

钢铁成形

Q355 钢板对接接头裂纹扩展所致焊接 残余应力重分布研究

古松¹, 林晓宇¹, 顾颖^{1*}, 赵亚杰², 孔超¹, 任松波¹

(1. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010;

2. 四川省交通勘察设计研究院, 成都 620017)

摘要: 目的 定量研究裂纹扩展导致的焊接残余应力重分布效应, 得到残余应力随裂纹扩展的变化规律。

方法 首先采用盲孔法测试了 Q355 钢板对接接头的初始残余应力; 其次利用线切割技术模拟了平行以及垂直于焊缝的裂纹扩展情况, 并测试了裂纹扩展导致的残余应力变化量; 最后根据测试数据提出了残余应力释放量 $\Delta\sigma$ 与裂纹长度 a 之间的函数关系式, 进一步得到了基于裂纹扩展的应力重分布计算公式。**结果** Q355 钢板对接焊的焊缝区纵向 (沿焊缝方向) 存在较大的残余拉应力, 拉应力峰值出现在焊趾处, 为屈服强度的 1.13 倍。焊缝区横向存在梯度较大、拉压交替变化的残余应力, 压应力峰值出现在焊趾处, 大小为 52.6 MPa, 拉应力峰值出现在距焊缝中心线 17 mm 处, 大小为 63.5 MPa。裂纹扩展能显著释放残余拉应力: 裂纹沿焊缝中心扩展, 横向残余拉应力峰值降低了 45.8%; 裂纹沿垂直于焊缝方向扩展, 焊趾处的拉应力峰值降低了 63.3%。**结论** 裂纹扩展会显著影响焊接构件的残余应力分布, 根据实测数据提出的裂纹扩展应力重分布计算公式能够较好地反映残余应力重分布情况。

关键词: 焊接残余应力; 裂纹扩展; 应力释放; 应力重分布; 试验测试

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.010.018

中图分类号: TG405; U441.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2023)010-0152-08

Redistribution of Welding Residual Stress Caused by Crack Propagation in Butt Joint of Q355 Steel Plate

GU Song¹, LIN Xiao-yu¹, GU Ying^{1*}, ZHAO Ya-jie², KONG Chao¹, REN Song-bo¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Sichuan Mianyang 621010, China; 2. Sichuan Communication Surveying Design Institute Co., Ltd., Chengdu 620017, China)

ABSTRACT: The work aims to quantitatively study the redistribution effect of welding residual stress caused by crack propagation, and obtain the variation law of residual stress with crack propagation. First, the initial residual stress of the Q355 steel plate butt joint was tested through the blind hole method. Then, the crack propagation parallel and perpendicular to the weld seam was simulated with the wire-cutting technology, and the changes in residual stress caused by crack propagation were measured. Finally, based on the test data, a functional relationship between the residual stress release amount $\Delta\sigma$ and the crack

收稿日期: 2023-04-26

Received: 2023-04-26

基金项目: 国家自然科学基金 (51708467, 52108385)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (51708467, 52108385)

引文格式: 古松, 林晓宇, 顾颖, 等. Q355 钢板对接接头裂纹扩展所致焊接残余应力重分布研究[J]. 精密成形工程, 2023, 15(10): 152-159.

GU Song, LIN Xiao-yu, GU Ying, et al. Redistribution of Welding Residual Stress Caused by Crack Propagation in Butt Joint of Q355 Steel Plate[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(10): 152-159.

length a was proposed, and further, a calculation formula for stress redistribution with crack propagation was derived. The results showed that: in the weld zone of the Q355 steel plate butt joint, there was a significant longitudinal residual tensile stress (along the direction of the weld seam), with the peak tensile stress occurring at the weld toe, reaching up to 1.13 times the yield strength. There was also a large gradient and alternating tensile-compressive residual stress in the transverse direction of the weld zone. The peak compressive stress appeared at the weld toe, measuring 52.6 MPa, while the peak tensile stress occurred at a distance of 17 mm from the center line of the weld seam, measuring 63.5 MPa. Crack propagation resulted in a significant release of residual tensile stress. When the crack propagated along the center line of the weld seam, the peak transverse residual tensile stress decreased by 45.8%. When the crack propagated perpendicular to the weld seam, the peak tensile stress at the weld toe decreased by 63.3%. To sum up, the propagation of cracks significantly affects the residual stress distribution in welded components. The crack propagation stress redistribution calculation formula proposed based on the measured data can effectively reflect the redistribution of residual stress.

