

文章编号: 1007-7294(2024)07-1100-11

Mn25Al7 钢焊接接头的疲劳性能试验研究

张宇¹, 李俊¹, 周俊², 陈威¹, 谌伟¹, 李晓彬¹

(1. 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院, 武汉 430063; 2. 中国舰船研究设计中心, 武汉 430064)

摘要: Mn25Al7 钢是一种新型的轻质高强船用钢, 目前针对 Mn25Al7 钢的疲劳性能尚未开展相关试验研究。本文对 Mn25Al7 钢的母材、对接焊接接头及 T 型焊接接头等典型节点进行疲劳试验研究, 分别基于名义应力方法和热点应力方法拟合得到典型节点疲劳等级曲线, 并与现有规范的疲劳等级曲线进行对比分析。对三种试样的断口形貌进行观测, 分析其裂纹扩展规律和断裂机理。试验结果表明: Mn25Al7 钢母材疲劳寿命高于按规范设计的普通钢材; 规范低估了母材和磨平焊趾的对接焊缝接头疲劳寿命, 但能较好地评估 T 型焊缝接头的疲劳寿命。通过对比分析三种试件的损伤速率差别, 进一步对断口形貌进行了系统分析, 发现初始裂纹源和焊接残留物会造成疲劳强度的降低。本研究可为船用高强钢的疲劳寿命预测提供理论依据和试验支撑。

关键词: 高强钢; 疲劳评估; 焊接接头; 断口分析; 疲劳试验

中图分类号: U661.4 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1007-7294.2024.07.013

Fatigue performance tests of Mn25Al7 steel welded joints

ZHANG Yu¹, LI Jun¹, ZHOU Jun², CHEN Wei¹, SHEN Wei¹, LI Xiao-bin¹

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. China Ship Research and Design Center, Wuhan 430064, China)

Abstract: Mn25Al7 steel is a new type of lightweight and high-strength marine steel, and the fatigue properties of Mn25Al7 steel have not been studied in relevant experiments. In this paper, the fatigue tests of typical nodes such as base metal, butt welded joint and T-welded joint of Mn25Al7 steel were carried out, and the fatigue grade curve of the typical nodes was obtained based on the nominal stress method and the hot stress method, respectively, and compared with the fatigue grade curve of the existing standard. The fracture morphology of the three samples was observed, and the crack propagation law and fracture mechanism were analyzed. The test results show that the fatigue life of Mn25Al7 steel base metal is higher than that of ordinary steel designed by the specification. The specification underestimates the fatigue life of butt weld joints of base metal and smoothed toes, but can accurately evaluate the fatigue life of T-weld joints. By comparing and analyzing the difference in damage rate of the three specimens, the fracture morphology was further systematically analyzed. It is found that the initial crack source and welding residue will reduce the fatigue strength. This study can provide a theoretical basis and experimental support for the prediction of fatigue life of marine high-strength steel.

Key words: high-strength steel; fatigue assessment; welded joint; fracture analysis; fatigue test

收稿日期: 2024-01-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51979213)

作者简介: 张宇(1997-), 男, 硕士研究生;

李晓彬(1971-), 男, 博士, 教授, 通讯作者, E-mail: lxbmark@163.com。

0 引言

疲劳断裂是钢材失效的主要形式,而船舶裂纹或断裂大部分是由焊接结构引起的。船用高强钢的使用并未明显提高疲劳强度,Mn25Al7钢就是一种新型的轻质高强船用钢,目前针对Mn25Al7钢的疲劳性能尚未有相关试验研究,因此,有必要对Mn25Al7钢展开典型节点疲劳试验研究。

国内外学者早已对船用高强钢展开了系列的疲劳试验研究,如Zhang等^[1]对Q345钢在高温冷却后的疲劳性能试验进行了研究,发现高温冷却后Q345钢的疲劳寿命与常温状态下相比明显降低,损伤速率受到高温的明显影响,其宏观形态也有差异。Hariprasath等^[2]探究了焊接工艺对海军级高强度低合金钢的高周疲劳行为的影响,发现母材和焊接接头的S-N曲线在IIW标准曲线之上。Sakai等^[3]通过试验观察了金属在正常寿命状态和高周疲劳状态下晶体裂纹、表面夹杂物和加工裂纹等不同的断裂模式。施刚等^[4]对Q390GJD钢材展开了疲劳性能试验研究,给出了能够描述其疲劳性能的S-N曲线,发现磨平焊趾的焊缝试件其疲劳强度高于原状焊缝试件,通过对试件断面特征进行微观分析,发现从疲劳断面能观察到明显裂纹,瞬间断裂面能观察到典型的韧窝特征。Yang等^[5]对Q420C钢展开了高周疲劳性能试验研究,发现钢板厚度对疲劳性能有着显著影响。郭宏超等^[6]对Q690D高强钢展开了母材及焊缝疲劳性能试验研究,拟合了描述其疲劳寿命的S-N曲线,讨论了焊接缺陷对试件疲劳损伤的影响。刘德重等^[7]对船用10Ni5CrMoV高强钢的断口进行了微观分析,发现断口呈现韧性断裂的形貌。上述研究均基于名义应力法对多种高强钢的母材及焊缝展开了疲劳性能评估,但由于焊接接头的几何差异,名义应力法无法满足焊接细部结构的疲劳评估要求。常用的焊缝疲劳评估方法还有热点应力法、缺口应力法、结构应力法等,20世纪80年代热点应力法就成为船舶领域研究焊接结构疲劳问题的主流方法,各国学者、国际焊接协会(IIW)和船级社对热点应力法进行了大量的理论研究和试验对比。Niemi^[8]建议热点应力插值点取为焊趾到板厚(t)的0.4倍和1.0倍处,对于较粗的网格,插值点建议取为 $0.5t$ 和 $1.0t$ 。IIW^[9]从2008年将距焊趾的 $0.4t$ 和 $1.0t$ 热点应力插值点修订为 $0.5t$ 和 $1.5t$ 处进行线性外推,DNV规范(2019)^[10]建议使用 $t \times t$ 的20节点实体单元或8节点单元,从 $0.5t$ 和 $1.5t$ 两点进行线性外推计算热点应力。经大量理论研究,采用 $0.5t$ 和 $1.5t$ 两点作为热点应力插值会更为准确。因此,本文主要通过S-N曲线结合线性累积损伤理论,来评估Mn25Al7钢在裂纹萌生阶段的疲劳性能,使用高频疲劳试验机,分别基于名义应力法和热点应力法得出S-N曲线,再将两种S-N曲线与现有规范分别进行对比来分析试验结果。

