

DOI:10.11784/tdxbz202402012

# 热输入对高锰钢模拟焊接热影响区显微组织和低温韧性的影响

邸新杰<sup>1,2</sup>, 曲永涛<sup>1</sup>, 利成宁<sup>1,2</sup>, 巴凌志<sup>1</sup>

(1. 天津大学材料科学与工程学院, 天津 300350; 2. 天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300350)

**摘要:** 作为一种新型低温用材料, 高锰钢具有低成本及优异的低温力学性能等优势, 在液化天然气(LNG)储罐等领域具有广阔的应用前景. 然而在实际焊接过程中, 高锰钢焊接热影响区中距熔合线 3 mm 处的特定亚区(FL+3 亚区)会出现低温韧性恶化的问题. 针对这一问题, 采用焊接热模拟技术再现了不同热输入下的 FL+3 亚区, 通过扫描电子显微镜、电子探针 X 射线显微分析仪和透射电子显微镜观察晶界比例、偏析及析出相. 结果表明, 模拟 FL+3 亚区具有较好的低温韧性, 其冲击断面形貌均为大量的韧窝. 然而随着热输入增加, 其冲击吸收功降低, 10 kJ/cm、15 kJ/cm、30 kJ/cm 和 45 kJ/cm 不同热输入下的 -196 °C 冲击吸收功分别为 177 J、172 J、138 J 和 112 J. FL+3 亚区的显微组织为单相奥氏体组织, 随着热输入增加, 晶粒尺寸无明显变化, 而小角度晶界比例升高. 热输入增加会加剧 FL+3 亚区的 C、Cu 晶界偏析和 Mn 带状偏析, 提高偏析区域的层错能以及临界剪切孪晶应力, 使得孪生机制难以激活, 进而减弱了形变孪晶的初化作用, 降低低温韧性. 当热输入增大到 15 kJ/cm 时, FL+3 亚区开始析出尺寸约为 200 nm 的颗粒状和块状 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 碳化物, 且析出相的尺寸和数量随着热输入增加而进一步增加. 碳化物析出易引起应力集中而产生裂纹萌生, 降低了 FL+3 亚区的低温韧性.

**关键词:** 高锰钢; 热输入; 焊接热模拟; 晶界比例; 偏析; 析出相; 低温韧性

中图分类号: TG401

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2025)02-0131-07

## Effect of Heat Input on the Microstructure and Cryogenic Toughness of the Simulated Heat-Affected Zone of High Manganese Steel During Welding

Di Xinjie<sup>1,2</sup>, Qu Yongtao<sup>1</sup>, Li Chengning<sup>1,2</sup>, Ba Lingzhi<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** As a novel cryogenic material, high manganese steel has advantages of cost-effectiveness and excellent cryogenic mechanical properties, as well as broad application prospects in liquefied natural gas (LNG) storage tanks. However, during welding, its cryogenic toughness usually deteriorates in a specific subzone (the FL+3 subzone) of the heat-affected zone, which is located 3 mm away from the fusion line. To solve this problem, welding thermal simulations of the FL+3 subzone were conducted under different heat inputs. A scanning electron microscope, an electron probe X-ray microanalyzer, and a transmission electron microscope were used to observe the grain boundary proportion, segregation, and precipitate. The result showed that the FL+3 subzone had good cryogenic toughness, and the fracture morphologies were characterized by numerous dimples. However, with increasing heat input, the impact absorbed energy decreased. The -196 °C impact absorbed energies at 10 kJ/cm, 15 kJ/cm, 30 kJ/cm, and 45 kJ/cm were 177 J, 172 J, 138 J, and 112 J, respectively. The FL+3 subzone consisted of single-phase austenite.

收稿日期: 2024-02-21; 修回日期: 2024-03-11.

作者简介: 邸新杰 (1973—), 男, 博士, 教授.

通信作者: 邸新杰, dixinjie@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52074191).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52074191).

With increasing heat input, the grain size did not change significantly, while the proportion of low-angle grain boundaries increased. A higher heat input aggravated the C-Cu grain boundary and Mn band segregation in the FL + 3 subzone, increasing the stacking fault energy and critical shear stress for twinning in the segregating region. This made it difficult to activate the twinning mechanism, weakened the toughening effect of deformation twins, and reduced the cryogenic toughness. When the heat input was 15 kJ/cm, granular and massive Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> carbides with a size of about 200 nm were precipitated, and the size and quantity of the precipitates further increased with increasing heat input. The carbide precipitates caused stress concentration and crack initiation, deteriorating the cryogenic toughness of the FL + 3 subzone.

