

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.03.04

LNG储罐用高锰钢焊接研究现状及展望

牛董山钰^{1,2}, 李波³, 信国松¹, 武鹏博¹, 朱闯⁴, 冯志强⁴, 罗玖田², 方乃文²

1. 聚力新材料科技(日照)有限公司, 山东 日照 276826

2. 北部湾大学, 广西 钦州 535011

3. 平度市技师学院, 山东 平度 266700

4. 中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150028

摘要: 随着国际液化天然气(LNG)产业的快速发展,对储运低温材料的需求日益迫切。为了平衡材料的服役性能与制造成本,含有20%~28%Mn元素的低温高锰钢引起了广泛关注。详细探讨了LNG储罐用高锰钢材料的特性、焊接过程中热裂纹的形成机理、合金元素的烧损途径以及焊接接头在低温环境的性能下降的影响因素等问题,并提出了实际焊接应用过程中的预防措施。同时,介绍了低温高锰钢常用的焊接工艺方法的应用现状及其对性能的影响规律,并探讨了新型焊接方法在低温高锰钢应用的发展趋势,以为LNG储罐的优质焊接应用提供参考依据。

关键词: 液化天然气(LNG)储罐; 低温高锰钢; 焊接

中图分类号: TG457.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)03-0028-12

Research Status and Prospects of High Manganese Steel Welding for LNG Storage Tank

NIU Dongshanyu^{1,2}, LI Bo³, XIN Guosong¹, WU Pengbo¹, ZHU Chuang⁴, FENG Zhiqiang⁴,
LUO Jiutian², FANG Naiwen²

1. Juli New Material Technology (Rizhao) Co., Ltd., Rizhao 276826, China

2. Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China

3. PingDu Technician Institute, Pingdu 266700, China

4. Harbin Welding Institute Limited Company, Harbin 150028, China

Abstract: With the rapid development of the international liquefied natural gas (LNG) industry, the demand for cryogenic materials for and transportation is increasingly urgent. In order to balance the service performance and manufacturing cost of materials, high manganese steel for cryogenic temperature has attracted extensive attention. properties of high manganese steel materials for LNG storage tank, the formation mechanism of hot cracks in the welding process, the burning loss path of alloy elements, the influencing factors of the performance degradation of welded joints in the cryogenic environment were detailed discussed, and the preventive measures in the actual welding application process were proposed. the same time, the application status of common welding process methods for low temperature high manganese steel and its influence law on the performance are introduced, and the development of new welding methods in the application of low temperature high manganese steel is discussed, in order to provide a reference basis for the high-quality welding application of LNG storage tank.

Keywords: Liquefied natural gas (LNG) storage tank; Low temperature high manganese steel; Weld

引用格式: 牛董山钰, 李波, 信国松, 等. LNG储罐用高锰钢焊接研究现状及展望[J]. 电焊机, 2025, 55(3): 28-39.

Citation: NIU Dongshanyu, LI Bo, XIN Guosong, et al. Research Status and Prospects of High Manganese Steel Welding for LNG Storage Tank[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(3): 28-39.

收稿日期: 2024-10-11 修回日期: 2024-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(52261044); 泰山产业领军人才工程(2024001)

通讯作者: 李波(1973—), 高级讲师, 主要从事焊接加工方面的教研工作。E-mail: qdpdjx.lb@163.com。

0 引言

自21世纪初期起,全球能源消耗与需求不断攀升,绿色环保的发展理念逐渐成为装备制造业科技创新的主导思想。液化天然气(Liquefied Natural Gas,简称“LNG”)以其环境友好、安全性高以及热效率出众的特质,已成为促进绿色发展的重要动力。与此同时,航运业减排工作的持续推进促使众多船舶采用LNG作为环保型替代燃料,以实现降低排放的目标,这一做法已获得业界广泛认同^[1]。

LNG 通常需要储存在极低温环境,约为 -161.5°C ,同时需要承受 0.1 MPa 左右的压力。因此,与LNG直接接触的内层结构必须使用能够承受这种低温低压环境的特殊材料。依据《国际散装液化气体运输船舶建造与设备规范》(IGC规则)的相关条款,LNG船舶的储罐系统以及其连接管道所使用的制造材料,必须严格限定在4种经认可的材料范围内:Invar合金、9%镍钢、不锈钢和铝合金,尽管这些金属具有显著的优点,但它们也面临成本昂贵和生产过程复杂的挑战^[2]。近年来,全球范围内的研究者们研制出一种适用于LNG储罐的新型金属材料——低温高锰钢。这种材料由C、Mn、Fe和Cr等核心元素组成,它不仅在力学性能上完全符合LNG储罐的建造标准,而且其制造成本相较于4种经认可的材料降低了50%~75%。这种新型低温高锰钢的开发为LNG储罐的制造提供了更具成本效益的替代方案^[3]。

1 LNG 储罐用高锰钢材料特性

1.1 化学成分特性

低温高锰钢具有稳定的组织结构,这是其保证强度和韧性的重要条件,其中合金成分对奥氏体的稳定性起着至关重要的作用^[4]。这种特性使高锰钢在极低温环境下依旧能维持其结构完整性和出色的力学性能。

Mn作为主要的奥氏体化元素,在钢的微观结构中扮演着至关重要的角色。通过在钢中添加Mn可以显著提升钢的低温性能和层错能,从而促进TWIP效应(孪生诱发塑性效应,是一种在变形过程

中通过形成孪晶来提高材料塑性的机制)。当Mn含量 $\geq 28\%$ 时,Mn可以替代Ni元素,使钢在室温下获得稳定的奥氏体结构,并展现出卓越的低温韧性,尽管这可能会降低钢的强度;然而,当Mn含量超过35%时,Mn会在晶界处聚集,导致晶界在低温下变得脆性增加,危害钢材的强度和韧性。C不仅是奥氏体化元素,同时还具有固溶强化效果,在钢中掺入适量C和N元素,可稳定奥氏体结构并抑制相变;N元素作为一种强化奥氏体的元素,其显著的固溶强化效果对于提升高锰钢的强韧性具有重要意义。N元素在钢中的溶解度相对有限,为确保其在钢中的均匀分布并充分发挥其强化作用,通常需要引入Cr元素以增加N的溶解度,有助于实现钢材性能的进一步优化与提升^[5]。在深入探索低温高锰钢的过程中,其化学组成得到了显著的拓展与丰富。近年来国内外科研机构及企业在该领域内研究并开发出的低温高锰钢的化学组成如表1所示。

表2列出了几种低温高锰钢的力学特性。从数据中可以看出,这些钢材在低温环境下展现出卓越的强度和韧性。具体而言,它们的抗拉强度甚至超过了9Ni钢,这一特点尤为显著。然而,在规定非比例延伸强度和超低温冲击韧性方面,这些低温高锰钢的性能稍显不足。特别需要注意的是,轧制板材在横向方向上的冲击韧性可能会相对较低。这一发现对于材料的应用和选择具有重要意义^[6]。

1.2 国内外发展历程

1981年,CHARLES J^[19]发表了关于Fe-30Mn-5Al-0.5C钢在 -196°C 低温下性能的研究成果,指出该钢种在低温环境下具有优异的适用性,其抗拉强度可达 $1\,200\text{ MPa}$,断后伸长率高达70%。