基于以上研究,本文对Mn25Al7钢展开疲劳性能试验研究,分析其应力与疲劳寿命之间的关系,并基于名义应力法和热点应力法进行疲劳等级曲线拟合,得到适用于Mn25Al7钢的典型节点S-N曲线,并与现有规范建议的疲劳等级曲线进行对比,评价Mn25Al7钢的疲劳强度;通过断口宏观形貌分析和损伤分析,观察试验所得试件断口处的疲劳裂纹和细微缺陷,从试验现象来分析造成母材和焊缝试件寿命差异的原因,为船用高强钢的疲劳寿命预测提供理论依据和试验支撑。

1 疲劳试验

1.1 试件设计

根据GB/T2975—2018《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》^[11],本试验设计了三组试件,分别为母材试件(33件)、对接焊接试件(25件)和T型焊接试件(22件)。试验用钢为Mn25Al7钢,采用全板厚取样方式,疲劳试件如图1所示。

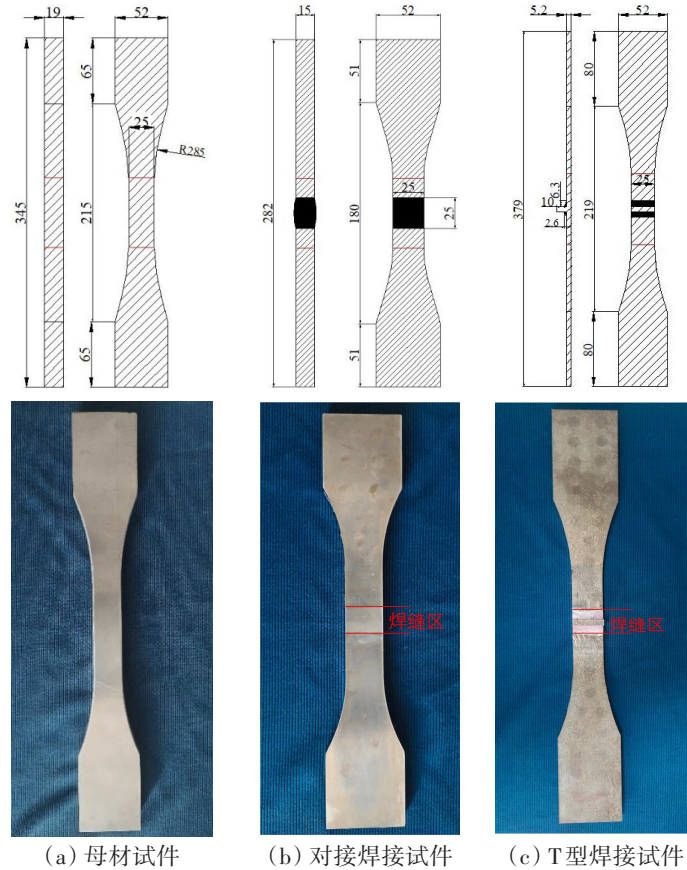


图1 疲劳试件(单位:mm)

Fig.1 Fatigue specimens (Unit: mm)

1.2 材料参数

母材试件保留原始表面尺寸,对接焊接接头及T型焊接接头的构造设计、焊接工艺及焊缝质量满足 GB/T 13816-2009《焊接接头脉动拉伸疲劳试验方法》^[12],对接焊接接头磨平焊趾,T型焊接接头试件采用角焊缝连接,焊趾尺寸为2~3 mm。焊条型号为ER80S-G,采用手工电弧焊,常温下进行焊接,钢板和焊条化学成分如表1~3。

表1 焊条熔覆金属力学性能

Tab.1 Mechanical properties of welding deposited metal

焊条类型	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 R_{eL} /MPa	断后伸长率 A	-30 °C冲击功 A_K /J
ER80S-G	≥600	≥480	25%	62

表2 焊接参数

Tab.2 Welding parameters

焊接方式	直径/mm	电流/A	电压/V	焊接速度/(cm·min ⁻¹)
手工电弧焊	4.0	140~180	22~26	15~25

表3 Mn25Al7钢和焊条的化学成分

Tab.3 Chemical compositions of Mn25Al7 steel and electrode

材料类型	C	Mn	P	S	Al	Cu	Mo	Ti
ER80S-G	0.07	1.75	0.013	0.012	/	0.21	0.18	0.15
Mn25Al7	0.80~0.95	23~27	<0.015	<0.015	6.0~7.5	/	/	/

为得到 Mn25Al7 钢的材料参数,根据 GB/T 208.1-2010《金属材料拉伸试验第一部分:室温试验方法》^[13]规定,制作 7 个试样,拉伸试件如图 2 所示,进行了准静态拉伸试验,测得 Mn25Al7 钢的应力-应变曲线,结果如图 3 所示,材料性能如表 4 所示。

