

窄间隙激光填丝焊焊接材料对比分析

吴晔华^{1, 2}, 王晓娜^{1, 2}, 闫灿灿^{1, 2}, 李竹渊^{1, 2}, 杨晓宁^{1, 2}, 张彤^{1, 2}, 胡玉^{1, 2}, 陈鹏^{1, 2}

1. 中国核工业二三建设有限公司 北京 101300

2. 中核集团高效智能化焊接重点实验室 北京 101300

摘要: 针对核用TP316LN不锈钢厚壁管道, 采用8种不同批号的不锈钢焊丝进行窄间隙激光填丝焊接。在激光焊接参数保持一致的情况下, 通过对焊接接头力学性能、微观组织进行分析, 探索不同化学成分的焊接材料对焊缝质量的影响, 从而得出窄间隙激光填丝焊焊接核用TP316LN不锈钢厚壁管道时, 焊接材料选用的基本原则和规律。

关键词: 激光填丝焊; 焊接材料; 化学成分; 力学性能; 微观组织

Comparative analysis of narrow gap laser wire filling welding materials

WU Yehua^{1, 2}, WANG Xiaona^{1, 2}, YAN Cancan^{1, 2}, LI Zhuyuan^{1, 2}, YANG Xiaoning^{1, 2},

ZHANG Tong^{1, 2}, HU Yu^{1, 2}, CHEN Peng^{1, 2}

1.China Nuclear Industry 23 Construction Co., Ltd., Beijing 101300, China

2.China Nuclear Power Group Key Laboratory for Efficient and Intelligent Welding, Beijing 101300, China

Abstract: For nuclear TP316LN stainless steel thick walled pipelines, 8 different batch numbers of stainless steel welding wires are used for narrow gap laser wire filling welding. By analyzing the mechanical properties and microstructure of the welded joint while maintaining consistent laser welding parameters, this study explores the influence of welding materials with different chemical compositions on the quality of the weld seam, and thus derives the basic principles and rules for selecting welding materials for laser wire filling welding.

Keywords: laser wire filling welding; welding materials; chemical composition; mechanical properties; microstructure

1 序言

随着第三代核电站技术的大力发展, 大型厚壁构件的种类和数量增多, 对焊接技术提出了更高的要求, 其中核电站主管道的安装、焊接质量水平最为重要^[1, 2]。近年来, 窄间隙自动焊领域不断涌现出新的焊接方法, 其中窄间隙激光焊技术发展最为迅速, 该技术综合了激光焊及窄间隙焊接技术的优

点, 选用小角度的坡口可以有效减少填充材料, 在降低焊接成本的同时也提高了焊接效率^[3, 4], 非常适用于核电主管道等厚壁构件的焊接。

焊接质量直接关系到核电站设备的寿命和安全, 焊接材料又对焊接质量有着至关重要的影响。选择与管道材质、力学性能、化学成分相匹配, 并能满足激光焊接特性的焊接材料, 因此在厚壁构件

第一作者: 吴晔华, 高级工程师, 主要从事核电建造焊接技术研究工作, E-mail: Jolin_wu55@163.com。

窄间隙激光焊接技术中显得尤为重要和关键。

2 试验材料及方法

采用窄间隙激光填丝焊接的方式实现核用TP316LN不锈钢管道的焊接，开展焊接接头的显微组织结构和力学性能分析，通过对比分析使用不同成分配比的焊接材料得到的焊接接头的组织及性能，揭示不同化学成分焊接材料对焊接接头综合性能的重要影响，从而优化选择适用于TP316LN不锈钢管焊接的填充材料，提高焊接接头的力学性能。

2.1 试验材料

本试验使用母材为TP316LN不锈钢管（规格为 $\phi 425\text{mm} \times 30\text{mm}$ ），其供货态为正火+回火态。焊接材料选用2个不同厂家、8个不同批号的ER316L不锈钢焊丝。

2.2 试验方法及参数

试验采用武汉锐科光纤激光技术股份有限公司生产的RFL-C12000XZ光纤激光器，坡口形式为单面钝边的窄间隙U形坡口。焊接过程中首先确定激光填丝焊试验变量，其中关键变量包括激光功率、焊接离焦量、焊接速度，次要变量包括激光头倾角、气体种类、气体流量。结合以往的工艺开发经验，优先对次要变量进行锁定，为保证焊接过程的稳定及飞溅量控制，激光头角度应与焊接面垂直^[3]，保护气种类及流量直接影响焊缝金属过渡及表面保护效果，因此选用纯度为99.99%的N₂，气体流量正面一般控制在150~200L/min，详细焊接参数见表1。