2010年,大宇造船海洋公司联合浦项钢铁公司,并与韩国、美国、法国、挪威、英国的五大船级社共同启动了“超低温用高锰钢及焊接材料开发”项目。该项目探究了高锰钢材料在LNG储气罐和大型LNG运输船中的应用可能性,以评估其在极端低温条件下的性能和可靠性^[20]。

我国在低温高锰钢的应用研究方面也起步较早,并取得了显著成果。基于国内外LNG储罐使用低温高锰钢的市场状况及用户实际需求,我国特钢企业协会率先在国内制定了团体标准T/SSEA 0060

表1 低温高锰钢的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of low-temperature high-manganese steel(wt. %)

钢材型号	C/%	Mn/%	Al	其他合金元素	文献来源
02Mn24	0.016	24.35	—	—	[6][7]
02Mn31	0.016	30.8	—	—	[7]
04Mn35	0.04	34.5	—	—	[7]
08Mn28Al2	0.08	28.0	1.6	—	[7]
08Mn274	0.085	27.0	4.1	0.05%Nb	[7]
10Mn31Cr7MoN	0.10	31.2	—	7.3%Cr; 0.69%Mo; 0.30%N	[15]
10Mn24Al4CrMo	0.11	23.9	3.5	1.0%(Cr+Mo)	[8]
40Mn25Cr4CuN	0.40	25.0	—	3.0%~5.0%Cr; (0.40%~0.70%)Cu; (0.04%~0.08%)N	[13][16]
45Mn20Al2N	0.45	20.0	2.0	(0.005%~0.11%)N	[4][10]
45Mn24Cr4CuNb	0.45	24.0	—	4.0%Cr; 0.50%Cu; ≤0.3%Nb	[18]
45Mn24Al2Nb	0.45	24.0	2.0	0.1%Nb	[14]
50Mn23Cr4Mo	0.48	23.0	—	≤6.3%Cr; (0.32%~0.34%)Mo	[11]
60Mn24Al2V	0.57	23.7	1.92	(0.3%~0.6%)V	[12][13]
60Mn18Al5	0.60	18.0	3.0~8.2	—	[9]

表2 低温高锰钢的机械性能

Table 2 Mechanical properties of low-temperature high-manganese steel

材料	测试温度/K	规定非比例延伸强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	冲击功KV ₂ /J
Fe-Mn-C	110	470, 691	901, 1125	54, 45	290(纵), 210(横), 150(纵), 100(横)
Fe-Mn-C-Al	110	410.4, 755.7	795.4, 1340.4	75, 67.6	253, 149
Fe-Mn-Cr-N	110	368, 883	668, 1365	68, 62	234, 128

—2020《低温压力容器用高锰奥氏体钢板》和 T/SSEA 0132—2021《高锰奥氏体低温钢用焊接材料》,上述标准旨在通过明确规定相关材料的化学组成与物理性能要求,为行业提供统一的技术依据,以确保产品的稳定与服役安全性^[21]。

1.3 微观组织及性能调控

相关研究^[9]指出,当低温高锰钢中的 Al 含量从 3% 上升至约 5% 时,其规定非比例延伸强度会由 406 MPa 提升至 467 MPa。这是由于 Al 在低温高锰钢中的多重强化作用(δ 铁素体强化、细晶强化和固溶强化),其中固溶强化与细晶强化效果在此含量范围内发挥明显作用。然而,当 Al 含量达到 8.0% 时,虽然钢材中出现的 δ 铁素体会将抗拉强度提升至 588 MPa,但也导致其在 -196 °C 下的脆性问题;WANG X J^[11]通过添加 6.3%Cr 和 0.2%N 对低温高锰钢进行改良,成功保持了材料在低温下的优异冲击性能,同时使规定非比例延伸强度提高了 150 MPa,该提升主要得益于 N 的固溶强化作用;FURD^[15]的研究发现,通过电渣重熔工艺以及 Cr 和 Mo 元素对晶界的强化作用,32Mn-7Cr-0.6Mo-0.3N 钢在低温

冲击环境中仍能保持稳定的奥氏体结构,并在低温冲击试验中成功抑制了沿晶裂纹的扩展延伸。

通过研究 Nb 和 V 的合金化效应^[17-18]表明,在低温高锰钢中增加 Nb 和 V 的含量可以显著提高材料的强度。这是因为在热加工过程中,Nb 和 V 元素抑制了回复与再结晶过程,促进了晶粒内部的硬化结构生成。事实上,Nb 与 V 所引发的晶粒细化效应及微小析出相的形成对于材料强度的提升作用具有一定的局限性。尽管合金化可以提高高锰低温钢的强度,但也会对低温冲击韧性产生不利影响。

刘宁^[22]通过单次通道压缩热模拟试验,探究了用于 LNG 储罐的含钒高锰钢的再结晶特性,发现流变应力曲线在低应变速率(0.1 s^{-1} 和 0.2 s^{-1})下主要呈现动态再结晶型态,当应变速率超过 0.5 s^{-1} ,流变应力下降并不明显,只在大应变下略有减少。试验用 LNG 钢的热变形激活能 Q 约为 590.3 kJ/mol。在不同的变形温度和应变速率下,组织结构表现出不同的演变规律:850 °C 下主要形成硬化组织,只在晶界处有少量变化;950 °C 下, 0.1 s^{-1} 和 2 s^{-1} 的变形速率会形成更小的晶粒,但 2 s^{-1} 下的再结晶似乎不够

完全,在 10 s^{-1} 下则主要是硬化组织;而在 $1\ 050\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的变形温度下,无论变形速率如何变化,都会生成较大的再结晶组织。谷秀锐^[23]使用混合溶液(草酸、硝酸、偏重亚硫酸钠和无水乙醇),在常温下腐蚀了 Mn 含量为 11%~14% 的高锰钢,展示出清晰色彩鲜明的显微组织结构。另外,他们还采用硝酸与无水乙醇混合液以及盐酸与无水乙醇混合液的复合侵蚀技术,对 Mn 含量为 22%~28% 的超低温应用高锰钢进行腐蚀,同样可获得了清晰的显微组织图像。

1 低温高锰钢焊接性分析

低温高锰钢在焊接过程中,合金元素易发生烧损现象,并伴随有 Mn 蒸汽的生成。目前,低温高锰钢熔化焊涉及 Laser 焊接^[24]、TIG 自熔焊接^[25-26]、TIG 填丝焊接^[27-28]、MAG 焊接^[29]、SAW 和 SMAW 焊接^[30] 等多种技术。然而,高锰钢在熔化焊接过程中面临的主要缺陷(分类如图 1 所示)包括焊接热裂纹、合金元素烧损以及焊接接头低温韧性恶化等。

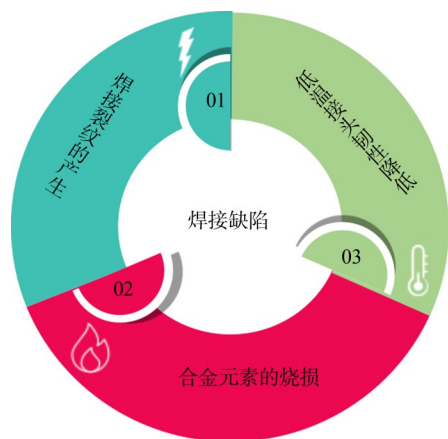


图1 主要焊接缺陷分类示意

Fig. 1 Classification of major welding defects

1.1 焊接热裂纹形成机制与抑制方法

在低温高锰钢焊接时,焊接热裂纹是常见问题。如图 2 所示,高锰钢对热裂纹敏感度较高,可能的裂纹成因包括:

