

# 甲醇合成塔用 150 mm SA387Gr22Cl2 钢板组织和力学性能

尹卫江<sup>1</sup> 李杰<sup>2</sup> 吴艳阳<sup>1</sup> 王甜甜<sup>1</sup> 张剑<sup>3</sup> 侯敬超<sup>1</sup>

(1 舞阳钢铁有限责任公司科技部,舞钢 462500,2 舞阳钢铁有限责任公司,舞钢 462500,3 河钢集团承钢公司,承德 067002)

**摘要** 对 150 mm 厚 SA387Gr22Cl2 钢板(1%:0.13~0.14C,0.09Si,0.55~0.56Mn,0.004P,0.001S,2.48~2.49Cr,1.11~1.12Mo)模拟焊后拉伸性能、-29℃冲击性能、金相组织及回火脆化倾向评定等进行试验,并检测了交货态(正火+回火)、最小模拟焊后态、最大模拟焊后态及步冷试验后的钢板各项性能指标。结果表明,钢板的回火脆化倾向不明显,其结果  $CvTr55 + 2.5 \Delta CvTr55$  为 -63℃,完全满足甲醇合成塔用钢板的技术要求。

**关键词** SA387Gr22Cl2 钢板 组织 力学性能 回火脆化

## Microstructure and Mechanical Properties of 150 mm SA387Gr22Cl2 Steel Plate for Methanol Synthesis Tower

Yin Weijiang<sup>1</sup>, Li Jie<sup>2</sup>, Wu Yanyang<sup>1</sup>, Wang Tiantian<sup>1</sup>, Zhang Jian<sup>3</sup> and Hou Jingchao<sup>1</sup>

(1 Department of Science and Technology, Wuyang Iron and Steel Co Ltd, Wugang 462500; 2 Wuyang Iron and Steel Co Ltd, Wugang 462500; 3 HBIS Group Cheng Steel Company, Chengde 067002)

**Abstract** The simulated post-weld tensile property, -29℃ impact property, metallographic structure and temper embrittlement tendency evaluation of 150 mm thickness SA387Gr22Cl2 steel plate(1%:0.13~0.14C,0.09Si,0.55~0.56Mn,0.004P,0.001S,2.48~2.49Cr,1.11~1.12Mo) are tested. The each property of steel plate with delivered state (normalizing + tempering), minimum simulated post-weld state, maximum simulated post-weld state and step cooling test are measured. The results show that the temper embrittlement tendency of steel plate is not obvious, the result of  $CvTr55 + 2.5 \Delta CvTr55$  is -63℃, fully to meets the technical requirements of steel plate for methanol synthesis tower.

**Material Index** SA387Gr22Cl2 Steel Plate, Microstructure, Mechanical Properties, Temper Embrittlement

石油、化工、煤炭液化等行业生产设施的管道和容器内主要为含氢的气态或液态介质,这些介质在高温高压下完成合成或裂解等化学反应<sup>[1]</sup>。SA387Gr22Cl2 钢是 ASME SA387/SA387M-2019 标准中含 2.25% Cr、1% Mo 的低合金钢,与 GB/T713-2014 中 12Cr2Mo1R 钢相近<sup>[2]</sup>。由于该钢种 Cr、Mo 合金同时加入,使其具有良好的加工性能和焊接性能,对热处理不敏感,能在大截面上得到均匀性能,因而在锅炉、压力容器及核电上得到广泛应用<sup>[3]</sup>。

为满足市场需求,舞钢公司试制出 150 mm 厚度甲醇合成塔用的 SA387Gr22Cl2 钢板。为考察 SA387Gr22Cl2 钢板能否满足甲醇合成塔使用要求,特对试制钢板各项性能指标进行检测,为后续制造设备提供数据支撑及理论指导。

### 1 试验材料及方法

SA387Gr22Cl2 试验钢板的厚度 150 mm,供货状态为正火+回火,其熔炼成分及力学性能见表 1 和表

2 所示。

试验钢板生产工艺流程:100 t 电弧炉冶炼→精炼→50.68 t 模铸→钢锭加热→450 mm 开坯→清理→加热→轧制→探伤→热处理→理化性能检验→切割→扒皮→入库,随后在钢板上取科研试样进行热处理试验。

