

# 粗晶热影响区比例对 09MnNiDR 焊接接头冲击韧性的影响

曹睿<sup>1</sup>, 杨兆庆<sup>1</sup>, 李金梅<sup>2</sup>, 雷万庆<sup>2</sup>, 张建晓<sup>3</sup>, 陈剑虹<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学, 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州, 730050; 2. 兰州兰石检测技术有限公司, 兰州, 730000; 3. 兰州兰石重型装备股份有限公司, 兰州, 730314)

**摘要:** 通过对 09MnNiDR 低温压力容器用钢埋弧焊焊接接头热影响区不同位置处的冲击吸收能量的测试、冲击断口以及微观组织的观察分析, 确定了 09MnNiDR 焊接接头的组织特征以及最薄弱区域, 并深入讨论了最薄弱区域对焊接接头冲击韧性的影响. 结果表明, 在 -70 °C 时, 焊接接头母材、亚临界热影响区、临界热影响区、细晶热影响区平均冲击吸收能量均在 270 J 以上, 表现出良好的韧性. 焊缝的平均冲击吸收能量为 139 J. 焊接接头韧性最薄弱区域为粗晶热影响区, 当缺口完全位于粗晶热影响区时, 冲击吸收能量为 20 J, 相比于母材冲击韧性损失高达 92.7%. 粗晶热影响区的显微组织为粗大的粒状贝氏体、板条贝氏体以及块状铁素体组成的复合组织. 随着缺口尖端前沿粗晶热影响区比例的增加, 其分布位置越靠近缺口尖端, 试样的冲击吸收能量越小, 充分体现出最薄弱区域对冲击韧性的影响.

**关键词:** 09MnNiDR; 最薄弱区域; 粗晶热影响区; 冲击韧性

**中图分类号:** TG 407 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20190818003

## 0 序言

韧性作为评估钢材性能好坏的关键性能之一, 直接影响钢铁材料设备的安全可靠使用. 大多数具有优异韧性的压力设备用钢材在经历焊接热循环后会产生一个韧性差的局部脆性区, 焊件的热影响区常常是设备损坏的薄弱区<sup>[1-2]</sup>. 而解理裂纹最容易在这个区域起裂, 并发生失稳扩展, 进而导致断裂<sup>[3]</sup>. 研究发现<sup>[4-7]</sup>, 热影响区 (heat affected zone, HAZ) 中的粗晶热影响区 (coarse grained heat affected zone, CGHAZ) 会生成粗大的脆性组织. 在这个区域原始奥氏体晶粒会显著粗化, 由于显微组织的粗化和基体上 M-A 组元析出, 使得 CGHAZ 冲击韧性相对于母材严重下降<sup>[8-9]</sup>. 通常认为 CGHAZ 是 HAZ 中典型的最薄弱区域. 但是最薄弱区域对冲击韧性影响的详细机制尚不清楚. 文章通过实际施焊确定了 HAZ 的最薄弱区域, 分析了 09MnNiDR 埋弧焊焊接接头 HAZ 的组织、硬度、断口形貌以及

最薄弱区域与冲击韧性之间的关系.

## 1 试验方法

试验所用母材为 09MnNiDR 压力容器低温钢, 板厚 60 mm, 采用埋弧焊, 加工 U 形坡口, 焊前预热温度为 150 °C, 焊后经 610 °C × 3 h 退火处理. 具体的焊接工艺参数: 热输入  $E = 20 \text{ kJ/cm}$ , 焊接电流  $I = 510 \sim 520 \text{ A}$ , 焊接电压  $U = 30 \text{ V}$ , 焊接速度  $v = 28 \text{ m/h}$ . 焊接接头热影响区宏观形貌如图 1 所示. 采用的焊材为 H09MnNiDR 焊丝和 SJ208DR 焊剂. 母材化学成分如表 1 所示.

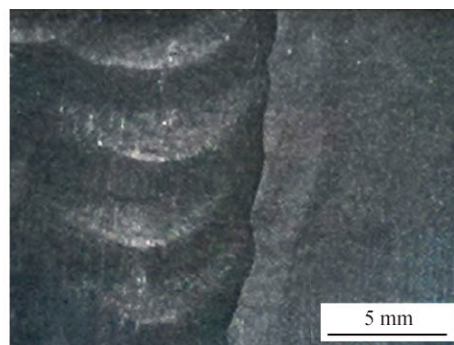


图 1 焊接热影响区宏观形貌

Fig. 1 Macroscopic diagram of welding HAZ

收稿日期: 2019-08-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51675255, 51265028); 兰州市科技计划项目 (2017C-07).

