

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.04.15

氢对TIP-TIG焊接LNG储罐用9Ni钢接头低温韧性的影响

郭 鹰, 杨尚玉*, 周 聪, 朱 雷

海洋石油工程股份有限公司, 天津 300462

摘 要: 虽然热丝TIG焊同TIG焊相比明显地提高了熔敷速度, 但与埋弧焊相比仍有不足。在热丝TIG焊的保护气氛中加入氢气可以进一步提高熔敷效率, 但氢也会恶化接头性能, 导致氢裂纹等缺陷。本研究旨在探究氢气对TIP-TIG焊接LNG储罐用9Ni钢接头性能和低温韧性的影响, 并确定氢气保护气氛中最佳氢气比例。采用不同比例的氢氩混合气体进行TIP-TIG焊接, 并使用光学显微镜、扫描电子显微镜和万能试验机对焊接接头的显微组织和力学性能进行分析。通过夏比V型缺口冲击试验和落锤撕裂试验(DWTT)评估接头的低温韧性。结果表明, 在保护气氛中加入氢气可以提高焊接效率和低温韧性, 但存在最佳比例, 98%氩气+2%氢气是最佳比例, 此时接头低温韧性达到最高。氢气的加入导致焊缝析出相中Mo含量显著下降, Mo元素大量固溶在基体内, 增强晶界凝聚力, 阻碍裂纹的扩展, 其断口处存在大而深的韧窝和较高的解理台阶, 使其低温韧性达到最高; 而随着氢含量增加到8%后, 在焊缝生成了微气孔, 破坏了材料的连续性, 导致焊缝低温冲击吸收能量降低, 从而损害熔敷金属的低温韧性。

关键词: 9Ni钢; TIP-TIG焊; 氢气; 低温韧性; 熔敷效率

中图分类号: TG457.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)04-0113-09

Effect of Hydrogen on Low Temperature Toughness of TIP-TIG Welded 9Ni Steel Joints for LNG Storage Tanks

GUO Ying, YANG Shangyu*, ZHOU Cong, ZHU Lei

Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjing 300462, China

Abstract: Although hot wire TIG welding significantly improves the deposition rate compared with TIG welding, it is still inadequate compared with submerged arc welding. Adding hydrogen to the shielding atmosphere of hot wire TIG welding can further improve the melting efficiency, but hydrogen can also deteriorate the joint properties and lead to defects such as hydrogen cracking. In this paper, the effect of hydrogen on the joint properties and low-temperature toughness of 9Ni steel for TIP-TIG (TT welding) welded LNG storage tanks was investigated, and the microstructure and mechanical properties of the joints were analyzed by optical microscope, scanning electron microscope and universal testing machine. The results show that the welding efficiency and low-temperature toughness of TT welding with hydrogen in the protective atmosphere is increased, and the optimal ratio of the gas mixture is 98% argon + 2% hydrogen, and under 98% argon + 2% hydrogen protective gas, the Mo content in the precipitation phase of the weld decreases significantly, and a large amount of Mo is solidly dissolved in the matrix, and the increase of the Mo element in the matrix enhances the cohesion of the grain boundaries, and plays a hindering role in the expansion of the crack. Its fracture at the presence of large and deep tough nest and high deconvolution step, so that its low temperature toughness to reach the highest; and with the increase in hydrogen content to 8%, in the weld generated microporosity destroys the continuity of the material, resulting in a reduction in the weld low-

收稿日期: 2024-04-08 修回日期: 2024-11-26

作者简介: 郭 鹰(1971—), 男, 硕士, 主要从事非晶态合金、海洋石油工程、液化天然气工程的先进焊接技术研发及应用。

通讯作者: 杨尚玉(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事焊接技术和项目管理工作。E-mail: ysy1981@126.com。

temperature impact absorbed energy, which impairs the low-temperature toughness of the molten metal.

Keywords: 9Ni steel; TIP-TIG welding; hydrogen; low temperature toughness

引用格式:郭鹰,杨尚玉,周聪,等. 氢对 TIP-TIG 焊接 LNG 储罐用 9Ni 钢接头低温韧性的影响[J]. 电焊机, 2025, 55(4): 113-121.

Citation: GUO Ying, YANG Shangyu, ZHOU Cong, et al. Effect of Hydrogen on Low Temperature Toughness of TIP-TIG Welded 9Ni Steel Joints for LNG Storage Tanks[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(4): 113-121.

0 引言

随着世界能源加速向多元化、低碳化转型,液化天然气(LNG)因其低污染、高能量的特点,在交通、电力等多个领域的应用规模迅速扩大^[1-2],这也推动了全球液化天然气市场的需求呈快速增长趋势^[3-5]。LNG 储罐作为储存和运输 LNG 的关键设备,其建造技术的发展备受关注。9Ni 钢以其高强度、超低温性能好和焊接性好等诸多优点,已被广泛运用于 LNG 储罐的建造中^[6-8]。目前, LNG 储罐内罐的焊接主要采用焊条电弧焊和埋弧焊,尽管 TIG 焊具有接头质量高、低温韧性好的优点,但较低的熔敷效率限制了其在大型 LNG 储罐建造中的采用。为了克服这一限制,奥地利学者 Ms. Siegfried Plasch 提出了全自动 TIP-TIG 焊(TT 焊)技术,该技术使用 TIG 焊的电源,将人工送丝改为机械抽拉式振动送丝,并添加了热丝系统,通过热丝将送进熔池端的焊丝加热到预定温度,增大熔敷量的同时也提高了焊接效率^[9]。郭鹰等人^[10]已经将这种焊接技术用于 LNG 储罐的焊接,发现 TT 焊接不仅不需要清洁焊道,而且由于 TT 焊自动化水平较高,显著提高了焊接效率。采用窄间隙坡口的 TT 焊接可将所需填充金属量减少 50% 以上,在焊接质量上具有显著的优势,在一定程度上可替代埋弧焊成为 LNG 储罐焊缝焊接新技术。

