

文章编号: 0258-7025(2009)12-3174-05

高功率 CO₂ 激光焊接管线钢接头的组织与性能

胡连海 黄 坚 李铸国 吴毅雄

(上海交通大学 上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240)

摘要 焊接是管线建设的关键技术之一,随着我国管线钢的快速发展,越来越需要匹配的焊接技术来满足管线的建设。分析了激光焊在管道焊接中的优缺点,并采用高功率激光焊接设备,对板厚为 16 mm 的 X52 管线钢进行焊接, X 射线探伤检测焊缝无裂纹,采用光学显微镜分析了焊接接头的焊缝结晶特性和微观组织。根据美国石油学会标准 API SPEC 5L 管线钢规范,对焊接接头进行了力学性能试验。结果表明:焊接接头的抗拉强度达 480 MPa,断于母材;180°接头弯曲未出现裂纹;-20 °C 焊缝金属冲击韧性 CVN=279 J,熔合区冲击韧性 CVN=282 J,热影响区冲击韧性 CVN=212 J,焊接接头的最大硬度分布在焊缝下部,为 270 HV 左右。研究表明,各项性能均满足管线钢焊接的要求。

关键词 激光焊接; X52 管线钢; 微观组织; 力学性能; 显微硬度

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093612.3174

Microstructure and Properties of High Power CO₂ Laser Welded Pipeline Steel

Hu Lianhai Huang Jian Li Zhuguo Wu Yixiong

(Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract Welding is one of the key technologies in pipeline construction. The corresponding welding technology should be meeting the requirements of the pipeline construction due to the rapid development of advanced pipeline steel. The advantages and disadvantages of laser welding for pipeline steel are analyzed. X52 pipeline steels with a thickness of 16 mm are welded using high power CO₂ laser. Cracks in the weld are not detected by X-ray. Solidification properties and microstructure of laser welded joint have been studied by optical microscope. The mechanical tests of the welded joint have been conducted according to American Petroleum Institute Specification API SPEC 5 L. The results show that the ultimate tensile strength is 480 MPa, fracturing in parent metal, without any cracks in 180° bend specimens; and Charpy notch toughness at -20 °C is CVN=279 J in weld metal, CVN=282 J in fusion zone and CVN=212 J in heat affected zone. The maximum hardness of butt welded joint is about 270 HV, which locates in the bottom of weld. All the mechanical properties of weld produced by using laser welding can meet the welding technical requirements of X52 pipeline steel.

Key words laser welding; X52 pipeline steel; microstructure; mechanical properties; microhardness

1 引 言

石油天然气是关系国家安全的战略资源,管道输送是长距离运输石油天然气最合理的运输方式,

具有经济、安全、高效、节能、不间断,以及对环境破坏程度小等显著特点。管线建设是一项大规模的焊接工程,焊接质量在很大程度上决定了管线建设的

收稿日期: 2008-10-28; **收到修改稿日期**: 2008-11-30

基金项目: 科技部国际合作重点项目(2006DFB52680)和上海市科委国际合作项目(061107030)资助课题。

作者简介: 胡连海(1975-),男,博士研究生,讲师,主要从事激光工艺及激光物理等方面的研究。

E-mail: lianhai_hu@sjtu.edu.cn

导师简介: 吴毅雄(1952-),男,教授,博士生导师,主要从事激光制造及过程控制等方面的研究。

E-mail: yxwu@sjtu.edu.cn

整体水平以及管线在运营中的安全性和可靠性。大量事实表明,管道事故大多发生在焊接接头处;而且,因焊接质量发生的事故,性质都比较严重。因此,许多国家都设法把最新科研成果应用于管道焊接^[1~3]。

目前厚板管线钢焊接一般采用多丝埋弧焊、熔化极气体保护焊等焊接方法,在焊接时要求开坡口并进行多层焊接^[2]。随着板厚的增加,焊接的层数增加,使得在实际生产中增加了准备工序和焊接加工的时间,从而造成了生产效率下降和焊接成本增加,同时由于输入的线能量大,热影响区(HAZ)宽,导致焊后变形大,焊接接头力学性能下降等。如今在管道领域焊接中越来越要求降低生产成本,提高产品质量。激光焊接的发展能够很好满足这一要求。

