

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.03.025

# 低温钢 SA516Gr.60 使用国产焊材的焊接工艺

徐 翔 ,陆亚珍 ,蔡平霞

( 河海大学机电工程学院 江苏 常州 213022 )

摘要 :在分析低温钢 SA516Gr.60 的化学成分、金相组织、力学性能和焊接性基础上 ,对低温钢 SA516Gr.60 焊接接头进行了常温拉伸和低温夏比冲击试验 .试验结果表明 ,手工焊和埋弧焊采用合适的焊接规范时 ,选用国产焊材能够满足实际需要 .

关键词 :SA516Gr.60 ;低温钢 ;低温韧性 ;焊材 ;焊接规范 ;焊接工艺

中图分类号 :TG44 ;TG142.79      文献标识码 :A      文章编号 :1000-1980( 2009 )03-0360-04

SA516Gr.60 钢板是美国 ASME 规范推荐的低温用钢 ,适用温度为  $-18 \sim -60^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup> ,因性能优越 ,在世界各国的低温压力容器中得到广泛使用 .虽然该钢种有与其相配套的国外进口焊材 ,但是使用国产焊材可以明显缩短工期和节约成本 .目前 ,对低温钢 SA516Gr.60 的焊接采用国产焊接材料的应用研究很少 ,有不少企业反映该钢材焊接后其焊接接头低温冲击功较低 ,还常发现  $-45^{\circ}\text{C}$  冲击功低于 ASME 规范<sup>[2]</sup>27J 的要求 .因此 ,采用国产焊材焊接时 ,如何解决控制焊接工艺来保证焊接接头低温工况下接头韧性的安全性等问题变得非常迫切 .

本文就低温压力容器在  $-45^{\circ}\text{C}$  工况运行时的安全性问题 ,在对 SA516Gr.60 进行材料检验、分析的基础上 ,进行焊接工艺评定试验 .

## 1 母材性能分析

### 1.1 母材化学成分

由表 1 可知母材碳质量分数小于 0.14% ,合金元素总的质量分数约为 2% .

表 1 母材的化学成分( 质量分数 )

| Table 1 Chemical composition of base metal ( mass fraction ) |       |       |       |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | %      |
|--------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 项 目                                                          | C     | Si    | Mn    | S      | P     | Cu    | Ni    | Cr    | Mo    | Al    | Nb    | V     | Ti    | N     | B      |
| 提供值                                                          | 0.128 | 0.215 | 0.916 | 0.0005 | 0.007 | 0.262 | 0.099 | 0.069 | 0.014 | 0.038 | 0.006 | 0.001 | 0.002 | 0.005 | 0.0002 |
| 复验值                                                          | 0.137 | 0.216 | 0.950 | 0.006  | 0.011 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |

### 1.2 母材金相组织

试验用母材 SA516Gr.60 为韩国进口钢板 ,板厚 12 mm ,冶炼工艺 :该钢材为镇静钢 ,并经正火处理 .金相组织为铁素体 + 珠光体 ,组织比较细小均匀 ,符合 ASTM A20/A20M《压力容器用钢板通用要求》标准中奥氏体细晶粒度要求 ,按 YB/T5148—93《金属平均晶粒度测定法》观察测得晶粒度为 8 级 .

### 1.3 母材的力学性能

通过常温拉伸试验( 按 GB228—87《金属拉伸试验方法》进行 )和低温夏比冲击试验( 试样取 3 个 ,按 GB/T4159—84《金属低温夏比冲击试验方法》进行 ) ,检测出母材的常温和低温力学性能 ,具体数据见表 2 .