表 1 09MnNiDR 钢化学成分 (质量分数, %)  
Table 1 Chemical composition of 09MnNiDR steel

| C    | Si   | Mn   | Al   | Ni   | Nb   |
|------|------|------|------|------|------|
| 0.08 | 0.35 | 1.47 | 0.02 | 0.55 | 0.02 |

在板厚 1/4 处取冲击试样, 缺口方向垂直于焊接方向 (图 2). 冲击试样的夏比 V 形缺口分别取在母材 (base metal, BM), 焊缝 (weld metal, WM) 以及热影响区各个不同的区域, CGHAZ 缺口开在熔合线处, 细晶热影响区 (fine grained heat affected zone, FGHAZ) 缺口开在距离熔合线 1 mm 处, 临界热影响区 (intercritical heat affected zone, ICHAZ) 缺口开在距离熔合线 1.5 mm 处, 亚临界热影响区 (subcr-

itical heat affected zone, SCHAZ) 缺口开在距离熔合线 2 mm 处. 通过带有千分尺的光学显微镜在左右移动距离为 0.1 mm 的范围内统计出缺口尖端粗晶热影响区宽度所占 8 mm 缺口尖端前沿的比例 (图 2c). 采用微机控制摆锤冲击试验机进行 -70 °C 的低温冲击试验, Quanta450FEG 型扫描电子显微镜 (SEM) 分析组织、断口形貌. 通过 HAT-1000A 数字显示显微硬度仪测量显微硬度.

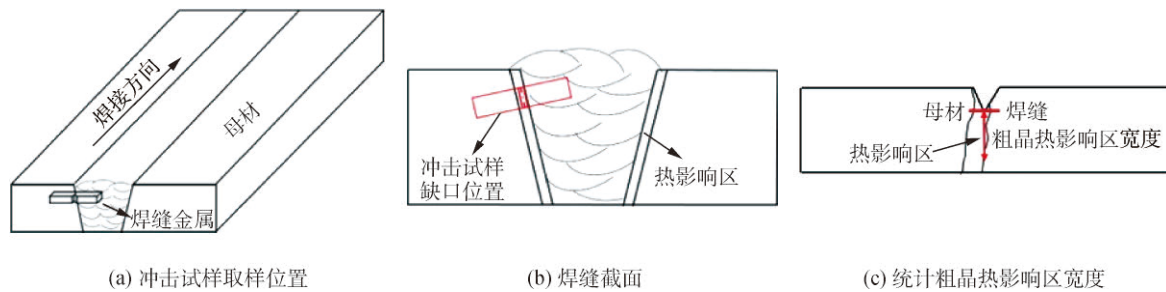


图 2 冲击试样取样位置与粗晶热影响区宽度测量示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sampling position and measuring width of CGHAZ of impact specimen. (a) sampling position of impact specimen; (b) weld cross section; (c) statistical analysis the width of CGHAZ

## 2 试验结果

### 2.1 焊接接头各区域的冲击吸收能量

焊接接头 -70 °C 平均冲击吸收能量如表 2 所示. BM, SCHAZ, ICHAZ, FGHAZ 的冲击吸收能量都在 270 J 以上, 而 FGHAZ 表现出最高的冲击吸收能量, WM 的冲击韧性表现良好, 冲击吸收能量平均达到 139 J. 焊接接头各区域的断口形貌如

图 3 所示. BM, SCHAZ, ICHAZ, FGHAZ 都是以大量韧窝和撕裂脊组成的韧性断裂. WM 的断口上呈现解理面与韧性撕裂脊共存的现象, 表现为准解理断裂. 通过将缺口开在熔合线处, 得到含有不同比例 CGHAZ 的焊接接头试样, 大量试验发现这些试样冲击吸收能量在 20 ~ 320 J 的范围内, 在这个区域冲击吸收能量出现巨大的波动, 断口形态也有显著差异, 将在 2.3 节中单独讨论.

表 2 焊接接头 -70 °C 下各区域的冲击吸收能量 (J)

Table 2 Impact energy of each region for 09MnNiDR welded joints at -70 °C

| BM  | SCHAZ | ICHAZ | FGHAZ | CGHAZ    | WM  |
|-----|-------|-------|-------|----------|-----|
| 276 | 281   | 274   | 304   | 20 ~ 320 | 139 |

### 2.2 焊接接头各区域的微观组织及硬度

焊接接头不同区域的组织如图 4 所示. 09MnNiDR 母材组织为铁素体, 且基体上弥散分布有少许碳化物, SCHAZ, ICHAZ, FGHAZ 组织均为块状铁素体. 不同的是, ICHAZ 组织为尺寸不均匀的块状铁素体, 这可能是一部分没有发生奥氏体化的铁

素体在冷却的过程中继续长大, 从而 ICHAZ 的组织由晶粒尺寸差异较大的铁素体组成. FGHAZ 为晶粒尺寸均匀且细小的块状铁素体组成. WM 的一次组织为粗大的柱状晶, 分布有少量碳化物, 在晶界内形成细小的针状铁素体, 二次组织为块状铁素体, 且尺寸较为均匀. CGHAZ 组织发生严重的粗