为了推动 TT 焊在 LNG 储罐中的应用,还需要进一步提高 TT 焊的熔敷效率。在惰性保护气氛中加入氢气可以改变保护气体的导热性和化学反应等性质,从而增强电弧的传热效率,提升熔敷效率。Huang 等^[11]研究了 GTAW 过程中使用活化助焊剂和 Ar-H₂ 混合气体对奥氏体不锈钢焊接的影响,发现 Ar-H₂ 混合气体能为工件提供更均匀的热输入,同时增加电弧电压,有利于增大熔池中熔化材料的体积和焊缝的深宽比。刘政军等^[12]模拟了 Ar 与 H₂ 混

合气体保护下 GTAW 的电弧特性,并研究了纯氩和氩-氢混合气体保护下电弧的阳极热输入,结果表明,随着氢气的加入,电弧的温度、流速、电势和电流密度等明显增大,氩-氢弧的阳极热输入高于纯氩弧,在一定程度上提高了焊接效率。Anbarasan 等^[13]采用纯氩和氩-氢保护并同时改变流量,在连续脉冲的 GTAW 下研究了 Inconel 718 焊缝形貌的影响,发现氩氢气体保护下的焊缝面积、宽度和熔深均有较大增加,得到了无氧化的美观焊缝,同时熔池的流动性也得到了提高。

但也有许多研究发现,在不锈钢、镍铜合金和镍基合金的焊接过程中加入氢气会导致氢裂纹缺陷的产生^[14]。Maroef^[15]等采用高含量的氢来焊接铁素体钢时,在其焊缝中发现了氢致裂纹。陈富强^[16]通过电化学充氢、氢渗透实验等方法,研究了 SA516Gr70 容器钢板的氢致裂纹敏感性,结果表明,随着进入钢中的氢含量增加,SA516Gr70 容器钢板诱发氢致裂纹的程度增大。当金属的氢含量达到 0.8×10^{-4} mass 时,超高强度钢的阈值应力强度低至平面断裂韧性的 10%,容易在材料内部发生严重的氢脆,导致材料的性能退化^[17]。

从以上研究可以看出,氢气的加入对于提高熔敷效率具有积极作用,但也可能恶化接头性能,甚至产生氢致裂纹等缺陷。为了研究氩保护气氛中加氢对 9Ni 钢接头性能及低温韧性的影响,本文通过改变保护气氛中氢的含量,研究了焊缝接头力学性能和落锤冲击韧性等,研究结果对 9Ni 钢的高效焊接具有指导意义。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

试验材料采用鞍钢生产的 X7Ni9 钢板,供货状态为淬火+回火(QT),板厚为 15.6 mm,其化学成分

和力学性能分别如表1、表2所示。

表1 X7Ni9钢的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical Composition of X7Ni9 steel (wt. %)

C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb
0.052	0.76	0.004	0.0001	0.18	0	9.34	0.01	0	0.014

表2 X7Ni9钢的力学性能

Table 2 Mechanical properties of X7Ni9 steel

拉伸性能			-196℃夏比V冲
R_{el}/MPa	R_m/MPa	$\delta/\%$	击功 A_{kv}/J
676	714	24.5	186

9Ni钢经过热处理后在室温下的组织主要为板条马氏体和少量的残余奥氏体,残余奥氏体相有较高的低温稳定性,对钢的低温韧性有很大影响。ERNiCrMo-4焊丝和9Ni钢的线膨胀系数十分接近,可有效避免因热膨胀产生的热应力;另外ERNiCrMo-4焊条焊接9Ni钢时,焊缝金属为奥氏体组织,具有良好的低温韧性^[18];因此熔敷金属选用直径为1.0 mm的ERNiCrMo-4焊丝,其化学成分和力学性能分别如表3、表4所示。

表3 ERNiCrMo-4焊丝化学成分(质量分数, %)

Table 3 Chemical composition of ERNiCrMo-4 wire (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Fe	W	Cu	Ni
0.01	0.01	0.54	0.005	0.001	15.55	16.3	5.52	13.2	—	58.76

表4 ERNiCrMo-4焊丝力学性能

Table 4 Mechanical properties of ERNiCrMo-4 welding wire

试验温度	屈服强度	抗拉强度	伸长率	冲击吸收功
/℃	/MPa	/MPa	/%	/J
-196	513	750	41	98, 99, 95

1.2 试验方法

采用全自动TT焊对LNG储罐用9%Ni钢进行立焊缝焊接。TT焊工作原理如图1所示,它在TIG焊的基础上改进,使用了TIG焊的电源,将人工送丝改为机械抽拉式振动送丝,通过热丝源将送进熔池端的焊丝加热到预定温度,增大了熔敷量,提高焊接效率。较低的热输入量加上焊丝对熔池的搅拌作用,进一步提高了焊接质量。TT焊在焊接时采用独特的钟摆技术,钟摆角度在±20°内,钟摆方式可使熔池与坡口侧壁充分接触,从而降低侧壁熔合不良的可能性,进一步提高接头质量^[19-20]。