表 2 母材的力学性能

| Table 2 Mechanical properties of base metal |              |              |           |                        |              |              |
|---------------------------------------------|--------------|--------------|-----------|------------------------|--------------|--------------|
| 项 目                                         | 屈服<br>强度/MPa | 抗拉<br>强度/MPa | 延伸<br>率/% | 冲击试验                   |              |              |
|                                             |              |              |           | 温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 冲击功/J        | 冲击功<br>平均值/J |
| 提供值                                         | 400          | 498          | 27        | - 51                   | 101 ,117 ,92 | 103.3        |
| 复验值                                         | 402.7        | 504.7        | 31.5      | - 45                   | 106 ,98 ,125 | 109.7        |

1.4 母材的焊接性

采用国际焊接学会(IIW)推荐的碳当量 $CE_{IW}=u(C)+\frac{1}{6}u(Mn)+\frac{1}{5}u(Cr+Mo+V)+\frac{1}{15}u(Cu+Ni)^{[3]}$ ,按表 1 提供值计算碳当量约为 0.322%。由于碳当量值较低,淬硬倾向小,室温下焊接时,不易形成冷裂纹;而且母材中 S、P 等杂质元素的含量控制得很低,也不易形成热裂纹<sup>[4]</sup>。由以上分析可知,母材合金元素配比比较合理,低温韧性较好,焊接性优良,试验板厚小于 20 mm,焊前不需预热<sup>[4,6]</sup>。

2 焊接工艺试验

2.1 焊材的选用

根据化学成分匹配、强度匹配和等塑、韧性的原则<sup>[7]</sup>,综合考虑质量和成本,选择哈尔滨焊接研究所生产的低温钢焊材。手工焊选用直径 3.2 mm 和 4 mm 的 J507DR 焊条,埋弧自动焊选用直径 4 mm 的 H09MnDR 焊丝配 SJ208DR 焊剂,其化学成分和力学性能分别见表 3 和表 4。

表 3 试验用焊材熔敷金属的化学成分

Table 3 Chemical composition of deposited metal of welding materials

| 焊材编号 | 材 料               | 规 格       | 各化学成分的质量分数/% |       |      |        |        |      |
|------|-------------------|-----------|--------------|-------|------|--------|--------|------|
|      |                   |           | C            | Si    | Mn   | S      | P      | Ni   |
| 1    | J507DR            | 直径 3.2 mm | 0.050        | 0.032 | 1.13 | 0.0042 | 0.0079 | 0.63 |
| 2    | J507DR            | 直径 4 mm   | 0.050        | 0.35  | 1.04 | 0.0037 | 0.0053 | 0.61 |
| 3    | H09MnDR           | 直径 4 mm   | 0.073        | 0.13  | 1.44 | 0.0033 | 0.0075 | 0.18 |
| 4    | H09MnDR 配 SJ208DR | 60~12 目   | 0.063        | 0.28  | 1.24 | 0.0050 | 0.011  | 0.07 |
|      |                   |           |              |       |      |        |        | 0.15 |
|      |                   |           |              |       |      |        |        | 0.08 |

2.2 焊缝坡口形式

本试验所用母材为 12 mm 的 SA516Gr.60 钢板,采用平板对接。手工焊开单面 V 形坡口,焊接层数为 5 层,角度为 60°±5°,留钝边 1.5 mm;埋弧焊时开单面 V 形坡口,角度为 70°±5°,留钝边 6 mm,如图 1 所示。

表 4 试验用焊材熔敷金属的力学性能

Table 4 Mechanical properties of deposited metal of welding materials

| 焊材编号 | 拉伸试验     |          |       | 冲击试验 |             |
|------|----------|----------|-------|------|-------------|
|      | 屈服强度/MPa | 抗拉强度/MPa | 延伸率/% | 温度/℃ | 冲击功/J       |
| 1    | 505      | 585      | 30    | -46  | 168,179,172 |
| 2    | 502      | 586      | 32    | -46  | 165,168,177 |
| 4    | 430      | 542      | 27.8  | -46  | 106,133,129 |