(1)合金元素诱发低熔点共晶。为确保焊接区域形成稳定的奥氏体结构,一种常见的做法是在母材和焊接材料中添加 C、Si、Cr、Ni、Cu、Al 等金属元素,并严格控制 S 和 P 等杂质含量。这些元素的存在有可能诱导焊接区域生成具有低熔点的共晶结

构^[31],此种结构在受到拉伸应力作用时,极易引发裂纹的产生并快速扩展。

(2)C 元素的作用。C 元素在固溶强化与奥氏体稳定化成分中起着关键的作用,它可以扩大凝固温度范围,并在焊缝及热影响区形成 $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}/\gamma$ 等低熔点的共晶组织,此种结构在受到热应力作用时极易引发裂纹的产生。

(3)凝固特性影响。Fe-Mn 合金的凝固温度范围广,导热系数小,凝固收缩率大,这些因素协同作用会导致焊接时产生明显的热应力^[5]。

(4)Si 元素的影响。Si 元素固溶于高锰钢可增强力学性能,但也会减少 C 含量,促进更多低熔点共晶结构的形成。此外, Si 在晶界聚积或促使低熔点液膜生成,该现象将显著加剧凝固裂纹的成形^[26]。

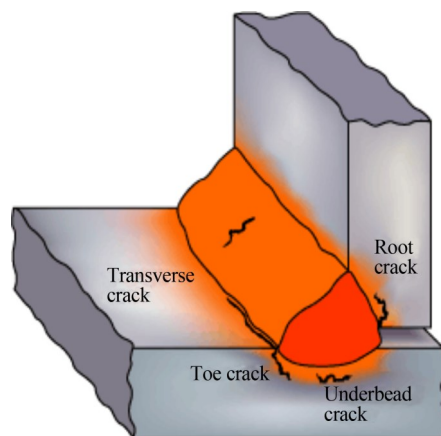


图2 焊接裂纹

Fig. 2 Welding cracks

文献[32]通过参考 LNG 储罐所需高锰钢的性能需求,开发了适用于丝极埋弧横焊的焊丝、焊剂及配套焊接工艺,可以明显减少热裂纹倾向;同时通过在焊丝中添加 Ni、Cr、Mo 等元素实现固溶强化以提升焊缝金属的韧塑性,并通过优化焊剂中各成分的配比,实现了有效的脱 O 和脱 P;在设计焊剂时,添加了 CaF_2 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 和 MgO 等成分,以提升液态熔池金属的流动性、促进熔渣排出、减少热裂纹的产生,焊缝展现出优异成形,通过这些方法,成功抑制了熔渣滴落、咬边以及凹坑等缺陷,完全满足低温高锰钢焊接工艺技术要求。

文献[33]中提到热裂纹缺陷产生的原因主要是低温高锰钢中 S 和 P 元素的存在,容易与 Fe 和 Mn 元素发生反应,通过生成 Fe-FeS 与 Mn-Mn₃P 的共

晶相,这些共晶物的热膨胀系数高于基体材料,且熔点较低,这在焊接过程中会导致内应力显著增加,易于引发热裂纹缺陷,尤其是在焊接热循环的影响下。为了解决这一问题,他们采用自主研发的自保护药芯焊丝进行堆焊修复,由表3、表4可知,自保护药芯焊丝的S、P含量明显低于母材,显著降低了熔敷金属发生热裂的风险;同时,熔敷金属中的Ni元素作为扩大奥氏体相区的稳定剂,有助于保证焊接过程中的奥氏体化过程在更加均匀和完整的状态下进行^[34]。同时,Mn元素以其优异的脱O与脱S特性,可稳定地溶解于铁素体与奥氏体之中,进一步扩张奥氏体相区,优化熔敷金属的韧性表现,进而增强了其抗裂性能。

表3 高锰钢化学成分(质量分数,%)

Table 3 Chemical composition of high manganese steel (wt. %)						
C	Mn	Si	Cr	P	S	Fe
1.05	12.9	0.5	2.4	0.04	0.008	余量

表4 自保护药芯焊丝熔敷金属化学成分(质量分数,%)

Table 4 Self-protecting flux-cored wire cladding metal chemical composition (wt. %)

C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Fe
≤1.0	6.0	4.0	24.0	12.0	≤0.02	≤0.008	余量

综上所述,在适宜工艺条件下,降低O、S和P等元素的含量可以提高焊缝的抗裂性能,从而有效地预防热裂纹的生成。

1.2 合金元素烧损

为确保高锰钢在低温环境下具备优异的强韧性,必须提高其Mn含量,并适量添加N、Al等元素以进一步增强其综合性能。然而,这些元素由于沸点较低,在焊接过程中容易发生烧损,这种烧损若未能有效控制,将对焊缝金属的组织结构及力学性能产生不利影响。因此,在实际操作过程中,需严格控制焊接工艺条件,以减轻或者避免此类元素烧损现象的发生,确保高锰钢材料的质量与性能满足既定要求^[5]。

文献[32]在埋弧焊接材料的工艺性设计过程中,采取多道层叠焊接与单层堆焊的技术方法进行了比对研究,将测试得到的熔敷金属化学成分与焊丝的设计成分进行精确对比,发现焊缝金属中的C、Cr、Ni、Mo等主要元素含量与焊丝的设计成分高度接近,未观察到显著的元素烧损现象;然而,熔敷金

属中的Mn含量略低于设计值,表明焊接过程中存在一定程度的Mn损耗。

尽管减少焊缝金属中的Mn含量可确保奥氏体结构的稳定性,但这也显著降低焊缝金属的强度和韧性。为了解决这一难题,文献[32]提出了通过调整焊接速度手段系统探讨了不同焊接热输入条件下Mn元素的消耗情况,并考察了焊接速度对焊剂排放效果的影响(具体数据见表5)。试验表明,Mn元素的消耗主要受焊接热输入的控制,即焊接电流和电弧电压的设定。当焊接速度降低时,热输入增加,焊缝金属在高温下的停留时间延长,Mn损耗加剧;相反,当焊接速度增加时,焊缝中的Si含量会上升(熔池中的Si来不及随焊渣排出),同时Mn的损耗仍然存在;当焊接速度设定为450 mm/min时,高温停留时间适度,冶金反应充分,Mn烧损减少,这有助于控制Mn元素的烧损,确保焊缝金属保持奥氏体组织稳定性,进而增强焊缝金属的强度与韧性。3组不同工艺条件获得熔敷金属成分及性能关系如图3所示。

表5 不同焊接速度获得熔敷金属Mn含量及力学性能

Table 5 Effect of different welding speeds on the manganese content and mechanical properties of deposited metal

序号	电弧电压/V	焊接电流/A	焊接速度/(mm·min ⁻¹)	Mn含量/%	抗拉强度/MPa	冲击吸收能量KV ₂ /J
1	30	350	400	22.15	718	87
2	30	350	450	23.27	735	93
3	30	350	500	22.85	710	86

MA^[35]研究得出,采用1 kW激光焊接1 mm厚的高锰钢,热影响区中的Mn含量显著减少了7.08%;相比之下,采用TIG自熔焊工艺进行相同操作时,未观察到Mn元素含量有显著变动;Morris^[36]利用4 kW激光自熔焊对厚度为3 mm的高锰钢进行焊接后发现焊缝中的Mn含量下降了2.26%。由此可推断,焊接工艺是影响高锰钢焊接中Mn元素挥发行为的关键因素。

