

# 激光填料焊接技术的发展现状及展望

胡军辉 曾晓雁 谢长生

(华中理工大学材料科学与工程系, 武汉, 430074)

**摘要:** 综述了激光填料焊接技术的分类与特点, 阐述了激光填丝焊的优点与发展现状以及存在的问题。

**关键词:** 激光 填料焊接

## Present situation and prospect of laser filler welding

*Hu Junhui, Zeng Xiaoyan, Xie Changshen*

(Department of Materials Science & Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** The laser filler welding is a important and wide applied technology. This paper summarizes the classification and characteristics of laser filler welding, illustrates the advantages, present situation and the problems of laser wire filler welding.

**Key words:** laser filler metal welding

### 一、引言

激光填料焊接是指在焊缝中预先填入特定焊接材料后用激光照射熔化或在激光照射的同时填入焊接材料以形成焊接接头的方法。广义的激光填料焊接应该包括两类: 激光对焊接与激光熔覆。其中, 激光熔覆是利用激光在工件表面熔覆一层金属、陶瓷或其它材料, 以改善材料表面性能的一种工艺。激光熔覆包括预置涂层激光熔覆与自动填料(丝、粉、箔或膏)激光熔覆这两种工艺方法。由于有关内容已有大量文献报导<sup>[1~4]</sup>, 这里不再赘述。本文将重点介绍激光填料对焊接工艺在国内外的的发展现状及前景预测。

### 二、激光填料焊接技术的特点

激光填料对焊接工艺的研究始于 1984 年, 主要是为了解决激光对焊存在的一些问题, 经过十来年的努力现已获得了很大的发展。

在一定的工艺条件下, 激光填料焊可保留激光对焊的几乎所有优点, 与常规焊接方法相比具有很大的优势, 主要表现为:

- (1) 焊缝深宽比大。当激光功率、焊接速度及填充速度满足一定要求时, 激光填料焊仍具有深熔特性, 因而焊缝深宽比大。
- (2) 线能量输入小, 热影响区及热变形都很小, 用于对变形要求严格的工件十分有利。
- (3) 焊缝熔合比的大小易于通过工艺进行控制, 必要时可控制得很小。
- (4) 由于激光对焊缝材质具有纯化作用, 故焊接接头机械性能优良, 强度和韧性接近, 甚至超过母材。
- (5) 由于激光能量密度高, 加热快, 故其对于被焊工件材料的适应性很强, 使难熔、难焊金

属乃至陶瓷的焊接都易于实现。

(6) 焊接速度快。即便是填充焊材要消耗部分能量而降低了焊接速度, 只要焊接间隙设计得当, 激光填料焊接的焊接速度仍远大于常规方法。

(7) 激光加工为无接触加工, 无加工惯性, 且焊接工艺参数一经确定, 焊接质量易于保证, 焊接可靠性高, 故易于实现自动化, 符合现代生产的发展趋势<sup>[5]</sup>。

此外, 焊接材料的填入使激光填料焊克服了激光直接对焊的一些缺点, 从而在一些领域的应用上具有独到的优点, 主要表现为以下几个方面:

(1) 通过对填入焊材的选择可方便地调节焊缝的成分与组织, 获取满足特定性能要求的焊接接头。这一点对于异种材料及脆性材料的焊接十分有利。

(2) 可解决激光对焊对焊接拼装要求太严的问题。由于激光束在焊接时聚焦为几百微米直径的光斑, 因此接头装配、拼合间隙的准直度也要求达到这个数量级。当焊缝较长时, 对于工件加工精度与装夹精度的要求十分高, 难于达到。即便拼装符合要求, 由于间隙的存在也会使部分激光能量漏出, 并使焊缝在原间隙部分形成凹陷。如若激光束直径为 1mm, 间隙宽度为 0.2mm 时, 约有 40% 的激光能量从间隙穿过<sup>[6]</sup>。国内进行的汽车板激光对焊的研究也表明, 由于达不到无间隙拼装的要求而使焊缝凹陷, 严重影响美观, 从而限制了拼焊板的使用。采用激光填料焊接技术时则因填料的加入而放宽了对焊接装配间隙与装配精度的要求。日本的 Kawasaki 钢铁公司用 2kW 激光器焊厚 3.5mm 的钢板, 使用直径 0.9mm 的焊丝, 送丝速度固定为 1.4m/min, 采用不同间隙宽度做试验, 结果发现由于焊丝端头的熔滴直径比焊丝直径大, 当间隙宽度为 1.8mm 时仍能形成较好的焊缝<sup>[7]</sup>。此外, 填料的加入可减少激光能量从间隙穿过, 并使焊缝稍微凸出, 成形漂亮, 若配合适当的后序措施, 在汽车板拼焊方面的应用很有希望。