**Keywords:** high manganese steel; heat input; welding thermal simulation; grain boundary proportion; segregation; precipitate; cryogenic toughness

近年来,液化天然气(LNG)已成为一种重要的清洁能源,LNG 储罐材料的研发也成为当前的研究热点<sup>[1]</sup>.传统的 LNG 储罐材料主要采用 9Ni 钢、铝合金、奥氏体不锈钢、殷瓦钢等<sup>[2-3]</sup>,但这些材料往往存在极端环境下性能较差或成本较高等问题.因此,研究者提出以低成本的 Mn 元素来替代昂贵的 Ni 元素,成功开发出了具有低成本、优异低温韧性的新型高锰钢.由于其能够满足超低温服役环境下的苛刻要求<sup>[4]</sup>,在 LNG 储罐等低温应用领域展现出了广阔的应用前景.

焊接是 LNG 储罐的重要加工工艺,焊接热源施加的瞬时、集中的热作用会导致焊接热影响区(HAZ)产生较大温度梯度,进而造成显微组织的不均匀性和韧性的恶化,对 LNG 储罐的安全性及服役寿命产生不利影响.对于高锰钢来说,在焊接过程中不发生相变<sup>[5]</sup>,而 HAZ 的 FL + 3 亚区(距熔合线 3 mm)易产生严重的偏析行为和析出行为,导致韧性降低.此外,随着大容量 LNG 储罐的发展,需要更高的焊接热输入来提高生产效率,而高热输入导致低温韧性的急剧恶化也成为制约高锰钢焊接应用的难题,有必要研究不同热输入对高锰钢显微组织及低温韧性的影响.因此,本文采用焊接热模拟技术再现了高锰钢焊接 HAZ 的 FL + 3 亚区,针对不同焊接热输入下 FL + 3 亚区的晶界比例、偏析和析出相进行研究,阐明其对低温韧性的影响,为高锰钢的工程应用提供参考依据.

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

试验所用母材为新型高锰钢,其厚度为 20 mm,通过直读光谱仪测得的化学成分如表 1 所示.在试验前,对其进行水韧处理,即在 1 050 °C 下固溶处理 1 h 后立即水冷,得到均匀的单相奥氏体组织并消除晶界

析出的碳化物.

表 1 高锰钢的化学成分

Tab.1 Chemical composition of high manganese steel

W <sub>C</sub>	W <sub>Mn</sub>	W <sub>Si</sub>	W <sub>S</sub>	W <sub>P</sub>	W <sub>Cu</sub>	W <sub>Cr</sub>	W <sub>Fe</sub>
0.42	24.40	0.25	0.002	0.01	0.43	3.25	余量

### 1.2 试验方法

将高锰钢板加工成尺寸为 11.0 mm×11.0 mm×71.0 mm 的焊接热模拟试样.使用 Gleeble3800 热模拟试验机进行焊接热模拟试验,来模拟高锰钢焊接 HAZ 的 FL + 3 亚区在 10 kJ/cm、15 kJ/cm、30 kJ/cm 和 45 kJ/cm 不同热输入下的焊接热循环.根据 Rykalin-3D 模型计算焊接热循环曲线相关参数,三维导热焊件上某一点的温度  $T$  随时间  $t$  的变化为

$$T = g(t) = \frac{E}{2\pi\lambda t} \exp\left(\frac{-r_0^2}{4at}\right) \quad (1)$$

式中: $E$  为焊接热输入; $\lambda$  为导热系数, $\lambda = 13.39 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ; $a$  为热扩散率, $a = \lambda/(c\rho)$ , $c$  为比热容, $c = 0.50 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ , $\rho$  为密度, $\rho = 7.80 \text{ g}/\text{cm}^3$ ; $r_0$  为焊件上某点距离热源运行轴线的垂直距离,表示为

$$r_0^2 = \frac{0.234E}{c\rho T_p} \quad (2)$$

式中  $T_p$  为峰值温度.焊件从 800 °C 到 500 °C 的冷却时间  $t_{8/5}$  为

$$t_{8/5} = \frac{E}{2\pi\lambda} \left( \frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \quad (3)$$

式中  $T_0$  为预热温度,考虑到多层多道焊的层间温度,其数值设置为 80 °C.最终得到焊接热循环参数结果列于表 2,试验过程中获得的实际焊接热循环曲线如图 1 所示.

焊接热模拟试验后,对试样中心部分均温区进行显微组织表征,使用配备有电子背散射衍射(EBSD)的 JSM-7800F 热场发射扫描电子显微镜来观察模拟

FL + 3 亚区的晶体学取向特征, 使用 SHIMADZU EPMA-1720 电子探针 X 射线显微分析仪分析元素偏

析种类及程度, 使用 JEM-F200 透射电子显微镜分析析出相种类及形貌.

