

## ● 行业综述

## 油气长输管线激光焊接研究新进展

史耀武

(北京工业大学 材料科学与工程学院, 北京 100124)

**摘要:** 介绍了油气长输管线现场焊接施工的需求, 以及激光/GMAW 复合焊具有的能显著提高光束能量利用率、改善焊缝成形、降低接头装配精度要求、改善接头力学性能等一系列优点。油气长输管线现场焊接施工时, 不论是整个组对接头均采用激光/GMAW 复合焊, 还是先采用激光/GMAW 复合焊接根焊道, 随后采用 GMAW 进行填充焊, 两种技术方案均能满足 X80 和 X100 高钢级管线钢管焊接接头的性能要求。

**关键词:** 油气长输管线; 现场焊接; 激光/GMAW 复合焊

**中图分类号:** TE973.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3938(2010)09-0005-04

### New Progress of Laser Welding Technology for Oil and Gas Long Distance Transmission Pipeline

SHI Yao-wu

(School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** This article introduced welding field construction requirements of oil and gas long distance transmission pipeline, as well as advantages of laser/GMAW hybrid welding technology, such as increasing the laser beam efficiency, improving weld figuration, decreasing the requirement of joint assembly precision and improving the mechanical properties of welded joints. During field construction, whether laser/GMAW hybrid welding for whole assembly joints, or laser/GMAW hybrid welding for root pass firstly, then GMAW for filling, both the welding technologies can meet mechanical properties requirements of high grade X80, X100 pipeline steels welding joints.

**Key words:** oil and gas long distance transmission pipeline; field welding; laser/GMAW hybrid welding

## 1 管线焊接施工需求

近年来全球对石油天然气的需求量猛增, 未来 25 年将增加 50%。为了完成石油天然气从产地到用户的运输, 全世界油气管线建设总里程已达到  $230 \times 10^4$  km, 仅 2008 年就完成了  $2 \times 10^4$  km 的管线建设, 其中 56% 是天然气管线<sup>[1]</sup>。我国已建成油气长输管线  $2.4 \times 10^4$  km, “十一五”期间将完成原油长输管线 4 000 km, 天然气长输管线  $1 \times 10^4$  km, 到 2010 年全国天然气管线总长度可达  $4 \times 10^4$  km<sup>[2]</sup>。

管线建设的主要成本是材料费和人工劳务费。在同样的输送压力下, 采用 X70 和 X80 高强

度管线钢管可减薄管壁厚度, 降低材料成本。目前, X70 和 X80 高强度管线钢管已在国内外油气长输管线建设中得到了广泛应用。随着 X100 和 X120 高钢级管线钢的开发应用, 管线建设材料用量将进一步降低<sup>[3-4]</sup>。另外, 高钢级管线钢可有效提高管线的抗震能力, 更利于在永久冻土地区使用。2002 年在加拿大的 Trans Canada 管线建设中首先使用了 X100 管线钢, 并建成了一条直径 1 219 mm、壁厚 14.3 mm 的试验管线<sup>[5]</sup>。

GMAW 自动焊是当前管线焊接施工的主流技术, 能显著提高焊接生产率和焊接质量。焊管对接时, 根焊道采用内焊机或铜垫板外焊, 然后进行坡口填充焊。实际上, 根焊道的焊接速度直接

影响管线的焊接施工速度,每个焊口填充焊道数决定着焊接工作站的数目。英国 Cranfield 大学开发了 CAPS 自动焊接系统(cranfield automated pipe welding system),采用两个 tandem 焊枪,4 根焊丝同时焊接,提高了焊接熔覆率,焊接速度 1.5 m/min,可显著减少焊接工作站的数目<sup>[6]</sup>。美国 CRC 公司,在内焊夹具上安装 4 个焊炬同时焊接,根焊速度可达 2 m/min。

应该指出,激光焊也能显著提高焊接生产率,曾采用 CO<sub>2</sub> 激光做过初步可行性试验<sup>[7]</sup>。如采用光纤传输的固体激光焊接系统,特别是最近开发的光纤激光焊接技术,不但能对管线现场自动化施工带来便利,而且还能大幅提高焊接速度(可达 4 m/min)。对于直径 1.25 m 的焊管,组对完成后只需 1 min 就能完成根焊。激光焊接具有生产效率高,热输入低、热影响区窄等优点,能降低高钢级管线钢管产生焊接冷裂纹的风险。