1.3 焊接工艺

试板尺寸为1 200 mm×400 mm×15.6 mm。试

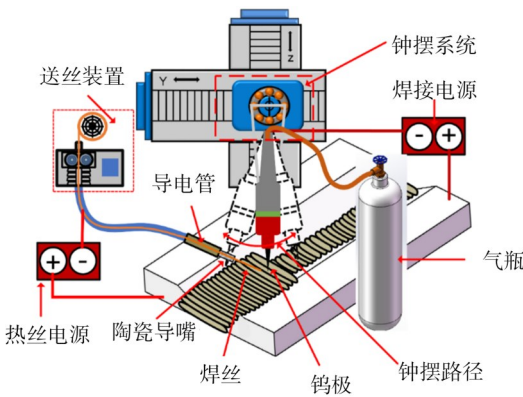


图1 TIP-TIG焊原理示意

Fig. 1 Schematic diagram of TIP-TIG welding principle

样采用TIP-TIG进行焊接,焊接时采用对称的双面半U形坡口,如图2所示。TT焊时,需背面加装与焊接机头同步的气体保护装置,焊接时层间温度均控制100℃以内,焊接参数如表5所示。其中热输入计算公式为:

$$Q=\frac{\eta\times U\times I}{v\times 1000}$$
(1)

式中 Q 为单位长度焊缝的热输入量(单位:kJ/mm); η 为热效率系数; I 为焊接电流(单位:A); U 为焊接电压(单位:V); v 为焊接速度(单位:mm/s)。

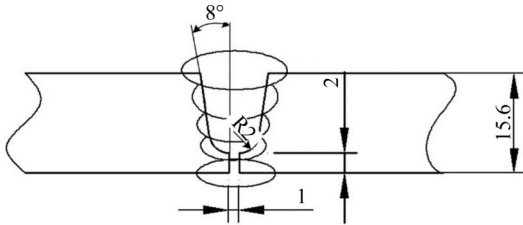


图2 坡口示意

Fig. 2 Schematic diagram of groove

试验根据EN1043-1标准,对纯氩和不同氢含量保护下的TT焊进行了低温冲击试验,包括夏比V型缺口冲击试验和落锤撕裂试验(DWTT),试样尺寸分别为10 mm×10 mm×55 mm和15 mm×76 mm×305 mm。

采用线切割方法截取焊后试样,依次用400#、800#、1200#、2000#、3000#的水磨砂纸进行打磨,随后采用1 μm的金刚石抛光膏抛光,直至试样在光学显微镜下无划痕。然后对抛光的试样进行电解腐蚀:焊缝电解腐蚀条件为电压6 V,电解液为10%草酸溶液,腐蚀时间约8 s;母材腐蚀条件为4%硝酸酒

表5 焊接参数
Table 5 Welding parameters

试样编号	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /mm·min ⁻¹	送丝速度 /m·min ⁻¹	钟摆角度 /(°)	左右停 摆/s	摆动速度 /(°·s ⁻¹)	热输入 /kJ·mm ⁻¹	备注
纯 Ar	200~240	14~16	80~100	2.38	13	0.7	130	0.95	打底
	340~360	14~17	160	2.62	12~14	0.6	100	1~1.32	填充
	200~220	12~16	200~250	2.53	20	0.7	50	0.4~0.44	盖面
98%Ar+2%H ₂	190	15~18	120	2.47	12	0.4	130	0.95~1	打底
	240	18~22	130	2.8~3.85	12~18	0.5	130	1.2~1.6	填充
	190	15~19	110~120	2.93	17	0.25	30	1.02~1.1	盖面
95%Ar+5%H ₂	200	17~20	120	2.47	12	0.4	130	1.1~1.15	打底
	220~253	16~20	130~150	2.8~4.4	15~17	0.5	150	0.9~1.7	填充
	180	18~19	110~120	2.57	17	0.25	30	0.9~1.2	盖面
92%Ar+8%H ₂	200	18~20	120	3.06	13	0.4	130	1.1~1.2	打底
	190~240	18~21	110~160	2.8~4.1	15~22	0.5	130	0.8~1.4	填充
	180	18~21	110~120	2.67	17	0.25	30	0.9~1.1	盖面

精溶液,腐蚀时间约 15 s。使用高速摄影对电弧形态进行拍摄,采用光学显微镜(蔡司 LSM800)和扫描电镜(QUANTA-FEG450)观察焊接接头和冲击断口的微观组织结构。

2 试验结果与分析

2.1 焊接接头低温冲击试验

4 种焊接接头的夏比 V 型缺口冲击试验结果如表 6 所示,所有试样的冲击吸收能均大于 35 J,满足英国国标 BS7777 中液化天然气储罐焊接接头的要求^[21]。与纯氩气保护下的 TT 焊接头相比,加入不同含量的氢气显著提高了接头的低温韧性。在 98%Ar+2%H₂ 保护气下,焊缝和热影响区的低温韧性达到最大值。而随着氢含量的进一步增加,接头的低温韧性有所降低。

表6 接头低温冲击试验数据(-196℃)
Table 6 Low temperature impact test data of joint(-196℃)

试样编号	KV ₂ J			三次试验 平均值/J	开口 位置
纯 Ar	116	124	112	117.3	焊缝
98%Ar+2%H ₂	177	182	168	176	焊缝
95%Ar+5%H ₂	175	170	158	167	焊缝
92%Ar+8%H ₂	160	162	156	159	焊缝