表 2 焊接热模拟试验参数

Tab.2 Test parameters of welding thermal simulations

热输入 $E$ /(kJ/cm)	峰值温度 $T_p$ /°C	加热速度 $\omega_H$ /(°C/s)	停留时间 $t_H$ /s	冷却时间 $t_8/5$ /s
10	850	150	1	12
15	850	150	1	18
30	850	150	1	35
45	850	150	1	53

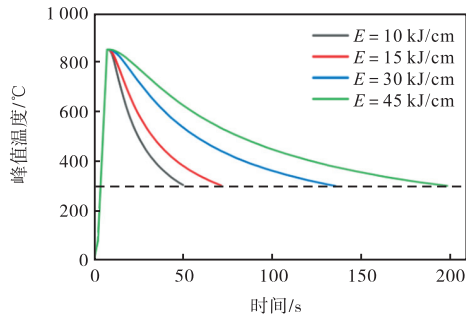


图 1 焊接热循环曲线

Fig.1 Welding thermal cycle curves

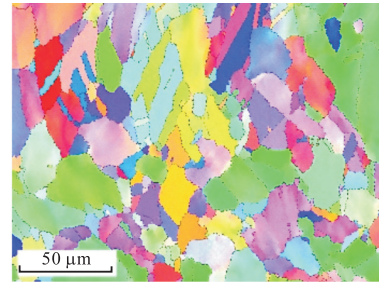
根据标准《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》(GB/T 229—2007), 将热模拟试样加工成尺寸为 10 mm × 10 mm × 55 mm 的冲击试样, 使用 ZBC2752-ED 型摆锤冲击试验机进行 -196 °C 夏比 V 型缺口冲击试验. 冲击试验结果取 3 个试样平均值.

## 2 试验结果及分析

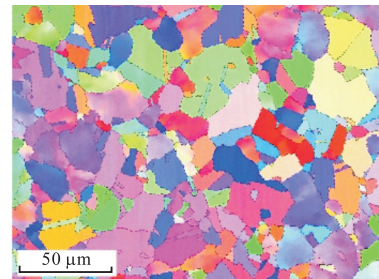
### 2.1 热输入对 FL + 3 亚区晶粒尺寸及晶界比例的影响

不同热输入下模拟 FL + 3 亚区显微组织的 EBSD 分析结果如图 2 所示. 在经历焊接热循环后, FL + 3 亚区未发生相变, 其显微组织为奥氏体等轴晶. 晶粒内部还分布有大量退火孪晶, 其与奥氏体基体存在一定的取向差. 试样在加热时会受到拘束应力的作用而产生变形带, 因此奥氏体晶粒呈现被拉长的形貌. 由于焊接热循环的峰值温度较低且高温停留时间较短, 不同热输入下 FL + 3 亚区的奥氏体晶粒均未发生明显粗化. 经统计得到 10 kJ/cm、15 kJ/cm、30 kJ/cm 和 45 kJ/cm 4 组热输入下的平均晶粒尺寸(平均截距长度)分别为 11.6 μm、12.0 μm、11.8 μm 和 12.2 μm, 表明热输入对 FL + 3 亚区晶粒尺寸影响不大.

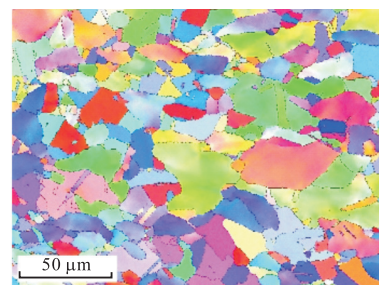
图 3 表示 FL + 3 亚区晶界取向差的分布情况, 以阐明不同热输入下晶界比例的变化规律. 在焊接热循环的作用下, FL + 3 亚区受到较强的热作用, 发生



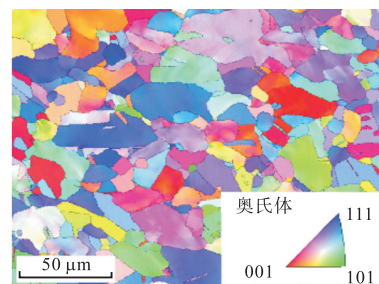
(a) 热输入为 10 kJ/cm



(b) 热输入为 15 kJ/cm



(c) 热输入为 30 kJ/cm



(d) 热输入为 45 kJ/cm

图 2 不同热输入下 FL + 3 亚区的反极图

Fig.2 Inverse pole figures of the FL + 3 subzone under different heat inputs

位错滑动和缠结. 位错在晶界和孪晶界处受到阻碍并产生位错塞积, 进而导致小角度晶界形成. 在 10 kJ/cm 和 15 kJ/cm 的小热输入下, 焊接热循环的热作用程度较小, 使得 FL + 3 亚区的小角度晶界比例较低, 而大角度晶界比例较高. 然而当热输入增大到

30 kJ/cm 和 45 kJ/cm 时, 更为强烈的热作用会促进小角度晶界形成, 导致其所占比例急剧升高. 经统计得到 4 组热输入下的小角度晶界比例分别为 23.7%、26.3%、35.8% 和 36.8%, 表明较大的热输入会显著提高 FL + 3 亚区的小角度晶界比例.