1.3 焊接接头低温韧性降低

低温高锰钢在极寒温度下表现出优异的物理特性。然而,焊接过程中的热循环作用往往导致材料成分偏析和组织稳定性下降。使得焊接接头的低温性能普遍不如母材本身^[37]。

文献[33]采用自主研发的药芯焊丝与E309L焊

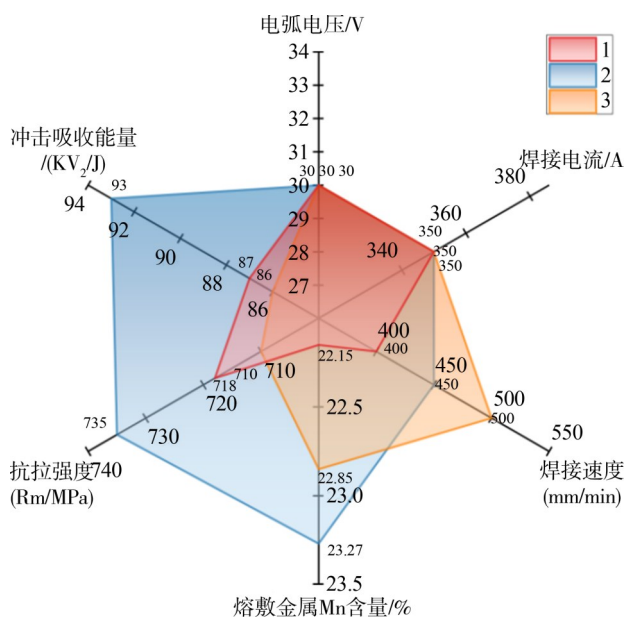


图3 3组不同参数对比雷达图

Fig. 3 Three sets of parameter comparison radar charts

丝对低温高锰钢进行焊接,并测试了焊接接头及熔敷金属的性能。母材和熔敷金属的化学成分见表3、表4。表6为自保护药芯焊丝接头热影响区冲击性能,图4为焊接接头熔敷金属在常温下的冲击韧度及热影响区在 -20°C 时的冲击韧性。试验结果表明,自保护药芯焊丝形成的焊接接头在低温条件下冲击韧性远超常温下ER309L材料的冲击韧性。

表6 热影响区冲击试验

Table 6 Impact test of heat-affected zone

热影响区(-20°C)	药芯焊丝(20°C)	ER309L(20°C)
59.3, 65.9, 63.2, 59.6, 60.4, 61.8 (平均61.7)	76.6	45.0

韩国浦项钢铁公司^[29]采用成分类似于Fe-Mn-C低温高锰钢的气保护金属电弧焊焊丝(母材力学性能如表2所示),并采用80%Ar+20%CO₂气体作为保护气体。在 25°C 环境下,焊接接头的强度极限约为669 MPa,非比例延伸强度约为438 MPa,焊缝金属及热影响区在 -30°C 的冲击功分别为60 J和86 J,明显低于母材的100 J耐低温冲击性能。Chan等^[25]研究揭示,增加保护气体中N₂的比例能在高锰钢TIG自熔焊过程中实现熔化区域N元素含量的提升,进而使得焊接接头在 -169°C 极端低温环境下有与母材相媲美的非比例延伸强度。然而,必须高度关

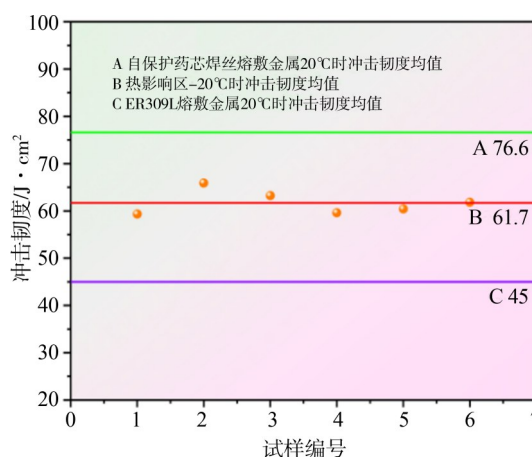


图4 ER309L和药芯焊丝冲击韧性

Fig. 4 Impact toughness of ER309L and flux-cored wires

注高N元素含量可能引发的晶界偏析现象,因为这一现象存在显著风险,可能导致材料在低温条件下的韧性显著下降^[36];文献[30]采用SAW工艺对Fe-24Mn高锰钢进行焊接,在 -163°C 条件下测得焊接接头的规定非比例延伸强度和抗拉强度分别为617 MPa和1 150 MPa,断后伸长率为20%;付瑞东等^[38]采用非熔化极惰性气体保护电弧焊工艺对32Mn-7Cr-0.6Mo-0.3N进行了焊接, -196°C 接头强度极限为1 250 MPa,略逊于母材极限强度1 350 MPa。

2 焊接方法对组织和性能的影响

2.1 埋弧焊

文献[39]采用埋弧焊工艺制备低温高锰钢焊缝金属,其主要化学成分为:0.20%~0.22%C、20%~22%Mn、2.80%~3.00%Ni。对焊缝金属进行 -196°C 示波冲击试验,并结合微观组织和冲击断口表征,以分析影响其低温冲击韧性的微观机理。结果表明,焊缝金属在 -196°C 时平均冲击值为68.2 J,断裂类型为延性断裂,断口呈韧窝形貌,全奥氏体组织具有优异的塑性变形能力,这使得焊缝金属能发生延性断裂;冲击过程中组织发生马氏体相变,这在一定程度上有益于焊缝金属低温韧性的提升。另外,焊缝金属组织中粒径小于 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 的夹杂物粒子占比达61.5%,这也是其保持良好低温韧性的一个主要因素。Fan等人^[40]对比了SAW和SMAW两种焊接方法对Fe-24Mn-0.4C-3Cr-3Cu低温高锰钢的

焊接效果,结果表明,两种方法获得的焊接区域微观结构均为奥氏体,且在 -196°C 条件下表现出卓越的力学性能,尤其是 SMAW 的综合性能更优。Choi 等人^[30]进一步探讨了 SAW 焊接 Fe-24Mn-0.44C-3.4Cr 低温高锰钢的微观结构和物理性能,发现埋弧焊处理的高锰钢在低温条件下力学性能保持良好,且埋弧焊热循环过程对焊接接头热影响区的恶化影响较弱^[41]。郭广飞等^[42]研究了 SAW 焊接工艺对 LNG 储罐用高锰钢焊接接头组织和性能的影响,研究结果如图 5 所示,焊缝组织的最大晶粒尺寸约为 $100\text{ }\mu\text{m}$,夹杂物较少,焊缝为典型柱状晶体组织;图 6 所示为焊缝组织的 SEM 图像,焊缝组织沿晶界析出了连续的层片状碳化物,焊接接头抗拉强度为 863.8 MPa 、断裂伸长率为 49.7% 、 -196°C 的冲击韧性为 100 J ,冲击断面韧窝尺寸不一,边缘清晰,韧窝大且深有大量孔洞,含有夹杂物,属于韧性断裂;焊接接头的表层显微硬度分布曲线如图 7 所示,显微硬度距焊缝中心呈 W 形分布,最低值出现在焊缝中心附近,最高值在细晶区。由焊缝组织分布可知,各区域均为奥氏体组织,受多次焊接热循环的影响,粗晶区晶粒长大严重,性能较差,硬度值较低,而细晶区晶粒细小,硬度值较高,性能较为优异。