由于夏比冲击试验不能完全反映全厚度方向上的韧性,本研究还采用了全厚度试样的落锤撕裂试验(DWTT),其试验过程更接近于 LNG 储罐的实

际断裂行为,更能表征其抗裂性能。焊缝低温落锤试验数据如表 7 所示。其中,吸收能量是 DWTT 试样所消耗的总能量,启裂功是 DWTT 试样启裂时所消耗的能量,扩展功是 DWTT 试样启裂至断裂过程所消耗的能量,剪切面积是断口面上韧性断裂面积所占评定区面积的百分比。由表 7 可以看出,在保护气体中加入氢气后,DWTT 的性能得到了明显提升。加入不同含量氢气后,裂纹扩展功始终约占冲击总能量的 80% 以上,构成了冲击吸收能量的主要部分;而在纯氩气保护下的 TT 焊,焊缝金属的裂纹扩展功约占冲击吸收能量的 70%。这表明加氢后,9Ni 钢接头在低温具有良好的抗裂纹形成和扩展能力。在确定高压管道运行过程中的裂纹扩展机制中,一般定义剪切面积大于 85% 为韧性断裂的接受值,所得的管线钢具有较高的韧性,满足海底管道的技术要求^[22-23]。从表 7 可知,加氢后的剪切面积都得到了提升,其中 2%H₂ 含量下剪切面积大于 85%,而 5%、8%H₂ 含量下剪切面积小于 85% 但与之接近。因此,加氢后焊接接头的韧性都得到了提升。此外,焊缝的启裂功随氢含量的增加在不断减小,表明焊缝更容易发生裂纹萌生;而随氢含量的增加,焊缝的吸收能量和扩展功呈先增大后减小的趋势。

2.2 接头组织和断口分析

根据以上研究结果,在 TT 焊保护气氛中加入氢气不仅没有降低接头力学性能,反而提高了接头

表7 低温落锤试验数据

Table 7 Low temperature drop hammer test data

试样编号	试验温度 /°C	吸收能量 /J	启裂功 /J	扩展功 /J	剪切面积 /%
纯 Ar	-196	2 506	997	1 709	73
98%Ar+2%H ₂	-196	3 363	858	2 768	87
95%Ar+5%H ₂	-196	3 100	629	2 471	82
92%Ar+8%H ₂	-196	2 913	595	2 318	80

的低温韧性,但随着氢含量的增加,接头低温韧性有所下降。为了探究该现象的原因,本文对不同氢气氛下的接头微观组织进行了研究。

接头宏观形貌如图3所示,不同氢含量下的焊缝成形良好。与纯Ar保护下的TT焊相比,氩氢混合保护TT焊的焊缝熔深更深。纯Ar保护气氛下,TT焊单层焊道熔深平均为2.5 mm,混合气体保护气氛下,TT焊单层焊道熔深平均为3.2 mm,氢的加入使单层焊道熔深平均增加了0.7 mm。表8列出了不同氢含量下接头的熔敷效率,结果显示在纯Ar中加入氢气可增加熔深,提高焊接效率。

从表8可以看出,保护气氛中加入氢气后熔覆效率有了明显的提升,且随着氢气比例的增加而增大(最高可提升9%)。为研究氢的加入对熔覆效率和电弧形态的影响,本文用高速摄像对不同氢气含量保护气氛的电弧形态进行了观察,如图4所示。图4a为纯氩气保护TT焊的电弧形态,图4b为氩-氢混合气体保护TT焊的电弧形态。由图4a可以看出,纯氩气保护TT焊的电弧燃烧稳定,焊接过程无飞溅,有较长的焊接电弧,但由于氩气导热系数很低使得电弧宽度较宽。纯氩气中加入氢气会增加电弧中的电压降,从而增加电弧功率,在高温下,氢气的导热系数几乎比氩气的导热系数高10倍,这就使得加氢后的电弧变得越来越窄,电弧能量更加集中^[24]。如图4b所示,垂直于焊接方向的电弧能量集中,电弧稳定性好,这样可以实现焊缝侧壁的均匀熔透以及增强焊缝内的熔深。

焊接时,熔化的母材金属占据整个焊缝金属的百分比称为熔合比,熔合比对焊缝性能有着重要的影响。通过焊缝面积和坡口面积计算焊缝熔合比如表8所示,纯氩保护下的熔合比为5.3%。随着氢气含量的增加,熔合比增加,这是由于保护气体中加入氢,破坏了电弧的静态特性,增加了电弧功率,

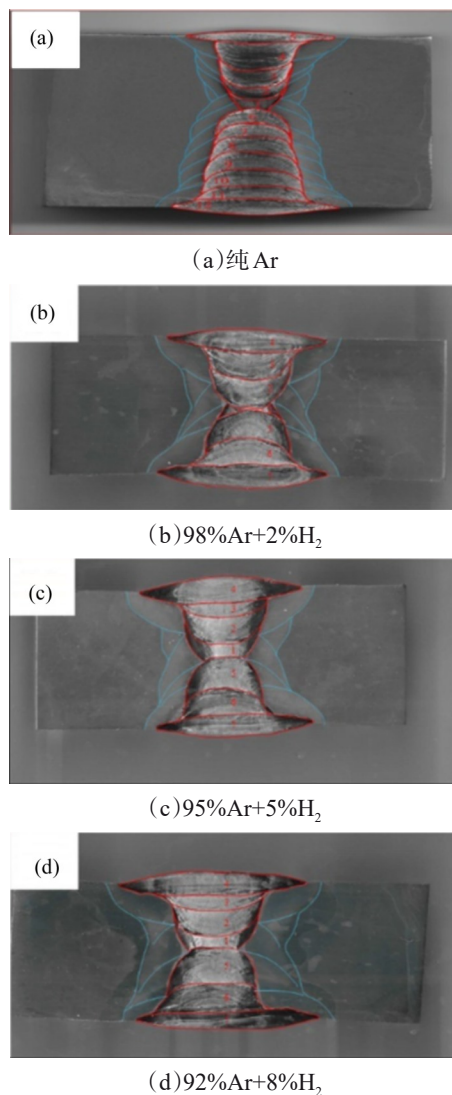
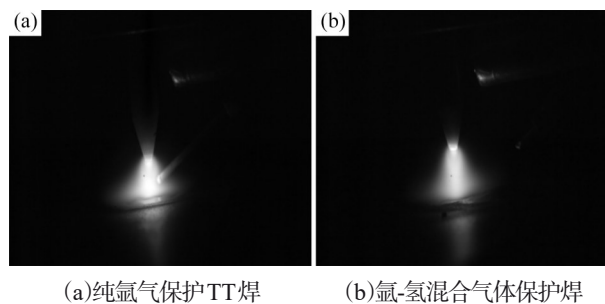


