

# S355 钢 T 形接头高周疲劳性能

程艳艳<sup>1,2</sup>

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司, 长春 130062; 2. 吉林化工学院, 吉林 吉林 132022)

**摘要:** 在工程领域中焊接构件极易产生疲劳断裂, 引起各行业广泛关注。文中以 T 形接头为研究对象, 采用 MIG 焊对 S355 钢板进行 T 形接头焊接试验, 并对焊接接头进行金相组织和硬度分析。结果表明, 焊缝主要为先共析铁素体、珠光体、粒状贝氏体和少量针状铁素体; 熔合区成分和组织不均匀, 晶粒大小不一致; 过热区晶粒较粗大且不均匀; 正火区组织主要为铁素体和珠光体, 晶粒细小均匀。焊接接头的硬度高于母材, 最高硬度出现在热影响区。对 T 形接头焊接试样进行轴向高周疲劳试验, 通过最小二乘法拟合试验数据, 得到疲劳  $S-N$  曲线。

**创新点:** 以相关标准为依据, 总结 S355 钢 MIG 焊 T 形接头的疲劳性能, 获得  $S-N$  疲劳曲线, 揭示疲劳断口特征和规律, 阐明其产生的原因, 为焊接结构的设计提供科学依据。

**关键词:** S355 钢; T 形接头; 显微组织; 高周疲劳性能; 断口特征

中图分类号: TG405      文献标识码: A      doi: 10.12073/j.hj.20220121001

## High-cycle fatigue performance of S355 steel T-joint

Cheng Yanyan<sup>1,2</sup>

(1. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062, China;

2. Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132022, Jilin, China)

**Abstract:** In the field of engineering, fatigue fracture of welded components is very easy to occur, which has attracted extensive attention in various industries. In order to analyze the microstructure and fatigue properties of typical welded components, T-joint were studied in this paper. Welding tests of T-joint of S355 steel were completed by MIG welding, and microstructure and hardness of welded joints were analyzed. The weld mainly contained pro-eutectoid, ferrite pearlite, granular bainite and a small amount of acicular ferrite. Composition and microstructure of fusion zone were not uniform, grain size was not consistent, and grains of overheated zone were coarser and uneven. Microstructure of normalized zone was mainly ferrite and pearlite, and grains were fine and uniform. Hardness of welded joints was higher than that of base metal, and hardness of heat-affected zone was the highest. Axial high-cycle fatigue tests on welded specimens of T-Joints were conducted, test data was processed and fitted by the least square method, and  $S-N$  curve was obtained.

**Highlights:** Based on the relevant standards, the fatigue performance of S355 steel MIG welded T-joint was summarized, the  $S-N$  fatigue curve was obtained, the characteristics and laws of fatigue fracture were revealed, and the causes of fatigue fracture were explained, it provided scientific basis for the design of the welding structure.

**Key words:** S355 steel, T-joint, microstructure, high-cycle fatigue property, fracture characteristics

收稿日期: 2022-01-21      修改日期: 2022-03-03      录用日期: 2022-03-11

基金项目: 吉林化工学院博士启动基金项目(2021023)

## 0 前言

随着经济的快速发展,城市交通压力逐渐增大,对出行工具提出了更高的要求。轨道客车具有快捷、方便和间隔时间短等优点,对其需求日益增加,因此轨道客车产业愈加受到重视。重要装置的焊接部位在车辆行驶中承受多个方向的动载荷<sup>[1-2]</sup>,这要求焊接母材具有良好的使用性能。目前 S355 钢常用于轨道客车焊接构件,其作为一种低合金高强度结构钢,具有良好的强度、塑性、韧性和抗疲劳强度<sup>[3-5]</sup>。关键结构的焊接质量影响轨道客车的安全性和可靠性,很多学者对其进行了研究<sup>[6-8]</sup>。许鸿吉等人<sup>[9-10]</sup>对 S355 钢半自动气体保护焊焊接接头的力学性能和显微组织进行了研究;严春妍等人<sup>[11]</sup>分析了激光-MIG复合焊的焊接接

