

残余应力对焊接角接头裂纹扩展性能的影响分析

蹇昊辰, 卢耀辉, 艾进鹏, 张雅东

(西南交通大学 机械工程学院, 成都 610031)

摘要: **目的** 分析焊接残余应力对角接头裂纹扩展特性的影响。**方法** 基于热弹塑性力学法, 建立角接头的有限元模型, 计算焊接温度场, 并采用热机耦合方法计算焊接残余应力。采用断裂力学方法, 分析计算焊趾部位的应力强度因子和裂纹扩展寿命, 并对比分析残余应力对裂纹扩展的影响。**结果** 计算得到焊缝的残余应力达到了材料屈服极限, 呈拉伸应力状态, 其 Von Mises 应力值为 345 MPa。在应力为 200 MPa 以内, 考虑残余应力的前提下, 分别使用文献试验得到的数据和 IIW 标准中的数据作为裂纹扩展参数, 应力比 $R=1$ 时的裂纹扩展寿命分别为 2.61×10^6 和 6.84×10^5 次循环; 在应力比 $R=0$ 时的裂纹扩展寿命分别为 1.16×10^5 和 2.90×10^4 次循环。**结论** 残余应力会加速裂纹扩展。采用控制变量法, 将应力范围设定为常值, 当应力比 $R < 0$ 时, 残余应力扩大了应力强度因子的范围; 在应力比 $R > 0$ 时, 残余应力一方面会增大最大应力强度因子, 使其接近材料的断裂韧性, 同时拉伸残余也提高了平均应力强度因子或者提高了应力比 R , 在这种情况下, 残余应力均会加速裂纹的扩展速度。随着裂纹长度的增加, 残余应力对裂纹扩展速率的影响会增大。外载荷和残余应力共同对裂纹扩展产生影响, 应力比 R 和残余应力对裂纹扩展的影响机制相同, 在焊接结构寿命评估时, 需要综合考虑这 2 个影响因素。

关键词: 焊接接头; 残余应力; 应力强度因子; 疲劳裂纹扩展; 有限元分析

中图分类号: TG405

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)07-0150-11

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.07.019

Influence of Welding Residual Stresses on Crack Growth of Fillet Joints

JIAN Hao-chen, LU Yao-hui, AI Jin-peng, ZHANG Ya-dong

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the influence of welding residual stresses on the crack growth of fillet joints. A finite element model of fillet joints was established based on the thermal elastic plastic mechanics, the welding temperature field was

收稿日期: 2023-01-14; 修订日期: 2023-04-15

Received: 2023-01-14; Revised: 2023-04-15

基金项目: 四川省科技计划项目 (2022YFG0251)

Fund: Sichuan Science and Technology Programme (2022YFG0251)

作者简介: 蹇昊辰 (1998—), 男, 硕士, 主要研究方向为焊接疲劳。

Biography: JIAN Hao-chen (1998-), Male, Master, Research focus: welded structure durability.

通讯作者: 卢耀辉 (1973—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为车辆振动疲劳可靠性、焊接结构耐久性及车辆空气动力学。

Corresponding author: LU Yao-hui (1976-), Male, Doctor, Professor, Research focus: vehicle vibration fatigue reliability, welded structure durability and vehicle aerodynamics.

引文格式: 蹇昊辰, 卢耀辉, 艾进鹏, 等. 残余应力对焊接角接头裂纹扩展性能的影响分析[J]. 装备环境工程, 2023, 20(7): 150-160.

JIAN Hao-chen, LU Yao-hui, AI Jin-peng, et al. Influence of Welding Residual Stresses on Crack Growth of Fillet Joints[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(7): 150-160.

calculated, and the welding residual stresses were obtained through thermal mechanical coupling. The fracture mechanics method was used to analyze the stress intensity factor and crack growth rate at the weld toe. The influence of residual stresses on crack growth was compared. The calculated residual stresses of the weld reached the material yield limit and were in a tensile stress state, with Von Mises stress of 345 MPa. Under the stress range of 200 MPa, taking residual stresses into account, data obtained from literature tests and data from IIW standards were used as crack growth parameters, the crack growth life was 2.61×10^6 and 6.84×10^5 cycles respectively when stress ratio $R=-1$; when stress ratio $R=0$, the crack growth life was 1.16×10^5 and 2.90×10^4 cycles respectively. Residual stresses will accelerate crack growth. The control various methods can be used to set the stress range to a constant value. The range of stress intensity factor is enlarged by the residual stresses in the case of the stress ratio $R<0$. The maximum stress intensity factor is increased after combining the residual stresses under the stress ratio $R>0$, which is closer to the fracture toughness of the material. Moreover, the average value of stress intensity factor or stress ratio R is changed by the tensile residual stresses. So the crack growth rate is accelerated in this condition. With the increase of crack length, the influence of residual stresses on crack growth rate will increase. Both load and residual stresses have an influence on crack growth, the influence mechanism of stress ratio R and residual stresses on crack growth is the same. Two influencing factors need to be comprehensively considered in the life assessment of welded structures.

KEY WORDS: welded joint; residual stresses; stress intensity factor; fatigue crack growth; finite element analysis

为了实现轻量化和复杂结构的设计,角接头被广泛应用于铁道车辆焊接结构中。在焊接过程中,焊接接头会产生缺陷,包括类裂纹缺陷和焊接残余应力及焊接变形。残余应力是由于焊接过程中温度分布不均匀,导致材料不均匀膨胀产生的,尤其在焊缝位置的残余应力呈现拉应力状态,对结构的安全可靠性具有不利的影响。焊缝部位的类裂纹缺陷,在残余应力和外载荷的作用下,是导致焊接结构发生疲劳失效的主要原因。现代计算机技术的发展和数值模拟方法的广泛应用,使焊接残余应力的计算成为现实。开展焊接残余应力影响下的焊缝部位裂纹扩展性能的研究,对焊接结构的抗疲劳设计和提出改善残余应力措施具有重要的工程应用价值和实际意义。

分析残余应力对焊接接头疲劳性能的影响,首先需要对残余应力的产生过程和分布进行精准的计算,然后通过与外载荷耦合的方式分析其作用机制,国内外学者对焊接疲劳进行了广泛深入的研究。在焊接变形和残余应力的研究方面,卢耀辉等^[1]通过热弹塑性法和固有应变理论,使用间接耦合方法分析了T形钢焊接接头的焊接变形,并与固有应变法进行了比较,验证了其准确性。他们还通过固有应变法模拟了转向架侧梁焊接变形,验证了固有应变法在预测大型焊接结构焊接变形方面的可行性。同时,在铝合金的焊接模拟方面,卢耀辉等^[2]还使用热弹塑性法计算了对接接头的焊接残余应力,并与试验结果进行了对比,验证了其准确性,使用固有应变法分析了3种焊接接头的残余应力,并计算了铝合金车体的整体焊接变形,发现焊接部位的平均应力明显增加,使得车体容易出现疲劳失效。在以上研究基础之上,卢耀辉等^[3-4]还进行了构架强度评估,分别使用板单元和实体单元分析了焊缝部位的应力,验证精度之后,使用goodman曲线评估了焊接构架的疲劳强度。卫星等^[5]在Abaqus