KEY WORDS: residual welding stress; crack propagation; stress release; stress redistribution; experimental test

焊接是桥梁、铁路和船舶等结构中最主要的连接方式,但焊接后的构件会产生残余应力,其峰值会达到屈服强度,这极大影响了焊接构件的疲劳寿命^[1-6]。在循环荷载作用下,焊接接头易萌生裂纹,继而不断扩展。裂纹扩展会使邻近区域的残余应力释放,导致整个残余应力发生重分布。相关研究表明^[7-10],焊接残余应力的重分布会影响裂纹扩展速率,它与裂纹扩展长度、裂纹尖端应力场的变化情况有关。因此,开展基于裂纹扩展的焊接残余应力重分布研究对建立残余应力重分布模型与评估裂纹扩展寿命具有重要意义。

陈文汨等^[11]采用盲孔法实测了里海型拘束焊接试板的残余应力,发现近焊缝区存在高残余拉应力。杨俊芬等^[12]研究表明,Q690 焊接高强钢管焊缝区的纵向残余拉应力峰值达到了钢材的屈服强度。Fisher^[13]进行了大尺寸焊接构件的疲劳试验,研究发现,焊接残余拉应力是导致构件疲劳强度降低的主要因素。瞿伟廉等^[14]通过理论计算对比发现,裂纹扩展导致的残余拉应力重分布会减缓裂纹的扩展速率。为进一步探究裂纹扩展对焊接残余应力重分布的影响,Liljedahl 等^[15]采用中子衍射法测量了 2024-T3 铝合金板对接焊垂直裂纹扩展对试件纵向残余应力重分布的影响。李良碧等^[16]通过数值模拟的方式,分析了 Q345 钢板对接焊中心裂纹扩展时残余应力的重分布情况。王强等^[17-18]实测了 10Ni5CrMoV 高强钢板对接焊垂直裂纹扩展时的残余应力重分布情况。

上述研究^[13-18]均采用数值模拟或试验测试的方式,对裂纹扩展所致残余应力的重分布情况进行了分

析,但仍存在一些不足:一方面,现有研究多集中在与焊缝垂直的裂纹扩展导致的应力重分布研究,有关平行于焊缝的裂纹研究相对较少,而现实中,裂纹沿焊缝方向扩展,尤其是沿焊趾或焊根方向扩展的现象更为普遍;另一方面,鲜有基于实测数据研究裂纹扩展导致的构件应力重分布效应。

针对上述问题,本文以 Q355 钢板对接焊为例,首先采用盲孔法实测了焊接试件的初始焊接残余应力,其次采用线切割技术预制裂纹并模拟其扩展过程,分别模拟了平行于焊缝的中心裂纹与垂直于焊缝的垂直裂纹的扩展情况,得到了在 2 种典型裂纹扩展过程中试件残余应力的释放量。最后分析了由裂纹扩展引起的残余应力重分布情况,提出了残余应力释放量 $\Delta\sigma$ 与裂纹长度 a 的函数关系式,进一步得到了随裂纹扩展的重分布应力公式。

1 试件设计

本试验共制作了 3 个试件,分别编号为 P1、P2、P3,其焊接工艺参数如表 1 所示,试件由 2 块尺寸为 800 mm×200 mm×8 mm 的 Q355 钢板焊接而成,如图 1 所示。3 个试件均借助焊接机器人进行焊接,从而确保 3 个试件焊接残余应力的大小与分布情况相同。焊接时,母材开 25°的 V 形坡口,采用焊接质量较好且速度较快的 CO₂ 气体保护焊将 2 块钢板对接在一起。为防止自动焊时发生烧穿现象,焊接分 2 次完成,即先在陶瓷衬垫上对接头坡口进行一道打底焊,完成后再进行盖面焊。

表 1 焊接工艺参数
Tab.1 Welding process parameters

No.	Bottom welding current/A	Bottom welding voltage/V	Cover welding current/A	Cover welding voltage/V	Lateral swing speed of welding torch /(mm·s ⁻¹)	Longitudinal swing speed of welding torch /(mm·s ⁻¹)
P1	140-155	21.5	200-205	29.3	3	4
P2	154-169	21.3	231-252	28.8		
P3	144-157	20.8	204-214	29.8		

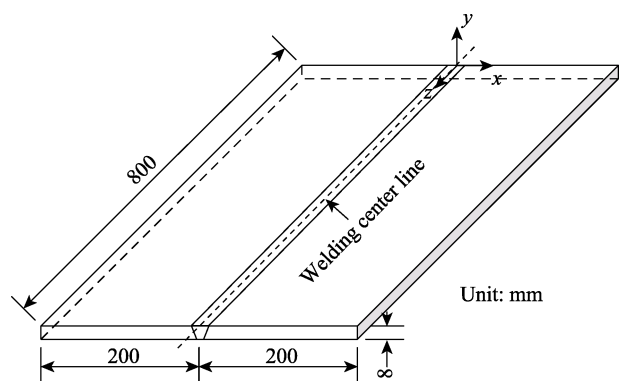


图1 试件示意图
Fig.1 Specimen diagram

2 焊接残余应力测试

本研究采用盲孔法,依据 GB/T 31310—2014《金属材料 残余应力测定 钻孔应变法》测试焊件的初始残余应力。盲孔法的原理如下:在构件表面钻一小孔(直径为 0.8~4.8 mm),然后测量钻孔所释放的应变进而推算残余应力。按照图 2 所示的测试应变布置方式设置应变花,其中 1[#]~3[#]敏感栅测试的应变分别为 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 ,根据线弹性理论,测试的残余应力 σ_i ($i=1, 2$) 及应力方向角 θ 的计算分别如式(1)和式(2)所示。

$$\sigma_i = \frac{1}{4A}(\varepsilon_1 + \varepsilon_3) \mp \frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_3 - 2\varepsilon_2)^2} \quad (1)$$

$$\theta = \arctan \left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \right) \quad (2)$$