头显微组织、硬度分布规律,焊接过程温度场和残余应力分布;赵轶磊等人<sup>[12-13]</sup>研究了 MAG 焊的焊接接头组织和力学性能。

除了 S355 钢焊接接头的组织和性能,焊接接头的疲劳性能也会对承载构架质量产生影响<sup>[14-15]</sup>,因此对焊接接头进行疲劳性能分析具有重要意义。文中以 S355 钢 MIG 焊 T 形接头为研究对象,分析焊接接头的显微组织和硬度,研究焊接接头的高周疲劳性能,对断口形貌进行分析。该研究结果可对生产提供指导。

## 1 试验方法

试验选用厚度为 14.5 mm 的 S355 钢板,化学成分见表 1。采用 MIG 焊接方法,T 形接头,焊丝选用直径 1.2 mm 的 ER80S-G 实心焊丝,化学成分见表 2。

表 1 S355 钢化学成分(质量分数,%)

| C    | Si   | Mn   | S     | P     | Cr    | Cu   | Ni   | Mo   | Zr   |
|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| 0.17 | 0.55 | 0.94 | 0.035 | 0.035 | 0.065 | 0.40 | 0.65 | 0.30 | 0.15 |

表 2 ER80S-G 实心焊丝化学成分(质量分数,%)

| C    | Si    | Mn   | P    | S     | Cr    | Ni   | Mo   |
|------|-------|------|------|-------|-------|------|------|
| 0.13 | 0.091 | 0.47 | 1.43 | 0.008 | 0.002 | 0.03 | 1.20 |

焊接时保护气体为高纯度氩气,按照焊接工艺预热,T 形接头的焊角尺寸按照 EN15085—2007 标准控制,表 3 为焊接工艺参数。

表 3 焊接工艺参数

| 焊缝<br>层数 | 电弧电压<br>$U/V$ | 焊接电流<br>$I/A$ | 焊接速度<br>$v/(mm \cdot min^{-1})$ | 气体流量<br>$Q/(L \cdot min^{-1})$ |
|----------|---------------|---------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 1~4      | 18~28         | 100~260       | 30~38                           | 18~20                          |

对全部试样进行着色探伤,检验合格后在焊件上切取 T 形接头试样,用砂纸研磨后在抛光机上抛光,采用 4% 硝酸酒精溶液对试样进行腐蚀,制成金相试样,然后在 MPC-400 倒置金相显微镜上对试样进行观察和分析。依据 ENISO9015:2011 标准使用 HVS-1000 型显微硬度计对焊接接头进行硬度测试分析,测试点在 a, b, c 3 条线上,位置如图 1 所示,其中 a 和 c 线上的测试点均在焊缝下 2 mm 内。

在 INSTRON 880L 疲劳试验机进行高周疲劳试验,T 形接头疲劳试样尺寸如图 2 所示。疲劳试验用应力控制,正弦波加载,应力比  $R=0.1$ ,选用 5 个应力范围

水平测试,使用 JSM-6490LV 扫描电子显微镜(SEM)对断口形貌进行观察。

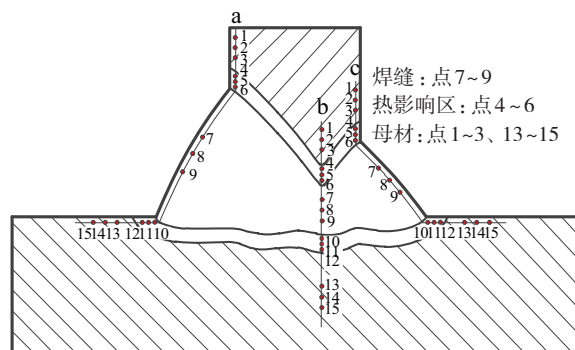


图 1 T 形接头硬度测试位置示意图

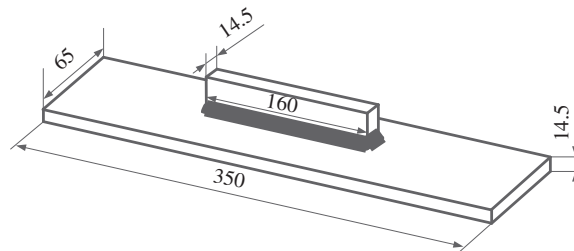


图 2 疲劳试样尺寸

## 2 试验结果及分析

### 2.1 焊接接头组织和硬度分析

S355 钢 MIG 焊 T 形接头分为打底层、填充层和盖面层,以盖面焊为例分析焊接接头的显微组织,图 3 为 S355 钢 MIG 焊 T 形接头的显微组织。从图 3a 可以看出焊缝中分布有沿奥氏体晶界生长的块状和板条状先共析铁素体,铁素体周围析出珠光体,局部区域有少量小岛状复相组织的粒状贝氏体,晶粒内部有少量针状铁素体。图 3b 为熔合区,显微组织主要为先共析铁素