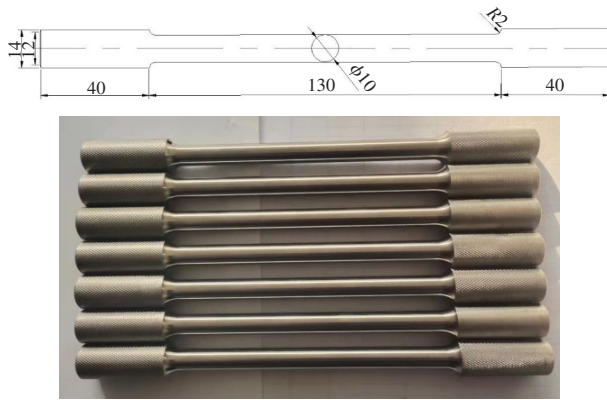


图2 拉伸试件
Fig.2 Tensile specimens

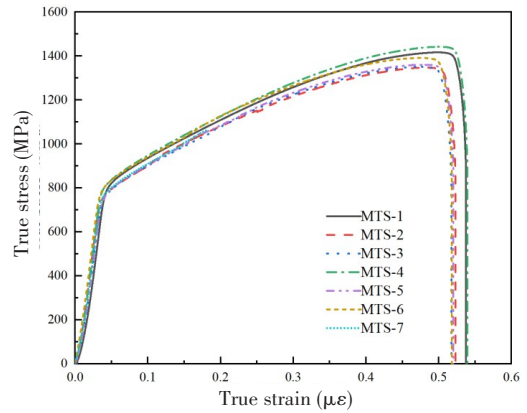


图3 应力-应变曲线
Fig.3 Stress-strain curves

表4 拉伸强度试验结果

Tab.4 Test results of tensile strength

材料类型	屈服强度 R_m /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	弹性模量 E /GPa	泊松比
MTS-1	514.30	835.07	149.60	0.26
MTS-2	499.30	830.82	149.30	0.28
MTS-3	508.17	845.09	149.10	0.24
MTS-4	515.80	833.11	146.20	0.26
MTS-5	511.85	849.12	143.00	0.23
MTS-6	512.83	846.90	145.50	0.21
MTS-7	498.44	826.00	143.50	0.25
Mn25Al7	508.67	838.015	146.6	0.25

1.3 加载方法

本次试验使用 JXG-200 高频疲劳试验机,加载方法如图 4 所示。根据 GB/T 3075-2008《金属材料疲劳试验轴向力控制方法》^[14]要求进行试验。试验的应力比为 $R=S_{min}/S_{max}$,即循环加载过程中试件截面最小应力 S_{min} 和最大应力 S_{max} 的比值,为避免试件受压屈曲,取 $R=0.1$ 。幅值 $\Delta\sigma=(S_{min}-S_{max})/2$,平均应力 $\sigma_m=(S_{min}+S_{max})/2$ 。试件厚度均小于 25 mm,不考虑厚度影响。

实验采用的机器为 JXG-200 高频疲劳试验机,其加载频率范围为 60~300 Hz,最大平均试验力为 ± 200 kN,最大动态试验力为 100 kN。为防止试件在高频率时产生过大的热量而影响试件的疲劳性能,故选择频率 120~140 Hz 进行疲劳试验。

试验最大应力范围为 $0.70 \sim 0.90 Pe$, Pe 为母材屈服强度,最小应力范围为试件在循环载荷 10^7 次时的对应值。加载系数为 $K=S_{max}/Pe$ (S_{max} 为对应最大应力),初始加载系数为 0.5,利用升降法找到无限寿命



图4 JXG-200 高频疲劳试验机及夹块
Fig.4 JXG-200 high frequency fatigue tester and clamping block

区间,即循环载荷为 10^7 次时对应的应力范围。试件的最大应力范围和最小应力范围之间应有 5 个等级划分区间,根据试件类型的不同,最大和最小应力范围也有所区别。

2 疲劳寿命评估

2.1 名义应力 $S-N$ 曲线与现行规范对比

名义应力法适用于高周疲劳寿命的分析,其以 $S-N$ 曲线为基础进行寿命预测,其对数形式如下:

$$\lg N = m \lg \Delta S + C \tag{1}$$

97.7% 存活率的计算公式为

$$\lg N = m \lg \Delta S + C - 2\sigma \tag{2}$$

式中, m 和 C 为材料常数, σ 为标准差,经线性回归后的参数如表 5 所示。

将试验结果和 GB 50017、AISC 360 及 BS 7608 三种规范^[15-17]进行对比,试验及各规范的幂函数表达式如表 6 所示,在疲劳寿命 10^7 次时对应的疲劳强度极限值对比如表 7 所示。

表 5 m 、 C 和 σ 值

Tab.5 Values of m 、 C and σ

试件类型	母材	对接	T型
m	-10.4319	-8.2617	-2.812
C	32.491	26.883	11.642
$C_{97.7\%}$	32.218	26.3724	11.353
$C_{2.3\%}$	32.764	27.3926	11.931
σ	0.1365	0.25055	0.1445

表 6 $S-N$ 幂函数表达式

Tab.6 $S-N$ power function expressions

试件类型	母材	对接焊缝接头	T型焊缝接头
50% 存活率	$\Delta S = 1301.911N^{-0.09586}$	$\Delta S = 1794.448N^{-0.12104}$	$\Delta S = 13\ 472.408N^{-0.35562}$
97.7% 存活率	$\Delta S = 1225.777N^{-0.09586}$	$\Delta S = 1560.549N^{-0.12104}$	$\Delta S = 10\ 897.829N^{-0.35562}$
GB 50017	$\Delta S = 5416.89N^{-0.25}$	$\Delta S = 5416.89N^{-0.25}$	$\Delta S = 11\ 344.472N^{-0.333}$
AISC 360	$\Delta S = 15\ 804.923N^{-0.333}$	$\Delta S = 11\ 292.432N^{-0.333}$	$\Delta S = 6749.487N^{-0.333}$
BS 7608	$\Delta S = 5641.245N^{-0.25}$	$\Delta S = 11\ 496.527N^{-0.333}$	$\Delta S = 8579.593N^{-0.333}$

表 7 疲劳强度极限值 (MPa)

Tab.7 Fatigue ultimate strength values (MPa)

试件类型	50% 存活率	97.7% 存活率	GB 50017	AISC 360	BS 7608
母材	277.69	261.45	96.33	73.76	111.40
对接焊缝接头	255.05	221.82	96.33	52.70	62.67
T型焊缝接头	43.66	35.32	52.66	31.50	47.09