平台上模拟了栓钉连接件的焊接过程,计算了不同环境温度下的焊接温度场和残余应力,发现焊缝附近为残余拉应力,远离焊缝为压应力,并且降低环境温度会提高残余拉应力。根据上述的研究成果,热弹塑性方法可以精确模拟接头的焊接热变形,同时实现对残余应力的计算。

焊接结构的裂纹源绝大多数是由于焊接缺陷诱导产生的,而焊接类裂纹缺陷包括夹渣、气孔和未融合等。这些缺陷形状类型各异,不便于直接用于计算,为了便于后期分析,可以将其表征为当量裂纹。对含裂纹结构的断裂性能进行评估,需要考虑外载荷和材料的断裂力学相关参数的影响。在裂纹扩展性能分析方面,刘俊杰等^[6]将缺陷规则化为半椭圆裂纹,计算了其应力强度因子,并利用FAD方法对铝合金车体焊接缺陷进行了评估,根据车体载荷计算得到了一次应力,再根据焊缝处的应力结果得到二次应力,并研究了在不同缺陷作用下车体的可靠性。徐威华等^[7]研究了30CrMnSiNi2A钢及其焊接接头的裂纹扩展性能,通过不同应力比下的疲劳裂纹扩展试验数据,研究了应力比对裂纹扩展速率的影响,发现在相等裂纹长度下,应力比增大,疲劳裂纹扩展速率减小。张颖云等^[8]对同种材料的研究结果表明,疲劳断口呈现多源启裂特征,接头各个部位的显微组织差异比较小。段德盛等^[9]对18CrNiMo7-6齿轮钢疲劳裂纹扩展行为进行了研究,验证了裂纹扩展速率与应力强度因子、温度之间的关系。庄力健等^[10]通过CT试样试验,研究了16MnR钢在不同应力比的恒幅循环载荷作用下的疲劳裂纹扩展行为,并配合Abaqus计算,推导出了疲劳裂纹稳定扩展速率的计算公式,发现应力比对裂纹扩展速率几乎没有影响。同时,Wang等^[11-12]和Dong等^[13]基于材料的循环塑性特性和增量形式的多轴疲劳损伤准则,分析了16MnR的循环弹塑性应

力场,研究了它的疲劳裂纹扩展速率特性,也得出了相似的结果。刘安中等^[14]制备了经过热处理的16MnR 紧凑拉伸疲劳试验试样,通过疲劳试验获得了材料的疲劳断裂起裂值,并观察了断口表面的三维形貌,发现温度和起裂值之间有对应的关系。石哲任等^[15]为了研究裂纹长度对裂纹扩展驱动力的影响,模拟了残余应力影响下的裂尖应力应变场的分布,通过应力三轴度预测了裂纹扩展性能。贾朋刚等^[16]测试了Q500D 焊接接头裂纹扩展的门槛值,并拟合了 Paris 公式的相关参数。尹汉军等^[17]研究了小裂纹的疲劳裂纹扩展行为,发现了小裂纹扩展速率与宏观裂纹之间的区别,通过试验确定了考虑裂尖闭合效应的等效应力强度因子模型的准确性。裂纹的萌生阶段往往占疲劳寿命的很大一部分,因此初始微观损伤阶段同样重要。郝运富等^[18]利用扫描电镜分析了镍基铝合金产生焊接裂纹的原因,提出了消除焊接裂纹的预防措施,如减小热输入和使用多道焊等。邹莹等^[19]以扩展有限元法为基础,分析了模拟裂纹扩展的优势和可行性。杨夏炜等^[20]研究了摩擦焊接接头疲劳裂纹萌生及扩展行为,通过对带有初始缺陷的模型进行仿真,得到了各个模型裂纹萌生和扩展的先后顺序。结果表明,孔洞缺陷对接头失效的影响远大于夹杂,初始应力会加速裂纹萌生。沈言等^[21]认为循环载荷作用下残余应力会出现释放现象,在此基础上提出了一种结构疲劳计算方法,并在 Abaqus 中验证了其准确性。刘孟晗等^[22]对激光焊接的裂纹和微观组织进行了研究分析,总结了裂纹萌生的规律,认为焊缝中的金属间化合物是裂纹萌生与扩展的主要原因。白易山等^[23]对 6005 铝合金进行了焊接试验,发现熔合区微观结构出现联生结晶特点,疲劳测试中断口呈韧性和解理混合断裂。以上学者对裂纹萌生和扩展行为进行了大量的研究,但是残余应力和外载荷共同作用下的裂纹扩展更为复杂。为在考虑残余应力的情况下对焊接接头裂纹扩展性能进行精确计算,顾颖等^[24]采用热力耦合方法,考虑了焊接残余应力的重分布效应,利用断裂力学方法分析了对接接头的裂纹扩展性能,发现焊接残余拉压应力可以显著影响材料的疲劳寿命。传统的焊接疲劳研究只是考虑焊接接头性能与母材的性能差异,考虑残余应力的精确分布对裂纹扩展影响方面的研究较少,同时结合外载荷的载荷比特性分析裂纹扩展性能的研究同样较少。在实际结构中,焊接接头受这 2 种因素的综合影响,因而探索两者对焊接接头的综合影响规律具有重要意义。

本文首先使用热力耦合方法,对多道焊焊接过程进行模拟,分析焊接过程的温度变化和焊接后的残余应力场分布。然后将应力场耦合到疲劳计算中,对裂纹进行精确建模,使用有限元方法计算各个不同载荷比与残余应力相耦合下的裂纹扩展行为,并与 IIW 规范的焊接接头 S-N 曲线有限寿命计算结果进行对比。本文的研究成果可以为焊接结构的设计和残余应力

的调整提供科学的建议。

1 焊接物理模型

1.1 网格划分

本文选取一个双道焊的 T 形接头,在 Abaqus 中建立了有限元模型,计算模型尺寸为 200 mm×200 mm,底板厚度为 16 mm,侧板厚度为 12 mm,材料为 16MnR 钢。为了捕捉到焊缝坡口处可能产生的应力集中现象,选用六面体实体单元进行网格划分。焊件的实体单元有限元模型包含 129 500 个单元和 145 238 个节点,单元尺寸为 2 mm,如图 1 所示。

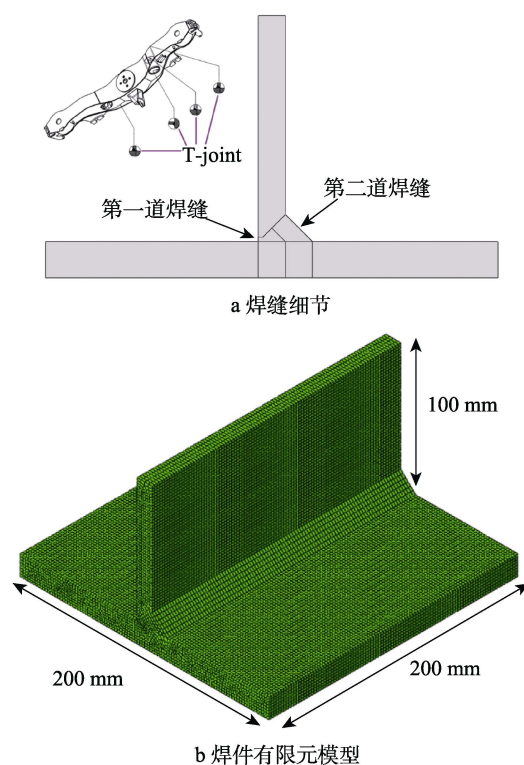


图 1 焊件示意图

Fig.1 Schematic diagram of weldment: a) weld details; b) finite element model of weldment