体、珠光体和粒状贝氏体。该区是焊缝和热影响区的过渡区域,焊接时局部金属晶粒熔化,化学成分及组织不均匀,且晶粒大小不一致。图 3c 为过热区,晶粒较粗大且不均匀,显微组织为铁素体和珠光体,并分布有少量粒状贝氏体。图 3d 为正火区,显微组织为细小均匀的块状铁素体和珠光体。图 3e 为母材区,该区域不受焊接热循环影响,可以看到呈条带状垂直于轧制方向分布的珠光体和铁素体。

焊接接头的硬度分布如图 4 所示,可以看出 T 形接头中 a, b, c 3 条线上的硬度分布规律一致,热影响区

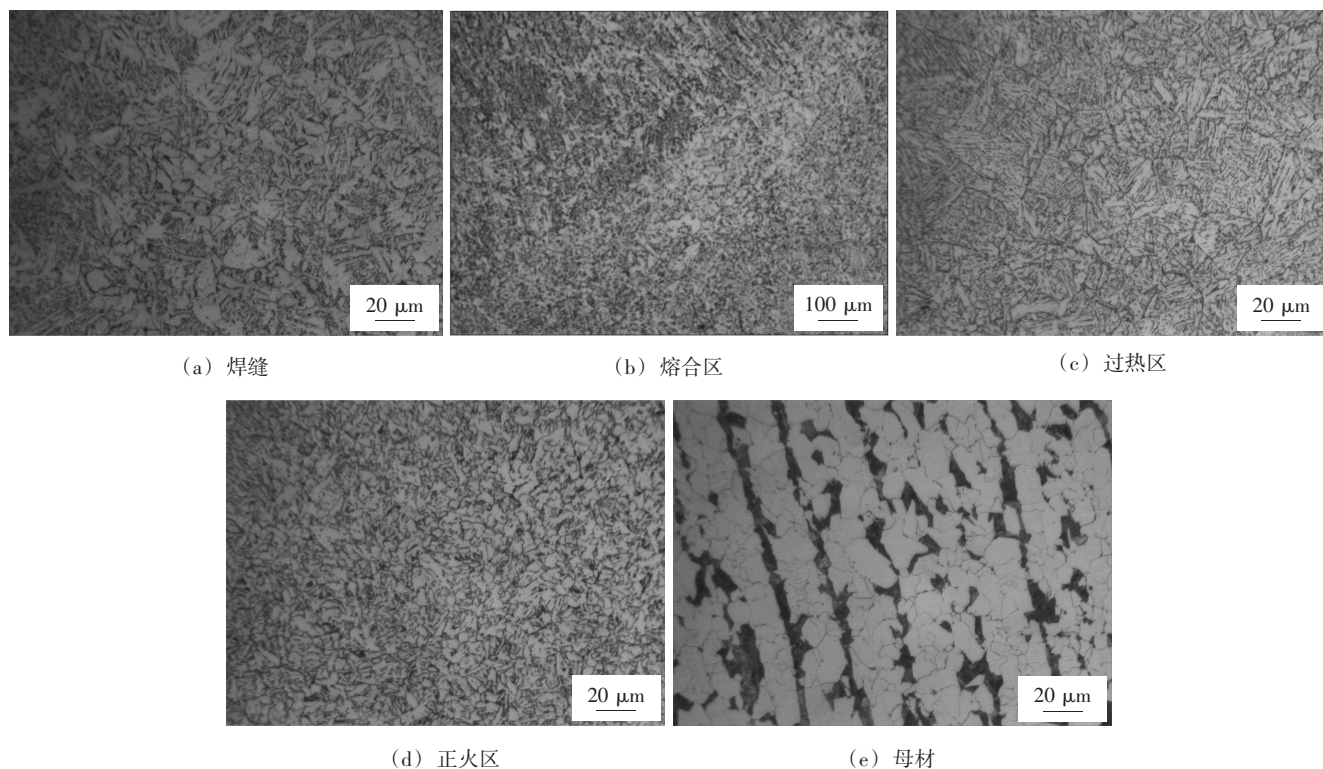


图 3 焊接接头显微组织形貌

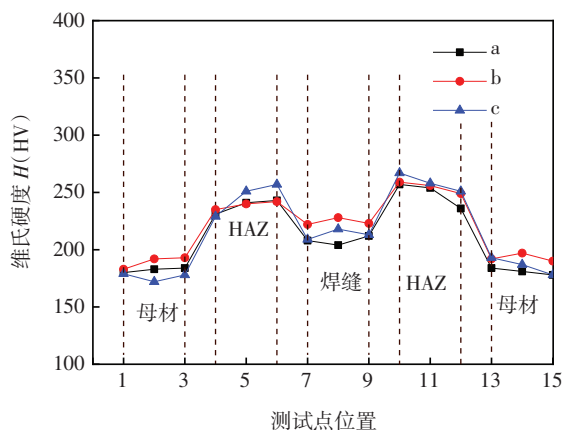


图 4 T 形接头硬度分布曲线

和焊缝的硬度均高于母材,最高硬度都出现在热影响区。不同位置的硬度值均在允许范围内,符合焊接工艺评定标准 ENISO 15614—1:2017<sup>[16]</sup>的要求。

### 2.2 疲劳性能分析

在高于实际工作应力下对 S355 钢 T 形焊接接头进行高周疲劳试验,试验结果见表 4。

依据国家标准 GB 24176—2009 对表 4 中的疲劳数据处理,采用最小二乘法进行拟合,得到 S355 钢 T 形接头的疲劳 S-N 曲线,如图 5 所示,表达式为

$$\hat{x}_{(50,50)} = 262.68 - 9.98y \quad (1)$$

式中: $\hat{x}_{(50,50)}$  为循环应力范围,MPa; $y$  为材料对数疲劳寿命。

表4 S355 钢 T 形焊接接头试样的疲劳试验结果

| 应力范围<br>$\Delta\sigma/\text{MPa}$ | 应力比<br>$R$ | 循环次数<br>$N(\text{周次})$ | 对数疲劳寿命<br>$\lg N, N(\text{周次})$ |
|-----------------------------------|------------|------------------------|---------------------------------|
| 162                               | 0.1        | 817 040                | 5.912 243                       |
| 162                               | 0.1        | 10 000 000             | 7                               |
| 162                               | 0.1        | 10 000 000             | 7                               |
| 196                               | 0.1        | 201 368                | 5.303 990                       |