如图 5~7 所示,将疲劳试验结果所得的 $S-N$ 对数曲线与各规范中的设计曲线进行对比,发现拟合的 $S-N$ 对数曲线与试验结果吻合。其中母材的离散性较大,但符合应力水平越低、疲劳寿命就越高趋势;对接焊缝和 T 型焊缝的试验数据分布广泛,但都符合正常趋势。

由图 5~7 可知,在 50% 存活率下,母材的疲劳强度极限值是 277.69 MPa;对接焊接接头的疲劳强度极限值为 255.05 MPa;是母材的 91.85%;T 型焊接接头的疲劳强度极限值为 43.66 MPa,是对接焊接接头的 17.12%。在 97.7% 存活率下,母材的疲

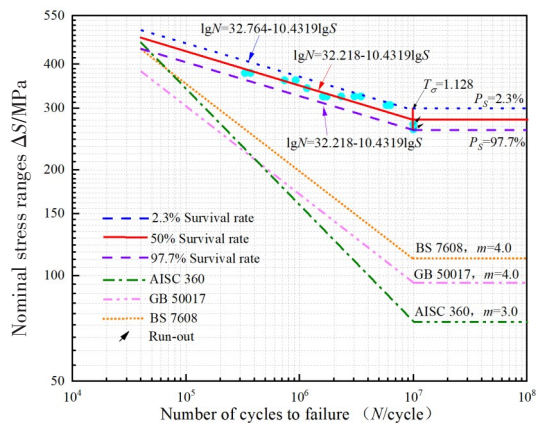


图 5 母材名义应力评估结果

Fig.5 Results of nominal stress evaluation of base metal

劳强度极限值为 261.45 MPa, 是 GB 50017 理论计算值的 2.717 倍、AISC 360 理论计算值的 3.765 倍、BS 7608 理论计算值的 2.347 倍, 说明 Mn25Al7 钢的疲劳性能明显优于按照上述规范所设计的普通钢材。对接焊接接头的疲劳强度极限值为 221.82 MPa, 是 GB 50017 理论计算值的 2.303 倍、AISC 360 理论计算值的 4.209 倍、BS 7608 理论计算值的 3.539 倍。

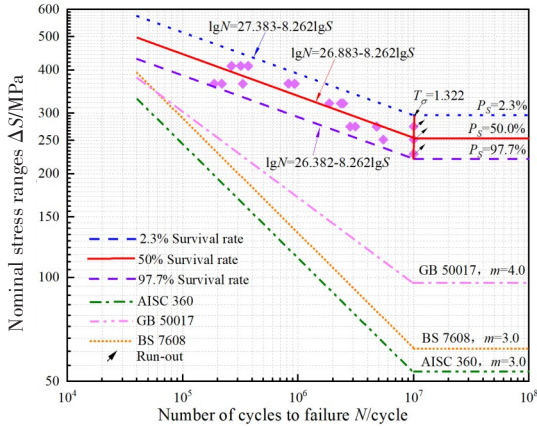


图6 对接焊缝接头名义应力评估结果

Fig.6 Results of nominal stress evaluation of butt-weld joints

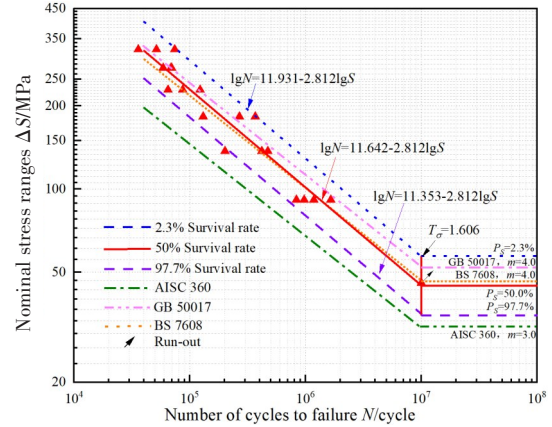


图7 T型焊缝接头名义应力评估结果

Fig.7 Results of nominal stress evaluation of T-weld joint

如图 5~6 所示, 三种规范与试验所得结果的斜率差距过大的原因有两点: 一是在 GB 50017 规范中, 对磨平焊趾试件的疲劳性能评估仅比未磨平焊趾试件的疲劳寿命增加 30%, 而 AISC 360 和 BS 7608 两规范并未考虑磨平焊趾对试件造成的影响, 说明这些规范明显低估了磨平焊趾后的 Mn25Al7 钢对接焊接试件的疲劳寿命; 二是未考虑试验的实际情况, 磨平焊趾只能将试件整体厚度磨平, 一些初始缺陷也会被处理, 从而提高了试件的疲劳寿命, 在文献[4]中也有类似情况。在 97.7% 存活率下, T 型焊接试件的疲劳强度极限值为 35.32 MPa, 与 AISC 360 疲劳强度极限值相比约低 10.81%, 有足够的安全储备, 而 GB 50017 和 BS 7608 均处于置信区间内, 说明规范可以较好地预测 Mn25Al7 钢 T 型焊接接头的疲劳寿命。

2.2 热点应力 S-N 曲线与现行规范对比

如图 8 所示, 焊接接头结构的热点指的是结构表面上容易发生应力集中的焊趾。焊头区域产生的所有应力都属于热点应力范畴, 局部焊缝产生的应力除外。IIW^[9] 仅定义了热点应力法的两个 FAT 类别, 即用于承载载荷的 FAT90 和非承载的 FAT100, 且其 S-N 曲线仅由其在 200 万次循环中的疲劳强度定义。这两个 FAT 类别明显低估了钢结构的疲劳评估。

热点应力定义为

$$\sigma_{hs} = 1.5\sigma_{0.5t} - 0.5\sigma_{1.5t} \quad (3)$$

式中, $\sigma_{0.5t}$ 为距焊趾 0.5 倍板厚处的计算应力, $\sigma_{1.5t}$ 为距焊趾 1.5 倍板厚处的计算应力。

根据试件的实际焊接变形对母材试件、对接焊缝试件和 T 型焊缝接头试件的有限元模型进行建模, 采用如图 9 所示的尺寸为 $t \times t$ 粗网格的 20 节点的 C3D20R 单元, 横向载荷以节点均布载荷的形式施加到加载位置, 主板左端固支约束, 右端施加均布荷载。考虑焊接变形对应力集中有较大影响, 实际的有限元模型应考虑焊接变形。采用计算焊接拐角处热点应力, 外插得到热点应力集中系数, 其中母材和磨平焊趾后的对接焊缝试件的热点应力与名义应力相同。