## 2 激光焊接技术的发展

激光焊接技术诞生于 20 世纪 60 年代。随着大功率激光技术的发展,以高能量、高品质激光作为热源的新型激光加工系统不断涌现,激光加工在汽车白车身装焊、大型客机以焊代铆、中厚板切割、电子工业微连接等领域的应用不断扩大。近年来大功率半导体激光器、半导体泵浦固体激光器得到了快速发展,特别是大功率半导体泵浦光纤激光器的发展,克服了固体激光器在维持光束质量时输出功率的限制,光束质量优良,在材料加工领域得到广泛关注。

虽然 20 世纪 60 年代初就出现了光纤激光器,但由于其功率小,只用作光学放大器。直到 2000 年才出现了材料加工用的 100 W 光纤激光器。现在已有数千瓦的光纤激光器,最大功率达到 20 kW。这种大功率激光器比半导体激光器效率高,电光转换效率超过 20%;设计紧凑,一台 6 kW 光纤激光器和一台家用电冰箱的尺寸相当,若干单模光纤激光器组合起来就能形成数千瓦的大功率激光输出,安装和移动方便;由于双包层光纤独特的波导结构,输出激光的光斑尺寸小,具有接近衍射极限的光束质量;对灰尘、振动等环境要求低,易于维护,使用寿命也比其他半导体泵浦激光器长,有利

于降低成本。大功率光纤激光可对多种材料进行深熔焊,由于波长短,几乎能被所有金属或合金吸收,而且光束定位柔性好,使用方便。

最近德国 Vietz 公司根据长输管线现场焊接的要求,采用 10 kW 大功率光纤激光器,开发了 VPL 专用光纤激光焊接系统,如图 1 所示。该系统用于壁厚大于 10 mm 钢管的焊接,激光焊接头安装在环形导轨上,焊接过程能自动对中焊缝。对壁厚 20 mm 的环焊缝,焊接速度可达 2.3 m/min,不需要填充焊丝,生产速度和成本为常规焊接方法的 1/3。VPL-2000 型系统的激光输出功率 20 kW,光束质量参数 BPP (beam parameter product) 11 mm·mrad,波长 1 070 nm;光纤直径 200 μm,长度 50 ~ 100 m<sup>[8]</sup>。



图 1 VPL 光纤激光焊接系统现场施工照片

将激光和电弧 (GMAW) 两种热源耦合作用在同一焊接区域,能够发挥两种热源的各自优势。激光焊接具有热源功率密度大,焊接热输入量小,细化焊接冶金组织,减小焊接变形等一系列优点,但激光焊接产生的光致等离子体使焊接过程不稳定,降低能量利用效率。电弧的引入,可以稀释光致等离子体,从而降低等离子体对激光能量的吸收、散射和反射作用,增加激光的穿透能力。同时,由于光致等离子体为电弧提供了导电通道,产生激光对电弧的吸引和压缩作用,提高电弧稳定性。因此在激光/电弧复合焊情况下,两种热源复合作用明显大于激光或电弧的单独作用。激光/电弧复合焊能显著提高光束能量利用率,增加焊接熔深,提高焊接速度,改善焊缝成形,降低接头组装精度要求,抑制焊接缺陷的产生,并保留激光焊接接头的优良性能。

采用激光/电弧复合焊接技术,焊丝的添加,

增加了焊接的适应性,可以调整焊缝金属的化学成分和显微组织,特别是降低接头装配尺寸的精度要求。单纯激光焊接时,接头间隙一般要小于0.2 mm,但用激光/电弧复合焊时,0.4 mm的接头间隙仍可进行焊接。激光前置使电弧引弧容易,甚至改变熔滴短路过渡频率,在一定焊接电流范围内可使焊接过程更为稳定。

### 3 管线激光焊接试验

#### 3.1 光纤激光焊接试验

试验用母材为 X100 管线钢、板厚 19 mm。采用 IPG YLR-8000 大功率光纤激光焊接系统,最大输出功率 8 kW,波长为 1070 nm,光束质量参数 16 mm·mrad,焦长 250 mm。激光头安装在 Fanuc M-710iB/45T 机器人上,平位焊接,焦点位于焊件表面。辅助气流为 Ar,流量 11 L/min。

光纤激光焊热输入对 X100 管线钢管环焊缝焊接熔深的影响如图 2 所示,可以看出,低热输入(10~100 J/mm)时,属热传导焊接,熔深较浅;高热输入(600~1000 J/mm)时,为穿透焊,熔深显著增加<sup>[9]</sup>。激光功率和焊接速度对 X100 管线钢管环焊缝焊接熔深的影响如图 3 所示,结果显示,焊接熔深与激光功率几乎呈线性关系,而熔深与焊接速度呈指数关系变化。