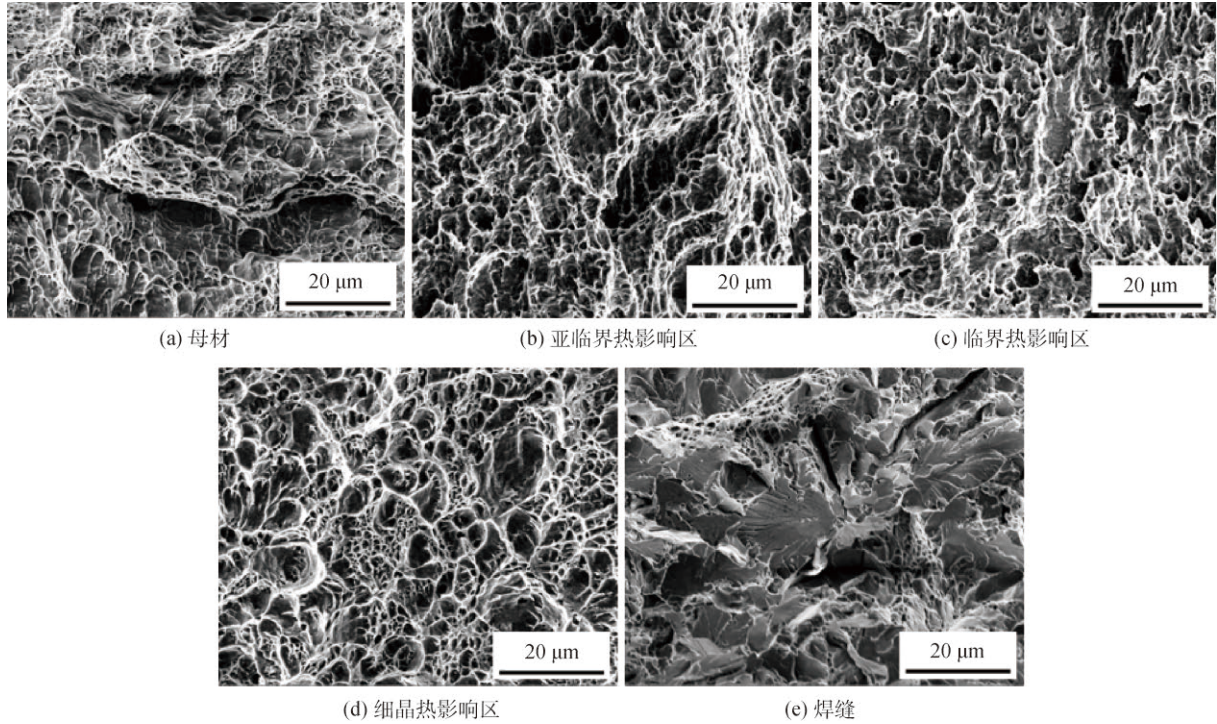


图 3 焊接接头冲击断口形貌

Fig. 3 Impact fracture surfaces of in various regions of the welded joint. (a) BM; (b) SCHAZ; (c) ICHAZ; (d) FGHAZ; (e) WM

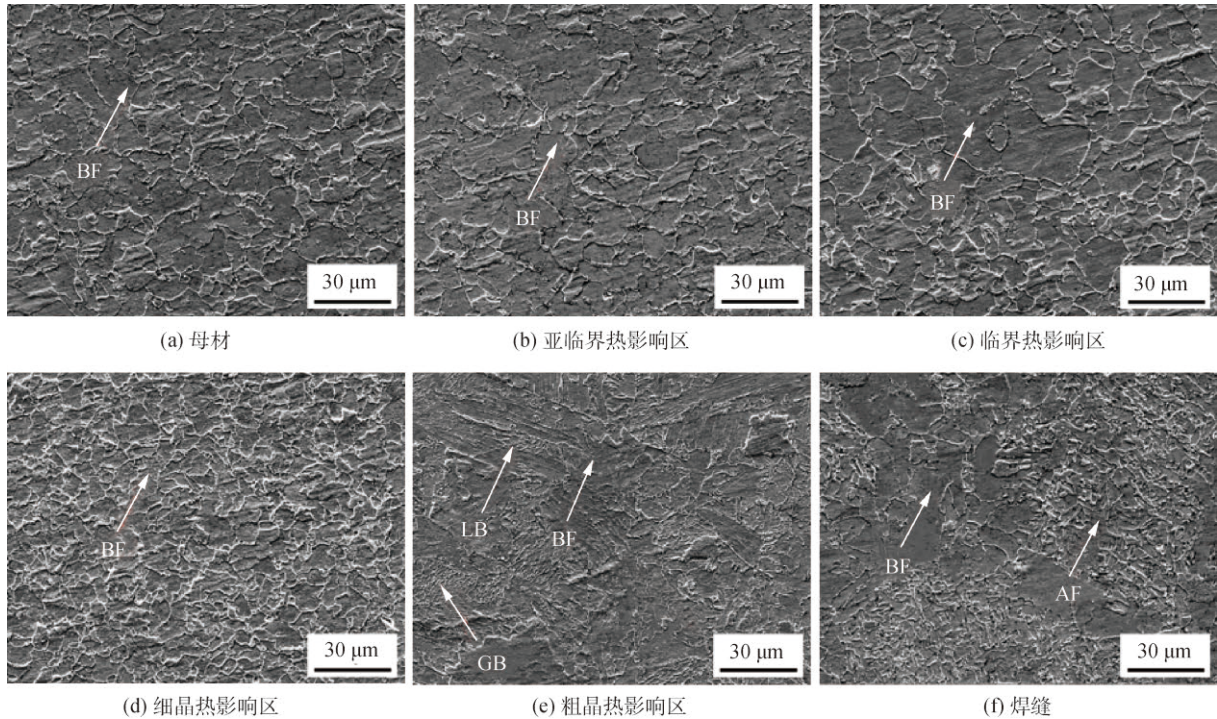


图 4 焊接接头各区域的显微组织

Fig. 4 Microstructures in various regions of the welded joint. (a) BM; (b) SCHAZ; (c) ICHAZ; (d) FGHAZ; (e) CGHAZ; (f) WM