激光焊接与传统电弧焊工艺相比的主要优势是激光深熔焊接模式可以获得大深宽比的焊缝,一次熔深大,所需焊道数量较少,从而大大减少焊接变形。所以,用激光焊替代目前管道焊接中使用的传统焊接方法(主要是埋弧焊和活性气体保护焊),使得不开坡口进行单道焊接或大大减少焊接层数成为可能,进而在焊接速度和焊接生产效率上有较大的提高,更重要的是能够减小焊接变形。同时由于焊接热源能量密度集中,线能量小,HAZ很窄,使得焊

接接头的力学性能优异。另外,从成本角度看,仅就使用新工艺降低重复作业所带来的成本降低就能够说明激光焊接系统较高投资成本是值得的^[4~7]。

2 激光焊接工艺

试验采用德国 TRUMPF 生产的 CO₂ 激光器,其最大输出功率为 15 kW,激光波长为 10.6 μm,焦距为 350 mm。试验板材为 X52 钢,含有微合金元素 Ti、Nb、V 等,其主要化学成分及含量如表 1 所示,板厚为 16 mm。采用 I 形坡口,选取不同焊接工艺参数进行激光焊接,对获得表面成形良好的焊缝,进行焊接接头质量检验,经过反复试验及参考前人研究结果,最终获得内在质量较好的焊缝,根据标准 JB4730-2005,采用磁粉探伤(MT)检查未发现表面裂纹,采用 300EG-S3 型 X 射线机进行探伤检测,局部区域存在少量的小直径气孔,焊缝质量达到了 II 级标准,表明采用激光焊接可以获得满意的焊接质量。采用的激光焊接规范为激光功率:14 kW;焊接速度:0.8 m/min;侧吹气体 He 气流量:30L/min;离焦距:-2 mm^[8~11]。激光焊缝表面宏观形貌如图 1 所示,焊缝表面光洁,熔宽均匀一致,上表面宽度为 8 mm 左右,下表面宽度为 2 mm 左右。

表 1 X52 钢化学成分

Table 1 Chemical composition of X52 pipeline steel

Element	C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	V
Content /mass fraction%	0.13	0.34	1.36	0.009	0.006	0.017	0.013	0.027

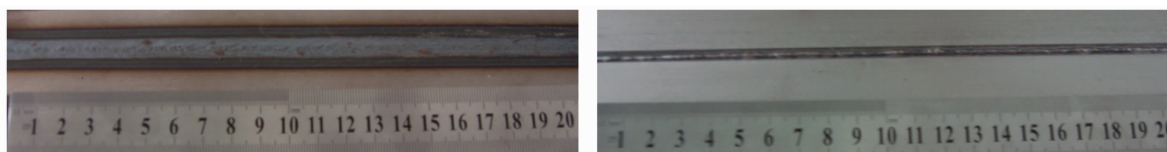


图 1 X52 管线钢激光焊缝形貌。(a) 正面焊缝; (b) 反面焊缝

Fig. 1 Bead of laser welded X52 pipeline steel. (a) The front bead; (b) the back bead

激光焊接工艺具有明显的优点,其一坡口加工量小,节省工时;其二由于焊接工艺参数少,导致焊接工艺调节简单,焊接过程稳定;其三焊缝内部缺陷少,形成的气孔直径也很小,对焊接质量的影响大大减弱^[6]。

3 焊缝区结晶特征

图 2 是激光焊接接头横断面宏观形貌。从图 2 可以看出,焊缝形状呈现典型的 Y 形,焊缝窄而深,这是由于对激光能量的吸收不同所造成的,上部受热大,冷却慢,下部受热小,冷却快,导致焊缝上部和