图3 焊接接头宏观形貌

Fig. 3 Macroscopic morphology of welded joint



(a)纯氩气保护TT焊 (b)氩-氢混合气体保护焊

图4 电弧形态

Fig. 4 Arc shape

从而导致大量的基材熔化,从而熔合比增加。较小的熔合比保证了焊缝组织为奥氏体,奥氏体因面心点阵滑移系统多而塑韧性好,由表8可知,熔合比的增加后,使得根部铁素体含量在增加,由于铁素体

表 8 焊接接头熔合比

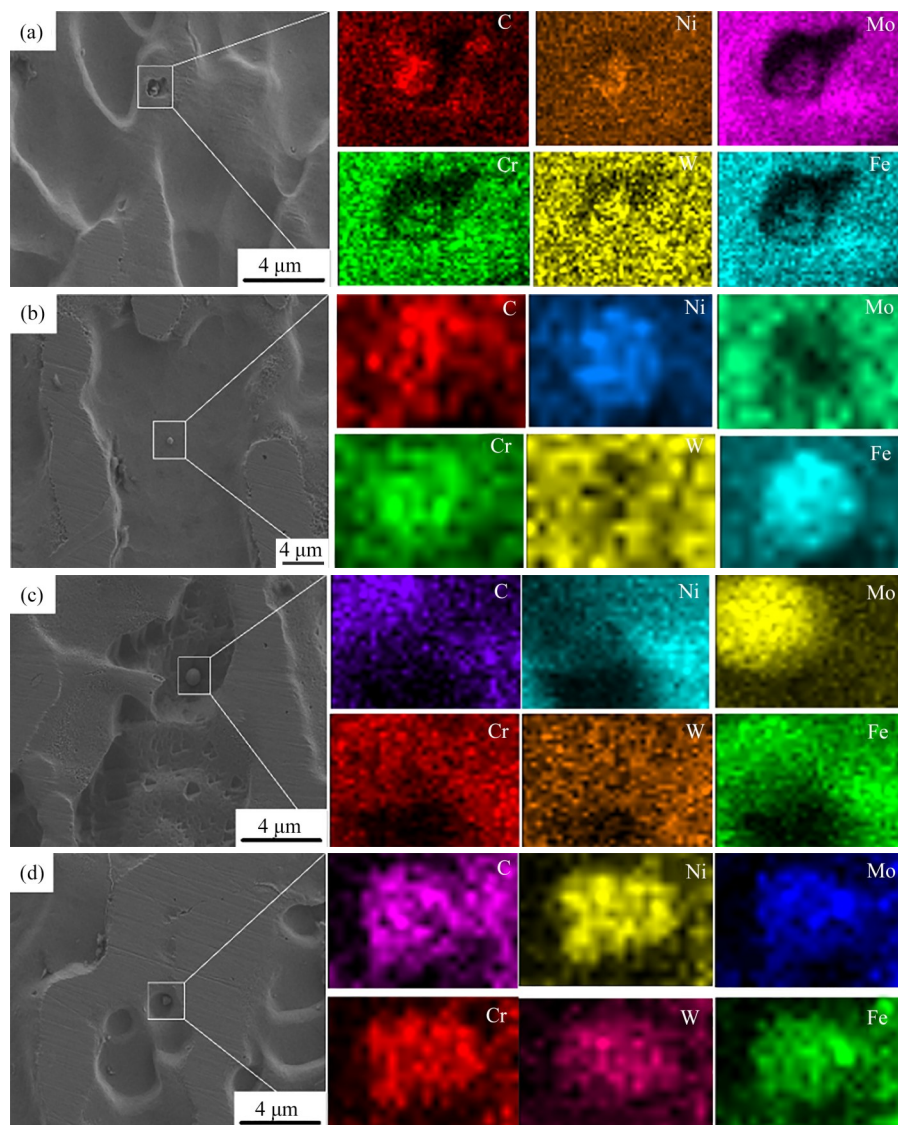
Table 8 Fusion ratio of welded joint

试样编号	熔敷效率/%	熔合比	根部铁素体含量/FN
纯 Ar	81	5.3	7
98%Ar+2%H ₂	85	13.5	9
95%Ar+5%H ₂	87	15.6	10
92%Ar+8%H ₂	90	18.1	12

是体心立方结构,具有低温韧脆转变,其含量增加后,当焊缝受到冲击载荷后,焊缝根部更容易发生裂纹的启裂。

图 5 为不同氢含量下焊缝金属析出相 EDS 面分析照片,表 9 为析出相 EDS 点分析结果。由表 9 可

知,不同氢含量下,焊缝金属中无氧化物的生成,析出相成分中都含有较高的 Ni、Fe、Mo 元素, Ni 元素含量相对于母材明显减小,该析出相为凝固过程中以共晶反应形式形成混合型的 MC 型碳化物 (W、Mo、Cr)C。通过对比氩氢混合的 TT 焊和纯氩的 TT 焊析出相成分,加氢后的焊缝析出相中 Mo 含量显著下降,这是由于在再结晶过程中,随着氢气的加入,使得温度升高,碳化物在高温下重新溶解,从而使得 MoC 中 Mo 的原子分数减少,析出相中 Mo 含量的下降,说明 Mo 大量固溶在基体内。Wang 等^[25]报道了 (Mo, Ti)C 碳化物在高温下的演化行为。根