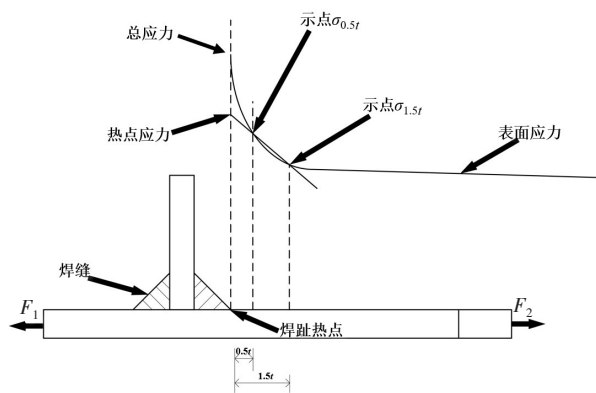


图8 结构热点应力的定义

Fig.8 Definition of structural hot-spot stress

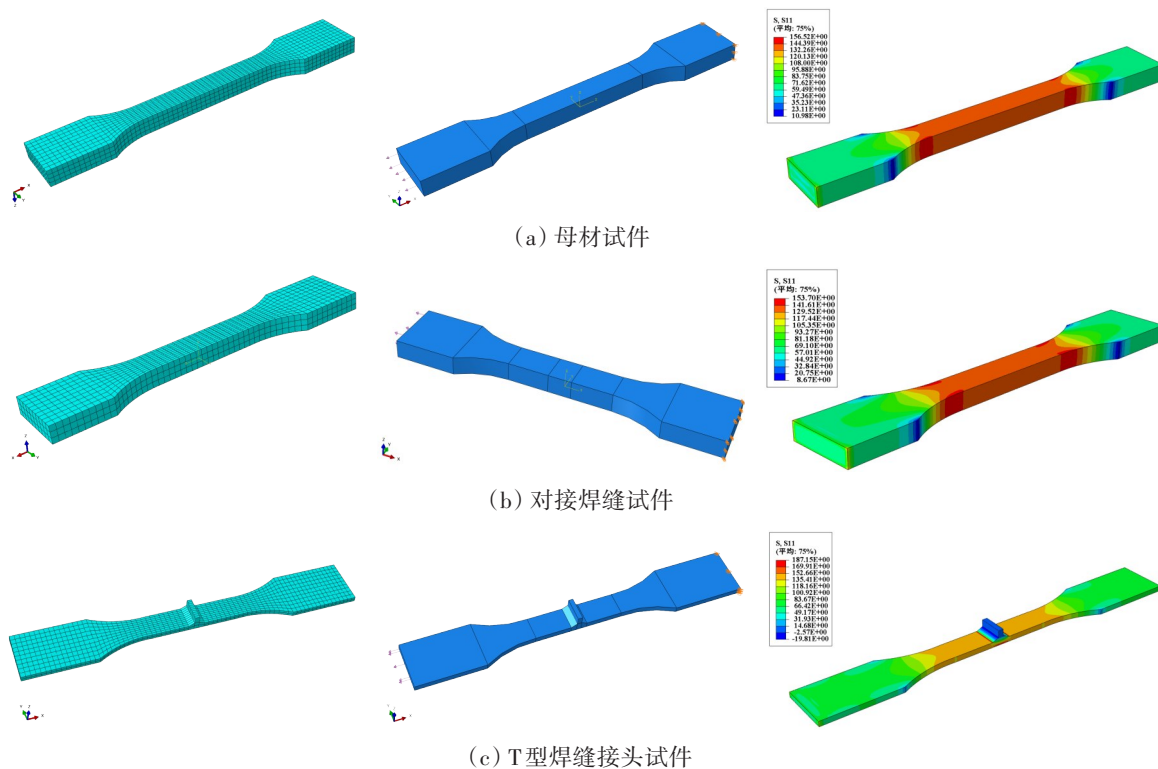


图9 有限元建模、边界条件及结果

Fig.9 FEM modeling, boundary conditions and results

如图10所示,在考虑焊接结构后的热点应力 $S-N$ 曲线中,50%存活率下的Mn25Al7钢的T型焊接接头的疲劳强度极限值为87.63 MPa,是对接焊接接头的疲劳强度极限值的33.516%;在97.7%存活率下的疲劳强度极限值为68.55 MPa,是对接焊接接头的疲劳强度极限值的30.904%。其中IIW规范中对应热点应力的FAT 100的疲劳强度极限值为58.50 MPa,与97.7%存活率下的T型焊接接头的疲劳强度极限值相比低14.661%,表明IIW规范能较好地评估Mn25Al7钢T型焊接接头的疲劳寿命,有足够的储备。

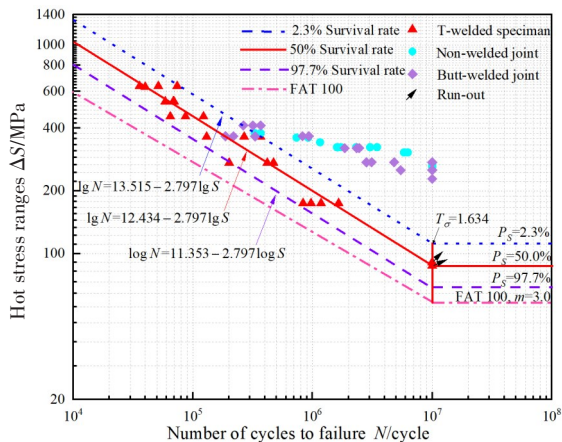


图10 基于有限元法的热点应力 $S-N$ 曲线

Fig.10 $S-N$ curve for hot spot stress method based on FEM

3 疲劳试验现象分析

3.1 疲劳损伤分析

在高周疲劳中,只产生微小的塑形变形。为了观察疲劳试验结果的准确率,令耗散势函数中塑形累积应变率为0,可得疲劳损伤 D 的周变化率^[18]为

$$\frac{\partial D}{\partial N} = \frac{2BR_c^0 (\bar{S}_{max}^{\beta+1} - \bar{S}_{min}^{\beta+1})}{(\beta + 1)(1 - D)} \tag{4}$$