表1 窄间隙激光焊接参数

焊道类型	激光功率/kW	离焦量/mm	焊接速度/(m/min)	送丝速度/(m/min)	送丝角度/(°)	保护气流量/(L/min)
打底层	4~6	-3~2	0.7~1	4~8	30~60	120~150
填充层	5~8	8~10	0.4~0.7	5~10	30~60	120~150
盖面层	5~8	8~10	0.2~0.5	4~8	30~60	120~150

3 试验结果分析

3.1 母材及焊丝成分分析

焊缝金属是由熔化的焊丝与部分熔化的母材混合后凝固形成的，因此焊缝金属的成分直接受母材与焊丝成分影响。

由于TP316LN不锈钢是一种奥氏体钢，其焊缝组织主要为奥氏体，镍当量是反映不锈钢焊缝金属组织奥氏体化程度的指标，奥氏体形成能力= $w_{\text{Ni}} + 30w_{\text{C}} + 30w_{\text{N}} + 0.5w_{\text{Mn}} + 0.25w_{\text{Cu}}$ ，从母材及8组焊丝激光填丝焊所得焊缝的成分可以发现，20-6555和543872两个牌号的焊丝C含量较小，直接影响焊缝在凝固及后续相变过程中C原子的扩散；14-6066和15-6256的Cr、Ni、Mo含量较高，这3种元素是影响Ni当量的主要元素，会对奥氏体晶粒尺寸产生直接影响；14-6066和14-6746两个牌号的焊丝N含量较高，这可能导致在焊缝中因产生更多的氮化物而钉扎在晶界处，从而影响焊缝性能和晶粒尺寸。9036焊丝中的Si含量最高可达0.65%，在提高焊缝金属强度的同时能够促进铁素体形成。

母材及8个不同批号焊接材料的化学成分分别见表2、表3。

表2 母材化学成分（质量分数）（%）

型号	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	N
不锈钢管TP316LN	0.028	1.991	0.992	0.029	0.041	17.27	11.32	2.13	0.12

3.2 微观组织分析

8个不同批号焊丝所得焊缝金属经打磨抛光后，用4:1的王水腐蚀后在光学显微镜下观察，微观组织主要为奥氏体，部分试样含有少量铁素体组织，但奥氏体晶粒的尺寸在不同批号焊丝所得焊缝金属的试样中略有不同，如图1所示。由图1可知，14-6066批号和15-6256批号焊丝的奥氏体晶粒尺寸都

表3 8个不同批号焊接材料化学成分（质量分数）（%）

型号	厂家	批号	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo
ER316L	ARCOS	543872	0.01	1.55	0.72	0.0026	0.017	18.63	13.78	2.15
	四川大西洋	22-9036	0.019	1.84	0.53	0.013	0.0042	19.5	13.05	2.43
		14-6066	0.029	1.69	0.46	0.0048	0.0039	19.82	12.45	2.87
		14-6746	0.024	1.71	0.46	0.0034	0.0032	19.5	12.74	2.75
		15-6256	0.022	1.72	0.42	0.0048	0.0044	19.79	13.14	2.59
		15-6251	0.022	1.72	0.42	0.0039	0.0036	19.79	13.12	2.6
		23-7412	0.019	1.81	0.53	0.015	0.02	18.74	11.83	2.3
		20-6555	0.013	2.09	0.54	0.012	0.018	19.09	12.47	2.38

较大,其中14-6066批号焊丝的奥氏体组织为蠕虫状形态,且该批号焊丝所得焊缝金属中几乎无法产生铁素体组织,这意味着当焊缝金属承受载荷和冲击时该部位容易产生变形,因此强度较低;且较大的晶粒尺寸会使裂纹更容易产生穿晶的脆性断裂,因此韧性较差。15-6251批号焊丝对应焊缝金属中的奥氏体普遍呈树枝状,且长径比较大,其作用类似于低碳钢中的针状铁素体组织,能够有效提升冲击性能。23-7412批号焊丝的奥氏体长径比较小,组织取向分布较为复杂,因此位错滑移方向较多,在承受冲击时表现优异。22-9036批号和14-6746批号焊丝的奥氏体晶粒尺寸较小,其中14-6746批号焊丝的平均冲击吸收能量高达295.3J。由著名的Hall-Petch(霍尔-佩奇)公式可知,晶粒尺寸较小的金相往往能够以细晶强化的方式使强度提高,同时较小晶粒的试样在面对冲击时由于晶界密度较多,因此滑移可沿多个方向进行,这使得晶粒度较小的焊缝金属