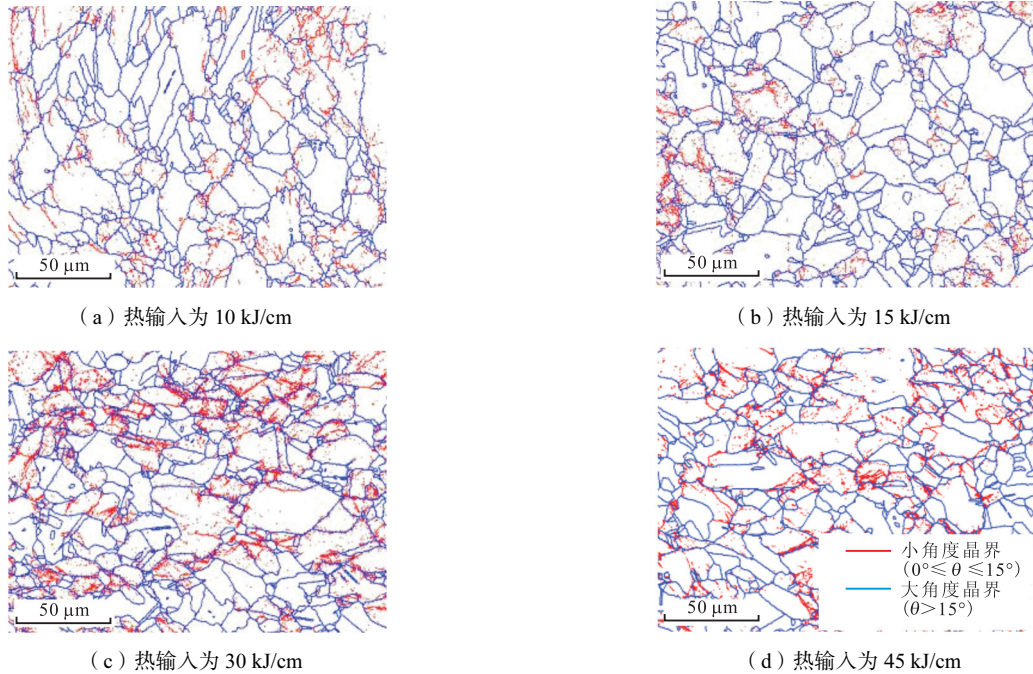


图 3 不同热输入下 FL + 3 亚区的晶界图

Fig.3 Grain boundary figures of the FL + 3 subzone under different heat inputs

### 2.2 热输入对 FL + 3 亚区偏析的影响

高锰钢存在严重的偏析倾向, 因此焊接过程中 HAZ 产生的温度梯度差异会加剧溶质元素偏聚, 导致 HAZ 产生剧烈的偏析行为, 对力学性能造成不利影响<sup>[6]</sup>. 图 4 为不同热输入下模拟 FL + 3 亚区中 C、Mn、Cr、Cu 4 种主要合金元素的分布情况. 可以从图中看出, Cr 元素在晶界和晶内的分布相对均匀, 然而 C、Cu、Mn 3 种元素在局部区域内产生明显的偏析现象, 其中 C 和 Cu 元素产生晶界偏析, 而 Mn 元素则产生带状偏析.

随着热输入增大, C、Cu 元素的晶界偏析程度会呈现逐渐加剧的趋势. 当热输入为 10 kJ/cm 时, FL + 3 亚区的晶界偏析程度较弱. 然而由于变形带的影响, 该处晶界相较于其他位置更易受到硝酸酒精腐蚀而产生凹坑. 这会导致测试位置处元素聚集, 从而造成偏析程度升高. 随着热输入进一步增大, 更长的高温停留时间会进一步弱化晶界, 元素更容易在晶界处聚集而加剧晶界偏析程度.