下部的结晶特性有所差异。

图 3 为 X52 管线钢焊缝的低倍金相组织,图 3(a)为上部焊缝中心低倍形貌,图 3(b)为下部焊缝中心低倍形貌。从图 2 和图 3 可以看出,焊缝上部形成柱状晶,柱状晶生长方向为沿散热最快方向,垂直于熔池凝固界面指向熔池表面。激光焊缝下部凝固组织与上部有所不同,散热最快的方向为垂直于焊缝,最初晶粒由两侧熔合线相向生长形成柱状晶,最后在焊缝中心处液体金属温度梯度较小,形成细小的等轴晶,可以使杂质元素和非金属夹杂物、显微缩松等缺陷弥散分布,因而能够显著提高力学性

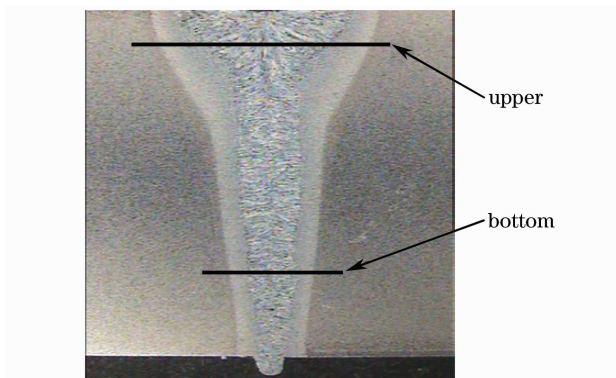


图 2 X52 管线钢焊接接头横断面宏观形貌
Fig. 2 Macrograph of laser welded X52 butt joint transverse section

