

长输管道激光-电弧复合焊接技术研究

曾惠林 张元 皮亚东 邹岳峰

【摘要】传统的电弧焊工艺由于受到焊接速度和焊层厚度的制约，难以进一步提高焊接施工效率。激光-电弧复合焊将激光和电弧两种热源复合在一起，实现优势互补，为管道施工提供了一种新的焊接方法。激光-电弧复合焊速度快，熔深大，可以显著提高施工效率。国外多家研究机构在试验室内成功实现了管道全位置激光-电弧复合焊，但未能实现工业化应用。光纤激光器的发明为激光-电弧复合焊现场应用提供了可能。初步试验表明，光纤激光-电弧复合焊能够满足管道环焊缝焊接的要求，力学性能满足现行标准要求。

关键词：管道；全位置焊接；激光-电弧复合焊；激光焊

1. 概述

随着国民经济的发展和对清洁能源的需求日益增加，我国对石油和天然气需求也大幅增长，管道建设规模也在不断进一步扩大。焊接是管道施工建设中最重要的工作，它关系到整个工程的建设成本、工程质量，寻求高效的焊接方法是降低施工成本，提高经济效益，提高建设质量的重要途径。焊接作业中两个因素被认为尤其重要，一是焊接速度，它决定着施工进度；二是操作工数量，它影响着人工成本。

2. 管道激光-电弧复合焊的特点

(1) 管道焊接的特点 出于提高输送能力，并降低耗材，降低成本的考虑，管道正向着大口径、高压、高钢级的方向发展。当其他条件基本相同时，随

管径增大，输油成本将降低；而提高管道工作压力，可以增加输量、增大站间距、减少站数，使投资减少、成本降低。因此，采用大口径、高压输送是管道工程发展的趋势。已经开工建设的中俄东线天然气管道工程管径为56in (1in=25.4mm)、设计压力12MPa。

传统的焊接方法主要是电弧焊。施工的通常做法是两根钢管对接后静止，一个焊枪围绕管道焊接一周完成一道根焊，或者两个焊枪各焊半周完成一道根焊，然后用自动焊、半自动焊或人工焊填充剩余的坡口。这种全位置焊接工艺工位多变，兼具平焊、立焊、仰焊的特点。受电弧焊自身特点的限制，已无法通过进一步提高焊接速度、增加焊接熔深的方法提高施工效率，目前

全位置的熔化极电弧自动焊焊接速度为500mm/s，焊层厚度为2~3mm。

(2) 激光-电弧复合焊的特点 激光焊与电弧另外一种焊接技术相结合的焊接工艺叫做激光复合焊，包括激光-等离子复合焊、激光-TIG复合焊、激光-MIG复合焊等。其中研究及应用最广泛的是激光-MIG电弧复合焊。与激光焊相比，激光-电弧复合焊的桥接能力好，能够适应较大的对口间隙和错边，且焊缝的硬度较低而韧性好；与电弧焊相比，激光-电弧复合焊熔深大，焊接速度快、变形小。由于以上独特优点，激光-电弧复合焊得到更多的研究，并已在汽车、船舶、航空、机械及钢铁等制造领域实现工业化应用。

(3) 管道激光-电弧复合焊



的优点 油气管道壁厚较大,为了保证焊透需开坡口,而后用焊材一层一层的填满。激光-电弧复合焊熔深比较大,尤其适合于厚壁材料的焊接,不仅节省焊材,而且节省人员配置。

以管径1219mm、壁厚18.4mm管道为例,坡口形式如图1所示,左边为自动焊坡口形式,右边为复合焊坡口形式。复合焊坡口的填充面积随钝边厚度 h 的增加而降低,当钝边达到8mm时,与自动焊相比,可以节省一半的焊材。随着钝边厚度的增加,节省耗材的量越大(见图2)。工作量的减少可相应减少施工人员数量。复合焊机组至少比自动焊机组节省四分之一的人员配置。

3. 管道激光-电弧复合焊工艺研究进展

(1) 激光器的发展与管道激光-电弧复合焊 管道现场施工环境复杂,包括平原、高山、沙漠、丘陵等多种地形。这些特点使得焊接施工对设备便携性、环境适应能力要求比较高。