此外, 随着热输入增大, Mn 元素的带状偏析程度逐渐加剧. 当热输入为 10 kJ/cm 时, FL + 3 亚区中的带状偏析程度较弱, 偏析带和基体的 Mn 含量差异

较小, 测得偏析带中 Mn 的平均含量为 21.7%. 当热输入增大到 15 kJ/cm 时, 偏析带中的 Mn 含量略有降低, 其平均数值为 20.8%, 该数值与 10 kJ/cm 热输入时的结果相差不大, 可以认为其 Mn 含量处于相同

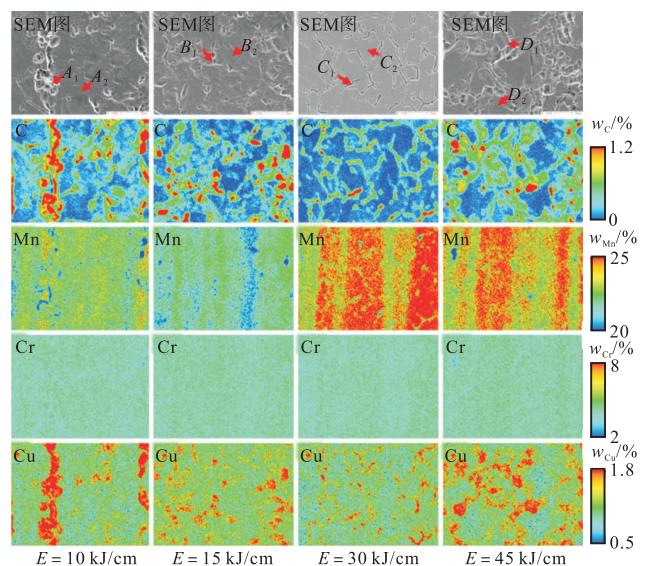


图 4 热输入对 FL + 3 亚区偏析的影响

Fig.4 Effect of the heat input on segregation in the FL + 3 subzone

水平。但由于更高的热输入导致焊接 HAZ 中产生局部更大的温度梯度, Mn 元素偏析倾向加剧, 开始沿变形带呈现出明显的带状分布。当热输入进一步增大到 30 kJ/cm 和 45 kJ/cm 时, 偏析程度进一步加剧, 偏析带与基体的成分差异更为明显, 此时偏析带中的平均 Mn 含量分别升高到 24.5% 和 24.4%。这可能是由于锰在铁中溶解形成置换固溶体, 其扩散速率较低导致偏析<sup>[7]</sup>, 而更大的热输入使得局部区域内形成更为强烈的温度梯度, Mn 元素在快速冷却条件下无法及时扩散而产生严重堆积。

### 2.3 热输入对 FL + 3 亚区析出相的影响

晶界是一种结构缺陷, 为了使体系的总自由能最小化, 晶界会与位错、空位或外来原子等其他缺陷之间发生相互作用。因此, 高锰钢中由晶界偏析产生的偏析原子通常会重新排列并相互结合, 导致析出相的形核和生长<sup>[8]</sup>。图 5 为不同热输入下模拟 FL + 3 亚区析出相的 TEM 谱图。当热输入为 10 kJ/cm 时, 在

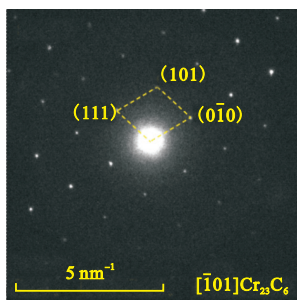
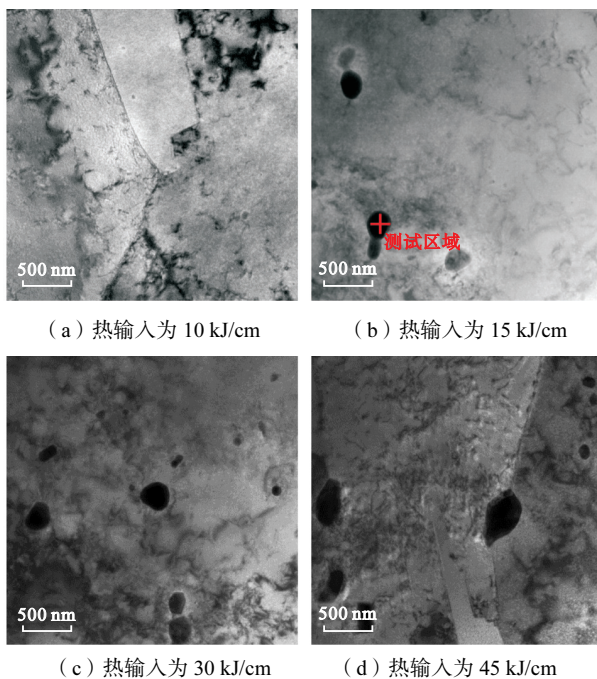