| 196                               | 0.1        | 256 706                | 5.409 436                       |
| 196                               | 0.1        | 694 651                | 5.841 767                       |
| 211                               | 0.1        | 242 683                | 5.385 039                       |
| 211                               | 0.1        | 236 440                | 5.373 721                       |
| 211                               | 0.1        | 190 138                | 5.279 069                       |
| 225                               | 0.1        | 112 905                | 5.052 713                       |
| 225                               | 0.1        | 261 035                | 5.416 699                       |
| 225                               | 0.1        | 197 372                | 5.295 286                       |
| 239                               | 0.1        | 73 365                 | 4.865 489                       |
| 239                               | 0.1        | 108 856                | 5.036 852                       |
| 239                               | 0.1        | 126 021                | 5.100 443                       |

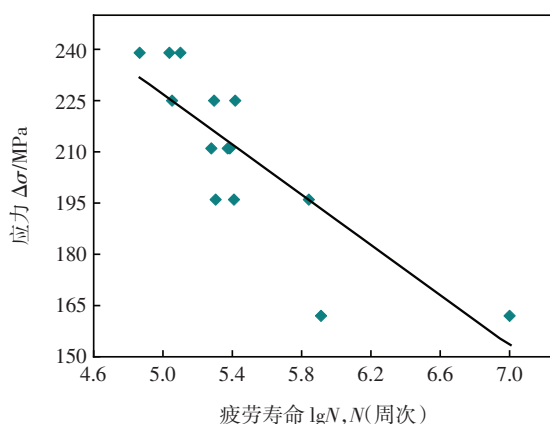


图5 S355 钢 T 形接头 S-N 曲线

### 2.3 断口形貌分析

通过疲劳断裂试件,分析 S355 钢 T 形焊接接头疲劳断裂情况,如图 6 所示。可以看到不同应力范围疲劳试验后,试件断裂部位均在 T 形接头端部的焊趾处。这是由于焊件为 T 形接头,焊缝向母材金属过渡