化, 在冷却的过程中, 产生粗大的复合组织 (粒状贝氏体 + 板条贝氏体)。

通过比较晶粒尺寸差异较大的 BM, FGHAZ 和 CGHAZ(图 5), 发现 BM 的平均晶粒尺寸为

15.7  $\mu\text{m}$ , 最大为 38  $\mu\text{m}$ ; FGHAZ 的平均晶粒尺寸为 11.8  $\mu\text{m}$ , 最大为 24  $\mu\text{m}$ ; 而 CGHAZ 的平均晶粒尺寸为 29.5  $\mu\text{m}$ , 最大为 63  $\mu\text{m}$ 。CGHAZ 晶粒尺寸粗化显著。焊接接头各区域的显微维氏硬度如图 6

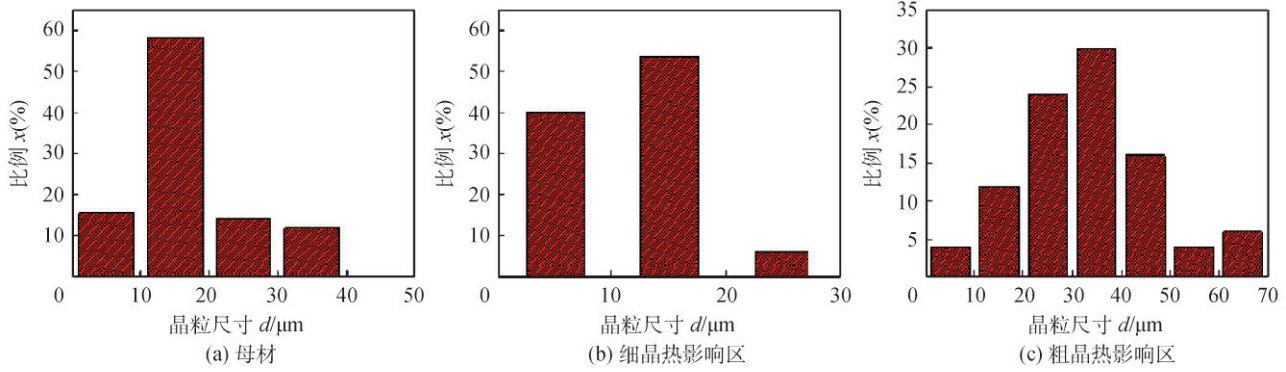


图 5 焊接接头晶粒尺寸分布图

Fig. 5 Distribution of grain size of the welded joint. (a) BM; (b) FGHAZ; (c) CGHAZ

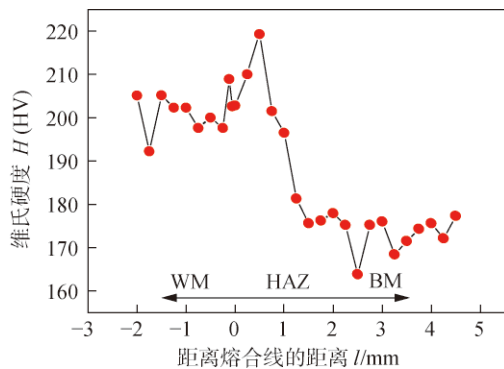


图 6 焊接接头维氏硬度分布

Fig. 6 Vickers hardness distribution of welded joint

所示, SCHAZ 硬度相比于母材发生少许软化, 平均在 155 ~ 166 HV, 其它区域并未产生软化现象, 而临近熔合线的 CGHAZ 的复合组织表现出最高的

硬度值, 平均为 207 ~ 226 HV.

### 2.3 粗晶热影响区宽度占缺口尖端前沿比例与冲击吸收能量的关系

图 7 为缺口尖端开在熔合线处不同冲击吸收能量下的冲击试样的宏观和微观断口形貌, 缺口尖端前沿的组织比例具有随机性, 使得这些试样的冲击吸收能量波动巨大. 当冲击吸收能量为 20 J 时, 测得粗晶区宽度所占比例达到整个缺口尖端前沿的 96.5%, 断口呈现完全的解理断裂. 随着缺口尖端前沿 CGHAZ 宽度逐渐减小, 冲击吸收能量提高. 由于 CGHAZ 区域为完全脆性解理断裂特征, 从图 3 可知焊接接头热影响区域中的其它区域的断口特征均为韧窝断裂形态, 所以直接可以通过断口上脆性解理断裂的区域来测量缺口尖端前沿粗