式中: A 、 B 为求解应力的关键性参数,根据国标,可由数值模拟或试验标定的方式确定。本研究测试试件为 P1,钻孔的孔径 $2a=1.5$ mm,孔深 $h=2$ mm。

钻孔会导致应力集中,高应力状态会导致孔边产生塑性变形从而影响测试精度。本研究依据 GB/T

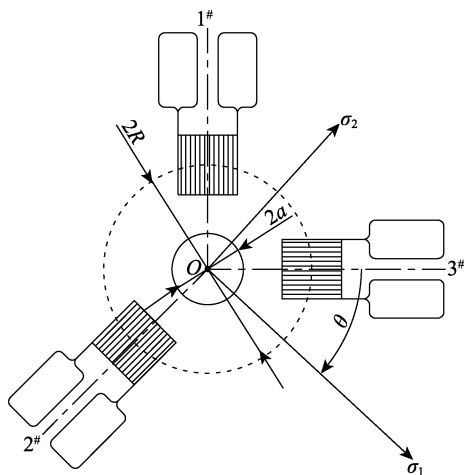


图2 残余应力测试应变布置示意图
Fig.2 Diagram for strain layout of residual stress test

31310—2014,通过数值模拟对不同应力水平下的 A 、 B 系数进行标定^[19],以降低塑性应变对测试精度的影响。

有研究表明^[19],焊接残余应力在焊缝的起弧与熄弧段较小,在焊缝中间段达到最大值且应力变化趋于稳定,近焊缝区的残余拉应力峰值可能超过钢材的屈服强度,随着与焊缝距离的增大,拉应力迅速衰减。根据焊接残余应力分布特征,试验选取焊缝中间段 200 mm 范围内作为残余应力测试区域,在测试区内测量纵向(z 方向)与横向(x 方向)的焊接残余应力。

在进行盲孔法多点测量时,孔与孔的间距需大于 15 倍孔径^[20],为方便应变片粘贴与接线操作,取测点间距为 30 mm。但单条测点间距 30 mm 的路径无法准确反映残余应力的分布情况,根据焊缝中间段应力均匀化的特征,在试件 P1 中间段 200 mm 范围内设置 L1~L8 共 8 条路径对测点进行加密,各路径测点位置如图 3 所示。由于无法在焊缝上粘贴应变片,因此粘贴在距焊缝最近的焊趾处,测得最近测点距离焊缝中心 12 mm。

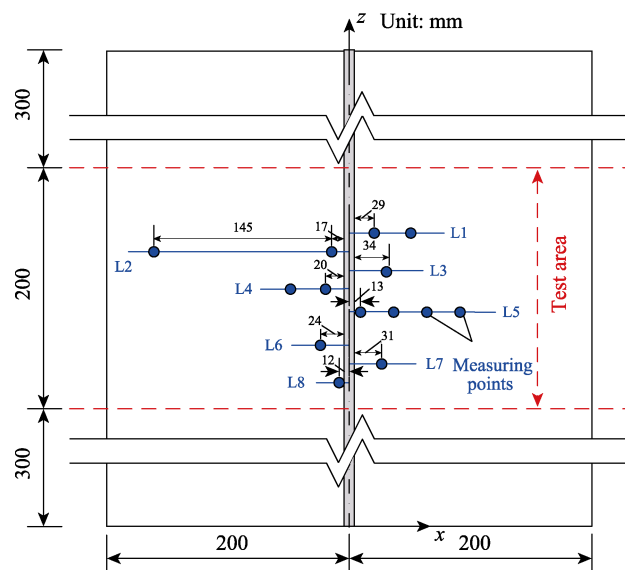


图3 测点布置图
Fig.3 Layout of measurement points

基于热弹塑性有限元法,采用 ANSYS 软件,进行了试件初始焊接残余应力数值模拟。有限元模型坐标系原点位于起弧点, z 方向为焊接热源前进方向。焊接温度场模拟采用 Solid70 热分析单元,选用双椭球热源模型模拟焊接热源,并采用“生死单元”模拟焊接熔敷金属的填充过程,温度场边界条件包括环境温度、辐射传热与试件表面对流换热^[7]。基于温度场分析结果,采用“热-力耦合”分析将 Solid70 热分析单元转换为 Solid185 力学分析单元,将温度场分析结果作为荷载施加于有限元模型,边界条件定义如图 4 所示,计算得到了试件残余应力大小与分布情况。