(3) 可利用较小功率的激光器来实现厚板窄焊道多层焊。由于目前工业激光器的功率还不够高, 一次性熔深很有限, 从而使厚板焊接十分困难。如图 1 所示, 对不同材料实施有效焊接时, 为达到熔深 10mm 所需最小激光功率分别为: 304 不锈钢约需 4kW, 低碳钢需 14kW, 铝需 16kW, 而纯铜则要超过 60kW<sup>[5]</sup>。目前, 国内的工业用 CO<sub>2</sub> 激光器一般为 2kW 级的, 难于焊接厚板。若减慢焊接速度, 虽然在一定程度上可增加熔深, 但将使线能量输入大大增加, 失去激光焊接的优势。采用激光填料焊接工艺焊厚板时可逐层焊接, 无须达到很大的熔深, 故用较小功率的激光器即可完成, 这对于激光焊接技术的推广具有很大的现实意义。

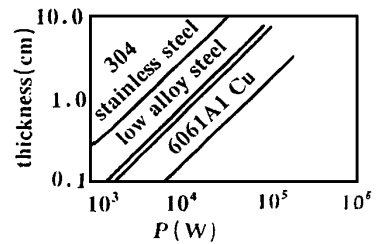


Fig. 1 The linear relationship of welding thickness and laser power for different metals

### 三、激光填料焊接技术的发展现状

目前, 激光填料焊接技术在对焊上的应用在国外已深受重视, 有不少文献对其进行了报道, 见表 1, 而在国内尚未见类似报导。

从表中可以看出激光填料焊接技术在目前具有以下几个特点:

(1) 填料方式以自动填丝为主。自动填丝法为一步法, 工艺方便易于控制填充量, 保证焊缝精确成形。另外送丝与送粉相比具有材料利用率高, 冶金质量好, 填料不发散, 可精确对位

和可适于复杂工件与复杂工位的焊接等优点。因此,自动填丝法成为激光焊接中优先采用的填料方式。虽然填丝法面临着焊丝表面吸收率低的问题,但若采用大功率激光器或热丝技术则可克服这一缺点。当丝在红热状态下填充时,不仅可以提高焊丝的表面吸收率,而且可以降低对激光器的功率要求。鲍尔夫博士所做的在基体表面堆焊耐磨耐蚀金属的研究中,采用热丝技术将焊丝预热到刚好低于熔化温度时可提高堆焊效率,并且对激光器的功率要求下降 25%<sup>[16]</sup>。

表 1 激光填料焊的资料

文献编号	焊件材料	填充材料	填充方式
[8]	Si 晶须强化铝基复合材料	Ti-6Al-4V 块	预置填料
[9]	HY80 钢与 HY100 钢	AX90 低碳低合金焊丝	自动填丝,热丝法
[10,11]	奥氏体不锈钢 X6CrNiTi1810 与低合金钢 10CrMo9	NiMo16CrTi 镍基焊丝	自动填丝
[12]	奥氏体不锈钢 AISI347 与低合金钢 13CrMo44	ENiCrMo3 镍基焊丝	自动填丝
[13]	航空铝合金	铝合金焊丝	自动填丝
[14]	铝合金	铝合金焊丝	自动填丝
[15]	铁粉烧结件	铁基合金焊丝	自动填丝