将式(4)积分后,在边界条件 $N=0$ 时, $D_0=0$; $N=N_f$, $D=1$ 时,可得疲劳损伤量 D 的演化方程^[6]:

$$N_f = \frac{(\beta + 1)(S_{max}^{\beta+1} - S_{min}^{\beta+1})}{2B(\beta + 2)} \tag{5}$$

$$D = 1 - \left(1 - \frac{N}{N_f}\right)^{1/(\beta + 2)} \tag{6}$$

式中: B 为材料常数; S_{\max} 、 S_{\min} 分别为最大和最小应力; N_f 为疲劳寿命; N 为疲劳次数; D 为疲劳损伤量; β 值根据试验所得 $S-N$ 对数曲线公式可得, 如表 8 所示。

由图 11 可知, 随着疲劳次数的增加, 损伤曲线斜率不断增大, 损伤速率越来越快, 在接近 1 时瞬间增大, 说明试件由于损伤累积断裂, 剩余截面不足以应对外载荷产生的应力, 发生瞬时断裂。其中母材和对接焊缝接头试件的损伤速率趋势一致, 对接焊缝略高, 与试验所得疲劳寿命结果一致, 说明对接焊缝虽有初始缺陷, 但经过焊趾打磨后, 缺陷减少, 增加了疲劳强度。图中 T 型焊缝接头的损伤速率明显高于母材和对接焊缝接头, 这也与试验所得结果相符合。

3.2 疲劳断口形貌分析

为进一步分析疲劳损伤原因, 对试件断口进行形貌观测, 分析其断裂过程, 发现在裂纹萌生区中, 图 12(a) 所示的母材断口平坦、光滑; 图 12(b) 所示对接焊缝试件的焊缝处有明显的凹陷区域; 图 12(c) 所示 T 型焊缝试件焊缝处有裂纹向扩展区延展。疲劳裂纹扩展区中, 三种试件由于裂纹表面在扩展过程中反复张开与闭合磨损, 断面平坦呈撕裂状, 且伴有明暗相间的条纹。裂纹瞬断区的断面较粗糙, 有剪切唇, 与拉伸断口类似。

表 8 β 值

Tab.8 Values of β

	母材	对接焊缝接头	T 型焊缝接头
β	9.4319	7.2617	1.812

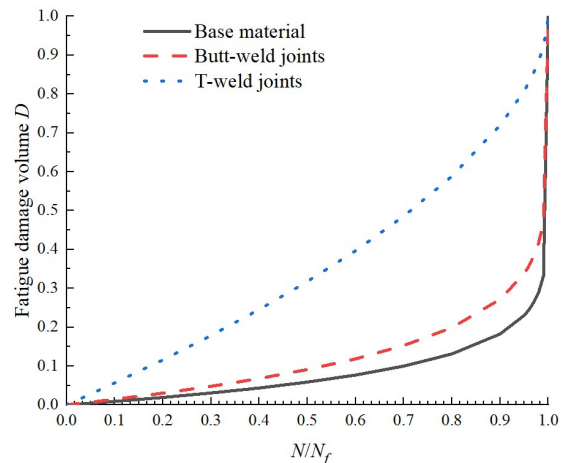
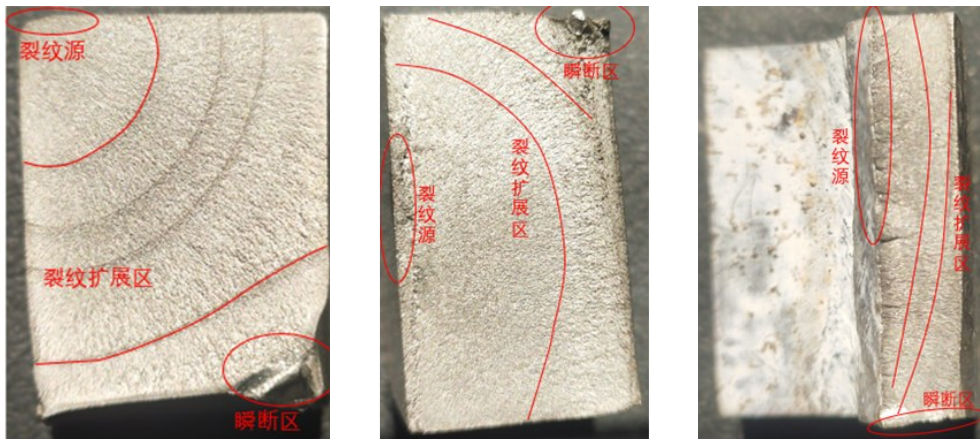


图 11 疲劳损伤曲线

Fig.11 Fatigue damage curves



(a) 母材断口

(b) 对接焊缝接头断口

(c) T 型接头断口

图 12 疲劳宏观断口

Fig.12 Fatigue fracture appearance

为进一步观察断口形貌, 观测导致三种试件疲劳强度不同的因素, 采用 JSM-IT300 扫描电子显微镜对断面进行扫描。图 13(a) 中, 母材的裂纹萌生区平坦且存在以裂纹源向外扩散的河流状条纹; 图 14(a) 中, 对接焊缝接头的裂纹源处有少许焊接缺陷; 图 15(a) 中, T 型焊缝试件存在明显的焊接凹陷区和焊接残留颗粒^[19]。图 13(b)、14(b) 和 15(b) 裂纹扩展区的特征为疲劳条纹和二次裂纹沿着晶体扩展^[20], 局部存在具有大量撕裂岭的断裂面, 疲劳条纹较短且条纹间距不断扩大, 垂直于裂纹扩展方