图 5 热输入对 FL + 3 亚区析出相形貌的影响

Fig.5 Effect of the heat input on the morphology of precipitates in the FL + 3 subzone

FL+3 亚区内没有观察到较大尺寸的析出相, 说明较小的热输入使得析出相没有充足的时间形核并长大。然而, 当热输入增大到 15 kJ/cm 时, 在奥氏体基体和晶界中观察到颗粒状和块状的析出相, 其尺寸约为 200 nm。为了确定该析出相的种类, 对图 5 (b) 中标记处的选区电子衍射斑点进行标定, 最终确定该析出相的种类为  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  碳化物。随着热输入进一步升高, 更长的高温停留时间使得析出相有充足的时间长大。因此, 随着热输入增大, 析出相的数量和尺寸均增加, 在 30 kJ/cm 时其最大尺寸约为 300 nm, 而在 45 kJ/cm 时其最大尺寸进一步增大到约 500 nm。

### 2.4 热输入对 FL + 3 亚区低温韧性的影响

图 6 反映了热输入对高锰钢模拟 FL + 3 亚区的  $-196\text{ }^\circ\text{C}$  冲击吸收功的影响。FL + 3 亚区具有优异的低温韧性, 其  $-196\text{ }^\circ\text{C}$  冲击吸收功均保持在 100 J 以上。这是由于高锰钢在变形过程中会发生孪生机制, 产生大量形变孪晶, 从而有效提高韧性<sup>[9]</sup>。一方面, 形变孪晶界面可以有效阻碍裂纹的扩展, 从而提高对裂纹扩展的阻力。另一方面, 在较大的冲击载荷和超低温下, 位错运动受到抑制, 难以通过位错滑移来产生塑性变形。而孪晶界面则是位错滑移面, 被其捕获的位错更容易发生滑动, 使得应力集中得到有效缓解, 从而提高材料的抗冲击性能<sup>[10]</sup>。

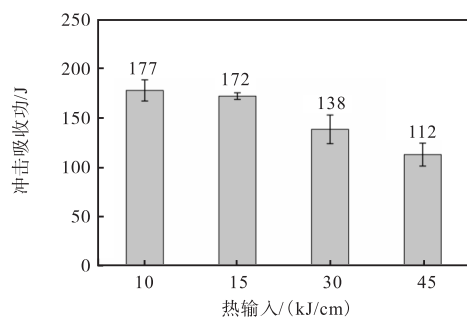


图 6 热输入对 FL + 3 亚区的  $-196\text{ }^\circ\text{C}$  冲击吸收功的影响  
Fig.6 Effect of the heat input on the  $-196\text{ }^\circ\text{C}$  impact absorbed energy in the FL + 3 subzone

然而随着热输入增大, FL + 3 亚区的  $-196\text{ }^\circ\text{C}$  冲击吸收功逐渐降低。当热输入从 10 kJ/cm 增大到 15 kJ/cm 时, FL + 3 亚区的冲击吸收功从 177 J 降低到 172 J, 降低程度较小; 而当热输入进一步增大到 30 kJ/cm 和 45 kJ/cm 时, 冲击吸收功分别降低到 138 J 和 112 J。对图 7 所示的冲击断口形貌进行观察, 发现 FL + 3 亚区发生韧性断裂。不同热输入下的断口形貌均为大量的韧窝, 较大尺寸的韧窝边缘处还分布着数量众多的小尺寸韧窝。在热输入为 10 kJ/cm 和 15 kJ/cm 时, 冲击断口处的韧窝数量较多, 而随着

热输入增大,其冲击吸收功有所降低,韧窝数量减少.