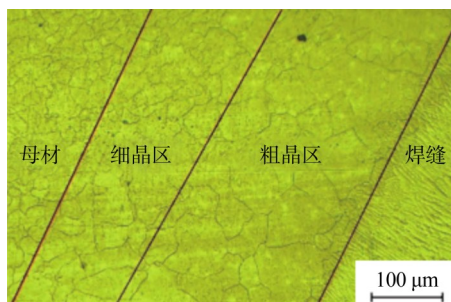


图 5 SAW 焊缝及热影响区显微组织

Fig. 5 Microstructure of SAW welded seam and heat-affected zone

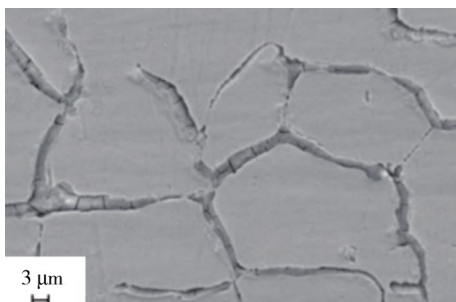


图 6 SAW 焊缝 SEM 组织

Fig. 6 SEM microstructure of SAW welded seam

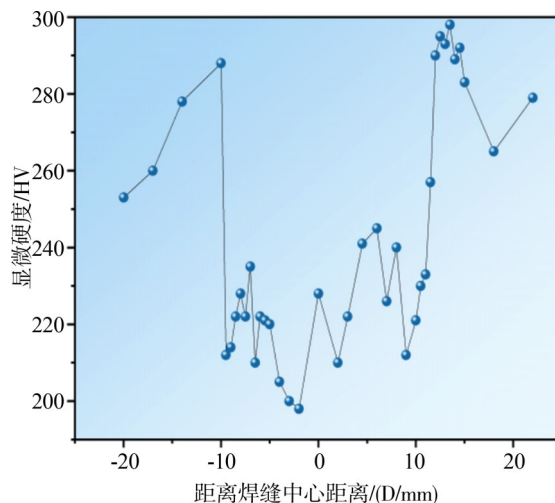


图 7 焊接接头表层显微硬度

Fig. 7 Microhardness of the surface layer of welded joint

文献[32]研制了一种专门用于低温高锰钢 SAW 横焊的焊接材料,有效抑制了熔渣滴落、咬边以及凹坑缺陷,焊缝金属表面光滑,脱渣性优良,无气孔、裂纹等缺陷,抗拉强度为 660 MPa , -196°C 夏比冲击吸收能 $>60\text{ J}$,满足了低温高锰钢焊接工艺性所提出的技术要求。Choi^[30]采用 SAW 工艺对 Fe-24Mn 高锰钢进行焊接,在 -163°C 下测得焊接接头的抗拉强度为 $1\text{ }150\text{ MPa}$,规定非比例延伸强度为 617 MPa ,断后伸长率为 20% 。

上述研究结果表明,低温高锰钢可采用大热输入的 SAW 工艺实现优质焊接,所获焊缝在极寒条件下仍能保持强度和韧性的较好匹配。

2.2 熔化极气体保护焊

韩国浦项钢铁公司^[29]进行了 Fe-Mn-C 系高锰低温钢气保焊(焊接参数见表 5),焊接接头抗拉强度为 669 MPa ,非比例延伸强度为 438 MPa ,极寒温度下冲击功为 60 J 、 86 J ,低于母材。Zhang 等人^[43]采用熔化极活性气体保护电弧焊对 Fe-22Mn-0.45C-1.8Cr 钢进行了焊接,在极寒条件下焊缝金属的冲击吸收功满足不小于 47 J 的要求;郭广飞^[42]采用熔化极气体保护焊对低温高锰钢 Q400GMDR 进行焊接,所获接头微观组织如图 8 所示,热影响区主要由奥氏体和少量夹杂物组成,熔合线附近晶粒粗大,焊缝组织呈现出细长的柱状晶结构,最大晶粒可达 $70\text{ }\mu\text{m}$;焊接接头的抗拉强度达 839.2 MPa ,断面收缩率为 46.9% ,且断裂位置均位于焊缝区域。

弯曲性能符合标准要求,未发现裂纹出现; $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,焊缝中心的平均冲击吸收能量为 123 J ,显示较为优异的冲击韧性。图9、图10分别为焊缝区SEM组织图焊接接头的表层显微硬度分布。

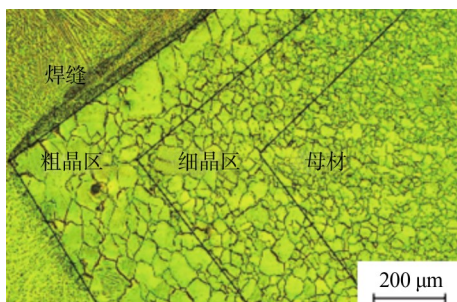


图8 GMAW焊缝及热影响区显微组织

Fig. 8 Microstructure of GMAW welded seam and heat affected zone

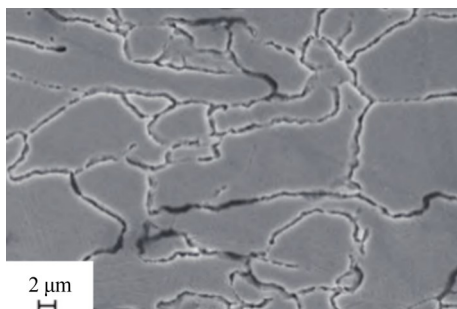


图9 GMAW焊缝SEM组织

Fig. 9 SEM microstructure of GMAW welded seam

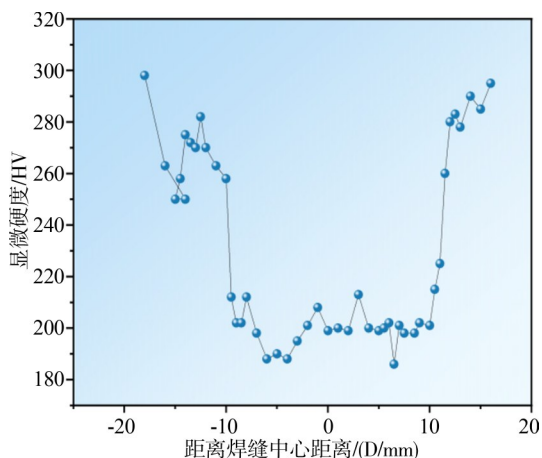


图10 焊接接头表层显微硬度

Fig. 10 Microhardness of the surface layer of welded joint

2.3 焊条电弧焊

如图11所示,焊条电弧焊的热影响区组织为奥氏体与少量夹杂物颗粒,熔合线附近晶粒粗大且狭长,焊缝组织为柱状晶^[42]。焊接接头硬度最低值均位于焊缝中心,拉伸试验断裂位置均为焊缝区域。

焊接接头的抗拉强度为 675.2 MPa ,拉伸和弯曲性能均能满足要求, $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时焊缝冲击吸收能量为 83.7 J ,冲击断口为韧性断裂;焊接接头的硬度分布有所差异,主要原因是热输入的不同位置传递能量的区别所致。图12、图13分别为焊缝SEM组织与焊接接头表层显微硬度分布。