向^[21],整个疲劳裂纹扩展区呈现穿晶断裂的特点,断裂模式为准解理断裂^[22]。图13(c)瞬断区主要特征为韧窝和撕裂岭,且存在不规则的疲劳条纹带,说明母材在快速扩展过程中不易发生滑移;瞬断区的主要特征为韧窝和显微孔穴,图14(c)中对接焊缝接头的韧窝多且小,并含有少量解理面;图15(c)T型焊缝接头含有少量解理面和大量显微孔穴和少数韧窝。

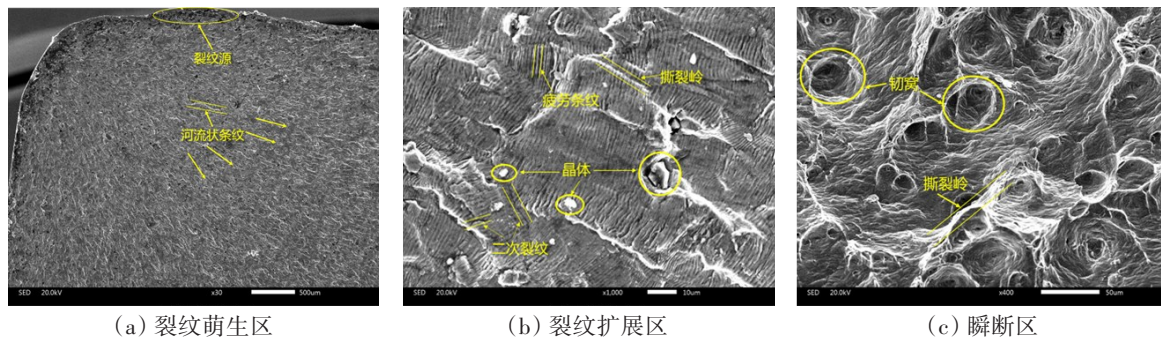


图13 母材微观断口

Fig.13 Electron microscope image of fracture of base metal

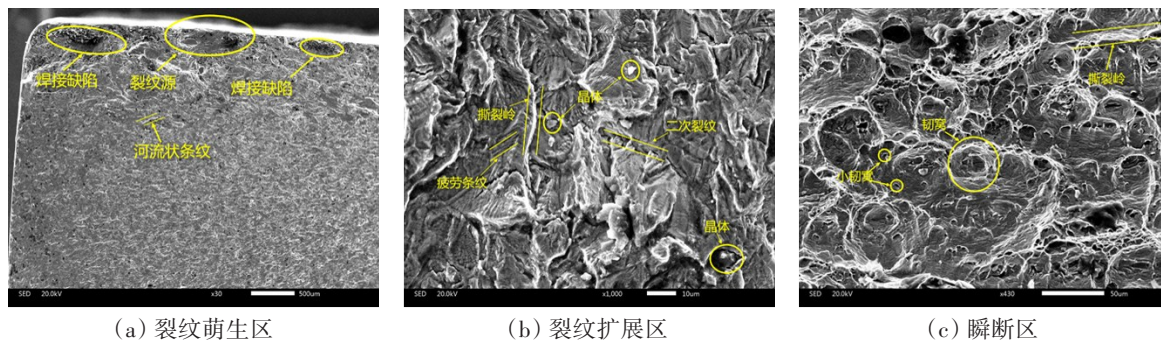


图14 对接焊接接头微观断口

Fig.14 Electron microscope image of fracture of butt-weld joint

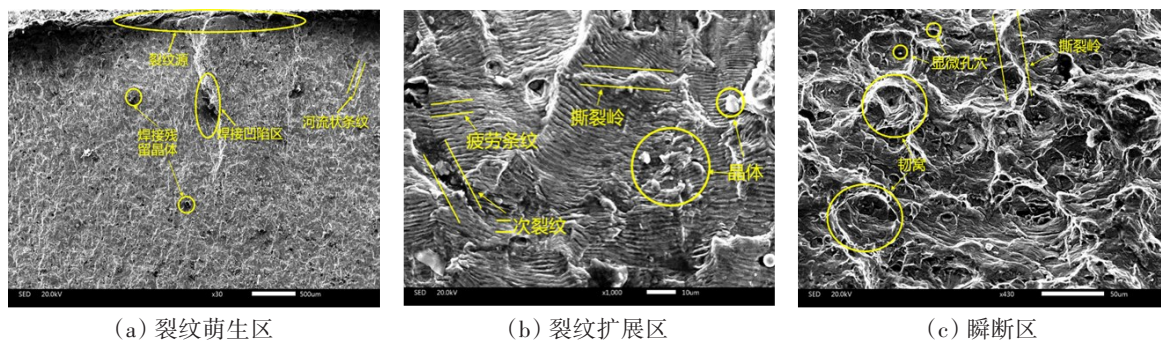


图15 T型焊接接头微观断口

Fig.15 Electron microscope image of fracture of T-weld joint

由上述现象说明,母材需要在循环载荷作用下产生裂纹源,焊缝试件含有初始裂纹源,故而母材断口较焊缝试件更为平坦。裂纹扩展区的穿晶断裂特征在焊缝试件中更为明显,这显然与焊接残留颗粒的影响、大量疲劳条纹的存在、材料的塑性较强有关。瞬断区中母材韧窝相比焊缝试件较大,是因为母材疲劳强度更高,韧窝由显微孔穴成形,而焊缝试件疲劳强度低于母材,断裂更快,显微孔穴只有少数成形的大韧窝,其余为小韧窝。T型焊缝试件的成形韧窝较对接焊缝试件更少,显微孔穴多于对接焊缝试件,符合试验中T型焊缝试件的疲劳强度低于对接焊缝试件的结果,与损伤曲线观察结果一致,说明成形韧窝越少,试件的疲劳强度越低,未成形韧窝呈现为小韧窝和显微孔穴。