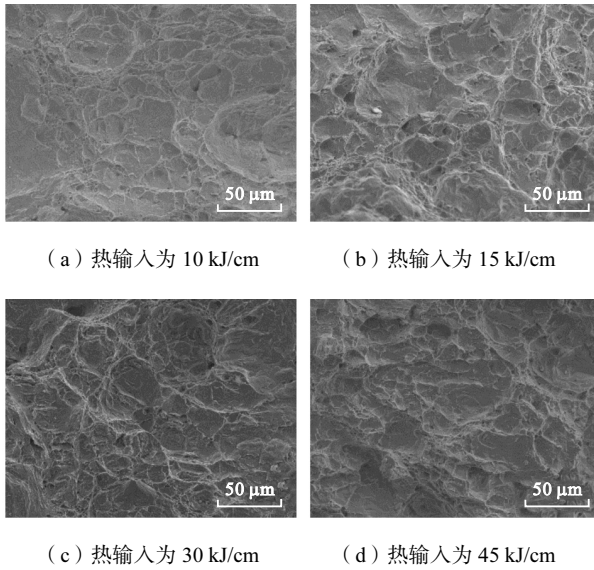


图 7 FL + 3 亚区冲击断口形貌

Fig.7 Impact fracture morphology of the FL + 3 subzone

2.5 FL + 3 亚区低温韧性的影响因素

较大的热输入能够使 FL + 3 亚区的低温韧性降低,这是由晶界比例、偏析和析出相等因素共同作用的结果.首先,不同于大角度晶界具有抑制裂纹扩展的作用,高比例的小角度晶界不仅无法阻止裂纹扩展,还容易使得裂纹偏转而降低韧性.此外,小角度晶界还会造成位错塞积和缠结,产生局部应力集中,从而促进裂纹的萌生.因此,随着热输入增加,逐渐升高的小角度晶界比例会降低 FL + 3 亚区的低温韧性.

其次,高锰钢中的偏析通常会造造成偏析区域化学成分的不均匀分布,从而改变局部区域的层错能.而更高的层错能会产生更大的临界剪切孪晶应力,使得塑性变形过程中孪生机制难以激活,减弱了形变孪晶对韧性的提高作用<sup>[11]</sup>.高锰钢的层错能通常采用热力学计算的方法得到,根据 Olson 等<sup>[12]</sup>提出的热力学平衡模型,其层错能  $\gamma_{isf}$  可以表示为

$$\gamma_{isf} = 2\rho\Delta G^{\gamma \rightarrow \epsilon} + 2\sigma^{\gamma \rightarrow \epsilon} \tag{4}$$

式中:  $\rho$  为 {1 1 1} 面的摩尔表面密度;  $\Delta G^{\gamma \rightarrow \epsilon}$  为由奥氏体到马氏体相变的吉布斯自由能;  $\sigma^{\gamma \rightarrow \epsilon}$  为奥氏体和马氏体的界面能,本文中取值为 9 mJ/m<sup>2</sup>.

临界剪切孪晶应力 ( $\tau_T$ ) 的方程<sup>[13]</sup>为

$$\tau_T = \frac{\gamma_{isf}}{b_p} + \frac{Gb_p}{D} \tag{5}$$

式中:  $b_p$  为不全位错的 Burgers 矢量大小;  $G$  为剪切模量;  $D$  为晶粒尺寸.

由式 (5) 可以看出,当晶粒尺寸不变时,临界剪

切孪晶应力与层错能呈正相关.假设试验用高锰钢的  $b_p = 2.5 \times 10^{-10}$  m,  $G = 65$  GPa<sup>[14]</sup>,根据 EPMA 线扫分析结果及上述公式计算出图 4 不同位置处的  $\gamma_{isf}$  和  $\tau_T$  的值,结果如表 3 所示.由于晶界偏析和带状偏析导致局部区域内 C、Cu、Mn 元素富集,晶界处 2 号位置的层错能会明显高于晶粒内部的 1 号位置,导致  $\tau_T$  增加.此外,  $\tau_T$  的值会随着热输入增大而增大,当热输入从 10 kJ/cm 上升到 15 kJ/cm 时,  $\tau_T$  的变化幅度较小.然而,当热输入从 15 kJ/cm 增大到 30 kJ/cm 和 45 kJ/cm 时,晶界处和晶粒内部的  $\tau_T$  均上升.此时,孪生机制难以激活,减弱了形变孪晶在低温冲击载荷下的韧化能力.此外,由偏析产生的晶格畸变也会降低晶界强度并形成缺陷,从而成为裂纹的起点.因此,较大热输入下更为严重的偏析会降低 FL + 3 亚区的低温韧性.

表 3 FL + 3 亚区的层错能 ( $\gamma_{isf}$ ) 及临界剪切孪晶应力 ( $\tau_T$ )

Tab.3 Stacking fault energy ( $\gamma_{isf}$ ) and critical shear stress for twinning ( $\tau_T$ ) of the FL + 3 subzone

位置	$w_C/\%$	$w_{Mn}/\%$	$w_{Cu}/\%$	$\gamma_{isf}/(mJ/m^2)$	$\tau_T/MPa$
A <sub>1</sub>	0.456	21.75	0.957	20.66	84.04
A <sub>2</sub>	1.256	21.53	1.913	36.19	146.16
B <sub>1</sub>	0.520	20.68	1.073	20.40	82.95
B <sub>2</sub>	1.444	19.82	1.661	34.08	137.67
C <sub>1</sub>	0.428	24.59	1.016	26.31	106.62
C <sub>2</sub>	1.364	24.24	1.386	41.24	166.34
D <sub>1</sub>	0.445	24.51	0.954	26.52	111.41
D <sub>2</sub>	1.547	24.32	1.526	42.57	171.61

最后,沿晶界析出的 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 碳化物析出相为脆硬相,与奥氏体基体的结合强度小,更容易引起应力集中而成为微裂纹萌生的起点<sup>[15]</sup>.这些微裂纹一旦形成,就会沿着奥氏体晶界迅速扩展.此外,在低温冲击载荷下,形变孪晶尖端与析出相之间会产生相互作用,导致晶间裂纹的产生.因此,随着热输入增大,FL + 3 亚区内析出相的尺寸和数量逐渐增多,极大地损害了 FL + 3 亚区的低温韧性.