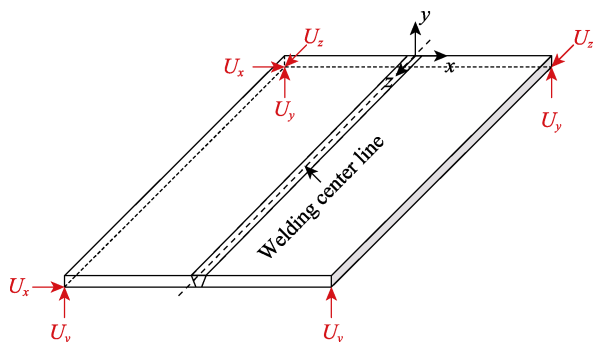


图 4 力学分析边界条件

Fig.4 Boundary conditions of mechanical analysis

模拟结果与实测结果如图 5 所示。可以看出, 实测结果与模拟结果较为吻合。测试数据显示, 在距焊缝中心 29 mm 范围内, 纵向残余应力以拉应力为主, 拉应力峰值为 401.1 MPa, 出现在焊趾处, 超出了 Q355 钢材的屈服强度。在距中心线约 30 mm 处, 纵向残余应力转变为压应力, 并在 43 mm 处达到压应力峰值 66.8 MPa, 这一结果与文献[21-23]中实测纵向残余应力分布结果基本相似。横向残余应力在焊缝区的应力梯度较大, 实测压应力峰值为 52.6 MPa, 仍出现在焊趾处, 随后转变为 46.7 MPa 的拉应力, 并在距焊缝中心 17 mm 处达到拉应力峰值 63.5 MPa。对比 Perić 等^[22]和 Banik 等^[23]研究中横向残余应力的测试结果可知, 由于采用的焊接工艺、钢板尺寸、测点

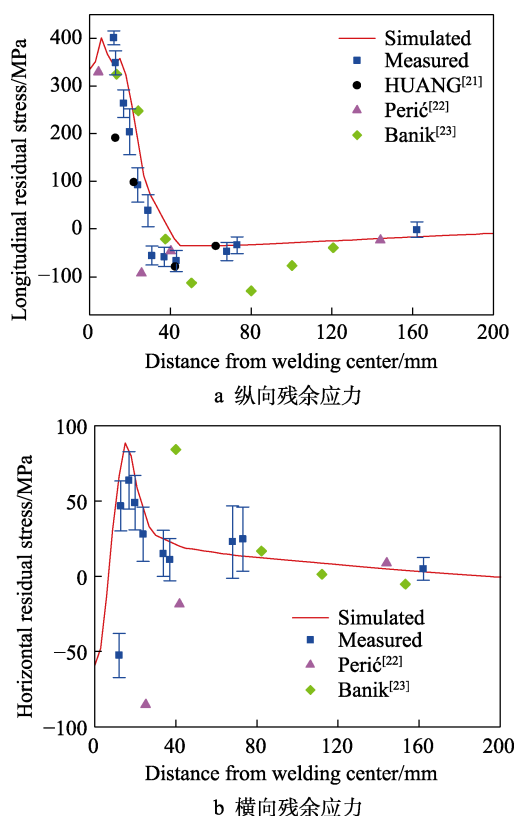


图 5 试件初始残余应力分布图

Fig.5 Initial residual stress distribution of specimen:
a) longitudinal residual stress; b) horizontal residual stress

数量均有不同, 横向残余应力峰值大小与出现位置相差较大, 但变化趋势基本相同, 即靠近焊缝区域存在较大压应力, 随后迅速转变为拉应力, 再缓慢减小至 0 MPa。

3 裂纹扩展释放应力测试

受初始缺陷的影响, 焊接结构在循环荷载作用下易萌生和扩展疲劳裂纹。裂纹扩展会释放材料内应力, 导致焊接残余应力重分布。本试验利用线切割技术沿设定路径切割细缝, 以模拟疲劳裂纹的萌生与扩展 (图 6)。试验模拟了典型的中心裂纹与垂直裂纹。其中中心裂纹长度为 100 mm, 采用试件 P2 模拟, 切割时测量垂直于焊缝路径 Path 1 上的横向残余应力变化量 $\Delta\sigma_x$, 如图 7a 所示; 垂直裂纹长度为 48 mm, 采用试件 P3 模拟, 切割时测量垂直于焊缝路径 Path 2 上的纵向残余应力变化量 $\Delta\sigma_z$, 如图 7b 所示。采用小型联排应变片测量应力变化量, 应变栅尺寸为 1 mm×1.5 mm, 4 个一排, 间距为 5 mm。距焊缝最近的测点位于焊趾处, 距离焊缝中心线 12.5 mm。