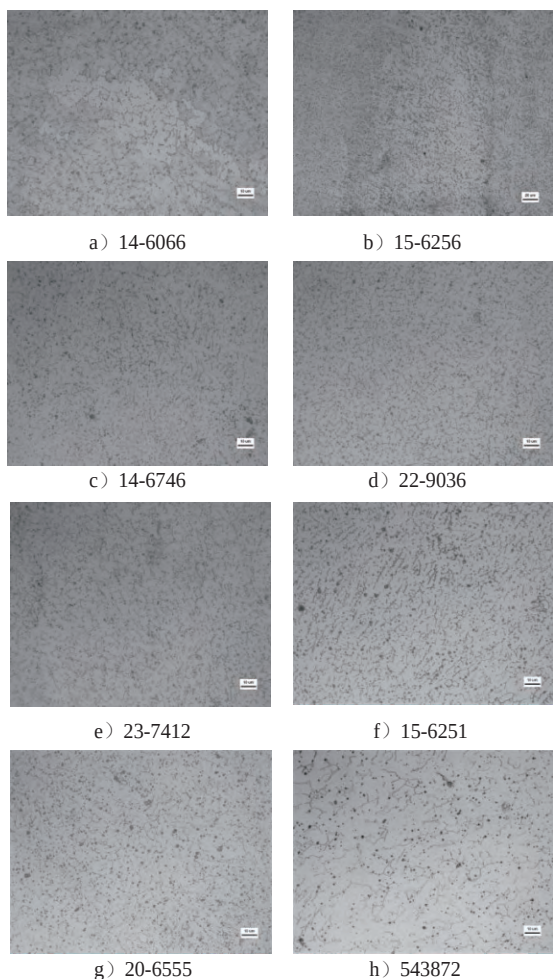


图1 光学显微镜下微观组织形貌

会获得较优的抗冲击性能,这一说法在14-6746批号试样上得到了很充分的验证。

同时,对8个不同批号焊丝所得焊缝金属的奥氏体晶粒尺寸进行了测量分析,如图2所示。543872批号焊丝对应的焊缝金属奥氏体晶粒尺寸位于中间水平,其在承受一定载荷时能够有效将变形分散至多个晶粒,且不会因为晶粒尺寸过大而发生脆性断裂,其奥氏体晶粒形态为枝晶状和椭球状,枝晶形态的奥氏体在沿垂直于枝晶生长方向具有较高的抗冲击性能,强度级别较高,椭球状的奥氏体晶粒位错滑移方向较多,因此在韧性方面也表现良好。

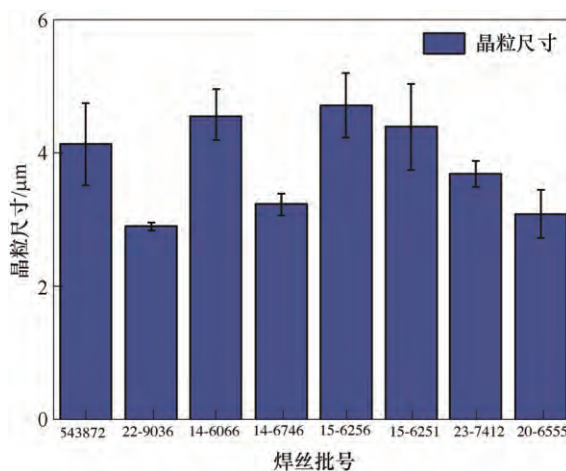


图2 奥氏体晶粒平均尺寸

3.3 宏观组织形貌

图3所示为543872批号焊丝对应的焊接接头的截面宏观形貌,共焊接了22道,其中打底层焊道有7道,填充层焊道有8道,盖面层焊道有7道,焊缝宽度约为3mm。由图3可知,窄间隙激光填丝焊接接头焊缝成形良好,无损检测结果表明,焊接接头没有明显的气孔、未熔合、裂纹等缺陷。



图3 焊接接头的截面宏观形貌

3.4 焊缝金属中的夹杂物分析

不同批号的焊丝所得焊缝金属中均存在夹杂物,如图4所示。其中,批号为14-6746、15-6251、543872及22-9036的夹杂物大多存在于奥氏体晶粒内部,这些夹杂物并不能起到有效钉扎晶界及阻碍晶粒生长的作用。批号20-6555和23-7412的夹杂物大多存在于奥氏体晶界处,阻碍了奥氏体晶粒的生长,因此奥氏体晶粒的尺寸也相应较小。为了探究其限制奥氏体晶粒生长的本质作用,对这些夹杂物进行了成分分析。