能。焊接接头下部吸收能量少,冷却速度快,温度梯度大,容易产生较大的拉应力,形成裂纹,但是由于该部位形成的细小等轴晶增强了基体的韧性,有利于防止开裂^[12]。

4 焊接接头显微组织

X52 管线钢激光焊接接头的金相微观组织

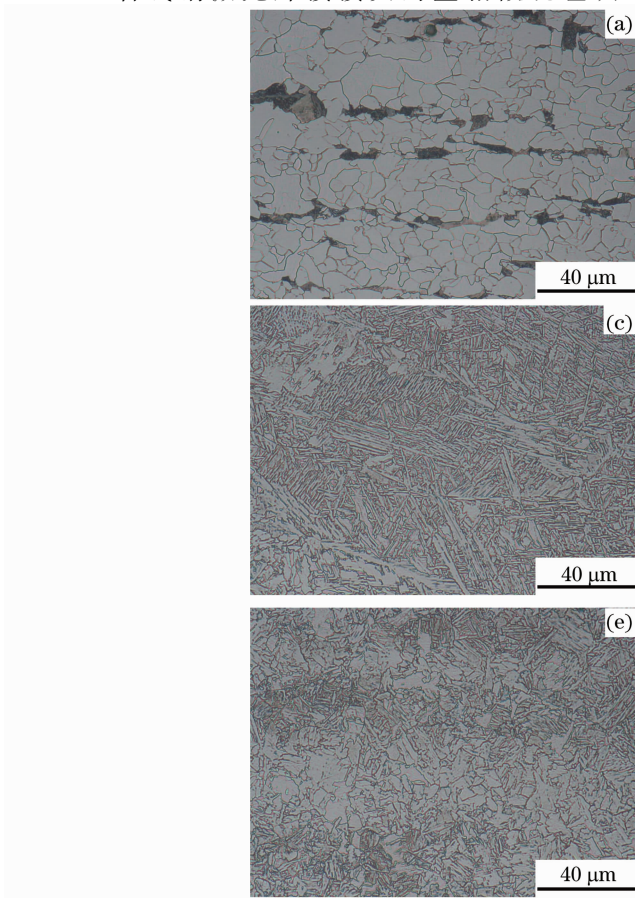


图 4 X52 管线钢接头的高倍金相组织
Fig. 4 Microstructure of laser welded X52 butt joint

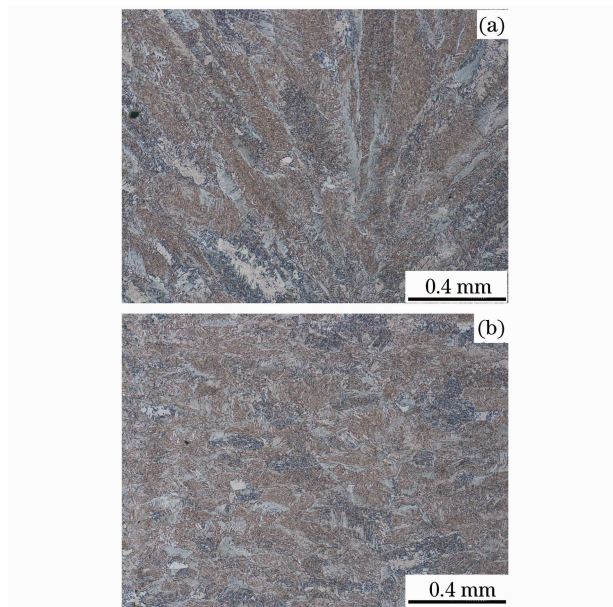


图 3 X52 管线钢焊缝的低倍金相组织
Fig. 3 Macrostructure of laser welded X52 seam
如图 4 所示,显微组织照片依次为母材(a)、焊缝(b)、熔合区(c)、过热区(d)、相变重结晶区(e)、不

完全重结晶区(f)。从图可见, X52 管线钢的母材组织为铁素体+珠光体; 焊缝组织由大量的针状铁素体、少量的细小先共析铁素体、粒状贝氏体和板条马氏体组成, 由于激光焊接的热输入小, 因而获得的塑性很好的针状铁素体组织比常规焊接方法细小得多, 这有利于提高焊缝金属的韧性和强度; 熔合区的组织为块状铁素体+针状铁素体+粒状贝氏体+板条马氏体; 过热区的晶粒比较粗大, 组织为板条马氏体+铁素体+粒状贝氏体; 相变重结晶区的晶粒比较细小, 组织为铁素体+珠光体+极少量粒状贝氏体; 不完全重结晶区的组织为铁素体+絮状细珠光体。

HAZ 由不同区域的组织构成, 每一区域的组织都受加热速度、峰值温度和冷却速度的影响。HAZ 的过热区部分晶粒粗大, 是焊接接头中最薄弱的环节, 但由于采用激光焊接, 该区域较窄, 相对其它电弧焊接方法, 晶粒也较小, 因而对焊接接头的整体性能影响较小^[13]。

表 2 焊接接头拉伸及弯曲性能

Table 2 Mechanical properties of laser welded butt weld joint

Code	Tensile test		Bend test (180°)		Charpy V-notch impact test A_{KV}/J (-20°C)											
	Tensile strength	Fracture location	Front bend	Back bend	Weld		Fusion zone			HAZ						
X52	R_m/MPa	Parent metal	No crack	No crack	1	2	3	Avg°	1	2	3	Avg°	1	2	3	Avg°
	480	metal	crack	crack	242	300	296	279	288	280	278	282	216	206	214	212

5.2 硬度测试试验

用显微维氏硬度计测量试样断面硬度, 焊接接头横断面及测量位置如图 2 所示, 硬度试验结果如图 5 所示。从图 5 中可知, 焊接接头的上部和下部的硬度分布是不同的, 接头上部的最大硬度在靠近熔合线的 HAZ 部位, 接头下部的最大硬度在焊缝中心附近, 而传统焊接方法的硬度最大值在 HAZ 部位, 硬度最大的部位淬硬倾向大, 往往容易导致裂纹的产生, 因而该焊接接头的焊缝下部需要引起重视, 容易出现裂纹等缺陷, 但是由于该接头的最大硬度在 270 HV 左右, 硬度不是很高, 从而该接头的冷裂纹敏感性较低, 焊接性较好。