图 6 裂纹扩展试验

Fig.6 Crack propagation test

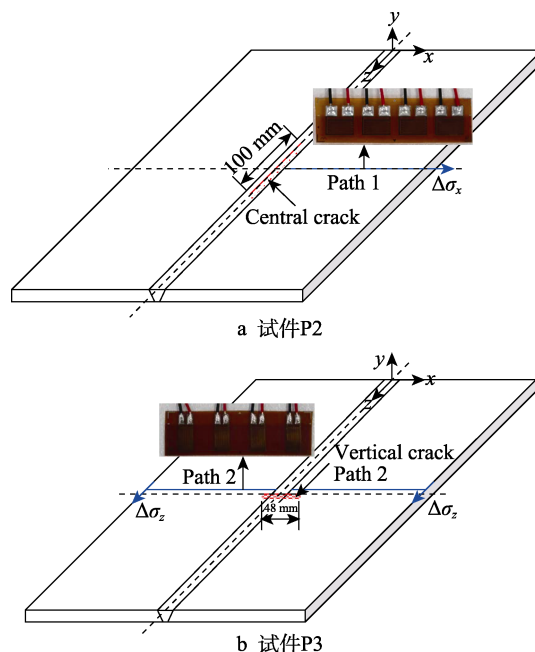


图 7 裂纹与测试路径示意图

Fig.7 Crack and test path diagram: a) P2 specimen;
b) P3 specimen

3.1 中心裂纹

中心裂纹每扩展 10 mm 记录一次应力变化。中心裂纹扩展时, P2 试件 Path 1 路径上的横向应力变化量 $\Delta\sigma_x$ 如图 8 所示。可以看出, 在裂纹扩展初期(裂纹长度 $a \leq 30$ mm), 由于裂纹距离测点较远, 裂纹扩展所释放的应力 $\Delta\sigma_x$ 较小。当裂纹扩展至 40 mm 时, 焊趾处 $\Delta\sigma_x$ 出现明显增长。当裂纹扩展至 50 mm 时, 焊趾处释放应力为 20.5 MPa, 此时裂纹尖端刚好达到路径 Path 1 的延长线上。当裂纹扩展至 60 mm 时, 焊趾处释放应力为 26.9 MPa, 此后随裂纹的扩展, 焊趾处应力释放速率不断减小。当裂纹扩展至 100 mm 时, 焊趾处释放的应力达到峰值 34.3 MPa。而在距焊缝 50 mm 以外区域, $\Delta\sigma_x$ 很小, 基本维持在 ± 5.0 MPa 以内。

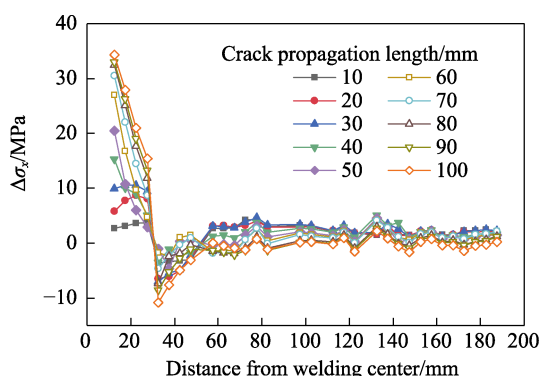


图 8 P2 试件应力变化
Fig.8 Stress variation of P2 specimen

3.2 垂直裂纹

垂直裂纹由焊缝中心线向两侧扩展。垂直裂纹扩展时, P3 试件路径 Path 2 上的纵向应力变化量 $\Delta\sigma_z$ 如图 9 所示。可以看出, 一旦垂直焊缝的裂纹开始扩展, 焊趾处 ($x=12.5$ mm) 就有明显的应力释放。当裂纹扩展至 8 mm 时, 虽然裂纹仍在焊缝内, 但两侧钢板焊趾处释放的应力达到约 50 MPa。当裂纹扩展至 16 mm 时, 焊趾处 $\Delta\sigma_z$ 达到 89.0 MPa, 而后随着

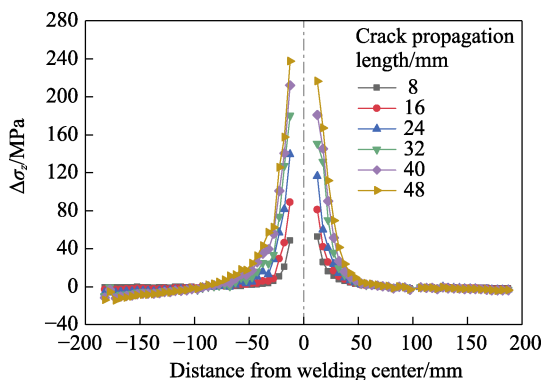


图 9 P3 试件应力变化
Fig.9 Stress variation of P3 specimen

裂纹的扩展, 应力释放速率不断减小。当裂纹扩展至 25 mm 时, 裂纹尖端恰好位于焊趾处, 随后继续扩展直至 48 mm 时停止。停止时, 两侧钢板释放的残余应力达到峰值 237.5 MPa 和 216.1 MPa。从整体变化趋势看, 焊缝两侧的应力变化基本对称。距焊缝中心 40 mm 范围内的应力释放显著, 40 mm 外的应力变化幅度较小, 有微小的压应力产生。

4 结果与分析

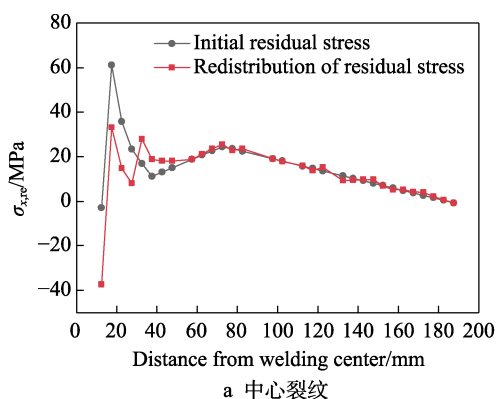
4.1 焊接残余应力重分布

由于裂纹的扩展, 存在于材料内部的焊接残余应力将发生重分布。当前, 已经采用盲孔法测得了裂纹扩展前的焊接残余应力 σ_{ini} , 也通过应变片测得了裂纹扩展所释放的应力 $\Delta\sigma$, σ_{ini} 与 $\Delta\sigma$ 间的差值就是裂纹扩展后的重分布应力 σ_{re} , 如式 (3) 所示