由于板材较厚,实际生产制造中一般是采用多道焊焊接。对应模拟计算时,采用生死单元技术模拟焊接。焊接时,温度边界条件包括对流换热和辐射散热,换热边界条件有:

$$q = h(t_1 - t_2) \quad (1)$$

式中: h 为对流换热系数; q 为热流密度; t_1 为焊件表面温度; t_2 为环境温度,本文取 20 °C。相关的材料属性见表 1。

1.2 焊接热源模型

工程上,常用的焊接热源模型有平面高斯热源、双椭球热源^[15]等。其中,平面高斯热源的热流密度分布如图 2 所示。

表 1 材料热物理属性
Tab.1 Thermophysical properties of materials

温度/℃	热导率/ (W·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)	比热容/ (J·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	对流换热系数/ (W·m ⁻² ·℃ ⁻¹)	弹性模量/Pa	线膨胀系数/ (10 ⁻⁵ ·℃ ⁻¹)	泊松比
20	51.74	7 867	459.6	10	2.05×10 ¹¹	1.10	0.270
250	47.55	7 786	534.5	35	1.95×10 ¹¹	1.22	0.280
500	39.40	7 711	684.0	52	1.54×10 ¹¹	1.39	0.290
750	28.90	7 602	1 191.0	100	1.03×10 ¹¹	1.48	0.275
1 000	30.00	7 552	550.0	150	7.50×10 ⁹	1.34	0.270
1 500	35.00	7 268	750.0	300	4.50×10 ⁹	1.33	0.270
1 700	110.00	6 924	780.0	310	2.50×10 ⁸	1.32	0.270

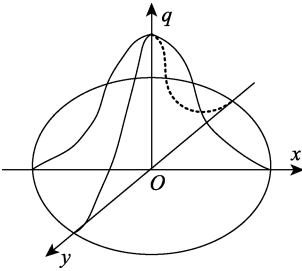


图 2 平面高斯热源示意图
Fig.2 Schematic diagram of plane Gaussian heat source

其可以表示为:

$$q(r)=\frac{3\eta UI}{\pi r_0^2}e^{-\frac{3r^2}{r_0^2}} \tag{2}$$

式中: $q(r)$ 为距离热源中心 r 位置处的热流密度; η 为电弧热效率; U 为电弧电压; I 为电弧电流; r_0 为有效加热半径。

双椭球热源模型^[25]的热流密度分布如图 3 所示。其中, a 为沿焊接方向的前半轴长; a_2 为沿焊接方向的后半轴长; b 为焊缝宽度方向的半轴长; c 为焊缝深度方向的半轴长。

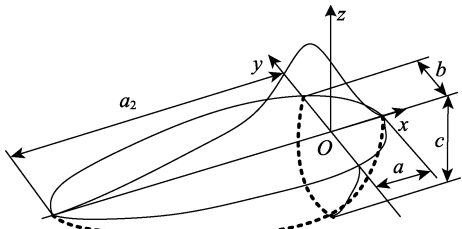


图 3 双椭球热源示意图
Fig.3 Schematic diagram of double ellipsoidal heat source

其可以表示为:

$$\begin{cases} q_1(x,y,z)=\frac{6\sqrt{3}(f_1)}{abc\pi\sqrt{\pi}}e^{-3\left(\frac{x^2+y^2+z^2}{a^2+b^2+c^2}\right)},x\geq 0 \\ q_2(x,y,z)=\frac{6\sqrt{3}(f_2)}{a_2b\pi\sqrt{\pi}}e^{-3\left(\frac{x^2+y^2+z^2}{a_2^2+b^2+c^2}\right)},x< 0 \\ f_1+f_2=2 \end{cases} \tag{3}$$

式中: x 、 y 、 z 分别是向热源中心点坐标系投影的 3 个坐标, x 表示距离热源中心沿着焊接方向上的距离, y 表示距离热源中心沿着焊接宽度方向上的距离, z 表示距离热源中心沿着熔池深度方向的距离; q_1 和 q_2 分别表示前半椭球和后半椭球的热流密度; f_1 和 f_2 表示前后半球能量之比。

在实际测试中,平面高斯热源的熔深太浅,因此本文选择双椭球热源模型,配合生死单元技术来模拟多道焊焊接过程。

2 焊接过程模拟

2.1 温度场分析

为了在获得焊接温度场后计算焊接残余应力分布,本文采用热机耦合分析。由于应变引起的生热远小于焊接热源输入,本文使用间接耦合进行分析。计算参数:焊接过程耗时 40 s,焊接速度为 10 mm/s,冷却过程耗时 1 500 s,焊接电压为 24 V,焊接电流为 120 A,焊接效率为 0.75,使用双椭球热源模型。在冷却过程中,温度梯度相比焊接过程非常小,因此模拟中增量步时间更大。选取第二道焊缝焊接路径上的 3 个点,记录他们在焊接过程中的温度变化,如图 4 所示。