3 结 论

(1) 高锰钢模拟热影响区 FL + 3 亚区的显微组织为单相奥氏体组织,未产生晶粒粗化.随着热输入增加,晶粒尺寸无明显变化,而小角度晶界比例升高.

(2) 模拟 FL + 3 亚区中存在严重偏析行为,随着热输入增加,C、Cu 晶界偏析和 Mn 的带状偏析程度加剧.偏析导致 FL + 3 亚区产生 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 碳化物析出相,其尺寸和数量随着热输入增加而增加.

(3) 模拟 FL + 3 亚区具有较好的低温韧性,然

而随热输入增加,其 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击吸收功降低.高比例的小角度晶界、严重的偏析和碳化物析出相共同作用降低了模拟 FL+3 亚区的低温韧性.其中,偏析会提高偏析区域的层错能及临界剪切孪晶应力,抑制孪生机制,进而减弱了形变孪晶的韧化作用.

#### 参考文献:

- [1] 罗震,武钰栋,马成勇,等.低温镍基焊条焊接的 LNG 储罐用 9Ni 钢接头的力学性能[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2020,53(8):771-776. Luo Zhen, Wu Yudong, Ma Chengyong, et al. Mechanical properties of 9Ni steel joints for LNG storage tanks welded with a low temperature nickel-based electrode[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2020, 53(8): 771-776 (in Chinese).
- [2] Tang J, He S D, Mo Y, et al. Revealing the cryogenic-temperature toughness and deformation mechanisms in high manganese austenitic steels[J]. Materials Characterization, 2022, 190: 112024.
- [3] 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(5):1-7,33. Feng Wei, Yu Tingxiang, Chen Bo, 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(5): 1-7, 33 (in Chinese).
- [4] Ba L Z, Di X J, Li C N, et al. Hot deformation behavior of a cryogenic high manganese steel based on the microstructure and texture evolution[J]. Materials Characterization, 2023, 195: 112554.
- [5] Deng H X, Liu Z H, Wang X F, et al. Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of the simulated coarse-grained heat-affected zone (CGHAZ) of novel twinning-induced plasticity (TWIP) steel[J]. Materials Today, 2022, 33(4): 104407.
- [6] Yang J, Dong H G, Xia Y Q, et al. Precipitation behavior of carbides and cryogenic toughness in heat-affected zone of high-Mn twinning-induced plasticity steel welded joint[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 68: 716-727.
- [7] Park M, Kang M S, Park G-W, et al. The effects of recrystallization on strength and impact toughness of cold-worked high-Mn austenitic steels[J]. Metals, 2019, 9: 948.
- [8] Sohn S S, Hong S, Lee G, 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.
- [9] 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.
- [10] Ren J K, Chen Q Y, Chen J, et al. Enhancing strength and cryogenic toughness of high manganese TWIP steel plate by double strengthened structure design[J]. Materials Science and Engineering A, 2020, 786: 139397.
- [11] Herbig M, Kuzmina M, Haase C, et al. Grain boundary segregation in Fe-Mn-C twinning-induced plasticity steels studied by correlative electron backscatter diffraction and atom probe tomography[J]. Acta Materialia, 2015, 83: 37-47.
- [12] Olson G B, Cohen M. A general mechanism of martensitic nucleation: Part I. General concepts and the FCC $\rightarrow$ HCP transformation[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1976, 7(12): 1897-1904.
- [13] Gutierrez-Urrutia I, Zaefferer S, Raabe D. The effect of grain size and grain orientation on deformation twinning in a Fe-22 wt.% Mn-0.6 wt.% C TWIP steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(15): 3552-3560.
- [14] Ren J-K, Chen Q-Y, Chen J, et al. On mechanical properties of welded joint in novel high-Mn cryogenic steel in terms of microstructural evolution and solute segregation[J]. Metals, 2020, 10(4): 478.
- [15] Li J R, Zhang C L, Jiang B, et al. Effect of large-size  $M_{23}C_6$ -type carbides on the low-temperature toughness of martensitic heat-resistant steels[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 685: 248-257.

(责任编辑:田军)