图11 SMAW焊缝及热影响区显微组织

Fig. 11 Microstructure of SMAW welded seam and heat affected zone

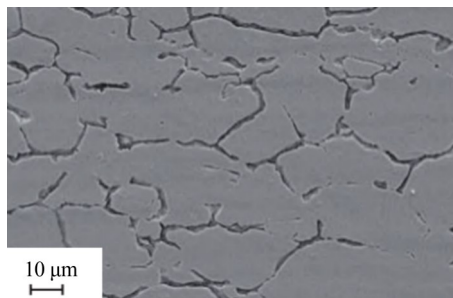


图12 SMAW焊缝SEM组织

Fig. 12 SEM microstructure of SMAW welded seam

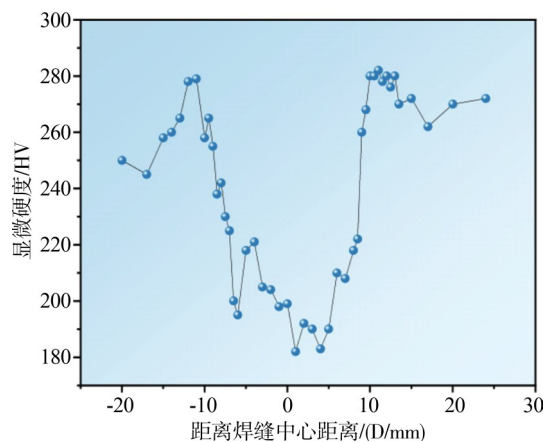


图13 焊接接头表层显微硬度

Fig. 13 Microhardness of the surface layer of welded joint

2.4 钨极惰性气体保护焊

付瑞东等^[38]采用钨极气体保护焊对厚度为 6 mm 的 $32\text{Mn}-7\text{Cr}-0.6\text{Mo}-0.3\text{N}$ 高锰钢进行了焊接试验,在 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温条件下,焊接接头的强度极

限达到了 1 250 MPa,相较于母材(极限 1 350 MPa)略有下降。

在采用 TIG 及 SMAW 等焊接工艺对高锰钢进行焊接处理时常会遇到一系列技术挑战。具体而言,这些挑战包括焊接过程中熔融区域的元素偏析现象显著加剧,进而导致焊接接头的连接强度显著降低;同时,凝固过程中可能出现开裂问题,严重影响焊接质量;此外,由于在热影响区的作用下,晶粒大小倍增,导致对焊接接头的抗拉强度与规定非比例延伸强度产生不利的影响。特别是在异种焊接时,由于 Mn 元素偏析原因,进一步限制了实用性与泛用性^[20]。

在高锰钢 TIG 焊接过程中,存在 N 元素烧损问题,这是因为母材中的 N 元素在焊接时易于溢出熔池区域。鉴于此,有学者在进行高锰钢 TIG 焊接时创新性地保护气体中融入氮气(N_2),以期实现气体中的 N 元素能浸入熔融金属,从而大幅度提升焊缝金属中氮元素的浓度。文献[27]揭示,在采用纯氩气作为保护介质进行 TIG 焊接,针对含 0.3%N 元素的高锰钢时,焊接过程中氮元素含量降至 0.27%。进一步地,当在保护气体中融入 4% 的氮气后,焊缝金属中的氮元素含量显著提升至 0.39%,这一调整不仅优化了焊接接头的性能,还显著提升了其整体质量与可靠性。

2.5 激光焊

激光焊接技术在低温高锰钢材料的应用最为

普遍且显著的是激光拼焊技术,在此工艺过程中,C 与 Mn 元素会经历显著的偏析现象,即元素在焊接界面处的不均匀分布。由于激光拼焊技术独特的快速冷却特性,焊缝区域的组织结构会经历急剧细化,具体表现为晶粒尺寸的显著减小。这一变化进而引发焊缝区域的硬度显著提升,然而,伴随而来的是焊接接头在塑性性能上的一定程度降低^[44]。MUJICA 等^[24]研究发现,焊缝中马氏体结构出现的诱因是激光焊接过程中存在的 Mn 元素烧损和偏析现象,这使得该区域的强度得到提升,但塑性却相应降低。

激光焊接有望应用于小型 LNG 储罐和管道,因此合金元素的汽化受到了特别关注。例如,Mn 在 1 500 °C 和 1 600 °C 时的蒸气压分别为 2 000 Pa 和 4 770 Pa。激光束焊接过程中形成的匙孔会使 Mn 元素气化。Mn 是提高钢中奥氏体稳定性的合金元素,由于汽化而改变 Mn 含量,塑性变形能力也会随之弱化。该研究分析了低温高锰钢激光焊接过程中 Mn 的汽化特性,研究了焦点位置诱导的匙孔形成过程和匙孔壁温度(见图 14)以了解 Mn 气化量随激光穿透程度不同而变化的机理。激光束的离焦距离越小,能量密度越高,穿透越彻底,激光束的多重反射越少,匙孔壁温度越低,因此 Mn 的气化量越小。电子探针显微分析结果与本研究使用的分析模型高度一致,证实了匙孔形成的部分穿透焊缝中 Mn 气化最为显著^[45]。

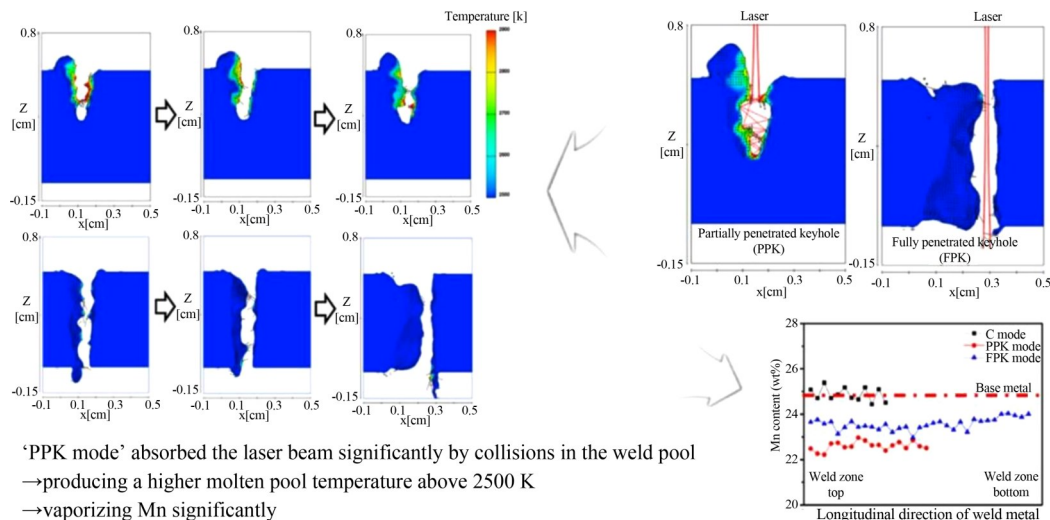


图 14 键孔形成过程和键孔壁温度

Fig. 14 Keyhole Formation Process and Keyhole Wall Temperature

3 结论

综上所述,本文探讨了LNG储罐用低温高锰钢焊接过程中存在的缺陷——热裂纹的形成、合金元素的烧损以及焊接接头在低温环境的性能恶化等问题,并提出了实际焊接应用过程中的预防措施。对于焊接热裂纹,主要通过调整化学成分,如通过降低S、P等杂质元素含量,可以有效控制热裂纹的产生;针对合金元素烧损问题,主要通过优化焊接工艺参数,调整焊接热输入等手段。当采用合适的焊接速度和焊接工艺参数,高温停留时间适度,冶金反应充分,可以有效控制焊缝金属合金元素的烧损,焊缝金属可以保持奥氏体组织稳定性,进而保障焊接接头的强度与韧性,同时通过焊接材料中有益合金元素的补充也是有效的控制手段;针对焊接接头在低温环境中性能恶化的问题,可在材料选择上侧重于使用低温韧性较好的钢材和焊材,并通过后续的热处理和预热手段来改善其低温性能,在此基础上,进一步探索新型焊接材料及工艺,将为高锰钢焊接技术的发展提供更为广阔的应用前景。