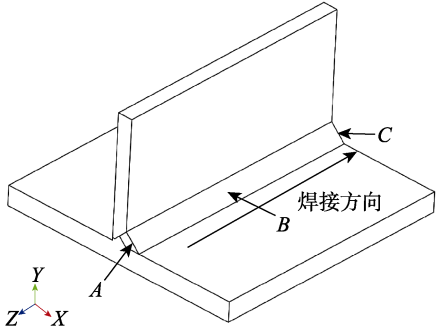


图 4 焊缝关注点
Fig.4 Focus points along the weld

图 5 和图 6 表明,当焊接热源中心依次经过 3 个点的时候,它们的温度急剧上升,材料温度达到熔点。当焊点离开后,它们的温度也迅速回落,温度上升的

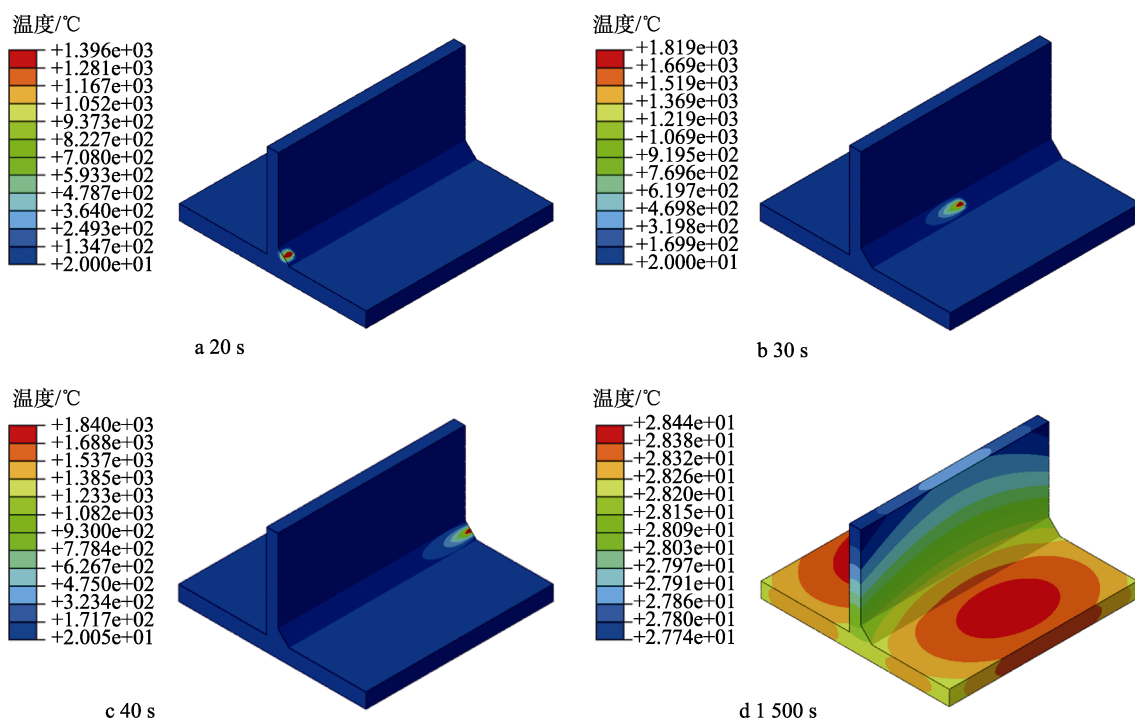


图5 焊接过程的温度变化
Fig.5 Temperature change during welding

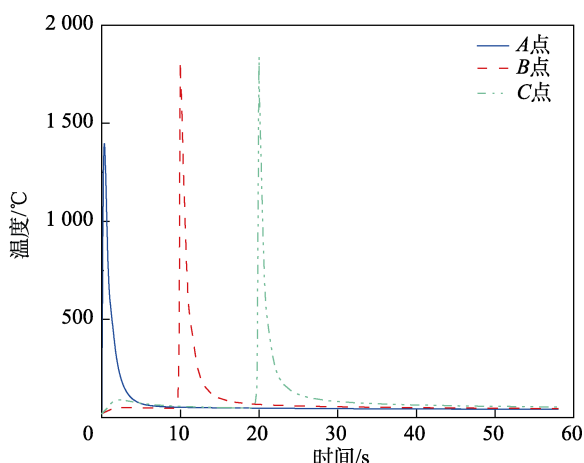


图6 3个关注点在焊接过程中的温度变化
Fig.6 Temperature changes of three concern points during welding

速度明显大于温度下降的速度。焊接40 s后,进入冷却阶段,焊缝温度缓慢下降。焊接完成1 500 s后,温度基本冷却至室温,如图5d所示。

2.2 应力场分析

焊接过程是一个非线性问题,图6表明,焊接过程中的温度是连续变化的,因此应力也是连续变化的。由于焊接温度场沿空间不均匀分布,且温度梯度巨大,焊接热源路径上将产生焊接热应力,温度场的不均匀分布将导致焊缝附近的应力达到材料的屈服极限,导致局部区域的塑性变形。本文将焊接温度分析中的温度场时间历程结果作为应力分析的边界条

件引入,使得在应力分析过程中温度场分布与对应时刻的温度分析结果一致,从而实现热力耦合分析。

由图7可以看出,焊接残余应力已经达到了材料的屈服强度。图7a中的截面清楚地显示了双道焊的影响,2次焊接的残余应力会相互叠加,进而在第二道焊缝的焊趾位置产生更大的残余应力。

分别沿着图4中垂直焊缝方向(x 轴方向)和 $A-B-C$ 方向(z 轴方向)提取焊接残余应力,如图8所示。可以看出,焊接残余应力在垂直于焊缝方向出现了2个峰,这与文献[1-2]的试验结果吻合。在沿着焊缝的方向,焊接残余应力在中间一段都保持在屈服强度附近。

3 残余应力对裂纹扩展性能的影响

3.1 应力强度因子分析

在焊接结束后,根据叠加原理^[26],提取每个节点上的节点力,分别施加到含裂纹模型对应位置的节点上,并加以插值细分,即可叠加残余应力。由于焊接缺陷常产生在焊趾位置,本文在焊趾处引入半椭圆裂纹,分别计算其带焊接残余应力和不考虑残余应力模型的疲劳裂纹扩展寿命。

如图9所示,在焊趾处截取一个局部子模型,子模型与全局模型共享位移边界条件,可以划分更精细的网格。在子模型中插入半椭圆形初始裂纹,裂纹短半轴为1 mm,长半轴为2 mm。在裂纹周围进行网格加密处理,裂尖有3个环路和8个奇异单元环绕。

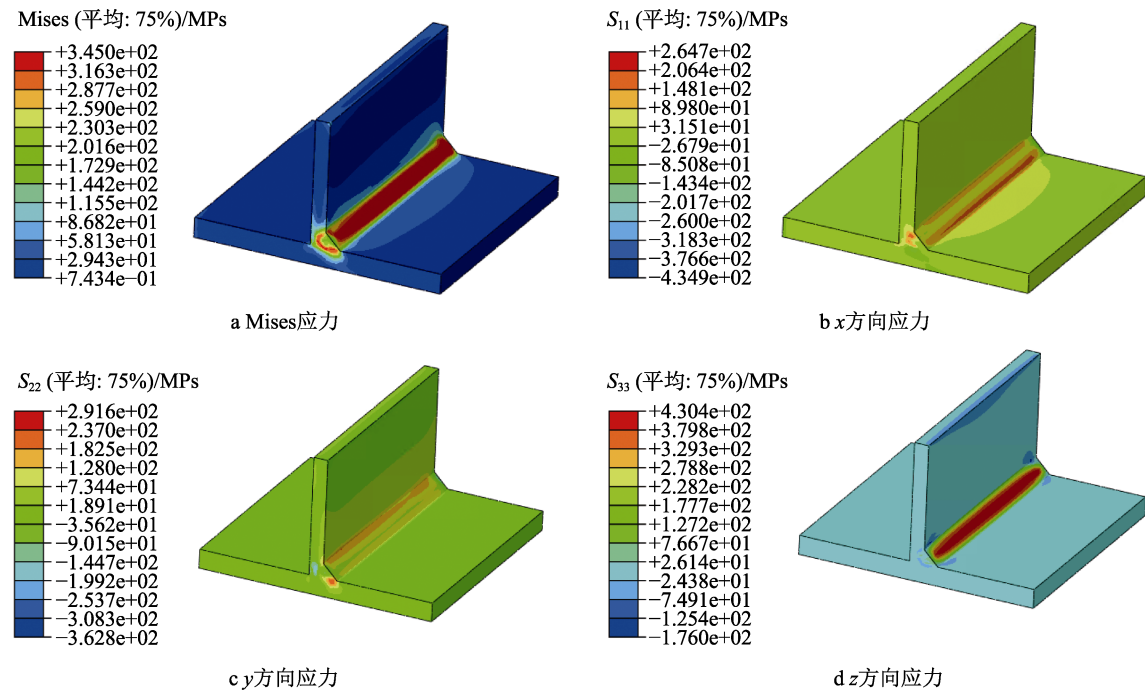


图 7 焊接残余应力

Fig.7 Welding residual stresses: a) Mises stress; b) x-direction stress; c) y-direction stress; d) z-direction stress