目前,工业中应用最多的激光器是CO₂激光器和Nd:YAG激光器。CO₂激光质量好,功率密度高,能实现深熔焊,但CO₂激

光要靠镜片组传输,设备笨重。Nd:YAG激光器结构相对紧凑,但效率低下,大约仅有3%输入热量转化为焊接激光束的功率,这就意味着系统不但需要巨大的能量来产生激光,而且需要冷却设备来冷却浪费的能量,这个特点意味着该设备不可能是轻便型的。对大多数制造行业来说,这些都不是主要问题,但对管道焊接现场施工来说,设备的可移动性是一个关键问题。受激光器的限制,管道激光-电弧复合焊在试验室成功过,却始终未能商业化。

最近几年,固体激光器有了重大发展,尤其是光纤激光器的出现,管道激光焊接应用的最后障碍已被清除。功率级大于20kW的光纤激光器已开发成功。光纤激光像Nd:YAG激光一样可使用光纤传输,操作灵活性很强,光束质量比Nd:YAG激光器更好,稳定性更高。光纤激光器便携性比CO₂激光器好,其所占空间只有同功率Nd:YAG激光器的五分之一。不同于其他固态或气态激光器,光纤激光器的效率超过25%,比典型的CO₂激光器和YAG激光器高很多,大大降低运行成本。由于不需更

换闪光灯或半导体,所以它们在整个使用寿命里几乎不需维护及维修。随着结构的不断改进,在不久的将来,光纤激光器有望成为一个便携式的激光系统,更加适用于管道施工现场作业。

(2) 国外管道激光-电弧复合焊研究现状 欧美国家在20世纪末就已开始了管道激光焊和管道激光-电弧复合焊技术研究。

英国焊接研究所(TWI)是一家资历较深的激光焊接技术研究机构,很早就着手研究管道激光-电弧复合焊。TWI在试验室条件下,利用3台Nd:YAG激光器组合成一套功率达10kW的系统进行管道激光-电弧复合焊研究。目前,改用7kW光纤激光器,可以实现激光-MAG环焊缝复合焊,在1.8m/min的速度下,在X80管线钢上可以产生9mm熔深。

美国爱迪生焊接研究所(EWI)在美国交通运输部(DOT)的资助下,于2008年与CRC公司合作进行了管道激光-电弧复合焊接试验。研究人员将光纤激光器与GMAW焊枪集成在一个商用轨道和牵引小车系统(CRC-Evans P450)上,系统在2.3m/min的速度下完成一个根部4mm厚的全熔透焊缝的焊接。根

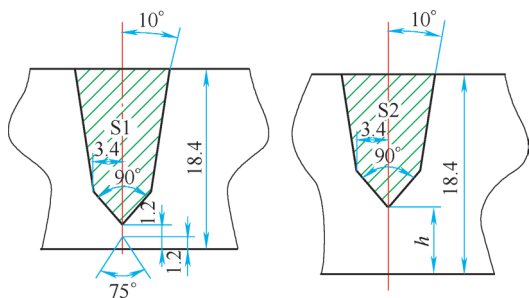


图1 自动焊与复合焊坡口形状比较

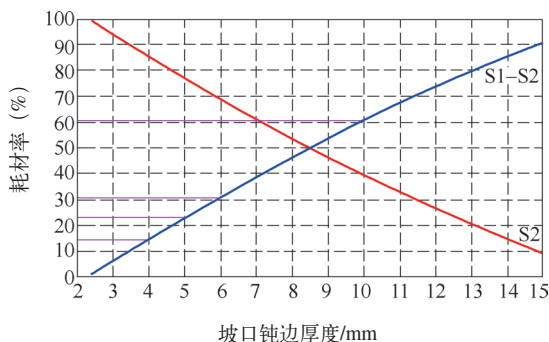


图2 钝边厚度与耗材的关系

部焊用双向下向焊，激光器功率10kW，焊接速度3m/min，初期试验取得了令人满意的效果。

德国菲茨公司（Vietz GmbH）也积极开展管道激光焊接技术研究，目前已在多个国家申请了管道激光焊接技术专利。菲茨公司开发的激光焊VPL系统（Vietz-Pipeline-Laser-System）可完成管道对口、连接的全套工作，并用激光焊接技术进行焊接。VPL系统采用20kW光纤激光器，目前焊接熔深可达12mm，并正朝16mm熔深的目标迈进。

（3）国内研究进展 2009年3月，中国石油天然气管道科学研究院在国内率先开展了管道全位置激光-电弧复合焊技术研究。通过大量试验，研究了激光功率、焊接速度、电弧电流、离焦量、热源间距及保护气体等参数对焊接质量的影响。试验还研究了复合焊对口精度、错边量、工位的适应能力，图3为中国石油天然气管道科学研究院焊接X70管线钢的试验装置。复合夹具用来夹持激光聚焦头和电弧焊枪，两者之间的夹角和相对位置可调整。复合夹具装在焊接小车上，焊接小车沿装在管圈上的轨道进行焊接。