对不同热处理制度的钢板进行板厚 1/2 和 1/4 位置取试样进行常温拉伸、夏比冲击以及组织检验,并按照标准进行力学试验及组织观察。

表 2 SA387Gr22Cl2 钢力学性能要求

表 1 试验 SA387Gr22Cl2 钢板的化学成分要求/%

Table 1 Requirement for chemical composition of test SA387Gr22Cl2 steel plate/%

| C         | Si    | Mn        | P     | S     | Mo        | Cr        | V     | Nb    |
|-----------|-------|-----------|-------|-------|-----------|-----------|-------|-------|
| 0.10~0.15 | ≤0.50 | 0.30~0.60 | 0.005 | 0.002 | 0.90~1.10 | 2.00~2.50 | ≤0.03 | ≤0.02 |

Table 2 Mechanical property requirements for SA387Gr22Cl2 steel

| 纵向拉伸试验     |               |             | -29℃横向冲击功   |
|------------|---------------|-------------|-------------|
| $R_m$ /MPa | $R_{eL}$ /MPa | $A_{50}$ /% | $K_{V8}$ /J |
| 515~690    | 310~620       | ≥18         | ≥55(均值)     |

表 3 SA387Gr22Cl2 钢板试样热处理制度

Table 3 Heat treatment scheme of samples of SA387Gr22Cl2 steel plate

| 试样             | 热处理制度                                                                           |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 1 <sup>#</sup> | 交货态(正火+回火,正火温度 910~940℃,保温时间 2~2.5 min/mm,水冷,回火温度 680~710℃,保温 3~3.5 min/mm,空冷)。 |
| 2 <sup>#</sup> | 最小模拟焊后热处理 min. PWHT:<br>(690±10)℃/8 h,350℃以上升降温≤55℃/h,出炉温度≤350℃,其中一块进行步冷试验。     |
| 3 <sup>#</sup> | 最大模拟焊后热处理 max. PWHT:<br>(690±10)℃/32 h,350℃以上升降温≤55℃/h,出炉温度≤350℃。               |
| 4 <sup>#</sup> | 步冷试验 S. C: 对经最小模拟焊后热处理 min. PWHT 后的试样进行步冷试验。                                    |

## 2 试验结果与分析

## 2.1 化学成分

分别用 1<sup>#</sup> 试样板厚 1/2 和 1/4 位置切取分析试样,采用直读光谱仪对钢板不同位置的化学成分进行分析,结果如表 4 所示。

从表 4 可以看出,钢板的化学成分 P、S、As、Sn、Sb 等有害元素的含量均控制在较低的范围之内,P 控制在 0.004%,S 控制在 0.001%,As、Sn、Sb 均在 0.002% 以下,有害元素控制在较低水平,极大降低了钢板回火脆性的产生。

SA 387Gr22Cl2 钢回火脆化敏感性系数 J、X 与

表 4 SA387Gr22Cl2 钢板的分析成分/%

Table 4 Analysis of SA387Gr22Cl2 steel plate/%

| 部位  | 成分 / % |      |      |       |       |      |      |       |       |       | J 系数 |      |
|-----|--------|------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|------|------|
|     | C      | Si   | Mn   | P     | S     | Cr   | Mo   | As    | Sn    | Sb    |      | Cu   |
| T/4 | 0.13   | 0.09 | 0.55 | 0.004 | 0.001 | 2.49 | 1.12 | 0.002 | 0.002 | 0.001 | 0.02 | 38.4 |
| T/2 | 0.14   | 0.09 | 0.56 | 0.004 | 0.001 | 2.48 | 1.11 | 0.002 | 0.002 | 0.001 | 0.02 | 39.0 |

注: T 钢板厚度, J 系数 钢板回火脆化敏感性系数。

表 5 SA387Gr22Cl2 钢板交货态金相组织及夹杂物

Table 5 Metallographic structure and inclusions in delivered state SA387Gr22Cl2 steel plate

| 位置  | 非金属夹杂物/级 |      |      |      |      |      |      |      | 总和   | 金相组织       | 晶粒度/级 |
|-----|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------|-------|
|     | A        |      | B    |      | C    |      | D    |      |      |            |       |
|     | 粗        | 细    | 粗    | 细    | 粗    | 细    | 粗    | 细    |      |            |       |
| T/2 | 0        | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0.5  | 0.5  | 回火贝氏体      | 7     |
| T/4 | 0        | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0.5  | 0.5  | 回火贝氏体      | 7     |
| 标准  | ≤1.5     | ≤1.5 | ≤1.5 | ≤1.5 | ≤1.5 | ≤1.5 | ≤1.5 | ≤1.5 | ≤4.5 | ≥90% 回火贝氏体 | ≤5    |