(a)纯氩气;(b)98%氩气+2%氢气;(c)95%氩气+5%氢气;(d)92%氩气+8%氢气

图 5 不同氢含量析出相 EDS 面扫结果

Fig. 5 EDS surface scan results of precipitated phases with different hydrogen content

据实验结果和热力学计算,在 925 °C 恒温条件下, (Mo, Ti)C 中 Mo 的原子分数随温度的升高而降低。基体内的 Mo 元素增加,可以增强晶界的凝聚,对裂纹的扩展起到阻碍作用,这也是加氢后焊接接头低温韧性提高的原因之一。

表 9 焊缝金属析出相成分(原子分数, %)

Table 9 Components of metal precipitates in weld seams (at. %)

试样编号	Fe	Ni	Cr	Mo	C	W
纯 Ar	14.7	29.3	10.7	33.8	7.0	4.7
98%Ar+2%H ₂	19.8	40.2	10.8	7.4	18.3	3.4
95%Ar+5%H ₂	28.6	35.0	8.5	12.2	11.6	3.5
92%Ar+8%H ₂	15.2	36.4	10.8	13.5	18.0	3.6

图 6 为 8% 氢含量下焊缝 SEM 微观形貌,可以看出在焊缝中出现了弥散分布的小气孔,气孔壁表面光滑、洁净、无氧化痕迹。此类气孔是来自氢在焊接熔池内溶解、冷却时未及时逸出熔池表面的氢气孔。在 92%Ar+8%H₂ 保护气下,熔池液态金属中的氢达到过饱和,为焊缝金属内生成氢气孔提供了前提条件。当熔池开始结晶时,液态金属中的过饱和氢析出,熔池周边母材未熔化的固态粒子、成长中的固态枝晶等为氢气泡提供了形核条件;在气泡的长大形核后,在表面张力的作用下,小气泡难以自行长大,再加上液体金属的对流和氢的扩散,小气泡在熔池中不断合并、长大;当气泡长大到一定程度时,就开始脱离吸附表面上浮,随着温度的下降,形成的气泡难以浮出,最后以气孔形式析出,破坏了材料的连续性。当焊缝在受到冲击载荷时,容易导致应力集中而成为裂纹起始点,使得焊缝低温冲击吸收能量降低,从而损害熔敷金属的低温韧性。这也是 8% 氢含量下低温韧性较低的原因。

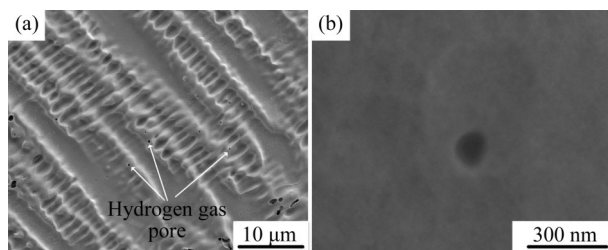
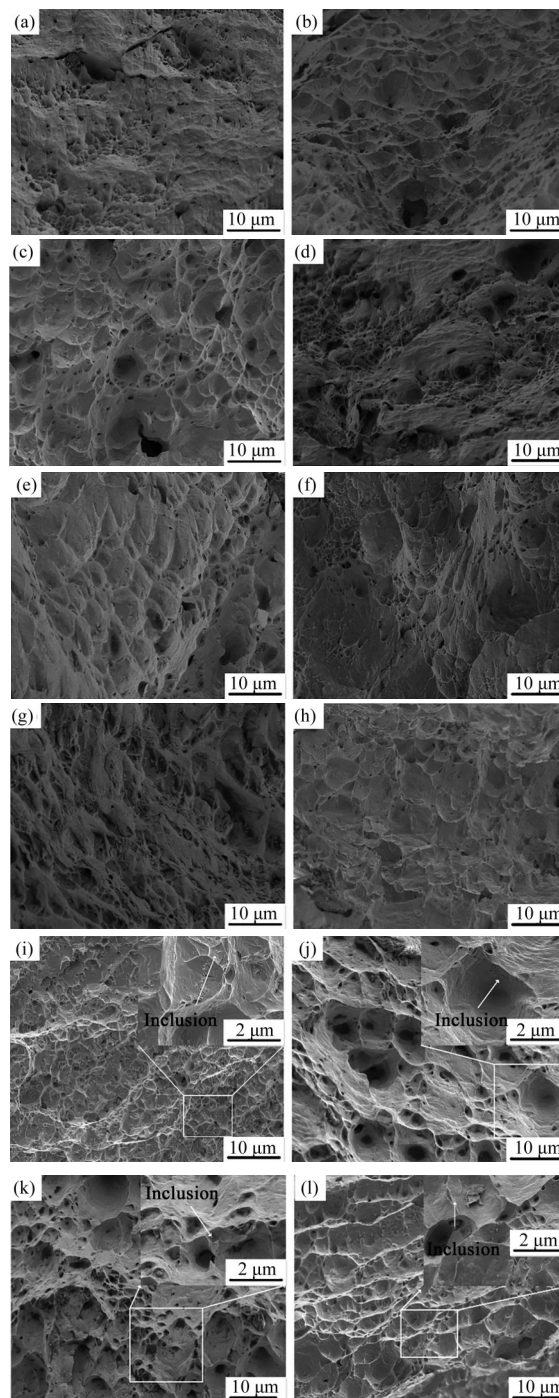