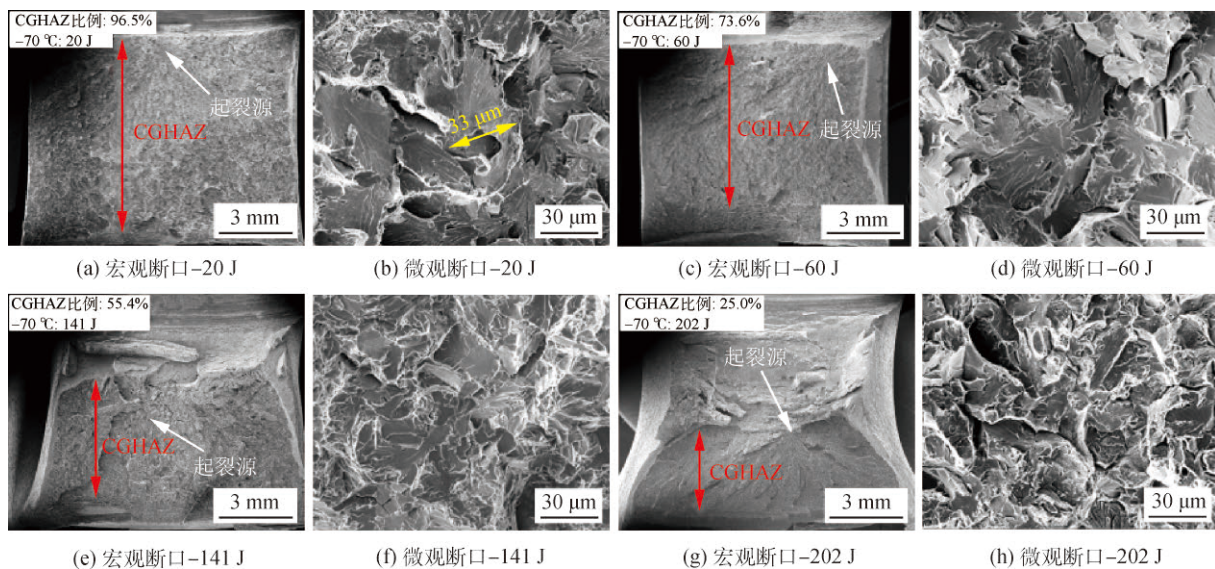


图 7 缺口前沿占有不同比例粗晶热影响区的冲击试样断口的宏观和微观形貌

Fig. 7 Macroscopic and microscopic fracture surfaces of impact specimens with different CGHAZ factions. (a) macroscopic fracture-20 J; (b) microscopic fracture-20 J; (c) macroscopic fracture-60 J; (d) macroscopic fracture-60 J; (e) microscopic fracture-141 J; (f) macroscopic fracture-141 J; (g) macroscopic fracture-202 J; (h) microscopic fracture-202 J

晶热影响区宽度分布的比例. 根据测量结果统计了图 8 所示缺口尖端前沿粗晶热影响区的分布比例与冲击吸收能量之间的关系, 发现当缺口前沿无粗晶热影响区时, 冲击吸收能量达到 260 J 以上, 试样断裂形式为完全的韧性断裂, 断口完全被韧性断裂区所覆盖. 粗晶热影响区占 8 mm 缺口尖端前沿的比例达到 25% 左右时, 冲击吸收能量降低到 202 J. 当比例达到 70%~80% 时, 冲击吸收能量分别下降到 60, 48, 30 J 左右, 相比母材冲击韧性损失达到了 80%~90%. 总体趋势为: 随着缺口尖端前沿粗晶热影响区占 8 mm 区域的比例的增加, 冲击吸收能量逐渐降低.

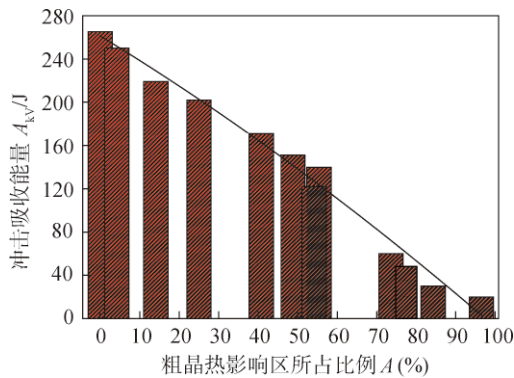


图 8 缺口尖端前沿粗晶热影响区所占比例与冲击吸收能量的关系

Fig. 8 Relationship between fraction of CGHAZ in front of the notch tip and impact absorbed energy

## 2.4 临界事件

Chen 等人<sup>[10]</sup>提出解理断裂的 3 个准则, 分别

为裂纹形核控制的应变准则, 控制裂纹钝化的三向应力度准则以及控制裂纹扩展的应力准则. 而临界事件被定义为这 3 个准则当中最困难的阶段, 这个阶段控制解理断裂微观开裂过程. 对于起裂但终止扩展而残留在断裂试样上的微裂纹进行观察, 以确定解理断裂的裂纹扩展过程中最艰难的阶段-临界事件. 并且残留裂纹通常在具有最大阻力的晶粒边界或者第二相被中断, 只有完全解理的断口侧面的残留裂纹才能更准确的反应临界事件. 故可以观察残留裂纹的扩展路径去推断试样断裂过程中最难发生的阶段. 图 9 所示为 CGHAZ 比例占 96.5%、最低冲击吸收能量为 20 J 的冲击试样断口侧面的残留裂纹. 从图 9 可知残留裂纹有三种形态, 一是穿过晶界, 沿着晶界扩展; 二是穿过晶粒边界, 裂纹发生偏转, 最终停留在晶粒内; 三是直接停留在一个晶界上. 以上形态也说明对于铁素体钢缺口试样, 粗晶热影响区组织的晶粒边界对裂纹的扩展具有关键性的阻碍作用. 为了进一步推断临界事件, 对完全解理的冲击试样断口上的解理小面半长轴进行测量如图 7b 所示, 发现解理小面半长轴  $a_c$  大约在 26~35  $\mu\text{m}$  左右, 与最大晶粒尺寸的 1/2 (31.5  $\mu\text{m}$ ) 能较好的吻合, 可以推论在铁素体钢缺口试样中解理断裂的临界事件是晶粒尺寸的裂纹穿过晶粒/晶粒边界的扩展, 粗大晶粒为关键的微观组元, 最粗大晶粒的尺寸表征了临界事件的尺寸.