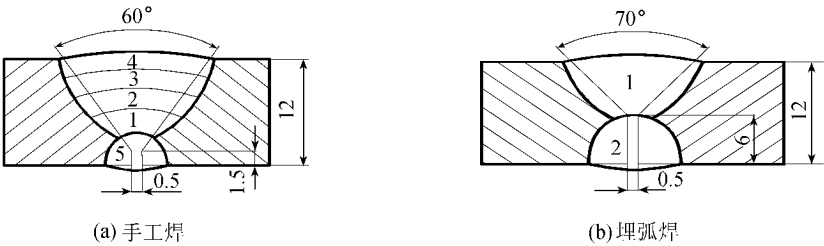


图 1 焊接接头简图(尺寸单位:mm)  
Fig. 1 Welding joints( unit : mm )

2.3 焊接规范参数

试验采用手工电弧焊和埋弧自动焊。手工电弧焊的设备型号为 ZX5-630,埋弧自动焊的设备型号为 MZ-1000。手工电弧焊打底焊采用直径 3.2 mm、盖面焊采用直径 4 mm 的 J507DR 的焊条,焊接线能量控制在 14 kJ/cm 左右;埋弧自动焊选用直径 4 mm 的 H09MnDR 焊丝配 SJ208DR 焊剂,焊接线能量控制在 21 kJ/cm 左右,并要严格控制层间温度在 100~150℃,具体参数见表 5。

表 5 焊接规范参数

Table 5 Parameters of welding specifications

| 焊接方法 | 试样编号 | 焊材编号 | 焊接电流/A | 焊接电压/V | 电流 | 极性 | 焊接速度/(cm·min <sup>-1</sup> ) | 层间温度/℃  |
|------|------|------|--------|--------|----|----|------------------------------|---------|
| 手工焊  | D1   | 1    | 110    | 22     | DC | 反  | 14                           | 100~150 |
|      |      | 2    | 160    | 22     | DC | 反  | 15                           | 100~150 |
| 埋弧焊  | D2   | 3、4  | 520    | 33     | DC | 反  | 48                           | 100~150 |

2.4 焊接工艺评定注意要点

- a. 焊接试验环境温度为 17℃ ,相对湿度为 65 % . 试验所用焊条应严格烘干 ,烘焙温度为 350℃ ,时间为 1 h ,恒温存放温度为 100 ~ 120℃ . 所用母材焊前不需预热 ,采用的是对接接头平焊焊接 ,横焊、立焊和仰焊时用的焊接电流应比平焊时小 10 % .
- b. 为控制焊接线能量 ,在焊材规格上 ,选用的是直径 3.2 mm 4 mm 的焊条和直径 4 mm 的焊丝<sup>[6]</sup> ;为防止焊接线能量超标 ,记录员在测定出焊接电流、电压、焊接速度后 ,及时计算出焊接线能量 ,发现焊接线能量接近上限时及时通知焊工进行调整<sup>[8]</sup> .
- c. 避免采用慢速大幅度摆动的操作方法 ,通常采用快速直线焊 . 在横焊、立焊和仰焊时 ,为保证获得良好的焊缝成形并与母材充分熔合 ,可作必要的摆动 ,可采用“之”字形运条方法 ,但应控制坡口两侧停留的时间<sup>[8]</sup> .
- d. 焊后进行 920℃ 正火 + 620℃ 回火热处理 ,能有效提高焊接接头的冲击韧性 ,增强焊接接头的抗脆断能力<sup>[9-11]</sup> .

2.5 焊后检验及冲击断口分析

焊后对产品试板的焊接接头进行了宏观检验、X 射线探伤、SEM 分析、力学性能测试 ,结果均能满足 GB150—1998《钢制压力容器》和 ASME 标准<sup>[2]</sup>的要求 . 由系列夏比冲击试验结合断口形貌测得母材、焊缝、热影响区的韧脆转变温度( FATT<sub>50</sub> )基本都在 - 60℃ ~ - 50℃ 之间 ,均低于设计温度 - 45℃ . 试验结果见表 6 和表 7 表中数据是指一组中 3 个试样的平均值 . 在用 SA516Gr. 60 钢板制造低温压力容器时 ,通常采用手工电弧焊接 ,因此 ,表 7 为手工电弧焊焊接的试验结果 ,而埋弧焊仅在表 7 括弧中列出 - 45℃ 时的试验结果 ) . 由试验结果可知 ,该焊接件在 - 45℃ 下使用完全满足 ASME 标准<sup>[2]</sup> - 45℃ 冲击功至少为 27J 的要求 .