图 6 92%Ar+8%H₂ 条件下焊缝 SEM 微观形貌

Fig. 6 SEM microstructure of weld with 8% hydrogen content

由表 6 可知在氢的加入后,低温冲击韧性大幅提升,98%Ar+2%H₂ 保护气下表现出韧性最高,这与断口的断裂形式有很大的联系。焊缝冲击断口

SEM 形貌如图 7 所示,图 7a~7d 为焊缝的起裂源,由图可以看出在断裂面上大而深的韧窝底部有较深的孔洞,这些韧窝表明断裂机制为微孔聚集,属于韧性断裂;启裂区裂纹的生长有剪切长大和颈缩长



(a)、(c)、(e)、(g)、(i) 纯 Ar; (b)、(f)、(j) 98%Ar+2%H₂; (c)、(g)、(k) 95%Ar+5%H₂; (d)、(h)、(l) 92%Ar+8%H₂

图 7 焊缝冲击断口 SEM 形貌

Fig. 7 SEM morphology of weld impact fracture

大两种方式,一般剪切裂纹较长,且方向与拉应力成 45° 角,而颈缩裂纹很短,多与拉应力正交,裂纹生长路径有大幅的转折,故而启裂区的断口形貌多为横断岭形。此外,该区域存在撕裂棱,撕裂棱周围存在韧窝,且在加入氢气后韧窝尺寸较大,说明有良好的韧性。

在加载时,裂纹尖端附近发生塑性屈服,导致裂纹钝化,当载荷将裂纹撕开成尖锐的尖端时,由于材料的韧性不足,裂纹以小解理的解理方式扩展,当裂纹尖端碰到孔洞时就会以颈缩的方式连接,随之颈缩区发生断裂,裂纹以这种方式扩展而形成放射区,如图7e~7h所示。由图可以看出该区域的韧窝呈现椭圆或抛物线状,还存在少量的等轴韧窝,这是由于在拉应力的作用下,韧窝产生了明显的变形。另外断口还呈现出台状滑移,其中在2%氢含量下,解理台阶高度较高,这对裂纹扩展起到一定的阻碍作用,使其韧性提高。因此,该区域为细小撕裂棱和一次解理为主的混合断裂形貌。

随着裂纹到裂纹快速扩展的后期,形成了如图7i、7j、7k、7l的剪切唇区,呈现出一排排韧窝。可明显观察到,在大韧窝底部仍存在较深的孔洞,且数量较多,如图7f所示,存在的韧窝较大且深,这表明有较好的韧性。从局部放大图可以看出,在韧窝内侧存在夹杂物,通过EDS分析,如表10所示,该夹杂物也是MC型碳化物(W、Mo、Cr)C,该析出相并未破坏焊缝韧性。

表10 析出相成分(原子分数,%)

Tab. 10 Precipitated phase composition (at. %)

试样编号	Fe	Ni	Cr	Mo	C	W
纯 Ar	10.0	26.3	12.5	36.0	10.9	4.3
98%Ar+2%H ₂	29.5	39.9	9.8	3.6	14.3	2.9
95%Ar+5%H ₂	30.6	28.6	12.1	5.8	17.5	5.4
92%Ar+8%H ₂	37.3	25.4	13.4	6.7	11.5	5.7

3 结论

本研究深入探讨了氢气对TIP-TIG焊接LNG储罐用9Ni钢接头性能和低温韧性的影响,得出以下结论:

(1)在高温下,由于氢气的导热系数比氩气高10倍,使得纯氩保护气氛中加氢后电弧变得更窄,

垂直于焊接方向上的电弧能量更加集中,熔深更大,而且电弧稳定性也进一步提高,电弧能量的集中提高了焊接效率,且随着氢气比例的增加而增大,最高可提升9%。

(2)随着氢气含量的增加,焊缝金属的启裂功降低,这是由于氢的加入使得熔合比增加,导致焊缝根部生成大量的铁素体,当焊缝受到冲击载荷后,铁素体因其韧性差使得在焊缝根部容易发生启裂;但随着氢含量的增加,焊缝的冲击韧性和扩展功呈现先增加后减小的趋势,其中在98%Ar+2%H₂保护气下达到最大值,这是因为氢的加入细化了焊接接头的晶粒,同时氢原子提高了整个裂纹扩展阶段的韧性。当氢气含量为8%时,焊缝中生成了微气孔破坏了材料的连续性,导致焊缝低温冲击吸收能量降低,从而损害熔敷金属的低温韧性。

(3)加入氢气后,焊缝的韧性得到了大幅提升,这主要是由于加氢后焊缝析出相中Mo含量显著下降,说明Mo大量固溶在基体内,可以增强晶界的凝聚,对裂纹的扩展起到阻碍作用。在98%Ar+2%H₂保护气下,焊缝断口解理台阶高度较高,这对裂纹扩展起到一定的阻碍作用,使其韧性提高。

参考文献:

- [1] 贾承造,张永峰,赵霞. 中国天然气工业发展前景与挑战[J]. 天然气工业,2014,34(02):1-11.
JIA C Z, ZHANG Y F, ZHAO X. Development prospect and challenge of China's natural gas industry[J]. natural gas industry,2014,34(02):1-11.
- [2] 杨跃辉. 9Ni钢断裂过程中的裂纹扩展行为[J]. 金属热处理,2015,40(12):177-180.
YANG Y H. Propagation behavior of crack in 9Ni steel during fracture process[J]. Heat Treatment of Metals, 2015,40(12):177-180.
- [3] Chen Q S, Wegrzyn J, Prasad V. Analysis of temperature and pressure changes in liquefied natural gas (LNG) cryogenic tanks[J]. Cryogenics,2004,44(10):701-709.
- [4] Wang B, Chen X, Wang G. Design of large low temperature LNG storage tanks and new progress in its construction technology[J]. Natural Gas Industry, 2010, 3(5):108-112.
- [5] Jo Y, Shin K, Hwang S. Development of dynamic simulation model of LNG tank and its operational strategy