焊接接头是一个组织性能不均匀体, 焊缝、热影响区和母材之间的强度和韧性存在不同程度的非匹配性, 这种非匹配性对整个结构的强度和断裂行为产生显著的影响, 采用激光焊接时这种非匹配性还表现在焊缝的上部和下部的组织性能的不均匀性, 但是由于激光焊接的焊缝和热影响区的范围比较窄, 相应的也在一定程度上减轻了这种非匹配性。

5 焊接接头力学性能测试与分析

焊接接头的力学性能是至关重要的, 对激光焊接的试样进行了焊接接头的抗拉强度、低温冲击韧性、弯曲、硬度测试等试验。

5.1 对接板拉伸、弯曲和冲击试验

因为激光焊的冲击试样没有专门的国家标准, 因此参考常规焊接冲击试样标准将焊接试样上下表面加工掉 3 mm, 然后加工成 10 mm×10 mm×55 mm 试样, 对试样腐蚀, 获得焊接接头宏观轮廓, 缺口位置一组试样开在焊缝中心, 一组试样开在熔合线位置, 第三组试样缺口位置开在 HAZ, 即熔合线外侧 0.8 mm。

表 2 分别给出了对接试板的拉伸、弯曲及低温冲击韧性测试结果, 各项性能均达到技术规范规定的标准。尤其注意的是冲击吸收功达到 200 J 以上, 说明韧性很高, 完全满足使用要求, 与目前的焊接方法相比要高出很多, 体现了激光焊接的优势^[14]。

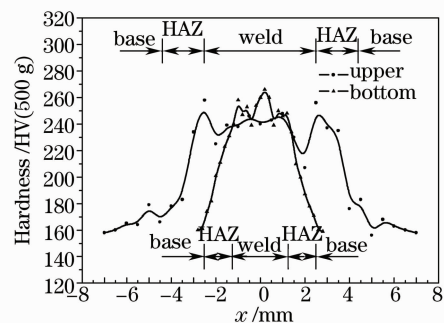


图 5 X52 管线钢焊接接头硬度分布

Fig. 5 Hardness distribution of laser welded X52 butt joint

5.3 讨论

X52 管线钢的激光焊焊接接头具有优异的低温冲击韧性, 其主要原因是:

1) 焊缝组织存在大量针状铁素体, 针状铁素体具有大角度晶界, 杂乱无章, 使裂纹在扩展过程中不断受到彼此咬合、相互交织分布的针状铁素体的阻碍, 导致裂纹扩展需要更多的能量, 并使扩展速度降低, 因而能够保证焊缝具有高的低温韧性;

2) 激光能量密度大,激光焊接时,加热快冷却快,使得 HAZ 的粗晶部位在高温停留时间短,大大地降低了加热时奥氏体的长大倾向,在随后的冷却过程中,相变产物尺寸减小,晶粒尺寸小,根据 Holl-etch 公式,材料的韧性和强度与晶粒的尺寸的负二分之一成正比,因而韧性和强度高;

3) X52 管线钢是一种含 Ti、Nb、V 微合金元素的,且与 N 一定比例的微合金钢,在激光快速加热时,熔合线和焊接热影响区粗晶区中的 Ti、Nb、V 的氮化物发生溶解,随后的快速冷却过程中,会在晶界析出大量细小弥散分布的 Ti、Nb、V 氮化物,这些氮化物一方面钉扎在晶界上,阻止晶粒长大,另一方面,根据 Lee 理论,细小的氮化物是针状铁素体的形核核心,氮化物愈细小,数量越多,铁素体的非自发形核核心就越多,所以激光焊接时,在熔合线和焊接热影响区粗晶区中会形成大量的针状铁素体,从而大大提高材料的韧性^[15]。