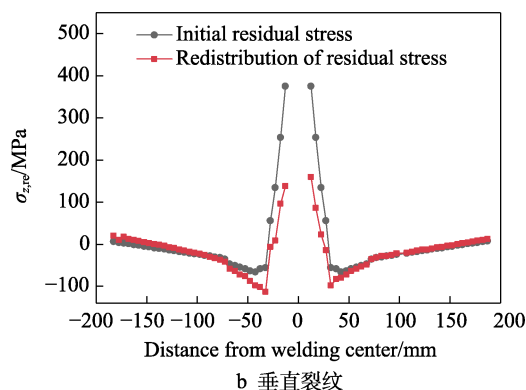
$$\sigma_{re} = \sigma_{ini} - \Delta\sigma \quad (3)$$

2 种裂纹完全扩展后, 焊接残余应力的重分布情况如图 10 所示。从图 10a 可以看出, 裂纹沿焊缝中心扩展使焊趾处的横向残余压应力增大, 达到 37.3 MPa, 相应地, 距焊缝中心线 18 mm 处的拉应力峰值降低了 45.8%。

裂纹沿垂直于焊缝的方向扩展会极大地释放纵向残余应力, 尤其在近缝区约 25 mm 范围内, 该区



a 中心裂纹



b 垂直裂纹

图 10 残余应力重分布

Fig.10 Residual stress redistribution: a) central crack; b) vertical crack

域的应力会随着裂纹的扩展而显著减小。然而, 释放后的残余应力仍处于较高水平, 拉应力峰值仍有 158.8 MPa, 接近屈服强度的 45%。在距焊缝中心 32.5 mm 处, 纵向残余压应力在起裂前小于 50 MPa, 在裂纹扩展后, 焊缝两侧压应力分别增大到 113.4 MPa 和 97.6 MPa。

4.2 随裂纹扩展的重分布应力公式

试验结果表明, 裂纹沿垂直于焊缝的方向扩展会显著释放纵向残余应力, 应力释放量表现出较强的规律性, 可通过式 (4) 所定义的函数关系来表示, 残余应力释放量与裂纹长度关系曲线如图 11 所示。可以看出, 该函数与测试结果匹配较好, 符合残余应力释放规律。

$$\Delta\sigma_z(x) = \sigma_0 \cdot f(\lambda) e^{g(\lambda) \cdot (x/L)^2} \quad (4)$$

式中: $\Delta\sigma_z(x)$ 为纵向残余应力变化值; σ_0 为焊缝中心线处的最大残余应力; x 为距焊缝中心线距离; L 为裂纹所在一侧钢板平行于裂纹方向的长度; $\lambda = a/a_{\max}$, 其中 a 为裂纹长度, $a_{\max}$ 为裂纹扩展的最大长度; $f(\lambda)$ 与 $g(\lambda)$ 为采用多项式分布拟合的函数 (相关系数 R^2 分别为 0.998 5 与 0.943 6), 如式 (5) 所示。

$$\begin{cases} f(\lambda) = 0.5155\lambda + 0.0476 \\ g(\lambda) = -228\lambda^3 + 412.3\lambda^2 - 174\lambda - 80.18 \end{cases} \quad (5)$$

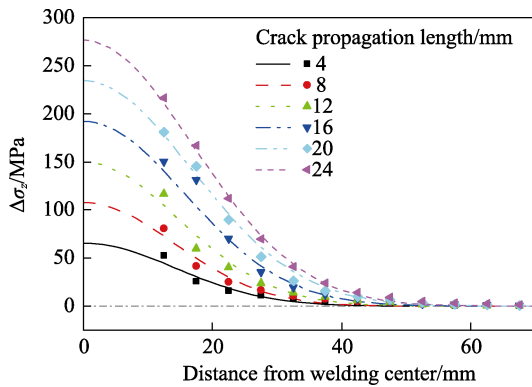


图 11 残余应力释放量与裂纹长度关系曲线
Fig.11 Relationship curve between residual stress release and crack length

结合 Tada 等^[24]和 Terada^[25]给出的残余应力分布函数与式 (3), 可以得到残余应力 $\sigma_{z, re}$ 随垂直裂纹扩展长度 a 的应力重分布计算公式, 如式 (6) 所示。

$$\sigma_{z, re} = \frac{\sigma_0(1-\xi^2)}{1+\xi^4} - \sigma_0 \cdot f(\lambda) e^{g(\lambda) \cdot (x/L)^2} \quad (6)$$

式中: $\sigma_{z, re}$ 为纵向重分布应力; $\xi = x/c$, 其中 c 为特征长度, 定义为从焊缝中心线到初始残余应力由拉转变为压处的距离。