P、As、Sn 及 Sb 元素有密切关系,Cr-Mo 钢长期在脆化温度区间内工作时,以上所述元素有足够的时间向晶界偏聚,从而降低晶界的断裂强度,增大了脆化倾向,而 Si 及 Mn 元素促进了以上元素的偏聚,促进了钢板的回火脆化。钢板的显微组织对钢板回火脆化也有一定的影响,细化晶粒有利于减少钢板回火脆化倾向。

## 2.2 性能检测

按表 3 试验方案所述不同状态下的钢板,切取拉伸试样、冲击试样、金相试样,按标准试验方法进行拉伸、冲击试验及金相组织等检测。

## 2.2.1 交货态

对钢板交货态试样进行组织观察,并对非金属夹杂物进行评级,具体见表 5 所示。

由表 5 可以看出,钢中非金属夹杂物总和均为 0.5 级,只有 D 类夹杂物,标准要求≤1.5 级,夹杂物细小,钢质纯净度高,同时,晶粒度达到 7 级水平,标准要求晶粒度≤5 级,晶粒均匀细小,为后续性能稳

定提供良好的组织基础,钢组织为回火贝氏体,满足标准要求。

## 2.2.2 模拟焊后热处理态

试样按表 3 热处理制度 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 进行最大、最小模拟焊后热处理,随后进行室温拉伸、高温拉伸、厚度方向性能及进行组织观察,检验结果见表 6、7 所示,金相组织见图 1 所示。

由表 6、7 看出,钢板的室温拉伸屈服强度( $R_{el}$ ): 376~441 MPa,抗拉强度( $R_m$ ): 545~589 MPa,延伸率( $A_{50}$ )≥28.5%。按照 ASME SA387/SA387M-2019 标准要求,室温拉伸标准值为:( $R_{el}$ ): 310~620 MPa, $R_m$  515~690 MPa, $A_{50}$ ≥18%,性能满足标准要求。高温拉伸、-29℃低温冲击及厚度方向拉伸性能均良好。试样经(过 690±10)℃,保温 32 h 模拟焊后热处理后,钢板厚度 1/4 和 1/2 处,都较技术条件有充足的富余量,性能均匀,各向异性小,完全满足甲醇合成塔使用条件要求。

表 6 SA387Gr22Cl2 钢板模拟焊后热处理性能

Table 6 Simulated PWHT performance of SA387Gr22Cl2 steel plate

| 位置  | 试样状态      | 室温                  |                  |             |           | 330 ℃                 | -29 ℃ 横向冲击功             |
|-----|-----------|---------------------|------------------|-------------|-----------|-----------------------|-------------------------|
|     |           | $R_{el}/\text{MPa}$ | $R_m/\text{MPa}$ | $A_{50}/\%$ | $Z/\%$    | $R_{p0.2}/\text{MPa}$ | $K_{\alpha 8}/\text{J}$ |
| T/4 | Max. PWHT | 380                 | 550              | 34.5        | 83        | 323                   | 280/272/261             |
| T/4 | min. PWHT | 441                 | 589              | 30.0        | 77        | 375                   | 261/260/273             |
| T/2 | Max. PWHT | 376                 | 545              | 33.0        | 78        | 310                   | 181/154/270             |
| T/2 | min. PWHT | 438                 | 580              | 28.5        | 77        | 373                   | 278/252/212             |
| 标准  |           | 310 ~ 620           | 515 ~ 690        | $\geq 18$   | $\geq 40$ | $\geq 215$            | $\geq 55$               |

表 7 SA387Gr22Cl2 钢板模拟焊后热处理态厚度方向拉伸性能

Table 7 Tensile properties of simulated PWHT in thickness direction of SA387Gr22Cl2 steel plate

| 项目 | 试样状态      | $R_{p0.2}/\text{MPa}$ | $R_m/\text{MPa}$ | $Z/\%$    |
|----|-----------|-----------------------|------------------|-----------|
| 钢板 | Max. PWHT | 386                   | 532              | 57        |
|    |           | 383                   | 530              | 61        |
|    |           | 385                   | 531              | 54        |
|    | min. PWHT | 453                   | 577              | 52        |
|    |           | 455                   | 576              | 52        |
|    |           | 452                   | 578              | 56        |
| 标准 |           | $\geq 310$            | $\geq 515$       | $\geq 45$ |