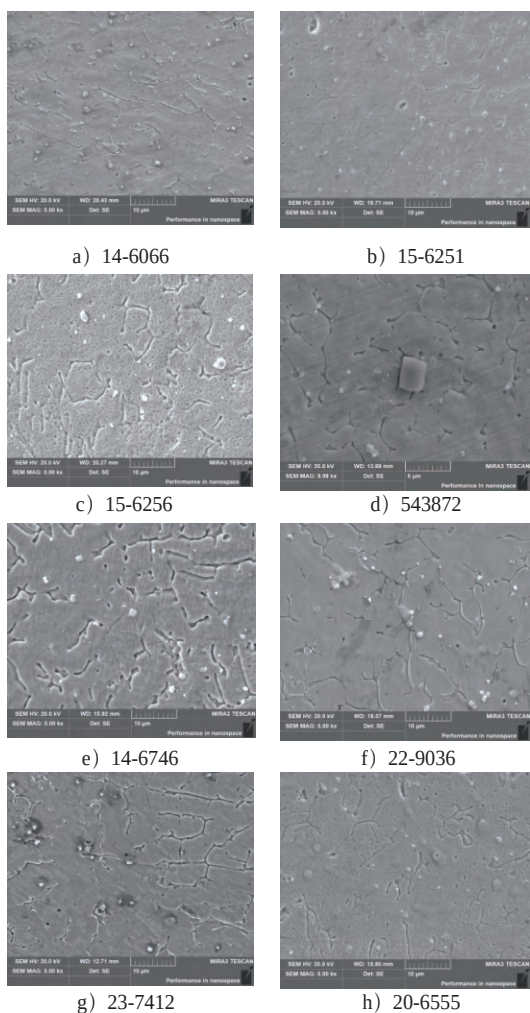


图4 不同批号焊丝对应焊缝金属中的夹杂物形态及位置

批号543872焊丝激光焊接所得焊缝金属组织如图5所示,夹杂物分布如图4d所示。由图5可发现,焊缝金属中的夹杂物既可以存在于奥氏体晶粒内部,也可以存在于奥氏体晶界处钉扎晶界,大部分的夹杂物尺寸 $<3\mu\text{m}$ 。影响奥氏体晶粒尺寸的主要是存在于奥氏体晶界处的夹杂物,这些部位的夹杂

物在奥氏体晶粒生长的过程中成为阻碍晶粒生长的因素,这也直接影响了焊缝金属的强度,较小晶粒度的焊缝金属晶界密度更大,因此在受到冲击和承受载荷时能够有效利用滑移抵消,变形能够分散更多的晶粒,相对而言,奥氏体晶粒尺寸较小的焊缝金属表现出良好的强度和韧性,也是细晶强化的一种体现。另外,在合金钢焊缝的熔池凝固过程中,一些碳氮化物会从基体中析出,其作用不同于低碳钢焊缝中的氧化物等类型的夹杂物,它们只是稳定地存在于晶粒内部或者钉扎于晶界处,通常称这类夹杂物为沉淀相或第二相。对于存在于晶界处的夹杂物,当焊缝金属受到冲击时,晶界部位的位错在发生滑移时会遇到第二相粒子,位错需要绕过或切过第二相,因此第二相阻碍位错运动,使材料强度得以提高。能谱分析得到的批号543872焊缝沉淀相元素分布如图6所示。由图6可知,绝大部分奥氏体钢中的沉淀相为TiN,还有其他少部分的碳化铬等碳化物。