不同裂纹扩展长度的重分布应力实测值与式 (6) 计算值的对比结果如图 12 所示。可以看出, 在距焊缝中心 40 mm 范围内, 式 (6) 计算的重分布应力与

实测值基本吻合, 距焊缝中心 40 mm 处的残余应力分布受裂纹扩展影响较小, 重分布应力无明显变化, 式 (6) 的计算结果也能体现出这一规律, 因此该计算公式能够较好地反映试验情况。

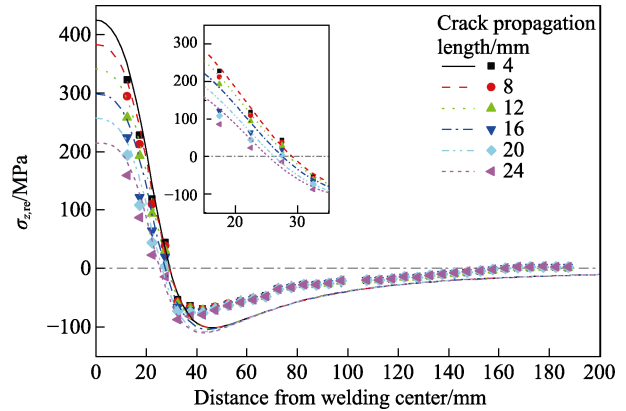


图 12 应力重分布实测值与计算值
Fig.12 Measured and calculated stress redistribution

5 结论

进行了裂纹扩展所致焊接残余应力重分布的试验研究, 得出如下结论:

1) Q355 钢板对接焊在焊缝区存在较大的纵向残余拉应力, 拉应力峰值高达 1.13 倍屈服强度, 且出现在焊趾处。横向残余应力在焊缝区的应力梯度较大, 呈拉压交替变化, 压应力峰值为 52.6 MPa, 出现在焊趾处, 拉应力峰值为 63.5 MPa, 出现在距焊缝中心 17 mm 处。

2) 裂纹沿焊缝中心扩展使横向残余拉应力峰值由 61.1 MPa 降低至 33.1 MPa。

3) 裂纹沿垂直于焊缝方向扩展, 在焊趾处释放了大量的纵向残余应力, 但释放后的残余应力仍较大, 拉应力峰值仍有 158.8 MPa, 接近屈服强度的 45%。

4) 根据实测数据提出了残余应力释放量 $\Delta\sigma$ 与裂纹长度 a 的函数关系式, 进一步得到了随裂纹扩展的重分布应力公式, 该计算公式能够较好地反映残余应力的重分布情况, 可以用于精确预测裂纹扩展寿命。

参考文献:

- [1] 陈勇, 徐育焱, 杨海波, 等. 304 不锈钢薄壁管件纵缝焊接接头残余应力数值模拟研究[J]. 精密成形工程, 2023, 15(3): 155-163.
- CHEN Yong, XU Yu-lang, YANG Hai-bo, et al. Numerical Simulation of Residual Stress in Longitudinal Welded Joint of 304 Stainless Steel Thin-walled Pipes[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(3): 155-163.