表 6 焊缝拉伸力学性能试验结果  
Table 6 Test results of tensile mechanical properties of welding joints

| 试样<br>编号 | 屈服强度/<br>MPa | 抗拉强度/<br>MPa | 延伸率/<br>% |
|----------|--------------|--------------|-----------|
| D1       | 482          | 590          | 31        |
| D2       | 486          | 601          | 28        |

表 7 不同试验温度下夏比冲击试验结果  
Table 7 Results of Charpy V-notch impact tests under different temperatures

| 取样对象 | 冲击功/J       |       |       | 脆性断面率/%    |       |       |
|------|-------------|-------|-------|------------|-------|-------|
|      | - 45℃       | - 60℃ | - 80℃ | - 45℃      | - 60℃ | - 80℃ |
| 母 材  | 109.7       | 82.3  | 47.0  | 30.8       | 49.4  | 76.0  |
| 焊 缝  | 101.7(99.0) | 86.0  | 17.0  | 35.7(36.5) | 51.8  | 89.5  |
| 热影响区 | 80.0(89.7)  | 24.0  | 11.0  | 41.5(38.0) | 78.7  | 90.5  |

通过观察图 2 可以看出 ,焊缝 - 45℃ 冲击试样断口断裂前发生了较明显的塑性变形 ,断面近缺口处不平整 ,为纤维区 ,断口周边有少量剪切唇区 ,而焊缝 - 80℃ 冲击试样断口断裂前塑性变形很小 ,近缺口处几乎不存在明显的纤维区 ,断口平整、光亮 ,放射区显著增大 . 从冲击试验结果可知 :焊缝 - 45℃ 冲击功在 100 J 左右 , - 80℃ 冲击功在 17 J 左右 ,热影响区试样与此类似 ,随着试验温度的降低 ,塑性变形减少 ,冲击韧性也随之降低 , - 45℃ 冲击功在 80 J 左右 , - 80℃ 冲击功在 11 J 左右 .

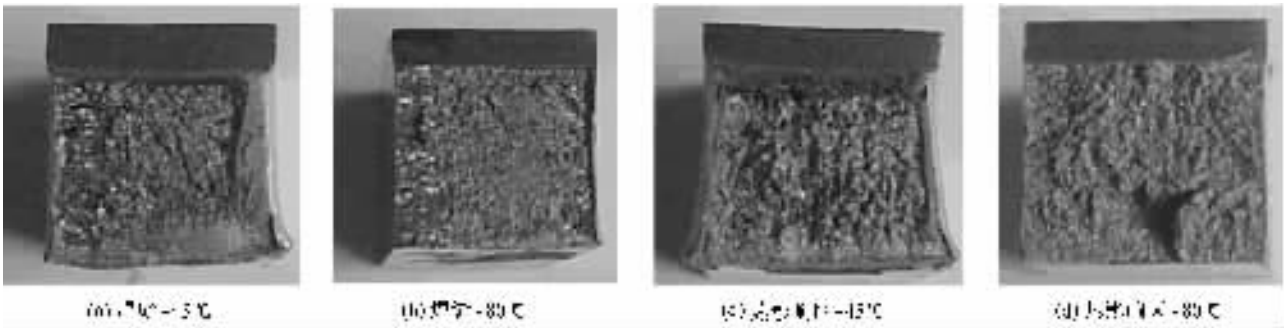


图 2 焊缝、热影响区不同温度下冲击试样断口

Fig. 2 Fracture surfaces of test specimens in welding joints and heat-affected zones under different temperatures