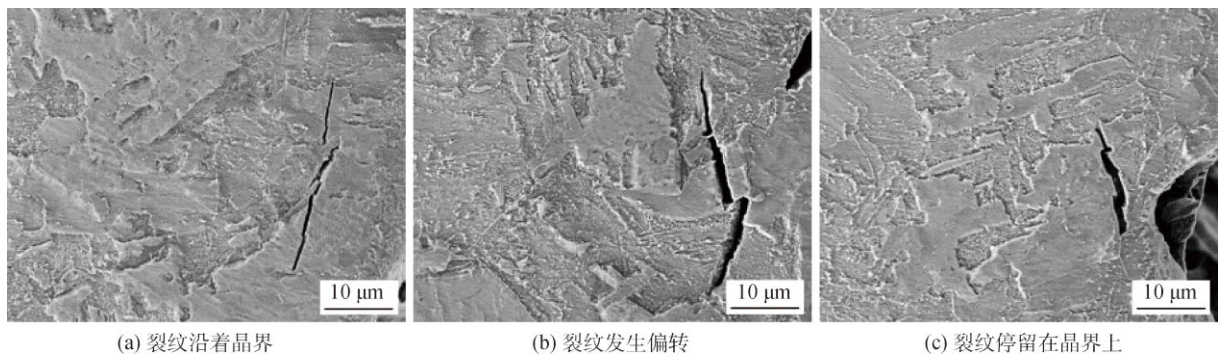


图 9 冲击试样断口侧面残留裂纹

Fig. 9 Retained cracks on the side surface in fracture surface of the impact specimen. (a) cracks' propagation along grain boundaries; (b) cracks' deflection; (c) cracks' stopping propagation on the grain boundary

## 3 分析与讨论

### 3.1 焊接接头最薄弱区域的确定

试验中 CGHAZ 和 FGHAZ 最大亚晶粒尺寸分别为 63 和 24  $\mu\text{m}$ . CGHAZ 亚晶粒尺寸显著增大,

FGHAZ 的铁素体晶粒分布均匀且细小, 平均尺寸为 11.8  $\mu\text{m}$ . FGHAZ 的平均晶粒尺寸仅为 CGHAZ 的 1/3, FGHAZ 微观组织具有更好的韧性. 因此, 韧性的提高是由细小的晶粒引起的, 而对于 CGHAZ, 由于硬度较高的粒状贝氏体和板条贝氏体组织的

出现,使得硬度值平均达到了 207 ~ 226 HV,大于焊接接头任何区域的硬度. 由于晶粒尺寸的粗化以及出现的复合组织表现出最差的韧性<sup>[11-13]</sup>. 因此,细小的块状铁素体表现出最优的冲击韧性,而 CGHAZ 中粗大的粒状贝氏体和铁素体组成的复合组织表现出最差的冲击韧性. 从显微组织确定 CGHAZ 是焊接接头的最薄弱区域. Chen 等人<sup>[10]</sup>提出临界事件决定了解理微观开裂的过程中最薄弱的区域,对于解理微观开裂过程,裂纹起裂和扩展产生于最薄弱的组元(最薄弱的区域,即粗大的晶粒)中,而不是产生于最小晶粒的最强组织组元中,最大的晶粒提供最低的阻力,而最小的晶粒则提供最大的阻力,这意味着尽管形成临界事件的临界阶段为整体开裂过程提供了更大的困难,但是微观开裂仍然发生在临界开裂阶段中最低阻力的最薄弱区域(微观组元)上. 文中缺口试样中解理断裂的临界事件是晶粒尺寸的裂纹穿过晶粒/晶粒边界的扩展,即最困难的阶段. 而粗大的复合组织只在 CGHAZ 发现,其它亚区域并不存在. CGHAZ 中由复合组织组成的粗大晶粒为关键的微观组元(薄弱组元),最粗大晶粒的尺寸称为临界事件的尺寸. 因而确定了临界事件,也就认定了裂纹扩展的最困难阶段以及最弱的阻力来自于哪个微观组元,从而也就确定了试样的最薄弱区域. 图 7a 中所示为 CGHAZ 比例占 96.5%、最低冲击吸收能量为 20 J 的冲击试样其断裂为完全的解理断裂形态,这也进一步说明 09MnNiDR 中 CGHAZ 是最薄弱的区域.