处有明显的截面变化,在疲劳试验交变载荷作用下应力集中系数比试样其它位置高,且该处焊缝厚度较薄,有一定淬硬倾向,故容易在该处断裂。



图6 疲劳断裂后的试件

S355 钢 T 形焊接接头疲劳宏观断口形貌如图 7 所示,疲劳断口分为疲劳源区、疲劳裂纹扩展区和瞬时断裂区,能够看到明显的疲劳弧线,具有疲劳断裂的典型特征。疲劳裂纹通常起源于试样表面、缺陷处或者应力最大处,试验中疲劳裂纹萌生在应力集中的 T 形接头端部焊趾处,在断口上存在多处疲劳源。疲劳裂纹逐步向板厚方向扩展,形成表面光滑并伴有放射纹路的扩展区,占据断面的大部分区域。瞬时断裂区位于断口两侧,表面较粗糙,在断口边缘有剪切唇。

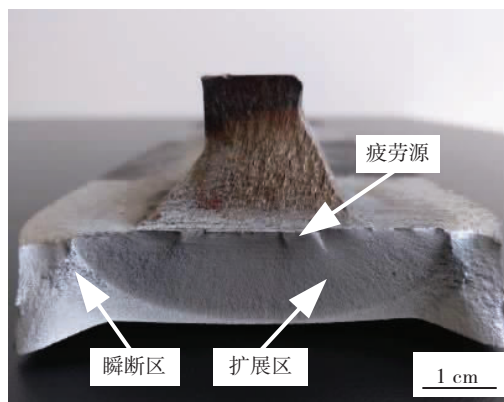


图7 S355 钢 T 形接头疲劳断口宏观形貌

采用 SEM 对 S355 钢 T 形接头疲劳断口进行观察,微观形貌如图 8 所示。疲劳裂纹萌生于焊趾处的尺寸较小的疏松处,该处的强度较弱,且应力集中,放射纹向周围扩展,如图 8a 所示。图 8b 为疲劳扩展区形貌,能够看到疲劳条带,多处产生了二次裂纹。图 8c 为疲劳瞬断区,可以看到许多大小不一的韧窝,且有朝一个方向的撕裂迹象。

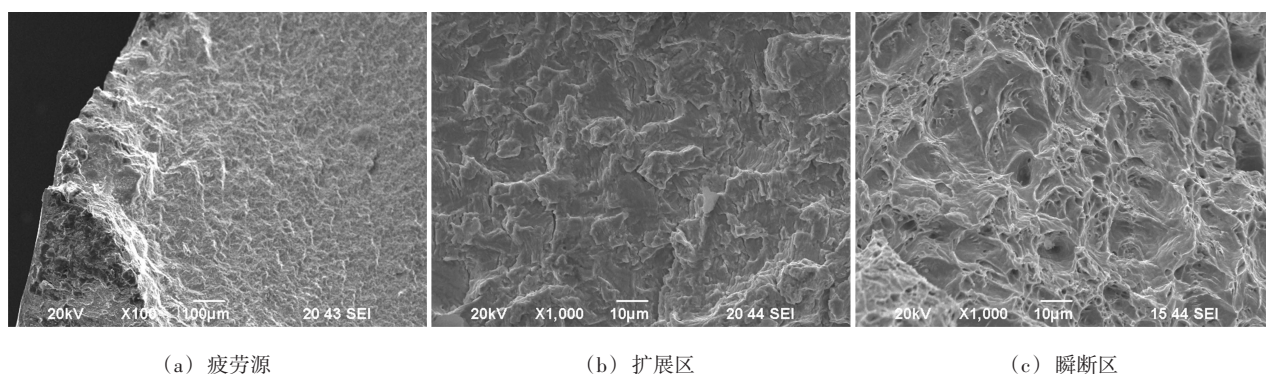


图8 S355 钢 T 形接头疲劳断口微观形貌

### 3 结论

(1) S355 钢 T 形接头的焊缝组织为先共析铁素体、珠光体、粒状贝氏体和少量针状铁素体。熔合区和过热区组织类似,正火区的晶粒较其它区域均匀细小。焊接接头的硬度符合焊接工艺评定要求,其中热影响区的硬度最高。