3 结 论

- a. 从影响材料韧性的各因素分析并通过碳当量计算可知 :SA516Gr.60 低温钢具有良好的低温韧性 ,焊接性优良 ,焊前不需预热 ,所以该钢材的焊接关键是采取合理的工艺 ,确保焊接接头的低温韧性 .
- b. 尽量采用低热输入焊接 ,最大限度减小过热现象 .手工电弧焊选用 J507DR ,焊接线能量控制在 15 kJ/cm 左右 ,焊速控制在 14 cm/min 左右 ;埋弧自动焊选用 SJ208DR 焊剂配 H09MnDR 焊丝 ,焊接线能量控制在 21 kJ/cm 左右 ,焊速控制在 50 cm/min 左右 ;严格控制层间温度在 100 ~ 150℃之间 ;再经过适当的焊后热处理 2 种焊接方法所获得的焊接接头的性能均能满足 GB150—1998《钢制压力容器》或 ASME 相关标准<sup>[2]</sup>的要求 .

参考文献 :

[ 1 ] 邱正华 ,张桂红 .低温钢及应用[ J ].石油化工设备技术 ,2004 ,25( 2 ) :43-46 .  
[ 2 ] SA—516/516M ,Stand specification for pressure vessel plates ,Carbon steel for moderate- and lower-temperature service[ S ].  
[ 3 ] American Society for Testing and Materials . ASME BPVC Sec II Part A Ferrous material specifications( SA-451 to End I ) [ M ]. New York : American Society of Mechanical Engineers ,2007 :957-962 .  
[ 4 ] 中国机械工程学会焊接学会 .焊接手册第 2 卷 材料的焊接[ K ].3 版 .北京 :机械工业出版社 ,2007 :157-158 .  
[ 5 ] 吴世初 .金属的可焊接性试验[ M ].上海 :上海科学技术文献出版社 ,1983 .  
[ 6 ] 傅积和 ,孙玉林 .焊接数据资料手册[ K ].北京 :机械工业出版社 ,1994 :12-13 .  
[ 7 ] 中国机械工程学会焊接学会 ,焊接生产制造与质量保证委员会 ,上海东升焊接集团有限公司 ,等 .钢制压力容器焊接工艺[ M ].2 版 .北京 :机械工业出版社 ,2007 :59-60 .  
[ 8 ] 龙本仁 ,肖剑 ,王林 .09MnNiDR 低温钢的焊接工艺评定[ J ].中国特种设备安全 ,2006 ,22( 7 ) :37-38 .  
[ 9 ] 高立峰 .3.5% Ni 低温钢塔的焊接及热处理[ J ].煤炭技术 ,2003 ,22( 3 ) :10 .  
[ 10 ] 邹增大 ,李亚江 ,孙俊生 ,等 .焊接材料、工艺及设备手册[ K ].北京 :化学工业出版社 ,2001 :73-852 .  
[ 11 ] 蔡平霞 .焊接工艺对低温钢 SA516Gr.60 焊接接头组织和性能的影响[ D ].南京 :河海大学 ,2006 .

Welding technology of low-temperature steel SA516Gr.60 using domestic welding materials

XU Xiang , LU Ya-zhen , CAI Ping-xia

( College of Mechanical & Electrical Engineering , Hohai University , Changzhou 213022 , China )

**Abstract :** Based on analysis of the chemical composition , metallographic structure , mechanical properties and welding performance of low-temperature steel SA516 Gr.60 , extension tests under normal temperatures and the Charpy V-notch impact tests under low temperatures were conducted with regard to the welding points of the low-temperature steel SA516Gr.60. The test results show that when the appropriate welding specifications are employed by the shielded metal arc welding and the submerged arc welding , the domestic welding materials meet the practical needs .

**Key words :** SA516Gr.60 ; low-temperature steel ; low-temperature toughness ; welding materials ; welding specification ; welding technology