焊接方法对低温高锰奥氏体钢焊接接头的显微组织和力学性能有着显著的影响。埋弧焊和活性气体保护焊在低温条件下均能保持良好的力学性能,且焊缝与母材的性能差距不大。然而,活性气体保护焊在冲击韧性方面表现出更优的综合性能,尤其在 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温环境下,冲击韧性优势更为明显;焊条电弧焊和钨极惰性气体保护焊应通过控制热输入避免熔融区元素偏析和焊接热影响区组织晶粒过于粗大的问题;激光焊在低温高锰钢焊接中也显示出巨大的应用潜力,但仍然存在设备成本较大、焊接结构装配精度高和对坡口尺寸形式容忍度较差的问题。

随着相关研究的进一步深入,特别是随着低温高锰钢组织性能的进一步优化和均匀分布,配套焊接材料的洁净度进一步提高,配套焊接工艺的进一步精细化,低温高锰钢将会在更多的装备制造中获得广泛应用。

参考文献:

[1] 王思佳. 中国高锰钢“猛”出圈[J]. 中国船检, 2022

(06):30-33.

WANG S J. Chinese high manganese steel "Meng" goes viral[J]. CHINA SHIP SURVEY, 2022(06):30-33.

[2] 华学明,蔡艳,吴毅雄,等. 大型LNG船围护系统低温金属材料焊接技术现状及发展[J]. 电焊机, 2015, 45(05):28-35.

HUA X M, CAI Y, WU Y X, et al. Status and development of welding technology of low temperature metal material used in large LNG ship envelope system[J]. Electric Welding Machine, 2015, 45(05):28-35.

[3] 陈学东,范志超,崔军,等. 我国压力容器高性能制造技术进展[J]. 压力容器, 2021, 38(10):1-15.

CHEN X D, FAN Z C, CUI J, et al. Progress in high-performance manufacturing technology for pressure vessels in China[J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38(10):1-15.

[4] 方乃文,黄瑞生,闫德俊,等. 低镍含氮奥氏体不锈钢激光-电弧焊电弧特性及组织和性能[J]. 焊接学报, 2021, 42(01):70-75

FANG N W, HUANG R S, YAN D J, et al. Effect of welding heating input on microstructure and properties of MAG welded joint for low nickel high nitrogen austenitic stainless steel[J]. Transactions of the China Welding institution, 2021, 420:70-75

[5] Lee J H, Sohn S S, Hong S M, et al. Effects of Mn Addition on Tensile and Charpy Impact Properties in Austenitic Fe-Mn-C-Al-Based Steels for Cryogenic Applications[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2014, 45(12):5419-5430.

[6] 郭伟,蔡艳,华学明. LNG用低温高锰钢及其焊接技术发展[J]. 电焊机, 2020, 50(11):7-11+142.

GUO W, CAI Y, HUA X M. Development of cryogenic high-manganese steel and its welding technology for LNG applications[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(11):7-11+142.

[7] Wang Y, Shi B, He Y, et al. A Fine Grain, High Mn Steel with Excellent Cryogenic Temperature Properties and Corresponding Constitutive Behaviour[J]. Materials, 2018, 11(2):253-253.

[8] Rudskoi A I, Parshin S G. Advanced Trends in Metallurgy and Weldability of High-Strength Cold-Resistant and Cryogenic Steels[J]. Metals, 2021, 11(12):1891-1891.

[9] Jun C, Kuan J R, Yu Z L. Deformation microstructures as well as strengthening and toughening mechanisms of low-density high Mn steels for cryogenic applications

- [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 13: 947–961.
- [10] Sohn S S, Hong S, Lee J, et al. Effects of Mn and Al contents on cryogenic-temperature tensile and Charpy impact properties in four austenitic high-Mn steels[J]. Acta Materialia, 2015, 100: 39–52.
- [11] Wang X, Sun X, Song C, et al. Enhancement of yield strength by chromium/nitrogen alloying in high-manganese cryogenic steel[J]. Materials Science & Engineering A, 2017, 698: 110–116.
- [12] Ren J, Chen Q, Chen J, et al. Enhancing strength and cryogenic toughness of high manganese TWIP steel plate by double strengthened structure design[J]. Materials Science & Engineering A, 2020, 786: 139397.
- [13] Chen J, Dong F T, Liu Z Y, et al. Grain size dependence of twinning behaviors and resultant cryogenic impact toughness in high manganese austenitic steel[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 10: 175–187.
- [14] Li Y, Lu Y, Li W, et al. Hierarchical microstructure design of a bimodal grained twinning-induced plasticity steel with excellent cryogenic mechanical properties[J]. Acta Materialia, 2018, 15: 879–894.
- [15] Ruidong F, Yangzeng Z, Yibin R. Mechanical Properties of 32Mn–7Cr–0.6Mo–0.3N Austenitic Steel for Cryogenic Applications[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2001, 10(4): 456–459.
- [16] Luo Q, Wang H, Li G, et al. On mechanical properties of novel high-Mn cryogenic steel in terms of SFE and microstructural evolution[J]. Materials Science & Engineering A, 2019, 75: 391–98.
- [17] Jia-kuan R, Qi-yuan C, Jun C, et al. Role of vanadium additions on tensile and cryogenic-temperature charpy impact properties in hot-rolled high-Mn austenitic steels[J]. Materials Science & Engineering A, 2021, 811: 141063.
- [18] Chen J, Ren J, Liu Z, et al. The essential role of niobium in high manganese austenitic steel for application in liquefied natural gas tanks[J]. Materials Science & Engineering A, 2020, 772: 138733–138733.
- [19] CHARLES J, BERZHEGAN A, LUTTS A, et al. New cryogenic materials iron-manganese-aluminum alloys[J]. Metal Progress, 1981, 119(6): 71.
- [20] 浦项开发出高锰钢大容量LNG贮藏罐[J]. 鞍钢技术, 2014(02): 62.
POSCO develops high-manganese steel large-capacity LNG storage tanks[J]. Angang Technology, 2014(02): 62.
- [21] 张福成, 陈晨, 刘帅, 等. 高锰钢研究进展: 成分、组织和性能调控[J]. 钢铁, 2024, 59(03): 1–18+78.
ZHANG F C, CHEN C, LIU S, et al. A review on high manganese steels: Control of chemical composition, microstructure and properties[J]. Iron and Steel, 2024, 59(03): 1–18+78.
- [22] 刘宁, 旷五洲, 陈俊. 含钒高锰LNG储罐用钢热变形行为及组织演变研究[J]. 轧钢, 2023, 40(05): 25–31+46.
LIU N, KUANG W Z, CHEN J. Study on hot deformation behaviors and microstructure evolution of V-bearing high Mn steel for LNG tank[J]. Steel Rolling, 2023, 40(05): 25–31+46.
- [23] 谷秀锐, 刘丽君, 刘燕霞, 等. 高锰钢显微组织的显示方法[J]. 理化检验-物理分册, 2024, 60(03): 20–22.
GU X R, LIU L J, LIU Y X, et al. Display method for microstructure of high manganese steel[J]. PTCA (PART A: PHYS. TEST.), 2024, 60(03): 20–22.
- [24] Mujica L, Weber S, Thomy C, et al. Microstructure and mechanical properties of laser welded austenitic high manganese steels[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2009, 14(6): 517–522.
- [25] Chan J W, Morris J W. Cryogenic mechanical properties of high-manganese steel weldments[J]. Advances in Cryogenic Engineering, 1985(32): 97–102.
- [26] Yoo J, Han K, Park Y, et al. Effect of silicon on the solidification cracking behavior and metastable carbide formation in austenitic high Mn steel welds[J]. Materials Chemistry and Physics, 2014, 148(3): 499–502.
- [27] 吴志强, 李华英, 李娟, 等. 高强塑性低密度高锰钢的TIG焊接接头显微组织及力学性能[J]. 电焊机, 2018, 48(03): 290–293.
WU Z Q, LI H Y, LI J, et al. Microstructure and mechanical properties of TIG welded joints of high strength and plasticity low density high manganese steel[J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(03): 290–293.
- [28] Jeong D, Park T, Lee J, et al. Ambient and cryogenic S–N fatigue behavior of Fe15Mn steel and its weld[J]. Metals & Materials Inter., 2015, 21(3): 453–460.
- [29] Choi J K, Lee S G, Park Y H, et al. High manganese austenitic steel for cryogenic applications[C]//Proceedings of the Twenty-second (2012) International Off-shore and Polar Engineering Conference Rhodes, Greece, 2012.
- [30] Choi M, Lee J, Nam H, et al. Tensile and Microstruc-