- [2] CHANG P H, TENG T L. Numerical and Experimental Investigations on The Residual Stresses of The Butt-Welded Joints[J]. Computational Materials Science, 2004, 29(4): 511-522.
- [3] GUO W, FRANCIS J A, LI L, et al. Residual Stress Distributions in Laser and Gas-Metal-Arc Welded High-Strength Steel Plates[J]. Materials Science and Technology, 2016, 32(14): 1449-1461.
- [4] FUKUDA S. Analysis of Crack Propagation in Residual Stress Field Using Computer Algebra[J]. Nuclear Engineering and Design, 1989, 111(1): 21-25.
- [5] 张红卫, 桂良进, 范子杰. 焊接残余应力对桥壳疲劳寿命的影响研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(24): 102-110.
- ZHANG Hong-wei, GUI Liang-jin, FAN Zi-jie. Fatigue Life Prediction and Experiment of an Axle Housing Considering Welding Residual Stresses[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(24): 102-110.
- [6] PERIĆ M, TONKOVIĆ Z, RODIĆ A, et al. Numerical Analysis and Experimental Investigation of Welding Residual Stresses and Distortions in a T-Joint Fillet Weld[J]. Materials & Design, 2014, 53: 1052-1063.
- [7] 顾颖, 冯倩, 任松波, 等. 焊接残余应力对对接接头疲劳裂纹扩展的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(10): 2752-2760.
- GU Ying, FENG Qian, REN Song-bo, et al. Effects of Welding Residual Stresses on Fatigue Crack Growth Behavior of Butt Joint[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(10): 2752-2760.
- [8] 朱林, 贾民平, 冯月贵, 等. 考虑残余应力重分布情况下的裂纹扩展预测研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(8): 43-49.
- ZHU Lin, JIA Min-ping, FENG Yue-gui, et al. Prediction Study of the Crack Propagation with Consideration of the Residual Stress Redistribution[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(8): 43-49.
- [9] SUTTON M A, REYNOLDS A P, GE Y Z, et al. Limited Weld Residual Stress Measurements in Fatigue Crack Propagation Part II Fem-Based Fatigue Crack Propagation with Complete Residual Stress Fields[J]. Fatigue Fracture of Engineering Materials Structures, 2006, 29(7): 537-545.
- [10] 吴圣川, 李存海, 张文, 等. 金属材料疲劳裂纹扩展机制及模型的研究进展[J]. 固体力学学报, 2019, 40(6): 489-538.
- WU Sheng-chuan, LI Cun-hai, ZHANG Wen, et al. Recent Research Progress on Mechanisms and Models of Fatigue Crack Growth for Metallic Materials[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2019, 40(6): 489-538.
- [11] 陈文汨, 张利, 金立业, 等. 焊接残余应力的分布和焊后热处理的应力松弛作用[J]. 金属热处理, 2002(2): 30-32.
- CHEN Wen-mi, ZHANG Li, JIN Li-ye, et al. Distributions of Residual Welding Stress and Effect of Post-Weld Heat Treatment on Its Relaxation[J]. Heat Treatment of Metals, 2002(2): 30-32.
- [12] 杨俊芬, 李渊, 彭奕亮. Q690 高强度钢管焊接残余应力数值模拟[J]. 工程力学, 2014, 31(10): 108-115.
- YANG Jun-fen, LI Yuan, PENG Yi-liang. Numerical Analysis on Welding Residual Stress in Q690 High-Strength Steel Pipe[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(10): 108-115.
- [13] FISHER J W. Improved Performance Through Large Scale Dynamic Testing of Structures[C]// IIW International Conference on Performance of Dynamically Loaded Welded Structures, 1997: 1-21.
- [14] 瞿伟廉, 何杰, 陈波. 对接焊缝残余应力对疲劳裂纹扩展的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(2): 116-119.
- QU Wei-lian, HE Jie, CHEN Bo. Influences of Welding Residual Stresses on Fatigue Crack Growth of Butt Weld Plate[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(2): 116-119.
- [15] LILJEDAHL C, ZANELATO O, FITZPATRICK M E, et al. The Effect of Weld Residual Stresses and Their Re-Distribution with Crack Growth During Fatigue under Constant Amplitude Loading[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(4): 735-743.
- [16] 李良碧, 张沛心, 周宏. 平板焊接接头裂纹扩展中残余应力重分布的数值模拟[J]. 电焊机, 2015, 45(8): 90-96.
- LI Liang-bi, ZHANG Pei-xin, ZHOU Hong. Numerical Simulation of Redistribution of Residual Stress in The Crack Propagation of Plate Butt-Welded Joint[J]. Electric Welding Machine, 2015, 45(8): 90-96.
- [17] 王强, 闫忠杰, 刘雪松, 等. 疲劳裂纹扩展过程中焊接残余应力重分布测试[J]. 焊接学报, 2019, 40(7): 139-142.
- WANG Qiang, YAN Zhou-jie, LIU Xue-song, et al. A Novel Method for Evaluation of Welding Residual Stress Redistribution during Fatigue Crack Growth[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(7): 139-142.
- [18] WANG Q, LIU X S, WANG P, et al. Numerical Simulation of Residual Stress in 10Ni5CrMoV Steel Weldments[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 240: 77-86.
- [19] 顾颖. U 肋加劲钢板面板焊接残余应力与变形研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- GU Ying. Research on Welding Residual Stresses and

- Distortions in Steel Bridge Decks Stiffened with U-Shaped Ribs[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [20] 金属材料残余应力测定钻孔应变法: GB/T 31310-2014[S].
Metallic Material-Determination of Residual Stress-Hole Drilling Strain-Gauge Method: GB/T 31310-2014[S].
- [21] 黄永辉, 王荣辉, 傅继阳, 等. 平板焊接接头纵向残余应力修正估算公式[J]. 工程力学, 2014, 31(6): 218-225.
HUANG Yong-hui, WANG Rong-hui, FU Ji-yang, et al. Modified Estimation Formula of Longitudinal Residual Stress for Flat Plate Welding Joint[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(6): 218-225.
- [22] PERIĆ M, GARAŠIĆ I, TONKOVIĆ Z, et al. Numerical Prediction and Experimental Validation of Temperature and Residual Stress Distributions in Buried-Arc Welded Thick Plates[J]. International Journal of Energy Research, 2019, 43(8): 3590-3600.
- [23] BANIK S D, KUMAR S, SINGH P K, et al. Distortion and Residual Stresses in Thick Plate Weld Joint of Austenitic Stainless Steel: Experiments and Analysis[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 289: 116944.
- [24] TADA H, PARIS P C. The Stress Intensity Factor for a Crack Perpendicular to the Welding Bead[J]. International Journal of Fracture, 1983, 21(4): 279-284.
- [25] TERADA H. Stress Intensity Factor Analysis and Fatigue Behavior of a Crack in the Residual Stress Field of Welding[J]. Fatigue of Aircraft Structures, 2011(1): 5-15.

责任编辑: 蒋红晨