由图 1 可以看出,钢板经模拟焊后热处理,组织均为回火贝氏体,碳化物明显增多,并且碳化物呈弥

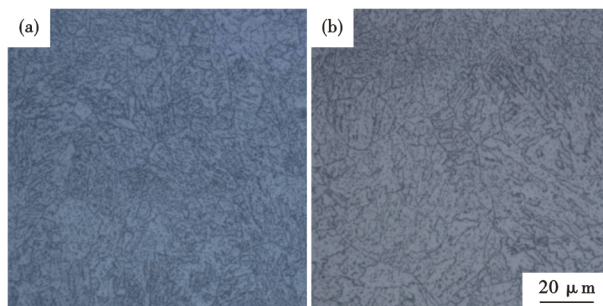


图 1 SA387Gr22Cl2 钢板模拟焊后热处理金相组织: (a) min. PWHT (b) Max. PWHT

Fig. 1 Metallographic structure of SA387Gr22Cl2 steel plate simulated post-weld heat treatment (PWHT) (a) min. PWHT (b) Max. PWHT

表 8 步冷试验态 SA387Gr22Cl2 钢板的系列横向冲击功/J

Table 8 Series transverse impact energy of step cooling test state SA387Gr22Cl2 steel plate/J

| 部位  | 冲击温度/℃   |          |          |             |             |             |             |             |
|-----|----------|----------|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|     | -120     | -100     | -80      | -70         | -60         | -50         | -29         | 0           |
| T/2 | 22/10/15 | 41/21/36 | 45/49/40 | 124/122/111 | 172/178/164 | 242/260/250 | 185/148/249 | 256/252/236 |

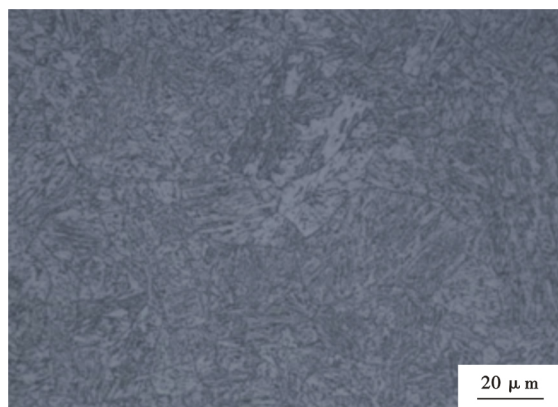


图 2 步冷试验后 SA387Gr22Cl2 钢板金相组织

Fig. 2 Metallographic structure of SA387Gr22Cl2 steel plate after step cooling test

散分布。说明碳化物随着模焊时间的延长,析出数量呈增加趋势,碳化物在晶内及晶界均有分布<sup>[4]</sup>。钢板最大模焊态性能低于最小模焊态性能,特别是板厚 1/2 位置最为明显,原因是随着焊后热处理时间的延长,在晶内和晶界处新析出的颗粒状析出相的数量逐

渐增多。析出相逐渐向晶界处聚集逐渐连接到一起,并有长大的趋势,由于析出相在晶界的聚集长大,弱化了晶界的结合力,表现出钢板低温冲击韧性的下降<sup>[5]</sup>。

### 2.2.3 步冷试验

按表 3 试样热处理制度编号 4<sup>#</sup>进行步冷试验,试验后,系列冲击试验结果见表 8 所示,金相组织见图 2 所示。

表 9 SA387Gr22Cl2 钢板最小模焊热处理、步冷试验态的 1/2 处系列平均横向冲击功/J

Table 9 Average transverse impact energy at 1/2 thickness series of SA387Gr22Cl2 steel plate with minimum die welding heat treatment and step cooling test state/J

| 冲击温度/℃ | Min. PWHT | Min. PWHT + S. C |
|--------|-----------|------------------|
| -120   | 13        | 16               |
| -100   | 15        | 33               |
| -80    | 79        | 45               |
| -70    | 128       | 118              |
| -60    | 262       | 171              |
| -50    | 272       | 251              |
| -29    | 245       | 194              |
| 0      | 285       | 248              |