- tural Characteristics of Fe-24Mn Steel Welds for Cryogenic Applications [J]. *Metals and Materials International*, 2020, 26(2): 240-247.
- [31] Sutton B J, Lippold J C. Effect of alloying additions on the solidification cracking susceptibility of high manganese steel weld metals[C]//*Proceedings of the Twenty-third (2013) International Offshore and Polar Engineering Anchorage, Alaska, USA, June 30-July 5, 2013*.
- [32] 冯伟, 于庭祥, 陈波, 等. LNG 储罐用低温高锰钢埋弧焊材料组织和性能研究[J]. *压力容器*, 2023, 40(05): 1-7+33.
- FENG W, YU T X, CHEN B, et al. Study on the microstructure and properties of low temperature high manganese steel submerged arc welding materials for LNG storage tanks[J]. *Pressure Vessel Technology*, 2023, 40(05): 1-7+33.
- [33] 韩佳源, 黄智泉, 黄彩艳, 等. 高锰钢堆焊修复用药芯焊丝焊接接头组织性能分析[J]. *焊接技术*, 2020, 49(10): 77-80.
- HAN J Y, HUANG Z Q, HUANG C Y, et al. Organisational properties of flux-cored wire welded joints for high manganese steel surfacing repairs [J]. *Welding Technology*, 2020, 49(10): 77-80+6.
- [34] 张侠洲, 高立军, 姚仲成, 等. 合金元素对耐候熔覆金属力学性能及耐蚀性能的影响[J]. *焊接学报*, 2019, 40(5): 154-160.
- ZHANG X Z, GAO L J, YAO Z C, et al. Influence of alloying elements on mechanical and corrosion resistance properties of weathering molten metal[J]. *Transactions of the China Welding institution*, 2019, 40(5): 154-160.
- [35] MA L L, WEI Y H, HOU L F, et al. Microstructure and Mechanical Properties of TWIP Steel Joints[J]. *Journal of Iron and Steel Research (International)*, 2014, 21(8): 749-756.
- [36] Jr J W M, Hwang S K, Yushchenko K A, et al. Fe-Mn Alloys for Cryogenic Use: A Brief Survey of Current Research [M]. *Advances in Cryogenic Engineering*, Springer US, 1978.
- [37] Lee J S, Kim K S, Kim Y, et al. Fatigue Strength Assessment of High Manganese Steel for LNG CCS[J]. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 2014, 51(3): 246-253.
- [38] 付瑞东, 李亮玉, 郑炆曾. 高锰奥氏体超低温钢焊接接头的组织和力学性能[J]. *焊接学报*, 2001, 22(3): 21-24.
- FU R D, LI L Y, ZHENG Y Z. Organisation and mechanical properties of welded joints in high manganese austenitic ultra-low temperature steels[J]. *Transactions of the China Welding institution*, 2001, 22(3): 21-24.
- [39] 陈亚魁, 王红鸿, 孟亮, 等. 超低温高锰钢埋弧焊焊缝金属微观组织及冲击韧性分析[J]. *武汉科技大学学报*, 2020, 43(05): 321-325.
- CHEN Y K, WANG H H, MENG L, et al. Analysis of microstructure and impact toughness of ultra-low temperature high manganese steel submerged arc welding seam metal[J]. *Journal of Wuhan University of science and technology*, 2020, 43(05): 321-325.
- [40] Fan X Y, Li Y T, Qi Y C, et al. Mechanical properties of cryogenic high manganese steel joints filled with nickel-based materials by SMAW and SAW[J]. *Materials Letters*, 2021, 304: 130596.
- [41] 徐浩, 刘建华, 刘洪波, 等. 高锰奥氏体低温钢发展现状、成分设计及热处理焊接工艺分析[J]. *特殊钢*, 2024, 45(02): 8-17.
- XU H, LIU J H, LIU H B, et al. Composition Design and Heat Treatment Welding Process Analysis of High-manganese Austenitic Cryogenic Steel[J]. *Special Steel*, 2024, 45(02): 8-17.
- [42] 郭广飞, 章小浒, 任明皓, 等. 焊接工艺对 LNG 储罐用高锰钢焊接接头组织和性能的影响[J]. *压力容器*, 2024, 41(05): 29-35.
- GUO G F, ZHANG X H, REN M H, et al. The effect of welding processes on the microstructure and properties of welded joints of high manganese steel for LNG storage tanks [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2024, 41(05): 29-35.
- [43] Zhang J S, Li G Q, Wang H H, et al. Microstructure, nonmetallic inclusions and impact toughness of high-Mn cryogenic steel weld metal[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2022, 27(7): 553-563.
- [44] 李辉, 江海涛, 杨林, 等. TWIP 钢激光拼焊板的力学性能及微观组织分析[J]. *材料科学与工艺*, 2014, 22(06): 6-9.
- LI H, JIANG H T, YANG L, et al. Mechanical properties and microstructure of laser welded TWIP steels[J]. *Materials Science & Technology*, 2014, 22(06): 6-9.
- [45] Choi M, Cho W D, Lee H K, et al. Severe Mn vaporization for partial-penetrated laser keyhole welds of high-manganese cryogenic steel[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 227(12): 55-67.