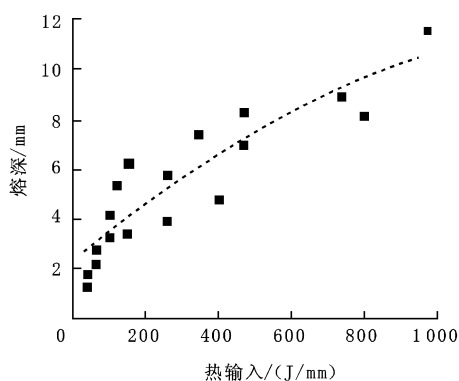


图2 光纤激光焊热输入对 X100 管线钢管环焊缝熔深的影响

X100 管线钢主要化学成分为:  $w(\text{C}) = 0.06\%$ ,  $w(\text{Mn}) = 1.9\%$ ,  $w(\text{Ni}) = 0.49\%$ ,  $w(\text{Mo}) = 0.26\%$ ,  $w(\text{Cu}) = 0.3\%$ , 碳当量 0.32。在激光焊非平衡冷却条件下,焊缝及热影响区淬硬形成细小马氏体组织。焊缝没有气孔等工艺缺陷,但热输入过

大时,焊缝中心可能产生气孔或沿晶裂纹。

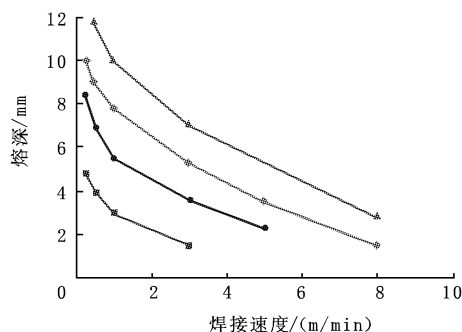


图3 光纤激光焊功率和焊接速度对 X100 管线钢管环焊缝熔深的影响

#### 3.2 激光/电弧复合焊试验

英国焊接研究所(TWI)对 X80 管线钢进行了焊接工艺试验,试验板厚 11 mm<sup>[10]</sup>。复合焊采用 Yb 掺杂光纤激光器,功率 7 kW,GMAW 弧焊电源为 AB Aristo 450。试板接头采用 Y 形坡口,深度 6 mm。模拟管线全位置焊接,分别采用平焊、立焊和仰焊。冲击试样厚度为标准 Charpy 试样的 2/3。平焊、立焊和仰焊三种焊接位置 -10℃ 冲击功平均值分别为 69 J,78 J 和 73 J。

#### 3.3 根焊道激光/电弧复合焊试验

英国焊接研究所曾对 X80 管道进行了 YAG 激光/GMAW 复合焊试验,先用 GMAW 完成根焊道,再用激光/GMAW 复合焊填充,最后用 GMAW 完成盖面焊接<sup>[4]</sup>,但是该方案不能提高根焊道的焊接速度。为此,近年来 TWI 研究了采用激光/电弧复合焊进行根焊的可行性,并研究了根焊道焊缝成形和焊接参数的关系<sup>[6]</sup>。试验母材为 X100 管线钢,为了模拟板厚 19 mm 对接接头的根焊道钝边厚度,焊接试验采用 6 mm 厚的试板进行。大功率光纤激光焊接设备为 IPG YLR-8000,最大输出功率 8 kW。GMAW 弧焊电源为 Lincoln Power Wave 455M/STT,焊丝直径 1 mm,保护气体为 Ar(流量 10 L/min),激光倾角 19°。经过大量试验,获得优良焊缝成形的焊接参数为:激光功率 5~6.25 kW,激光/电弧间距 2 mm,送丝速度 10~12.5 m/min。

近期研究的激光/电弧复合焊技术,采用 4~10 kW 的 Yb 掺杂光纤激光器,配合 CRC P450,可实现钝边高度 4~8 mm 的管道的高速根焊。对钝边高度 4 mm 的管道,焊接速度可达 2.3 m/min。如

采用 10 kW 光纤激光器,焊接速度可达 3 m/min,目前正在开发工地现场使用激光/GMAW 复合焊根焊系统<sup>[11]</sup>。

### 3.4 激光根焊/GMAW 填充焊试验

近期研究了激光根焊/电弧填充焊技术,并对管线进行了现场焊接试验。试验母材为 X100 管线钢,板厚 19 mm。焊接窄间隙坡口如图 4 所示。根焊激光功率 7.6 kW,母材预热 100 ℃,根焊速度 1.5 m/min,Ar 气保护,流量 20 L/min。填充焊采用 4 个 Tandem GMAW 焊接,送丝速度均为 14.5 m/min,焊接电流 233 A,焊接电压 24 V,焊丝为 CarbofilNiMo1,焊丝直径 1 mm,Ar 气保护,预热 100 ℃。