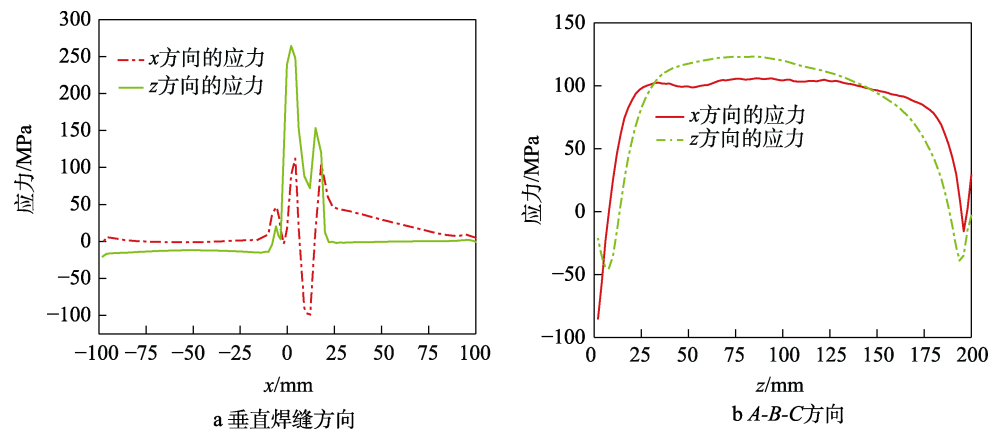


图 8 沿路径上的焊接残余应力分布

Fig.8 Welding residual stresses along the path: a) vertical weld direction; b) A-B-C direction

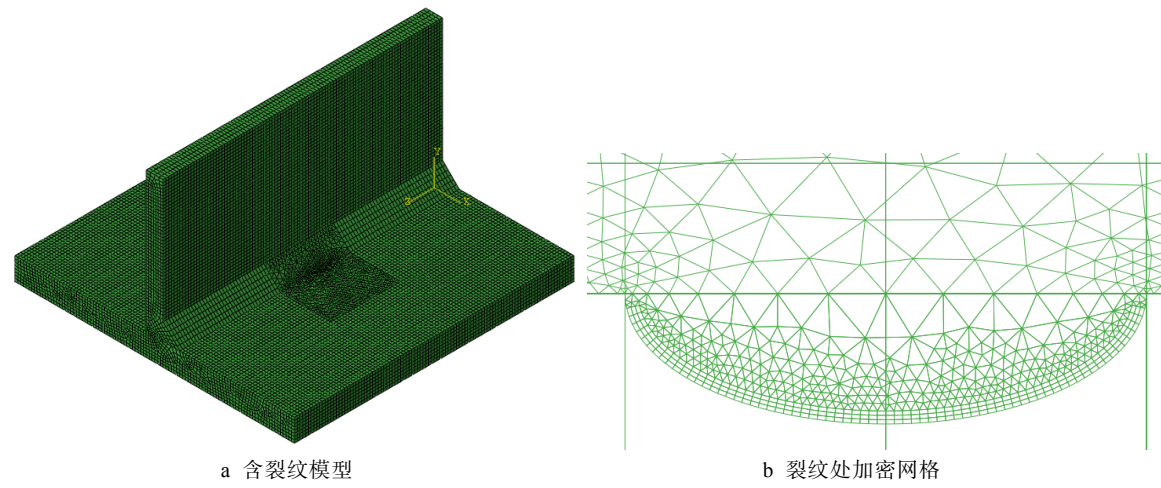


图 9 裂纹示意图

Fig.9 Crack diagram: a) crack model; b) dense grid at crack location

在底板两端施加 200 MPa 的拉应力,计算裂纹前缘节点上每个点的应力强度因子,并将裂纹前缘长度进行归一化处理,得到归一化应力强度因子,如图 10 所示。这种做法可以计算裂纹前缘各个节点的扩展速率,而不是仅仅局限于厚度一个方向,从而可以更全面地评估构件的疲劳强度。

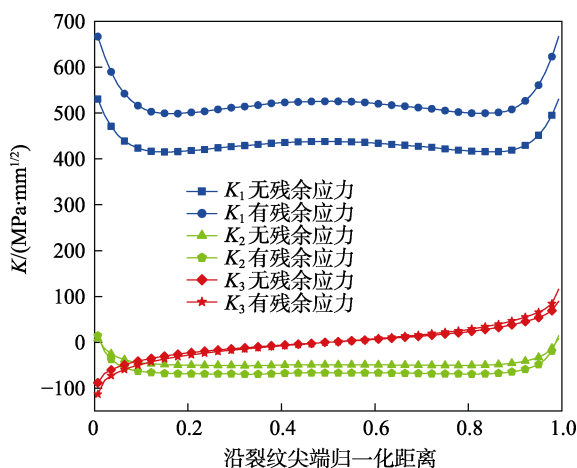


图 10 裂纹尖端应力强度因子
Fig.10 Stress intensity factor at crack tip

可见,在没有焊接残余应力的情况下, I 型应力强度因子在裂纹两端达到最大,可达 $530 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$,而 K_{II} 和 K_{III} 相对小得多。使用同样的模型,同样形状和尺寸的裂纹,施加焊接残余应力后, K_I 最大值仍然出现在裂纹两侧,为 $666 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ 。对比图 10 可以发现,焊接残余应力会导致 K_I 增大,增加裂纹扩展速率,尤其是裂纹两端,但对 K_{II} 和 K_{III} 的影响很小。

3.2 裂纹扩展寿命计算

焊接残余应力的不均匀分布会使得受循环载荷的工件的最大应力和最小应力发生变化,导致 ΔK 和 R 发生变化,从而影响疲劳裂纹的扩展速率和扩展方向。对于角接头,在焊趾位置的残余应力最大(如图 7 所示),这种影响将更为强烈。对于本文选取的 16MnR 材料,裂纹扩展速率模型选择 Paris 公式,Paris 公式中的参数根据文献[12]与 IIW 标准取值:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (4)$$

表 2 焊缝材料的裂纹扩展寿命计算参数
Tab.2 Calculation parameters of crack growth life of weld material

	$C/(\text{mm} \cdot \text{cycle}^{-1})$	m
文献试验数据	4.01×10^{-9}	3.04
IIW 标准	1.65×10^{-8}	3

当 R 较大时, IIW 标准建议对标准 Paris 公式进行修正:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^m}{(1-R) - \frac{\Delta K}{K_C}} \quad (5)$$

为探明不同的外载荷对裂纹扩展的影响,本文分别对考虑和不考虑残余应力的模型底板施加交变载荷,应力恒定为 200 MPa, R 分别为 0 和 -1,以此来考虑 2 种极限情况,即脉动循环和对称循环。初始裂纹如图 9 所示,分别考察裂纹扩展速率和裂纹前缘应力强度因子的变化。

沿着裂纹扩展路径的应力强度因子变化如图 11 所示。所有载荷条件下都以 I 型开裂为主, K_{II} 和 K_{III} 接近于 0,故可以忽略不计,带有焊接残余应力的应力强度因子在裂纹扩展路径上的上升速度远大于无残余应力的应力强度因子。当裂纹扩展到一定程度时,仅仅是焊接残余应力引起的应力强度因子就已经足够大,超过了材料的裂纹扩展门槛值,足以引起疲劳裂纹扩展。同时,材料的裂纹扩展参数对于最大应力强度因子基本没有影响。