(2) 激光填料焊接技术主要应用于异种材料焊接、有色及特种材料焊接和大型结构钢件焊接等激光直接对焊不能胜任的领域。填充焊材的成分要根据母材的成分组织及焊件的性能要求来进行选择。为保证焊缝的性能,可依据合金化原理来设计焊缝成分。但由于激光焊接过程中焊缝的冷却速度极快,是典型的非平衡过程,焊缝的成分分布也很不均匀,故不能简单地利用 Schellfer 图等平衡态下的数据来选择焊材成分,只能以其作参考,通过在试验中反复摸索来予以选择。对于异种材料焊接的研究目前主要集中在异种钢及钢与铸铁的焊接。这些材料的焊接由于碳和其它合金元素含量的巨大差异,而在焊缝中生成马氏体或白口铁等脆性组织,并使焊接应力增加,引发焊接裂纹。为解决这个问题,需通过填充焊丝来降低焊缝中的碳含量,以及提高镍元素等奥氏体化元素的含量,从而可尽量抑制脆性组织的生成,在焊缝中得到奥氏体、铁素体或其复相组织。表中文献所报导的奥氏体不锈钢与铁素体钢、珠光体钢与球墨铸铁的焊接均选用了镍基焊丝,碳含量极低,只是 Fe, Cr, Mo 等元素含量稍有不同。文献[9]报导的 HY80 与 HY100 钢的焊接因母材碳含量不高且成分差异不大,故只选用了低碳含量的合金焊丝。有色及特种金属材料的焊接因材料本身的特殊性能要求以及焊缝脆性大,易出现裂纹与气孔等原因而要求通过填充适当的焊接材料来控制焊接质量。文献[8]中通过填充 Ti-6Al-4V 块来焊接 SiC 晶须强化铝基复合材料可避免激光对晶须的烧损;文献[13,14]中通过填充焊丝来调节焊缝中的 Si, Mg 等合金元素的含量而解决了铝合金直接对焊易开裂的问题;文献[15]中通过铁基合金焊丝的填充而避免了铁粉烧结件焊接缺陷的出现。大型结构钢件采用填料焊技术主要是为了解决对接缝公差大及重合性差的问题,故焊材选择可参考常规焊标准进行。

(3) 对激光填料焊接的工艺参数及焊缝组织性能进行了研究分析。除了激光功率、光斑模式与直径、扫描速度及等离子体抑制气与保护气流量这些通常的工艺参数外,对于激光填料焊接尚需考虑对接缝间隙宽度、焊丝直径与送丝速度及光束偏置量,其确切含义如图 2 所示。这

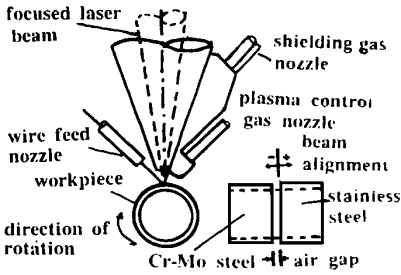


Fig. 2 The schematic diagram of experimental apparatus of laser wire-filler welding

些工艺参数对于焊缝熔深、显微组织、缺陷的发生及力学性能的影响很大。文献[12]所报导的奥氏体不锈钢 AISI347 与低合金钢 13CrMo44 的焊接实验中采用了 1.2mm 直径的 ENiCrMo<sub>03</sub> 焊丝, 激光波长为 10.6 $\mu$ m, 光斑模式为 TEM<sub>20</sub> 模, 激光聚焦于工件表面下 1mm 处。试样为壁厚 4.5mm、直径 43.5mm 的管状工件。作为等离子体抑制气与保护气的氦气以与光束夹角为 45° 的方向分别按流量 20L/min 与 32L/min 吹入。送丝速度根据填充相应间隙所需金属体积再上浮 13% 来计算。典型工艺参数设置见

表 2 典型工艺参数的设置

工艺号	功率 (kW)	焊速 (mm·min <sup>-1</sup> )	间隙宽度 (mm)	送丝速度 (mm·min <sup>-1</sup> )	偏置量 (mm)
1	3.5	1250	0	563	0
2	3.5	1250	0	1150	0
3	3.5	1250	0.2	1125	-0.1
4	3.5	1250	0.4	2200	-0.2
5	5.0	1250	0.6	3200	-0.3
6	5.5	1250	0.8	4260	-0.4
7	3.5	1250	0.2	1125	-0.15
8	3.5	1250	0.2	1125	-0.25
9	3.5	1250	0.2	1150	-0.35
10	3.5	1250	0.2	1150	-0.45

表 2。实验得出了以下结论: (1) 没有裂纹产生。这归因于填充材料良好的抗裂性与适宜的工艺参数。除了因气体保护不充分而产生的少量气孔外, 基本上不存在其它表面缺陷。由于气孔尺寸小, 数量少, 对接头性能影响不大。(2) 除编号为 1, 2, 9, 10 的工艺条件所获焊缝组织为奥氏体与马氏体复相组织外, 其余均获得了单一奥氏体组织, 可满足接头韧性要求。由于激光加热、冷却