6 结 论

利用高功率的 CO₂ 激光焊接设备对 X52 管线钢进行焊接,并对焊接接头进行了力学性能测试,试验结果表明,激光焊接可以实现深熔焊接,在焊接厚板时,能够大大减少焊接道数。对于 16 mm 管线钢实现了单道焊双面成形焊接工艺,焊接速度快,焊接效率高;由于激光能量密度高,输入线能量低,导致 HAZ 窄,焊接接头晶粒细小,存在大量塑性很好的针状铁素体;焊接接头具有较高的力学性能,尤其是低温冲击韧性相当良好,焊接接头最大硬度位于焊缝下部,裂纹敏感性低。

参 考 文 献

- Li Helin. Developing pulse and prospect of oil and gas transmission Pipe[J]. *Welded Pipe and Tube*, 2004, **27**(6): 1~11
李鹤林. 油气输送钢管的发展动向与展望[J]. *焊管*, 2004, **27**(6): 1~11
- Mi Qiuzhan, Yu Yingzi, Wang Lesheng. Welding technology of long-distance oil and gas pipeline[J]. *Welding Technology*, 2006, **35**(1): 4~6
米秋占, 于英姿, 王乐生. 油气长输管道的焊接技术[J]. *焊接技术*, 2006, **35**(1): 4~6
- P. L. Moore, D. S. Howse, E. R. Wallach. Microstructures and properties of laser/arc hybrid welds and autogenous laser welds in pipeline steels[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2004, **9**(4): 314~322
- S. Webster, J. K. Kristensen, D. Petring. Joining of thick section steels using hybrid laser welding[J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2008, **35**(7): 496~504
- Yang Xichen, Wang Yu, Ying Chaolong *et al.*. Microstructure and Properties of High Power Laser Welding of Ship Steel Plate [J]. *Chinese J. Lasers.*, 2007, **34**(6): 866~870
杨洗陈, 王 雨, 应朝龙 等. 高功率激光焊接船板的组织性能 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 866~870
- Chen Jimin, Xu Xiangyang, Xiao Rongshi. *Laser Modern Manufacture Technology* [M]. Beijing: National defense Industry Press, 2007, 82~83, 108
陈继民, 徐向阳, 肖荣诗. *激光现代制造技术* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007, 82~83, 108
- Chen Yanbin. *Modern Laser Welding Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2005, 2~3
陈彦斌. *现代激光焊接技术* [M]. 北京: 科学出版社, 2005, 2~3
- Wang Hong, Shi Yaowu, Gong Shuili *et al.*. Effect of assist gas flow on the gas shielding during laser deep penetration welding [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, **184**(1~3): 379~385
- M. Hamadou, R. Fabbro, F. Coste *et al.*. Experimental study of CO₂ laser welding inside a groove - Application to high thickness laser welding [J]. *Journal of Laser Applications*, 2005, **17**(8): 178~182
- K. Y. Benyounis, A. G. Olabi, M. S. J. Hashmi. Effect of laser welding parameters on the heat input and weld bead profile [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, **164-165**: 978~985
- K. Manonmani, N. Murugan, G. Buvanasekaran. Effects of process parameters on the bead geometry of laser beam butt welded stainless steel sheets [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, **32** (11-12): 1125~1133
- Li Yanxiang, Wu Aiping. *Principle of materials processing* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005, 119~123
李言祥, 吴爱萍. *材料加工原理* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005, 119~123
- Zhang Wenyue. *Welding metallurgy* [M]. China Machine Press, 1996, 185~188
张文钺. *焊接冶金学* [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996, 185~188
- M. Kocak, J. dos Santos, S. Riekehr. Trends in laser beam welding technology and fracture assessment of weld joints [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2001, **6**(6): 347~350
- Zhang Xiaoli, Zhuang Chuanjing, Ji Linggang *et al.*. Structure Feature and Strength-Toughness of High Grade Pipeline Steels [J]. *Special Steel*, 2006, **27**(6): 27~29
张小立, 庄传晶, 吉玲康 等. 高钢级管线钢的组织特征和强韧性 [J]. *特殊钢*, 2006, **27**(6): 27~29