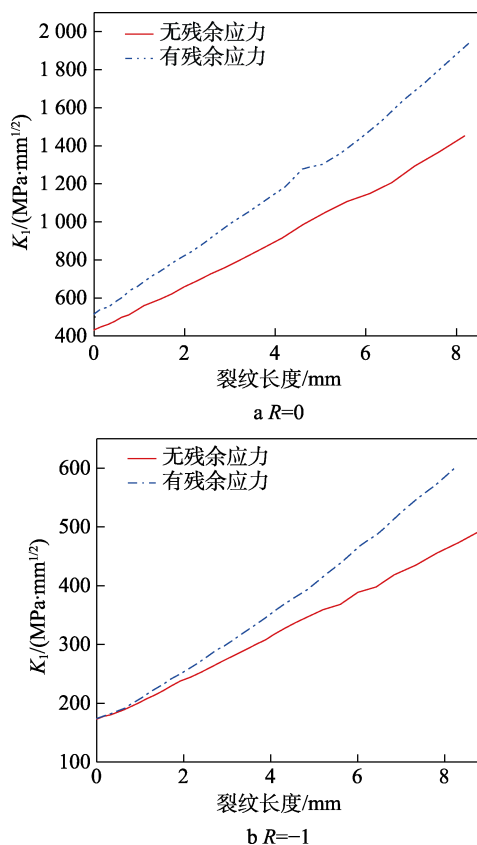


图 11 沿裂纹扩展路径的应力强度因子
Fig.11 Stress intensity factor along crack growth path

如图 12 和图 13 所示,焊接残余应力会加速裂纹的扩展,并且随着裂纹扩展,焊接残余应力导致的应力强度因子不断变大,在总的应力强度因子中的占比越来越大,是计算疲劳寿命中不可忽略的影响因素。同时,采用 IIW 标准参数计算的裂纹扩展寿命低于采

用 16MnR 试验参数计算的结果。对于普通的纯拉伸循环载荷, 残余应力的作用增大了应力比, 导致裂纹扩展加速。焊接残余应力在裂纹位置产生正应力, 而循环载荷的压缩部分并不能使裂尖张开, 对裂纹扩展

没有贡献, 因此:

$$\Delta K_{\text{eff}} = K_{\text{max}} - \max(K_{\text{min}}, 0) \quad (6)$$

式中: ΔK_{eff} 表示对裂纹扩展有贡献的有效应力强度因子。

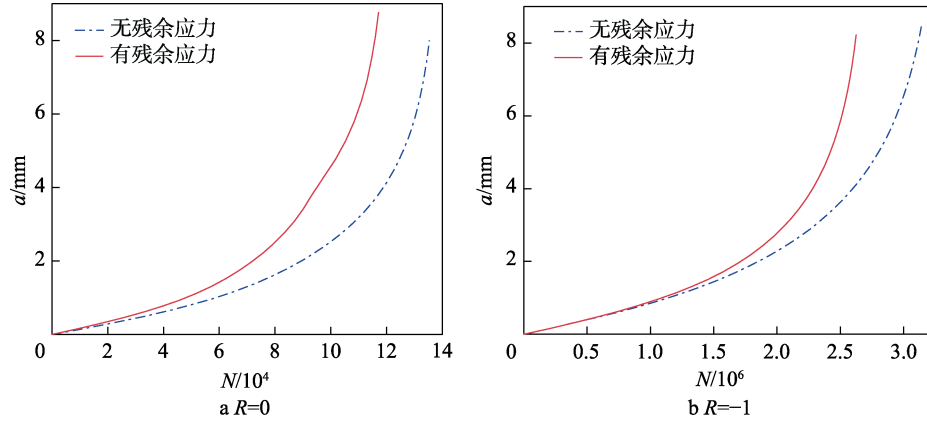


图 12 文献实验参数计算的 a - N 曲线

Fig.12 a - N curve calculated by experimental parameters of literature

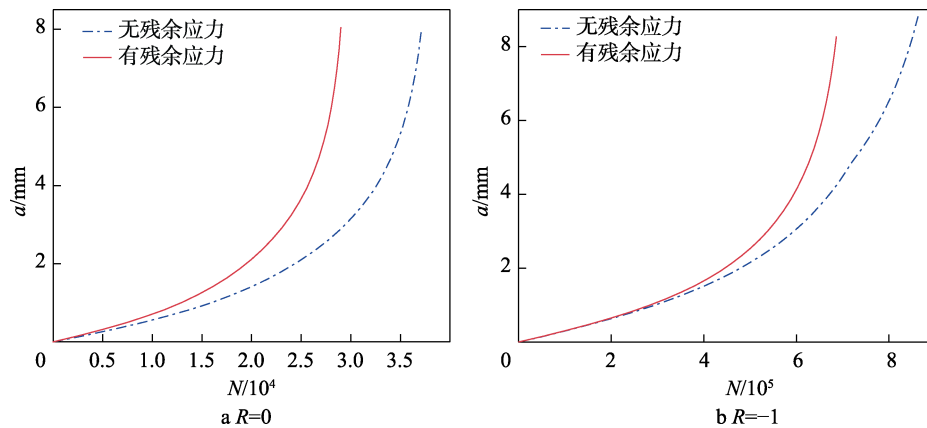


图 13 IIW 标准参数计算的 a - N 曲线

Fig.13 a - N curve calculated by IIW standard parameters

在 $R>0$ 的情况下, $K_{\text{max}}>0$, $K_{\text{min}}>0$, 此时有:
无残余应力

$$\Delta K_{\text{eff}} = K_{\text{max}} - \max(K_{\text{min}}, 0) = K_{\text{max}} - K_{\text{min}} \quad (7)$$

有残余应力

$$\Delta K_{\text{eff}} = K_{\text{max}} + K_{\text{CT}} - \max(K_{\text{min}} + K_{\text{CT}}, 0) = K_{\text{max}} - K_{\text{min}} \quad (8)$$

其中: K_{CT} 表示因为残余应力而产生的应力强度因子, 使用应力叠加法计算。

虽然式 (7)、(8) 中 2 种 ΔK_{eff} 一致, 但考虑到其增加了平均应力会导致更快达到断裂韧度, 而且提高了应力比, 导致裂纹扩展速率增加, 这仍然会降低疲劳寿命。

$R<0$ 时有:

无残余应力

$$\Delta K_{\text{eff}} = K_{\text{max}} - \max(K_{\text{min}}, 0) = K_{\text{max}} - 0 = K_{\text{max}} \quad (9)$$

有残余应力

$$\begin{aligned} \Delta K_{\text{eff}} &= K_{\text{max}} + K_{\text{CT}} - \max(K_{\text{min}} + K_{\text{CT}}, 0) = \\ &= K_{\text{max}} - K_{\text{min}}; K_{\text{min}} + K_{\text{CT}} > 0 \\ \Delta K_{\text{eff}} &= K_{\text{max}} + K_{\text{CT}} - \max(K_{\text{min}} + K_{\text{CT}}, 0) = \\ &= K_{\text{max}} + K_{\text{CT}}; K_{\text{min}} + K_{\text{CT}} < 0 \end{aligned} \quad (10)$$