快, 故存在成分不均匀区。(3) 对接缝间隙越大, 丝材对焊缝成分贡献也越大, 焊缝中 Cr, Ni 含量均上升。但间隙大则要求输入线能量大, 焊缝深宽比下降。因此, 在能满足焊缝成分要求的情况下间隙不宜过大。(4) 利用激光束偏向母材一侧的方式可调节焊缝成分。本实验中, 光束偏向不锈钢一侧时可减少低合金钢的熔化, 提高了焊缝中的 Cr, Ni 含量。文献[10]报导的用 0.8mm 直径焊丝(Ni 含量 99.2%) 分别焊接 GGG40 球墨铸铁/16MnCr5 及 GGG60 球墨铸铁/20MnCr5 的试验中, 对接缝间隙在 0~0.5mm 之间变化, 通过调整工艺参数可重复获得质量稳定的焊接接头, 其显微组织如图 3 所示。焊缝宽约 1.5mm, 深 6~9mm, 热影响区尺寸很小, 在钢一侧可控制在 0.8mm 以下, 球墨铸铁一侧可控制在 0.3mm 以下, 这归因于很小的线能量输入。白口组织的分布区极窄, 在



Fig. 3 Microstructure photograph of cross-section of welded joint GGG40/16MnCr5

0.1mm 以下, 对焊接接头的性能影响较小。焊缝区为树枝晶奥氏体组织, 晶界上分布有一定量的碳化物, 硬度值为 HV200~250。整个焊缝除少量小孔(直径 0.5mm 以下)外, 无其它焊接缺陷。焊接接头强度也满足要求(GGG40/16MnCr5 接头强度达到 400N/mm<sup>2</sup>), 拉伸试样破坏只在球墨铸铁处发生。文献[9]报导的 HY80 与 HY100 钢的激光热丝焊试验中对不同送

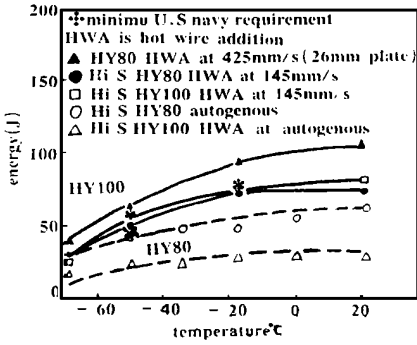


Fig. 4 Comparison of weld metal CVN results for laser welding using hot wire addition

丝速度下所获焊接接头的组织性能进行比较发现,

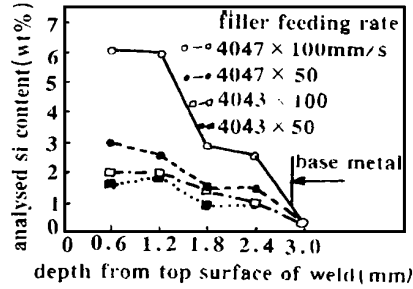


Fig. 5 Analysed silicon content in the weld metal obtained with filler wire

随着送丝速度的提高,焊缝显微组织由不填丝的马氏体组织变化为低速 (145mm/s) 送丝的马氏体与贝氏体的复相组织,

到高速 (425mm/s) 送丝时,则为铁素体组织,断裂韧性也大为提高(见图 4)。文献[14]中报导了对 A6063 铝合金进行激光填丝焊的研究成果。采用不同种类焊丝以不同送丝速度进行焊接的焊缝截面上 Si 元素含量的分布见图 5。当以 100mm/min 的速度填充 A4047 焊丝时,可在焊缝中避免显微裂纹的发生,且真空性能良好。

#### 四、存在的问题及发展方向

由于激光填料焊技术的研究起步较晚,技术上还很不完善,存在一些急待解决的问题,主要有以下几个方面:

1. 填料装置大多借鉴其它设备改制而成,难于充分满足激光加工的高精度要求;
2. 由于丝材拉制的困难性使得高合金成分及硬质材料的焊丝都无法实现;
3. 传统的工艺与质检标准限制了这项技术的应用;
4. 工艺与材料设计的研究刚刚起步,在理论上还很不完善。