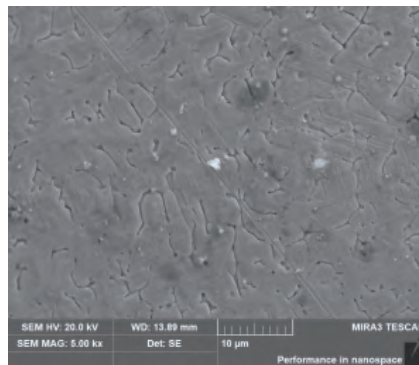


图5 543872批号焊缝金属组织

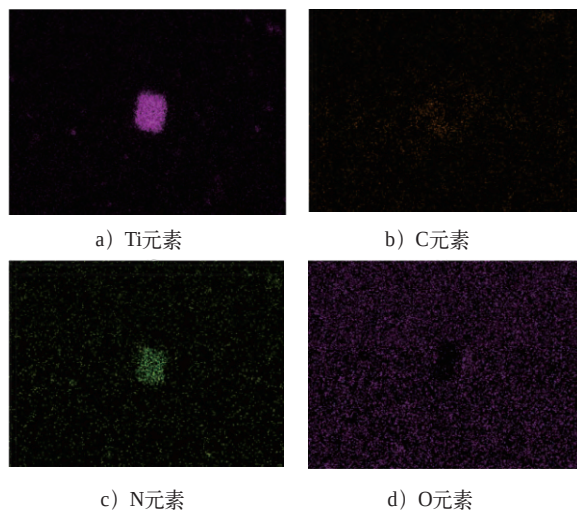


图6 543872批号焊缝沉淀相元素分布

3.5 力学性能分析

对8个不同批号焊丝的窄间隙激光焊焊接接头分别进行了板状拉伸和焊缝室温冲击试验,试验结果见表4。从性能参数上来看,543872批号焊丝所得焊缝金属的抗拉强度和室温冲击吸收能量整体表现均优于其他批号焊丝,且强韧性匹配度较高,在获得较高抗拉强度的同时室温冲击性能也表现良好。这主要是由于该批号焊丝的镍当量高达15.71%,奥氏体组织最为稳定。反观14-6066批号焊丝所得焊缝金属的抗拉强度和室温冲击性能都比较低,虽然14-6066批号焊丝的镍当量并不低,但由于其较高的N含量导致焊缝金属中存在较多尺寸较大的氮化物,且不是起到钉扎晶界的作用,而是作为裂纹源对焊缝金属的力学性能起到了负面作用,因此导致其强度和韧性都较低。

综合来看,543872批号焊丝对应的焊缝金属不仅获得了更优的微观组织,其强度和韧性两个力学性能指标都比较高。

表4 8个不同批号焊接材料所得焊接接头力学性能

型号	厂家	批号	抗拉强度 /MPa	室温冲击吸收能量 /J
ER316L	ARCOS	543872	615、622 (618.5)	302、309、305 (305.3)
	四川 大西洋	22-9036	606、601 (603.5)	289、288、299 (292)
		14-6066	582、571 (576.5)	278、281、284 (281)
		14-6746	590、588 (589)	298、299、289 (295.3)
		15-6256	608、592 (600)	296、288、290 (291.3)
		15-6251	605、589 (597)	298、279、301 (292.7)
		23-7412	601、595 (598)	270、295、285 (283.3)
		20-6555	585、594 (589.5)	297、287、266 (283.3)

注: () 内为平均值。

4 结束语

14-6066批号和15-6256批号焊丝在Ni含量和所得焊缝的奥氏体晶粒尺寸上均表现相近,这说明镍当量在影响奥氏体晶粒尺寸上充当着重要角色,但

二者焊缝金属的力学性能却相差甚远,这可能是与N含量水平不同有关。543872批号焊丝的强度和韧性是所有焊丝中所得焊缝金属中综合表现最好的,且获得了最佳的微观组织形态,其原因是Si增加了铁素体形成的能力,且能够有效提高强度。因此,本研究得出的结论是在TP316LN的焊缝中较高的N含量可能会产生尺寸较大的氮化物,而成为潜在的裂纹源危害焊缝,而不是钉扎晶界细晶强化改善焊缝金属的强度,因此在选择TP316LN不锈钢的激光焊焊接材料时应遵循以下原则。

1) 当焊丝中N含量相差不多时,优先选择低N含量的焊丝。

2) 焊丝中在一定范围内含有较多的Si将会提升焊缝金属的铁素体形成倾向,能够为韧性的提高带来积极影响。

3) TP316LN不锈钢焊缝金属韧性要求较高,选用焊接材料时需要对焊接材料的低温性能、焊接工艺性能、焊接材料成本、设计要求及运行工况进行综合考虑,在保证质量的前提下,避免因对焊接材料性能要求过高而增加成本。

参考文献:

- [1] 徐大懋. 加速发展核电——中国能源结构调整的必由之路[J]. 中国能源, 2005, 27 (8) : 6-9.
- [2] LIU J, XU G, REN L, et al. Defect intelligent identification in resistance spot welding ultrasonic detection based on wavelet packet and neural network[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 90 (9-12) : 1-8.
- [3] 李挺. 窄间隙激光填丝焊接系统及其焊接性能的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.
- [4] 林三宝, 蔡笑宇, 季相儒. 厚板窄间隙焊接技术研究进展[J]. 机械制造文摘 (焊接分册), 2017 (5) : 33-38.
- [5] 秦国梁. 窄间隙气体保护焊接工艺发展与应用[J]. 金属加工 (热加工), 2022 (9) : 8-20.

MW 20240116