由于式 (9)、(10) 中 $K_{\text{min}}<0$, 因此加入残余应力后, ΔK_{eff} 一定会变大, 导致裂纹扩展, 甚至在纯压缩循环时, 原本 K_{min} 和 K_{max} 都小于 0, 裂纹不会扩展, 但是在残余应力的作用下, $K_{\text{max}}+K_{\text{CT}}>0$ 之后, 仍然可能发生疲劳裂纹扩展, 这与文献[24]的结论吻合。由此可见, 残余正应力不仅可以加速裂纹的扩展, 也可能使得原本不可能发生裂纹扩展的结构发生疲劳失效, 在工程实际中需要加以考虑。同理, 如果可以让残余应力为负, 根据式 (10), ΔK_{eff} 会相应减小, 从而可以延长疲劳裂纹扩展寿命。对于裂纹扩展路径, 残余应力和应力比的影响较小, 每种工况下裂纹都是沿着焊缝根部向厚度方向扩展, 同时也会沿着焊趾向两侧扩展, 如图 14 所示。

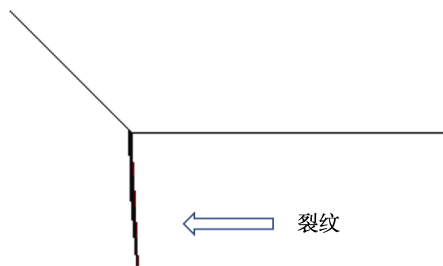


图 14 裂纹扩展路径
Fig.14 Crack growth path

3.3 IIW 有限疲劳寿命计算

为进一步分析裂纹扩展寿命的准确性, 本文将上述计算结果与 IIW 标准得出的结果进行对比。根据 IIW 标准, 采用名义应力法, 载荷的名义应力 $\Delta\sigma$ 为 200 MPa。根据焊接接头形式以及裂纹扩展形式, 焊接接头可以认为是打磨过的, 因此选取 FAT80 级 $S-N$ 曲线, 如图 15 所示。

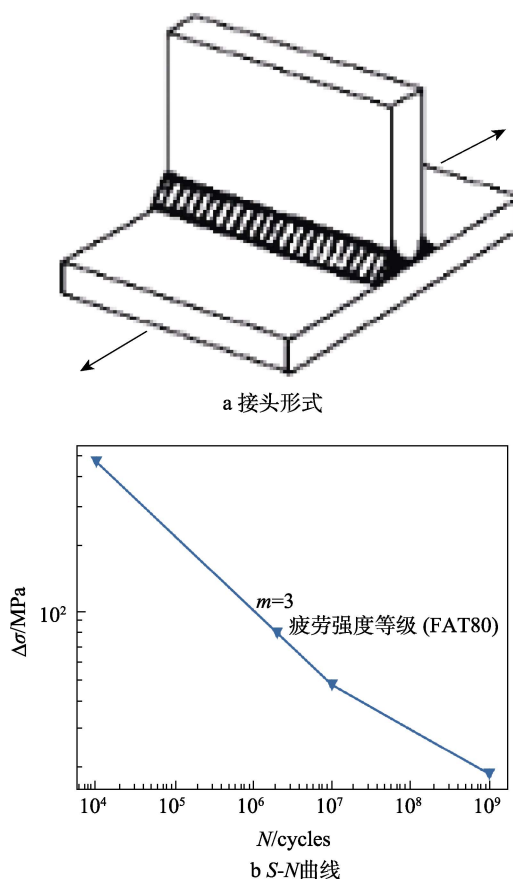


图 15 接头形式及对应的名义应力 $S-N$ 曲线
Fig.15 Joint type (a) and corresponding nominal stress $S-N$ curve (b)

同时, $S-N$ 曲线的级别还与厚度有关:

$$f(t) = \left(\frac{t_{\text{ref}}}{t_{\text{eff}}} \right)^n \quad (11)$$

式中: t_{eff} 为 16mm; 参考厚度 t_{ref} 为 25mm; n 取

0.2, 以此来修正构件厚度的影响, 得到本文的厚度系数为 1.093 4。因此, 实际 $S-N$ 曲线级别是 $80 \times f(t)$, 由于焊接位置 $S-N$ 曲线的 m 取 3, 可得寿命为 167 302 次。与图 12、13 中采用断裂力学的计算结果相比, 使用裂纹扩展方式预测的寿命都偏短。为了找出导致其计算结果偏离标准的原因, 分析如下:

1) 焊接过程中导致的初始缺陷可能大于本文假定的初始裂纹尺寸, 因此形成了这种差距, 真实焊接过程中初始缺陷的尺寸可能会更大。

2) IIW 标准中钢材的 Paris 参数与文献试验参数有所区别 (见表 2), 与 16MnR 的试验参数相比, 其裂纹扩展速率更快。同时, 考虑到 IIW 标准的 $S-N$ 曲线是焊态的 $S-N$ 曲线, 而本文模拟裂纹扩展时, 只引入了一个初始裂纹, 其他地方认为是没有缺陷的, 导致使用 16MnR 性能参数模拟的裂纹扩展寿命偏高。因此, 对于焊接部位的裂纹扩展寿命来说, 还需要考虑到其他的焊态缺陷, 或者使用考虑缺陷的参数进行计算。

4 结论

1) 对 16MnR 钢角接头通过数值模拟分析, 得到了其焊缝部位的焊接残余应力分布。分析了分布规律和大小, 与文献试验数据趋于一致, 发现在焊缝区域附近, 残余应力呈现拉伸应力状态, 对焊趾位置的疲劳强度是有害的。

2) 残余应力和不同载荷比共同作用下, 对裂纹扩展的影响机制是相似的, 均会提高裂纹的扩展速率, 降低结构的疲劳寿命。

3) 对比传统采用的 IIW 标准的疲劳全寿命计算, 发现本文的裂纹扩展寿命计算结果偏于保守。

参考文献:

- [1] LU Yao-hui, LU Chuan, ZHANG De-wen, et al. Numerical Computation Methods of Welding Deformation and Their Application in Bogie Frame for High-Speed Trains[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 38: 204-213.
- [2] LU Yao-hui, ZHU Sheng-chang, ZHAO Zhi-tang, et al. Numerical Simulation of Residual Stresses in Aluminum Alloy Welded Joints[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 50: 380-393.
- [3] 卢耀辉, 向鹏霖, 曾京, 等. 铁道客车焊接构架疲劳强度评估方法[J]. 北京交通大学学报, 2016, 40(6): 83-88. LU Yao-hui, XIANG Peng-lin, ZENG Jing, et al. Evaluation Method of Fatigue Strength for Welding Bogie Frame on Railway Vehicle[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2016, 40(6): 83-88.
- [4] 卢耀辉, 冯振, 陈天利, 等. 铁道车辆转向架构架多轴疲劳强度有限元分析方法[J]. 北京交通大学学报,