4 结 论

本文对 Mn25Al7 钢母材、对接焊缝接头和 T 型焊缝接头三种试件的疲劳性能进行了试验研究,并基于名义应力法和热点应力法与相关规范进行了对比分析,进一步对试件断口进行了形貌分析,得到如下结论:

(1) 母材在 97.7% 存活率下的疲劳强度为 261.45 MPa,是 GB 50017 理论计算值的 2.717 倍、AISC 360 理论计算值的 3.765 倍、BS 7608 理论计算值的 2.347 倍,故 Mn25Al7 钢母材的疲劳性能明显优于上述规范中所设计的普通钢材。

(2) 磨平焊趾的对接焊接接头试件在 97.7% 存活率下的疲劳强度极限值为 221.82 MPa,远高于各规范的设计值,表明规范低估了磨平焊趾后的 Mn25Al7 钢对接焊接接头试件的疲劳性能。

(3) T 型焊接接头的 S-N 曲线与 GB 50017 和 BS 7608 更吻合,可以更准确地预测 T 型焊缝接头的疲劳性能,AISC 360 有更多的安全储备。

(4) 基于热点应力法的 S-N 曲线与 IIW 规范中的 FAT 100 设计曲线较吻合,能较好地评估 Mn25Al7 钢 T 型焊接接头的疲劳寿命,有足够的安全储备。

(5) 断口形貌分析与损伤曲线结果一致,焊接试件的初始裂纹源越多,疲劳强度越低。母材试件裂纹源始于循环载荷累积,对接焊接接头和 T 型焊接接头试件可观察到明显的初始裂纹源。

参 考 文 献:

- [1] Zhang Chuntao, Liu Yifeng, Huang Chunlin. Fatigue performance of Q345 structural steel after natural cooling from elevated temperatures[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 184: 106811.
- [2] Hariprasath P, Sivaraj P, Balasubramanian V, et al. SridharK. Effect of welding processes on high cycle fatigue behavior for naval grade HSLA joints: A fatigue strength prediction[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 142: 106783.
- [3] Sakai T, Nakagawa A, Oguma N, et al. A review on fatigue fracture modes of structural metallic materials in very high cycle regime[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 93(2): 339-351.
- [4] 施刚, 张建兴. 建筑结构钢材 Q390GJD 的焊缝连接疲劳性能试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2014, 40(03): 218-223.
Shi Gang, Zhang Jianxing. Experimental study on fatigue behavior of welded joints of structural steel Q390GJD[J]. Sichuan Architectural Science Research, 2014, 40(3): 218-223. (in Chinese)
- [5] Yang Liguo, Xing Yongming. Experimental study on high-cycle fatigue properties of Q420C steel at room temperature[J]. Materials Research-Ibero-American Journal of Materials, 2022, 25: 01-15.
- [6] 郭宏超, 王金怀, 刘云贺, 等. Q690D 高强钢焊缝连接疲劳性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(09): 1-9.
Guo Hongchao, Wan Jinhui, Liu Yunhe, et al. Experimental study on fatigue performance of Q690D high strength steel welded joints[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(09): 1-9. (in Chinese)
- [7] 刘德重, 冯琼, 张升才, 等. 船用 10Ni5CrMoV 高强钢的疲劳性能[J]. 材料科学与工程学报, 2014, 32(02): 227-233.
Liu Dezhong, Feng Qiong, Zhang Shengcai, et al. Fatigue performance of marine high strength steel 10Ni5CrMoV[J]. Journal of Materials Science Engineering, 2014, 32(02): 227-233. (in Chinese)
- [8] Niemi E. Structural stress approach to fatigue analysis of welded components[M]. Designer's Guide, 2018.
- [9] IIW. Recommendations for fatigue design of welded joints and components[S]. 2011
- [10] DNVGL-RP-C-203, Fatigue design of offshore steel structures[S]. 2019.
- [11] GB/T 2975-2018, 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备[S]. 2018.
GB/T 2975-2018, Steel and steel products—Location and preparation of samples and test pieces for mechanical testing[S]. 2018.
- [12] GB/T 13816-2009, 焊接接头脉动拉伸疲劳试验方法[S]. 2009.
GB/T 13816-2009, Test method for pulsed tensile fatigue of welded joints[S]. 2009.

- [13] GB/T 228.1-2021, 金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法[S]. 2021.
GB/T 228.1-2021, Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature[S]. 2021.
- [14] GB/T 3075-2021, 金属材料疲劳试验轴向力控制方法[S]. 2021.
Metallic materials-Fatigue testing-Axial force-controlled method[S]. 2021.
- [15] GB 50017-2017, 钢结构设计规范[S]. 2017.
GB 50017-2017, Code for design of steel structures[S]. 2017.
- [16] ANSI/AISC 360-16, Specification for structural steel buildings[S]. 2016.
- [17] BS 7608: 2014, Guide to fatigue design and assessment of steel products[S]. British Standards Institution, 2014.
- [18] 楼志文. 损伤力学基础[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.
Lou Zhiwen. Damage mechanics foundation[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1991.
- [19] Elangeswaran C, Cutolo A, Muralidharan G K, et al. Effect of post-treatments on the fatigue behaviour of 316L stainless steel manufactured by laser powder bed fusion[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 123: 31-39.
- [20] Briffod F, Bleuset A, Shiraiwa T, Enoki M. Effect of crystallographic orientation and geometrical compatibility on fatigue crack initiation and propagation in rolled Ti-6Al-4V alloy[J]. Acta Materialia, 2019, 177: 56-67.
- [21] Suzuki K, Koyama M, Hamada S, et al. Planar slip-driven fatigue crack initiation and propagation in an equiatomic CrMnFeCo-Ni high-entropy alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 133: 105418.
- [22] 翟战江, 赵琳, 彭云, 等. DP980钢及DP980钢激光焊接接头的高周疲劳性能[J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(07): 679-686.
Zhai Zhanjiang, Zhao Lin, Peng Yun, et al. High cycle fatigue behavior of DP980 steel and DP980 steel laser welded joints [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2022, 34(07): 679-686. (in Chinese)