### 3.2 粗晶热影响区比例对冲击韧性的影响

取样位置的微小变化会造成冲击韧性的显著差异,随着缺口尖端前沿的 CGHAZ 宽度所占比例增加,冲击吸收能量逐渐降低,直至达到 20 J. 表明缺口尖端的微观组织所占比例对冲击韧性有很大的影响,冲击吸收能量从 260 J 左右变化到 20 J,断裂模式从韧性断裂变为解理断裂,其中最主要原因是在缺口尖端前沿 8 mm 区域上存在一定比例的 CGHAZ. 这表明除了由粗大的粒状贝氏体,板条贝氏体和块状铁素体组织组成的 CGHAZ 外,其它区域的组织在试验温度下表现出更好的韧性. 而起裂源处的解理小面半长轴尺寸和 CGHAZ 最大晶粒尺寸的 1/2 相一致,表明 CGHAZ 中粗大晶粒是起裂位置. 因此随着 CGHAZ 比例的增加,冲击韧性逐渐降低. 在实际焊接条件下,虽然无法获得完整 CGHAZ 的冲击韧性. 但是,根据图 8 中 CGHAZ 分

布比例与冲击韧性的关系,可以通过多项式拟合获得 CGHAZ 完整的冲击韧性.

综上所述,焊接接头的冲击韧性的差异主要来自缺口尖端前沿 CGHAZ 的比例. 而晶粒尺寸以及微观组织决定了 CGHAZ 的强韧性. 因此 CGHAZ 在缺口尖端前沿的分布也就影响着试样整个焊接接头的冲击韧性. 文中揭示了 09MnNiDR 焊接接头最薄弱区域以及最薄弱区域与冲击韧性之间的关系,对实际焊接热影响区冲击韧性的评估建立了一定的理论根据.

## 4 结 论

(1) 揭示了 09MnNiDR 低温钢焊接接头在实际施焊热输入为 20 kJ/cm 的情况下,最薄弱区域为 CGHAZ, CGHAZ 粗大的复合组织(粒状贝氏体 + 板条贝氏体)使得冲击吸收能量最低在 20 J 左右,相对于母材冲击吸收能量降低约 92.7%,粗大晶粒的出现以及复合组织的转变是韧性恶化的重要因素.

(2) 随着缺口尖端前沿粗晶热影响区的比例越大,冲击韧性越低. CGHAZ 比例达到 70% ~ 80% 时冲击吸收能量分别降低到 60, 48, 30 J, 相比母材韧性损失达到 80% ~ 90%,充分体现薄弱环节对接头冲击韧性的损害有巨大的影响.

## 参 考 文 献

- [1] Lan L, Qiu C, Zhao D, *et al.* Analysis of microstructural variation and mechanical behaviors in submerged arc welded joint of high strength low carbon bainitic steel[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2012, 558(12): 592 - 601.
- [2] Yang Y, Cheng J, Nie W J, *et al.* Investigation on the microstructure and toughness of coarse grained heat affected zone in X-100 multi-phase pipeline steel with high Nb content[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2012, 558(12): 692 - 701.
- [3] 崔冰, 彭云, 彭梦都, 等. 焊接热输入对 Q890 高强度钢热影响区裂纹扩展的影响[J]. *焊接学报*, 2017, 38(8): 63 - 67.  
Cui Bing, Peng Yun, Peng Mengdu, *et al.* Effect of heat input on crack growth behavior of CGHAZ of Q890 high-performance steel[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2017, 38(8): 63 - 67.
- [4] Zhou Y, Jia T, Zhang X, *et al.* Microstructure and toughness of the CGHAZ of an offshore platform steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 219(5): 314 - 320.

- [5] Zhu Z, Han J, Li H. Influence of heat input on microstructure and toughness properties in simulated CGHAZ of X80 steel manufactured using high-temperature processing[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2015, 46(11): 5467 – 5475.
- [6] 秦华, 苏允海, 连景宝. BWELDY960Q 钢焊接热模拟热影响区组织与性能 [J]. *焊接学报*, 2018, 39(11): 97 – 101.  
Qin Hua, Su Yunhai, Lian Jingbao. Microstructure and properties in heat affected zone of BWELDY960Q steel by welding thermal simulation test[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2018, 39(11): 97 – 101.
- [7] Jang J, Ju J, Lee B, *et al.* Effects of microstructural change on fracture characteristics in coarse-grained heat-affected zones of QLT-processes 9% Ni steel[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2003, 340(1-2): 68 – 79.
- [8] Yang S, Ju L, Cong W. On the heterogeneous microstructure development in the welded joint of 12MnNiVR pressure vessel steel subjected to high heat input electrogas welding[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(8): 1747 – 1752.
- [9] Cao R, Yang Z, Chan Z, *et al.* The determination of the weakest zone and the effects of the weakest zone on the impact toughness of the 12Cr2Mo1R welded joint[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 50(2): 539 – 546.
- [10] Chen J, Cao R. *Micromechanism of cleavage fracture of metals*[M]. USA: Elsevier, 2014.
- [11] Wang X, Wang X, Shang C, *et al.* Characterization of the multi-pass weld metal and the impact of retained austenite obtained through intercritical heat treatment on low temperature toughness[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2016, 649(1): 282 – 292.
- [12] Liang Y, Chun L, De W, *et al.* Microstructural characteristics and toughness of the simulated coarse grained heat affected zone of high strength low carbon bainitic steel[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2011, 529(11): 192 – 200.
- [13] 文明月, 董文超, 庞辉勇, 等. 一种 Fe-Cr-Ni-Mo 高强钢焊接热影响区的显微组织与冲击韧性研究 [J]. *金属学报*, 2018, 54(4): 501 – 511.  
Wen Mingyue, Dong Wenchao, Pang Huiyong, *et al.* Microstructure and impact toughness of welding heat affected zones of a Fe-Cr-Ni-Mo high strength steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018, 54(4): 501 – 511.