因此,要使激光填料焊接技术在汽车、造船和化工等行业获得广泛的生产应用,必须针对上述问题进行系统性的研究开发,主要包括: (1) 研制开发精度高、易于控制的自动填料装置; (2) 设计开发用于不同用途的填料,采用药芯焊丝的方法拓宽焊材成分范围; (3) 制订新标准来促进激光填料焊接在不同行业的应用; (4) 用计算机等手段对焊接传热、传质过程进行理论分析,为工艺与材料设计奠定理论基础; (5) 建立工艺参数数据库,提供适应的软件服务。

#### 参 考 文 献

- 1 朱晓冬,莫之民,韩睿师 *et al.* 金属热处理, 1994; (6): 7~ 8
- 2 曾晓雁. 激光熔覆金属陶瓷复合层中陶瓷相的行为研究. 华中理工大学博士学位论文, 1993
- 3 杨洗陈. 宽带激光熔覆中激光光束与金属交互作用机理. 国家自然科学基金资助项目研究成果年报, 1994
- 4 Schwarz W, Fux V, Nowotny S *et al.* Welding and Cutting, 1992; (7): 23~ 25
- 5 王家金. 激光加工技术. 北京: 中国计量出版社, 1992: 1~ 5
- 6 浜崎正信. 实用激光加工. 北京: 机械工业出版社, 1992: 152
- 7 阎毓禾, 钟敏霖. 高功率激光加工. 天津: 天津科技出版社, 1993: 218
- 8 Hirose A, Matsuhino Y, Kotoh M *et al.* J Mater Sci, 1993; 28: 349~ 355
- 9 Phillips R H, Metzbowler E A. Welding Journal, 1992; 7(6): 201s~ 207s
- 10 Dikthey U, Shu X. Welding in the World, 1993; 31(6): 36~ 38
- 11 Dikthey U, Risch A. Welding in the World, 1995; 36: 135~ 142
- 12 Sun Z, Moioio T. Mater Sci & Tech, 1993; 9(7): 603~ 608

## 管状激光介质的光学性质

朱长虹 李正佳 刘安平 张 昀

(华中理工大学激光技术与工程研究院, 武汉, 430074)

摘要: 针对管状激光介质的热透镜效应, 提出“ $C_1$  判据”和“热感应光线主轴”的观点; 推导了二维光线矩阵和热透镜焦距; 并指出提高光束质量的主要方法。

关键词: 管状激光介质 热感应光线主轴 热透镜效应

### Optical properties of tube lasing medium

Zhu Changhong, Li Zhengjia, Liu Anping, Zhang Jun

(Institute of Laser Technology & Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** The paper puts forward the idea about “ $C_1$  discrimination” and “thermally induced principal optical axis” for thermal lasing effect in tube lasing medium. The parameter  $C_1$  is a factor of the second term of the temperature distribution expression in the cross section of the tube lasing medium. The positive or negative value of  $C_1$  indicates the direction of the gradient between the inner wall and outer wall, relatively indicates the operating mode of the laser. In the effect of thermal lensing, basically the temperature gradient determines the distribution of refractive index in the radial direction. So it is called “thermally induced principal optical axis”. This paper derives two dimension transfer matrix of ray and the focus length of the thermal lens, meanwhile points out the main method of improving beam quality.

**Key words:** tube lasing medium thermally induced principal optic axis thermal lensing effect

### 一、引 言

管状激光介质的泵浦与散热面积比板条和棒状的要大, 能增强冷却效果, 提高介质的热应力破坏阈值, 加大激光平均输出功率。例如采用 Kr 灯内泵浦方式的 Nd:YAG 管状激光器, 单级输出的激光平均功率已达到千瓦量级, 光电转换效率为 7.5%, 是棒状的两倍<sup>[1]</sup>。但光束质量尚不尽人意, 限制了这类激光器的推广应用。在高平均功率条件下, 激光介质的光学性质, 在很大程度上与热力学因素有关。因此, 有必要对管状介质的光学性质, 即由温度分布引起折射率变化的热透镜效应进行理论分析。

13 Sepold G. Application of High Power Lasers, 1991; (3): 11~ 17

14 Kutsuna M, Suzuki J, Kimura S *et al.* Welding in the World, 1993; 31(2): 126~ 134

15 铁粉烧结件激光焊工艺. 神户制钢技报, 1993; 43(1): 135

16 Boualf B, Bartzsch J. Welding and Cutting, 1993; (4): 31~ 33

\* \* \*

作者简介: 胡军辉, 男, 1973 年出生。在读硕士。课题方向为激光焊接与表面强化。