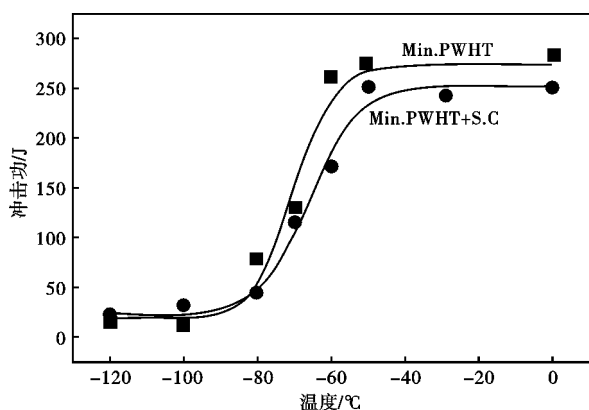


图 3 SA387Gr22Cl2 钢转变温度曲线

Fig. 3 Transition temperature curves of SA387Gr22Cl2 steel

从表 8 可以看出,步冷试验后在  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  的冲击吸收能量仍较高,从图 2 还可以看出,组织为回火贝氏体。

#### 2.2.4 回火脆化敏感性评价

将最小模焊热处理后的系列冲击试验和步冷试验后的系列冲击试验结果,取平均值列于表 9。

将表 9 中的数据绘制的转变温度曲线,见图 3 所示,得到 55J 的温度计温度增量。

$$\text{CvTr55} = -88\text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$\Delta\text{CvTr55} = 10\text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$\text{CvTr55} + 2.5\Delta\text{CvTr55} = -63\text{ }^{\circ}\text{C} < 10\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

试验结果表明,经步冷试验后试板的横向冲击吸收能量为 55 J 处温度增量较小,回火脆化倾向不明显,据此计算得到的  $\text{CvTr55} + 2.5\Delta\text{CvTr55}$  为  $-63\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,远远低于规范要求的  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,满足使用要求。

### 3 结论

(1) 经过  $(690 \pm 10)\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,保温 8 和 32 h 模拟焊后

热处理后,钢板不同厚度位置室温拉伸屈服强度 ( $R_{el}$ ):  $376 \sim 441\text{ MPa}$ ,抗拉强度 ( $R_m$ ):  $545 \sim 589\text{ MPa}$ ,并且都较技术条件有充足的富余量,性能均匀,各向异性小,符合技术标准要求。

(2) 钢板夹杂物细小,钢质纯净度高,显微组织为回火贝氏体组织,晶粒度达到 7 级,晶粒均匀细小,完全满足使用标准要求。

(3) 钢板的回火脆化敏感性评价显示,回火脆化敏感性满足设备使用要求, $\text{CvTr55} + 2.5\Delta\text{CvTr55}$  为  $-63\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,远低于规范要求的  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

国家重点专项计划资助项目(2017YFB0305300)

#### 参考文献

- [1] 姜洪生,张汉谦,丛郁,等. 临氢设备用 12Cr2Mo1R (SA387Gr22Cl2) 厚钢板的开发 [J]. 钢铁,2008,43(12): 67-70.
- [2] 高照海,唐郑磊,许少普,等. 特厚临氢设备用 12Cr2Mo1R (SA387Gr. 22Cl. 2) 钢种的试制 [J]. 钢铁研究学报,2014,26(2): 56-62.
- [3] 姜洪生. 临氢设备用厚钢板生产及使用技术研究 [D]. 沈阳: 东北大学 2008.
- [4] 崔忠圻. 金属学与热处理 [M]. 北京: 机械工业出版社,2000.
- [5] 吴艳阳,温冰,牛红星,等. 模拟焊后热处理制度对临氢 12Cr2Mo1R 钢板性能的影响 [J]. 宽厚板,2012,18(1): 6-8.

尹卫江(1983-),男,硕士(2012 年内蒙古科技大学),高级工程师,2009 年辽宁科技大学(本科)毕业,Cr-Mo 系列容器钢的研发. E-mail: yinweijiang2010@163.com

收稿日期: 2021-06-19

欢迎全国冶金、机械、耐材及相关  
行业在《特殊钢》杂志上刊登工艺设备  
和技术、产品研发宣传广告