- 2014, 38(4): 26-31.
- LU Yao-hui, FENG Zhen, CHEN Tian-li, et al. Finite Element Analysis of Multi-Axial Fatigue Strength for Railway Vehicle Bogie Frame[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2014, 38(4): 26-31.
- [5] 卫星, 高亚杰, 康志锐, 等. 低温环境下栓钉环焊缝焊接残余应力场数值模拟[J/OL]. 吉林大学学报(工学版), 2023: 1-8.
- WEI Xing, GAO Ya-jie, KANG Zhi-rui, et al. Numerical Simulation of Residual Stresses Field of Stud Girth Weld in Low Temperature Environment[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 1-8.
- [6] 刘俊杰, 卢耀辉, 党林媛, 等. 基于FAD的铝合金车体焊接缺陷安全性评价方法研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(12): 98-103.
- LIU Jun-jie, LU Yao-hui, DANG Lin-yuan, et al. Methods for Safety Assessment of Welding Defects for Aluminum Alloy Body Based on FAD[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(12): 98-103.
- [7] 徐威华, 苗张木. 应力比对疲劳裂纹扩展速率的影响[J]. 大连交通大学学报, 2017, 38(1): 117-120.
- XU Wei-hua, MIAO Zhang-mu. Effect of Stress Ratio on Fatigue Crack Growth Rate[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2017, 38(1): 117-120.
- [8] 张颖云, 胡生双, 朱增辉, 等. 30CrMnSiNi2A钢电子束焊接头的疲劳裂纹扩展特性研究[J]. 航空制造技术, 2022, 65(8): 113-118.
- ZHANG Ying-yun, HU Sheng-shuang, ZHU Zeng-hui, et al. Study on Fatigue Crack Propagation Characteristics of Electron Beam Welded Joint of 30CrMnSiNi2A Steel[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(8): 113-118.
- [9] 段德盛, 王文先, 闫志峰, 等. 18CrNiMo7-6 齿轮钢的疲劳裂纹扩展行为[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(7): 101-107.
- DUAN De-sheng, WANG Wen-xian, YAN Zhi-feng, et al. Fatigue Crack Propagation Behavior of 18CrNiMo7-6 Gear Steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2022, 43(7): 101-107.
- [10] 庄力健, 高增梁, 王效贵, 等. 16MnR 钢在不同应力比下的疲劳裂纹扩展的试验研究及模拟[J]. 压力容器, 2007, 24(3): 1-7.
- ZHUANG Li-jian, GAO Zeng-liang, WANG Xiao-gui, et al. An Experimental Study and Simulation of Fatigue Crack Propagation of 16MnR Steel[J]. Pressure Vessel Technology, 2007, 24(3): 1-7.
- [11] WANG Xiao-gui, YIN Dong-hui, XU Feng, et al. Fatigue Crack Initiation and Growth of 16MnR Steel with Stress Ratio Effects[J]. International Journal of Fatigue, 2012, 35(1): 10-15.
- [12] WANG Xiao-gui, GAO Zeng-liang, ZHAO Tian-wen, et al. An Experimental Study of the Crack Growth Behavior of 16MnR Pressure Vessel Steel[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2009, 131(2): 1.
- [13] YIN dong hui, WANG xiao gui, QIU bao xiang, et al. Fatigue Crack Growth Rate of 16MnR Steel with Effect of Stress Ratio[J]. Advanced Materials Research, 2010, 118-120: 278-282.
- [14] 刘安中, 王涛, 张速, 等. 基于激光共聚焦技术对16MnR 钢高温损伤后疲劳断裂的分形研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(22): 245-248.
- LIU An-zhong, WANG Tao, ZHANG Su, et al. Fractal Research on 16MnR Steel Fatigue Fracture after High Temperature Damage Based on Laser Confocal Technology[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(22): 245-248.
- [15] 石哲任, 赵凌燕, 王正, 等. 裂纹长度对焊接接头裂纹扩展驱动力的影响[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(13): 76-80.
- SHI Zhe-ren, ZHAO Ling-yan, WANG Zheng, et al. Effect of Crack Length on Driving Force of Crack Propagation in Dissimilar Metal Welded Joints[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(13): 76-80.
- [16] 贾朋刚, 霍岩, 侯世璞, 等. Q500D 厚钢板及其焊接接头疲劳裂纹扩展速率试验对比研究[J]. 上海大中型电机, 2022(2): 32-35.
- JIA Peng-gang, HUO Yan, HOU Shi-pu, et al. Comparative Study on Endurance Crack Propagation Rate Test of Q500D Thick Steel Plate and Its Welded Joints[J]. Shanghai Medium and Large Electrical Machines, 2022(2): 32-35.
- [17] 尹汉军, 李达, 苏云龙, 等. 海洋工程焊接结构疲劳小裂纹扩展观察与表征[J]. 焊接技术, 2022, 51(5): 57-62.
- YIN Han-jun, LI Da, SU Yun-long, et al. Observation and Characterization of Fatigue Small Crack Propagation of Welded Structures in Marine Engineering[J]. Welding Technology, 2022, 51(5): 57-62.
- [18] 郝运富. 316L 换热器管头用 ERNiCrMo-3 焊接裂纹原因分析及预防措施研究[J]. 石油和化工设备, 2022, 25(11): 160-165.
- XI Yun-fu. Reason Analysis and Preventive Measures of Ernicrmo-3 Welding Crack for TP316L Heat Exchanger Tube Head[J]. Petro & Chemical Equipment, 2022, 25(11): 160-165.
- [19] 邹莹, 周晓松. 焊接接头疲劳裂纹扩展的数值模拟研究概述[J]. 机械设计与制造工程, 2022, 51(10): 1-5.
- ZOU Ying, ZHOU Xiao-song. Overview of Numerical Simulation Research on Fatigue Crack Propagation of Weld Joint[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2022, 51(10): 1-5.
- [20] 杨夏炜, 彭冲, 马铁军, 等. 高温合金线性摩擦焊接头疲劳裂纹扩展有限元分析[J]. 航空学报, 2022, 43(2): 625004.
- YANG Xia-wei, PENG Chong, MA Tie-jun, et al. Finite Element Analysis of Fatigue Crack Growth of Linear Friction Welded Superalloy Joints[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(2): 625004.

- [21] 沈言, 罗广恩, 蒋小伟, 等. 考虑焊接残余应力释放的结构疲劳寿命分析方法研究[J]. 船舶力学, 2021, 25(7): 935-945.
SHEN Yan, LUO Guang-en, JIANG Xiao-wei, et al. Fatigue Life Analysis Considering Welding Residual Stress Release[J]. Journal of Ship Mechanics, 2021, 25(7): 935-945.
- [22] 刘孟晗, 方正帅, 刘凤德, 等. 钛/钢异种材料激光焊接裂纹与微观组织分析[J]. 应用激光, 2021, 41(3): 474-480.
LIU Meng-han, FANG Zheng-shuai, LIU Feng-de, et al. Analysis of Microstructure and Cracks of Laser Welding Titanium/Steel Dissimilar Materials[J]. Applied Laser, 2021, 41(3): 474-480.
- [23] 白易山, 杨尚磊, 朱敏琪, 等. 6005 铝合金搭接接头组织及疲劳性能研究[J]. 上海工程技术大学学报, 2021, 35(1): 9-14.
BAI Yi-shan, YANG Shang-lei, ZHU Min-qi, et al. Study on Microstructure and Fatigue Properties of 6005 Aluminum Alloy Lap Joint[J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2021, 35(1): 9-14.
- [24] 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.
- [25] GOLDAK J, CHAKRAVARTI A, BIBBY M. A New Finite Element Model for Welding Heat Sources[J]. Metallurgical Transactions B, 1984, 15(2): 299-305.
- [26] GADALLAH R, OSAWA N, TANAKA S. Evaluation of Stress Intensity Factor for a Surface Cracked Butt Welded Joint Based on Real Welding Residual Stress[J]. Ocean Engineering, 2017, 138: 123-139.

责任编辑: 刘世忠