所用激光器功率为6kW，钢管直径1016mm，坡口钝边厚度6mm，焊接速度1.2m/min。

试验表明，在1.2m/min的焊接速度下，可实现6mm厚钝边一次焊透，焊缝成形良好。金相显示，内部熔合良好（见图4）。

管线钢激光焊接的一个比较突出的问题是其焊缝硬度高、耐

冲击性也较差。管道的施工标准需要焊缝接头在适当的环境温度下要有足够的冲击韧性。试验证明，激光-电弧复合焊接技术可以克服这个问题。电弧具有预热和回火作用，可以有效降低焊缝硬度，增加韧性；来自电弧焊的焊丝填充物能控制焊缝金属的特性，也起到降低热裂纹敏感性和提高焊缝金属韧性的作用。通过对焊缝的不同部位的硬度进行测量，结果显示，焊缝区硬度略高于母材，热影响区硬度在母材硬度上下波动，但都低于270HV₁₀的标准要求。针对焊缝区硬度超标，课题组进行了焊接工艺硬度试验，研究数据如表1所示。

通过大量的高能量激光功率复合焊接工艺试验，硬度随着预热温度的提高而减小，与较低能量的激光功率焊接试验对比，硬度则更小。其他的力学性能试验

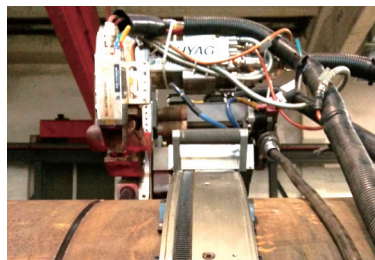


图3 试验装置

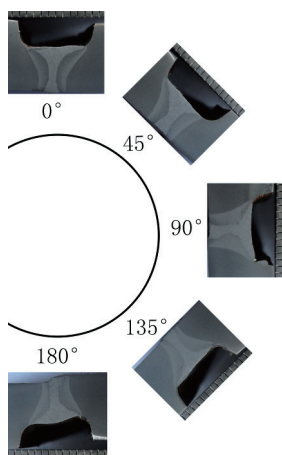


图4 金相图

则截取不同工位的焊缝，铣去剩余坡口，制作成标准试件进行拉伸试验。试验发现，试件的断裂大多发生在母材上，断裂位置距离焊缝和热影响区较远；发生在焊缝上的断裂通常伴随着内部气孔、未熔透等缺陷；熔合线附近较易发生断裂，断裂处通常伴随熔合不良缺陷。这些结果说明，焊缝本身性能较好，内部缺陷是降低焊缝抗拉能力的主要因素。对焊缝的弯曲、冲击试验表明，焊接接头的各项指标均达到现行标准规定的要求。

施工中一个现实问题是对接头对口精度难以保障，错边、间隙难以避免，这对复合焊是一个极大的考验。当错边量、间隙过大时，常出现背部内凹，熔合不良等缺陷。试验过程中内凹调整如图5所示。

在激光-电弧复合焊接过程中，熔池主要受表面张力、电弧压力、熔池金属自身重力和激光

表1 激光-电弧复合焊接工艺硬度试验

激光功率：7300W 预热温度：不加热（HV）								
位置	母材	热影响区	焊缝	热影响区	母材			
	1	2	3	4	5	6	7	8
17°	227	265	256	317	319	262	268	221
	—	9	10	11	12	13	14	—
	—	260	242	319	317	268	253	—
	—	—	—	15	16	17	—	—
	—	—	—	309	309	304	—	—
激光功率：7300W 预热温度：100℃（HV）								
位置	母材	热影响区	焊缝	热影响区	母材			
	1	2	3	4	5	6	7	8
19°	232	237	245	268	272	254	247	216
	—	9	10	11	12	13	14	—
	—	225	221	266	284	233	225	—
	—	—	—	15	16	17	—	—
	—	—	—	258	264	254	—	—
激光功率：7300W 预热温度：200℃（HV）								
位置	母材	热影响区	焊缝	热影响区	母材			
	1	2	3	4	5	6	7	8
25°	221	227	227	235	266	245	240	228
	—	9	10	11	12	13	14	—
	—	218	219	264	260	218	218	—
	—	—	—	15	16	17	—	—
	—	—	—	264	266	272	—	—