---

**第一作者简介:** 曹睿, 1977 年出生, 教授、博士研究生导师; 主要研究方向为金属材料以及焊接接头强韧性、损伤以及断裂行为、新材料、异种材料的焊接性、复合板材的制造以及相关基础研究; SCI 检索论文 70 篇, EI 检索论文 105 篇, CSCD 检索论文 60 篇, 获授权国家发明专利 2 项, 在美国 ELSEVLER 出版社出版专著 1 部, 在科学出版社出版译著一部; Email: caorui@lut.edu.cn.

(编辑: 朱艳)

## MAIN TOPICS, ABSTRACTS & KEY WORDS

### **Reactive air brazing of SOFC using Ag-CuO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite braze and the service performance study** SI

Xiaoqing, LI Chun, ZHENG Qingwei, QI Junlei, Feng Jicai, CAO Jian (State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China). pp 1-6

**Abstract:** In this study, the Ag-CuO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite braze was successfully developed through adding Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle reinforcements, which was suitable for reactive air brazing (RAB) solid oxide fuel cell (SOFC) components. The RAB joining process was investigated in detail. The cell was successfully joined to the aluminized steel at 1 050 °C for 30 min. The interfacial joining properties were studied. The evolution behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle reinforcements in the RAB process was also analyzed. As-brazed joints were tested in high-temperature service atmospheres. The microstructure properties of joints after aging in high-temperature oxidization (air) and reduction (H<sub>2</sub>-50H<sub>2</sub>O-N<sub>2</sub>) atmospheres was investigated. It is shown that the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> protective layer of aluminized steel had good protective effects on the steel matrix, avoiding its performance degradation during brazing and high-temperature aging. The Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> protective layer play a key role in ensuring the stability of joint structure. The influence of the high-temperature service on the gas-tightness of joints was systematically studied. The applicability of the Ag-CuO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite braze used for RAB joining SOFC components was comprehensively evaluated.

**Key words:** solid oxide fuel cell; reactive air brazing; interfacial microstructure; high-temperature service

### **Influence of fraction of coarse-grained heat affected zone on impact toughness for 09MnNiDR welded joint** CAO

Rui<sup>1</sup>, YANG Zhaoqing<sup>1</sup>, LI Jinmei<sup>2</sup>, LEI Wanqing<sup>2</sup>, ZHANG Jianxiao<sup>3</sup>, CHEN Jianhong<sup>1</sup> (1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metal, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050, China; 2. Lanzhou Ls Testing Technology Co., Ltd., Lanzhou, 730000, China; 3. Lanzhou Ls Heavy Equipment

Co.,Ltd., Lanzhou, 730314, China). pp 7-13

**Abstract:** The impact absorbed energy of various regions of the heat affected zone(HAZ) of submerged arc welding actual welded joint for 09MnNiDR low temperature pressure vessel steel was measured, the microstructures, fracture surface were observed and analyzed. Based on the experimental results, the microstructures of all regions of HAZ, the weakest region can be determined, and the effects of the weakest region on impact toughness of the welded joint were further discussed. The results show that at -70 °C, the average impact absorbed energy of the base metal, subcritical heat affected zone, intercritical heat affected zone, and fine grain heat affected zone of the welded joint is above 270 J, which all show good toughness. The average impact absorbed energy of the weld metal is 139 J. The coarse grain heat affected zone (CGHAZ) is the weakest region of the welded joint. When the notch tip is completely composed of CGHAZ, the impact absorbed energy of 20 J is reached. The impact energy of CGHAZ decrease to 92.7% of the base metal. The microstructure of CGHAZ is composed of coarse granular bainite, lath bainite and block ferrite. With the increase of the fraction of CGHAZ in front of the notch tip, the closer from notch location is, the lower the impact absorbed energy of the specimen is, which fully reflects the influence of the weakest region on the impact toughness.

**Key words:** 09MnNiDR steel; the weakest region; coarse grain heat-affected zone; impact toughness

### **Study on high temperature low cycle fatigue behavior of a novel austenitic heat-resistant steel** YANG Shangqing<sup>1,2</sup>,

XU Lianyong<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Lei<sup>1,2</sup>, HAN Yongdian<sup>1,2</sup>, JING Hongyang<sup>1,2</sup> (1. Tianjin University, Tianjin, 300072, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin, 300072, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China). pp 14-18

**Abstract:** 22Cr15Ni3.5CuNbN austenitic heat-resistant steel is a new type of austenitic heat-resistant steel developed for the manufacture of super (super) critical power station boiler pipes at 620 – 650 °C. The high temperature