- [J]. Energy, 2021, 223: 120060.
- [6] 陈社鹏,李臻. 9Ni 钢在 LNG 储罐中的应用分析与探讨[J]. 化工装备技术, 2009, 30(06): 40-43.
CHEN S P, LI Z. Analysis and discussion on the application of 9Ni steel in LNG storage tank[J]. Chemical equipment technology, 2009, 30(06): 40-43.
- [7] 吴智武,王移山,李少华,等. LNG 储罐用 9Ni 钢的焊接材料与工艺[J]. 焊接技术, 2009, 38(8): 40-41.
WU Z W, WANG Y S, LI S H, et al. Welding materials and technology of 9Ni Steel for LNG storage tank[J]. Welding Technology, 2009, 38(8): 40-41.
- [8] Lebel F, Abi-Aad E, Duponchel B, et al. Thermal ageing process at laboratory scale to evaluate the lifetime of Liquefied Natural Gas storage and loading/unloading materials[J]. Materials & Design, 2013, 44(2): 283-290.
- [9] 蔡文刚. TIP TIG 焊接工艺在 LNG 储罐 9% 镍钢焊接中的应用[J]. 石化技术, 2019, 26(02): 48.
CAI W G. Application of TIP TIG welding process in welding 9% nickel steel of LNG storage tank[J]. petrochemical technology, 2019, 26(02): 48.
- [10] Ying G, Shangyu Y, Cong Z, et al. Low-Temperature Toughness Enhancement of 9% Ni Steel Girth Welds in LNG Storage Tanks via a TIP-TIG Welding Process[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2023: 1-13.
- [11] Huang H Y. Argon-Hydrogen Shielding Gas Mixtures for Activating Flux-Assisted Gas Tungsten Arc Welding[J]. Metall Mater Trans, 2010, 41: 2829-2835.
- [12] 刘政军,李宇航,苏允海. Ar 与 H₂ 混合气体保护下 GTAW 电弧特性数值模拟[J]. 焊接学报, 2019, 40(07): 67-71+164.
LIU Z J, LI Y H, SU Y H. Numerical Simulation of GTAW arc Characteristics under the protection of Ar and H₂ mixed gas[J]. Acta Weldologica Sinica, 2019, 40(07): 67-71+164.
- [13] Anbarasan N, Jerome S. Effect of flow rate and argon-hydrogen shielding gas mixture on weld bead morphology of inconel 718-ScienceDirect[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(13, Part 3): 26990-26996.
- [14] Chuaiphan W, Srijaorenpramong L. Effect of hydrogen in argon shielding gas for welding stainless steel grade SUS 201 by GTA welding process[J]. Journal of Advanced Joining Processes, 2020: 100016.
- [15] Maroef I, Olson D L, Eberhart M, et al. Hydrogen trapping in ferritic steel weld metal[J]. Metallurgical Reviews, 2002, 47(4): 191-223.
- [16] 陈富强. SA516Gr70 容器钢板氢致裂纹敏感性研究[J]. 轧钢, 2023, 40(01): 46-51.
CHEN F Q. Study on Hydrogen induced Crack Sensitivity of SA516Gr70 container Steel plate [J]. Steel Rolling, 2023, 40(01): 46-51.
- [17] Thomas R L S, Gangloff S R P. Internal hydrogen embrittlement of ultrahigh-strength AERMET 100 steel[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2003, 34: 327-344.
- [18] Kumar S K, Yadav V K, Sharma S, et al. Role of dissimilar Ni-based ERNiCrMo-3 filler on the microstructure, mechanical properties and weld induced residual stresses of the ferritic/martensitic P91 steel welds joint[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2021, 193: 104443.
- [19] 韦宝成,杨尚玉,郭鹰. LNG 储罐 9%Ni 钢立缝全自动焊技术[J]. 电焊机, 2020, 50(6): 113-116.
WEI B C, YANG S Y, GUO Y. Automatic welding technology of 9%Ni steel vertical seam for LNG storage tank [J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(6): 113-116.
- [20] 杨尚玉,郭鹰. 9Ni 钢 TIP-TIG 焊接接头低温韧性研究[J]. 电焊机, 2023, 53(6): 29-35.
YANG S Y, GUO Y. Study on low temperature toughness of 9Ni Steel TIP-TIG welded Joint [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(6): 29-35.
- [21] Jeong P, Jae L, Myung K. An investigation of the mechanical properties of a weldment of 7% nickel alloy steels [J]. Metals Open Access Metallurgy Journal, 2016, 6(11): 285.
- [22] DNV-OS-F101, Submarine pipeline systems[S]. 2012.
- [23] Specification for Line pipe. ANSI/API Specification 5L, Forty Fourth Edition [M]. Washington: API Publishing Services, 2007.
- [24] 朱天浩. 9Ni 钢焊缝组织中夹杂物形成机制及控制方法[D]. 江苏: 江苏科技大学, 2018: 22-25.
ZHU T H. Formation mechanism and control method of inclusions in weld microstructure of 9Ni steel[D]. Jiangsu: Jiangsu University of Science and Technology, 2018: 22-25.
- [25] Wang Z Q, Sun X J, Yang Z G, et al. Carbide precipitation in austenite of a Ti-Mo-containing low-carbon steel during stress relaxation[J]. Materials Science and Engineering, 2013, 573: 84-91.