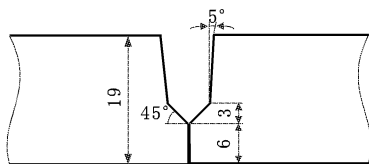


图 4 X100 管线钢激光根焊/GMAW 填充焊坡口示意

焊接接头 Charpy 冲击试样的缺口位于根焊道,上平台冲击吸收能为 200 J,下平台冲击吸收能为 50 J,转变温度 -60 ℃。焊缝主要由 GMAW 焊接完成,先进行激光/电弧复合焊根焊,随后采用 GMAW 填充焊,完成的焊接接头冲击韧性与 GMAW 根焊的结果相似。焊缝硬度(HV<sub>0.2</sub>)约为 280,也与 GMAW 根焊的结果类似。

近期,对 X100 管线钢、壁厚 11.7 mm 管道的试验还表明,如采用 GMAW 焊接,一个焊口至少需要 4 个焊道。如采用激光/GMAW 复合焊完成根焊道,GMAW 填充焊只需 1 个焊道即可,显著提高了焊接生产效率<sup>[12]</sup>。

## 4 结 语

激光/GMAW 复合焊接技术在提高焊接速度和生产效率方面有重要工程应用价值,特别是随着大功率光纤激光器的技术进步,可望显著提高油气长输管线的现场焊接生产率。不论是整个组对焊接接头均采用激光/GMAW 复合焊,还是采用激光/GMAW 复合焊接根焊道,随后采用 GMAW 进行填充焊,两种技术方案均显示了良好

的应用前景,且均能满足高钢管线钢焊接接头的性能要求。目前我国只有百瓦级光纤激光器生产技术,千瓦级大功率光纤激光器仍依赖进口,而且超过 6 kW 光纤激光器的进口还受到限制。研制大功率光纤激光器仍需突破技术瓶颈,以推动激光/电弧复合焊在高压长输管线焊接技术中的应用,这对推动激光/电弧复合焊在其他结构工程领域的应用也有重要意义。

### 参考文献:

- [1] SMITH C, KOOTUNGAL L. Worldwide Pipeline Construction[J]. Oil & Gas Journal, 2008, 106(6): 46-52.
- [2] 李影, 李国义, 马文鑫. 我国油气管道建设现状及发展趋势[J]. 中国西部科技, 2009, 8(14): 6-8.
- [3] 史耀武. 油气长输管线焊接技术回顾与发展[J]. 焊管, 2005, 28(6): 1-6.
- [4] LOMIZO Y I. Overview of Recent Welding Technology Relating to Pipeline Construction [J]. Transactions of JWRI, 2008, 37(1): 1-5.
- [5] TRUE W R. TCPL Installation Proves Commercial Use of X100[J]. Oil & Gas Journal, 2003, 101(5): 72-75.
- [6] YAPP D, KONG C J. Hybrid Laser-arc Pipeline Welding [J]. Welding and Cutting, 2008, 7(6): 16-19.
- [7] GAIN Y, MAS J P. Laser Orbital Welding Applied to Off-shore Pipeline Construction [C]//Pipeline Technology: Proceedings of 3rd International Conference. Belgium: Ed. R. Denys, Elsevier Science BV, 2000: 327-342.
- [8] VIETZ. Your Global Partner For Pipeline Equipment [EB/OL]. <http://www.vietz.de/seiten-de/produkte-produkte-laserschweissen-vpl.html>.
- [9] QUINTINO L, COSTA A, MIRANDA R, et al. Welding with High Power Fiber Lasers a Preliminary Study [J]. Materials and Design, 2007, 28(4): 1231-1237.
- [10] HOWSE D S, SCUDAMORE R J, BOOTH G S. The Evolution of Yb Fibre Laser/MAG Hybrid Processing for Welding of Pipelines [C]//Proceedings of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference. Seoul: [s. n.], 2005: 90-94.
- [11] HARRIS I D, NORFOLK M I. Hybrid laser/Gas Metal Arc Welding of High Strength Steel Gas Transmission Pipelines [C]//Proceedings of the Biennial International Pipeline Conference, [s. l.]: IPC, 2009: 61-66.
- [12] KEITEL S, NEUBERT J, STROFER M. Laser Based Girth Welding Technologies for Pipelines—GMAW Gets Support [J]. Welding in the World, 2009, 53(5): 289-294.

作者简介: 史耀武(1940—), 男, 北京市人, 博士, 教授, 长期从事先进焊接制造技术的教学与研究工作。

收稿日期: 2010-02-08

编辑: 汪翰云