验证明,在其他条件相同的情况下,采用逐点焊成品率仅 60%,而采用多点同时对称焊成品率几乎达 100%,在大规模生产中达 99.5%。

4 结 论

- 1) 根据理论与实验及批量生产,证明了在非理想接触的两层零件中施行点焊,当间隙大于下层材料壁厚时,仍可采用中心穿透熔化焊。
- 2) 形成良好熔融焊接的前提条件是选择激光焊接工艺参数,其中脉宽与波形对加热过程影响较大,脉宽长,功率密度低,可焊性参数范围宽。
- 3) 选用多点同时对称焊,不仅可提高生产效率,并可减小零件变形及提高成品率。

根据以上原则选用的激光焊接系统已在我国 770 厂和 4400 厂(显象管生产厂)运行,已实现在大规模生产中合格率达 99.5% 的指标。

参 考 文 献

- 1 [美] M. M. 舍尼尔兹著. 金属焊接手册. 北京: 国防工业出版社, 1988. 76~87
- 2 Yasunori, Shimoi. Laser Welding in Automatic Assembly Line for Color-CRT Electron Gun. *Annals of the CIRP*, 1983, **32**(1): 135~139
- 3 N. Rykalin, A. Vglov, A. Tokara. *Laser Machining and Welding*. Oxford OX3 OBW, England, Pergamon Press Ltd., 1975. 57~114
- 4 Wan. A. Z., F. W. Saris. A Thermal-Melting Model Calculation of Pulsed Laser Annealing of GaAs. *Phys. Lett.*, 1981, **83A**(7.15): 367~370
- 5 王家金主编. 激光加工技术. 北京: 中国计量出版社, 1992. 346~350

Research of Processing Technology for Assembly of CRT Electron Gun Using Pulsed Laser Welding

Huang Weiling You Lide Li Jiawei Chen Zemin Liu Yiaolan
(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract This paper discribed briefly features of pulsed YAG laser welding technology in production of CRT clectron gun. The theoretical basis of laser welding of electron gun and the selection of processing parameters have been discussed.

Key words laser weiding; CRT; multispots welding simultaneously

第二届国际光电子科学与工程学术会议 (ICOESE '94)在北京召开

随着现代科学技术的发展,光电子科学和工程正发挥着越来越大的作用。为了给我国从事这一领域的工程技术人员和世界各地的学者提供一个交流信息、增进相互了解、推进国际间的友好合作和交往、磋商技艺的良好机会,中国光学学会联合国际学会(ICO)、美国光学学会(OSA)、国际光学工程学会(SPIE)、日本应用物理学会(JSAP)、全俄光学学会(ROS)以及美中光电学会(PSC)等国际学术团体,于1994年8月15~18日在北京共同举办了第二届国际光电子科学与工程学术会议,会议由中国光学学会光电技术专业委员会、清华大学、北京理工大学共同组织。除了来自全国各地的180多位代表外,参加会议的还有来自美国、法国、英国、日本、加拿大、澳大利亚、俄罗斯、乌克兰、以色列、韩国、越南、荷兰、德国等国家和中国台北、香港等地区的80多名专家、学者。

除了特邀报告外,会议还分三个分会场,对新的光学现象、原理和理论,新型光电子器件、智能传感器及其集成,先进的光电测试、分析、测量及控制技术,激光器件、技术、系统及其在信息光学中的应用,激光的材料处理技术及在工业和医学中的应用,全息、光学信息处理及应用,红外光学、弱光技术和应用,导波光学、光纤器件与光纤传感器及光通讯,图像获取、形成、处理、评估和显示用的光学或混合系统,光学记录、储存和再现技术,数字、模拟与混合光计算技术及光学神经网络,模式识别和智能机器人视觉,人工智能在光学装备中的应用等问题进行了广泛的学术交流。会议上口头报告的论文有130多篇,另有30多篇论文进行了张贴交流。本届会议的论文集已由SPIE出版,卷号为2321,总页数约为800页。

会议期间,还举办了相应的展览会,美国、日本、德国以及北京、上海的8家公司展出了自己近期的部分光电子产品。

(周稳观)