(2) S355 钢 T 形接头试样的高应力范围水平的疲劳  $S-N$  曲线表达式为  $\hat{x}_{(50,50)} = 262.68 - 9.98\gamma$ 。

(3) 在轴向高应力作用下 S355 钢 T 形接头疲劳断口存在多个疲劳源,萌生于两侧的端部焊趾疏松处;疲劳裂纹扩展区有疲劳条带及二次裂纹;瞬断区有大量韧窝,具有韧性断裂的典型形貌。

### 参考文献

- [1] 杨广雪,刘志明,李广全,等.基于等效结构应力法的焊接构架疲劳损伤评估[J].铁道学报,2020,42(7):73-79.
- [2] 王文静,刘志明,李强,等.CRH2 动车转向架疲劳强度分析[J].北京交通大学学报,2009,33(1):5-9.
- [3] 王元良,骆德阳,王一戎.我国高速列车焊接技术及其新发展[J].电焊机,2008,38(8):8-12.
- [4] Sun J M, Hensel J, Klaseen J, et al. Solid-state phase transformation and strain hardening on the residual stresses in S355 steel weldments[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 265: 173-184.
- [5] 李凯,何广忠,王春生,等.接头组对间隙对激光电弧复合焊背部成形的影响[J].城市轨道交通研究,2021,24(2):131-133.
- [6] 刘博维. S355J2W 耐候钢焊接接头组织及性能研究[D].北京:北京交通大学硕士学位论文,2012.
- [7] Li Tianci, Zhang Lele, Chang Chao, et al. A uniform - gaussian distributed heat source model for analysis of residual stress field of S355 steel T welding[J]. Advances in Engi-

- neering Software, 2018, 126: 1-8.
- [8] Wang Feixiang, Yang Xinqi, Yin Yayun, et al. Thermal process influence on microstructure and mechanical behavior for friction taper plug welding in structural steel S355[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(9-12): 3459-3466.
- [9] 许鸿吉,金光,宋冰昕,等. S355 钢焊接接头的组织与力学性能[J].理化检验:物理分册,2008(11):600-603.
- [10] 陆善平,王鑫,李殿中,等.焊后退火工艺对高速列车转向架焊接接头组织和性能的影响[J].焊接,2011(5):2-5.
- [11] 严春妍,易思,张浩,等. S355 钢激光 - MIG 复合焊接头显微组织和残余应力[J].焊接学报,2020,41(6):12-18.
- [12] 赵轶磊. S355J2W + N 耐候钢板高频脉冲 MAG 焊 T 形接头全熔透焊接工艺及组织和性能研究[D].大连:大连交通大学硕士学位论文,2020.
- [13] 张雪红.厚板低碳钢激光 - 电弧复合焊与 MAG 焊接接头组织研究[J].焊接,2015(1):33-36.
- [14] Lewandowski J, Rozumek D, Marciniak Z, et al. Fatigue crack growth in welded S355 specimens subjected to combined loading[J]. Fracture and Structural Integrity, 2019, 13(48):10-17.
- [15] Duncheva G, Maximov J, Ganev N, et al. Fatigue life enhancement of welded stiffened S355 steel plates with noncircular openings[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 112: 93-107.
- [16] Technical Committee: ISO/TC 44/SC 10 Quality Management in the Field of Welding. Specification and qualification of welding procedures for metallic-welding procedure test-part1: arc and gas welding of steels and arc welding of nickel and nickel alloys, ENISO15614-1:2017[S]. 2017-06.

第一作者: 程艳艳,博士,副教授;主要从事材料加工方面的科研和教学工作;chengyanyan1980@sina.com。

(编辑:郑红)