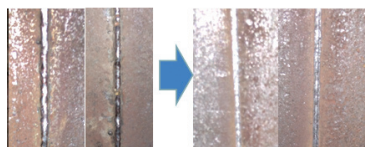


图5 仰脸位置内凹对比

光烧蚀压力共同作用,在不同空间位置,其受力情况也不一样,5-6点位置内凹很大部分原因是受熔池金属自身重力的影响。从受力角度分析:一是可以通过改变电弧焊枪角度,从而改变电弧压力沿管壁切线垂直方向的分力大小,达到抑制熔池下坠目的,如表2所示。从表2可看出,当焊枪角度为 30° 时,5-6点位置的内凹深度在0.1~0.4mm之间,随着角度的增大,焊枪角度为 45° 时,内凹深度加大,尺寸在0.3~0.5mm之间,当焊枪角度继续增加为 60° 时,其内凹深度没有明显的变化。二是通过适当减小激光和电弧能量的输入,调整光纤间距以及离焦量也对内凹缺陷有一定的抑制作用。目前工艺所能适应的错边量为1.5mm,最大间隙为0.8mm,完全能够满足目前的施工技术水平。

管道全位置激光-电弧复合焊影响因素较多,包括:错边量、激光功率、对口间隙、光纤间距、离焦量、焊接速度和送丝速度等7个影响因素。通过大量的试验研究,基本确定了激光-电弧复合焊的各工艺参数,对进行焊接完成的管口进行RT检测,合格后对整个管圈进行了拉伸、冲击、弯曲、硬度和刻槽锤断力

表2 焊枪角度对焊缝背面成形的影响

焊枪角度($^{\circ}$)	30	45	60
内凹深度/mm	0.1~0.4	0.3~0.5	0.3~0.5

学性能试验。试验结果表明,拉伸测试断裂位置均为母材,抗拉强度均大于测试要求,冲击试验的单个值和平均值均高于测试要求,弯曲和刻槽锤断试验试样均未见裂纹,金相观察发现,在顶点位置,焊缝钝边根部有未熔缺陷如图6所示。

其他位置焊缝区组织,没有发现焊接缺陷。射线及力学性能如图7所示。

4. 结语与展望

管道激光-电弧复合焊具有良好的应用前景,其熔深大、焊速高的优点为节省施工成本提供了一种新的途径。从国内外的研究结果看,复合焊技术具有应用于管道焊接的潜力,尤其是大功率光纤激光器的出现使管道复合焊的现场应用成为可能。

在没有内部缺陷的情况下,管道激光-电弧复合焊焊缝的性能满足现行标准要求。因此,在未来的研究中,需要继续优化工艺,减少焊缝缺陷,从而保证获得合格焊缝。目前的研究仅限于实验室条件,未来还需要模拟更

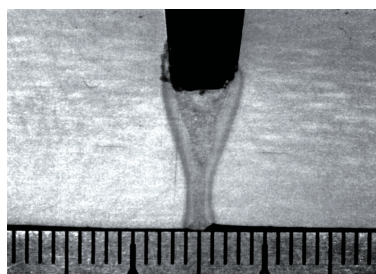


图6 平焊位置金相组织

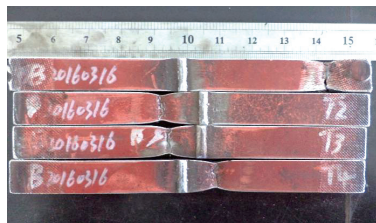


图7 拉伸试样断裂位置

多的现场条件,测试工艺的适应能力。要实现工业化应用,光纤激光器在野外条件下的可靠性还有待验证。

参考文献:

- [1] Eboo M. Steen and W M and Clarke J. Arc-augmented laser welding[A]. Advanced in welding processes proceedings [C]. 4th international conference, Harrogate, 1978, May 9-11, 257-265.
- [2] W. M. Steen. Arc augmented laser processing of materials[J]. Journal of application physics., 1980, 51(11): 5636-5641.
- [3] 马晓丽,华学明,沈甘迪.高效弧焊设备与方法在船舶制造中的应用现状, [J]. 中国激光, 2005, 32(11): 1571-1576.
- [4] Jasna U, Hoffmann J and Seyffarth P. Nd: YAG laser gas metal arc hybrid welding: a chance for the use of the advantages of laser technology and flexible automation in shipbuilding and steel construction [A]. 2002 International Conference on Robotic Welding, Intelligence and Automation, Shanghai [C]. 2002, 12: 9- 12.

作者简介:曾惠林,皮亚东,中国石油天然气管道科学研究院有限公司;张元,邹岳峰,中国石油天然气管道局有限公司。

MW 20170208