

试验与研究

基于XFEM的X80管线钢焊接接头 三维裂纹萌生扩展仿真分析*

张锦刚^{1,2}, 晁利宁^{1,2}, 李远征^{1,2}, 周新义^{1,2},
唐家睿^{1,2}, 陈浩明^{1,2}, 韦 奉^{1,2}

(1. 中油国家石油天然气管材工程技术研究中心有限公司, 西安 710018;
2. 中国石油宝鸡石油钢管有限责任公司, 陕西 宝鸡 721008)

摘 要: 利用有限元软件ABAQUS, 以X80管线钢不同坡口形式的焊接接头为研究对象, 基于扩展有限元方法(XFEM), 对X形和V形两种不同形式坡口的焊接接头在拉伸载荷下的裂纹扩展形态进行数值模拟分析。结果表明, 裂纹尖端首先出现了应力集中, 应力分布趋势与理论计算的塑性区形状大致相同。利用XFEM方法模拟裂纹尖端自由扩展, X形坡口和V形坡口的焊接接头裂纹首先出现在焊缝并靠近熔合线处, 且二者的扩展路径一致, 在相同条件下, X形坡口的焊接接头焊缝处最先出现裂纹, V形坡口的焊接接头焊缝处裂纹出现的时间较X形坡口出现裂纹的时间晚。

关键词: X80管线钢; 焊接接头; 裂纹扩展; XFEM; 应力集中

中图分类号: TG406

文献标识码: A

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2024.01.004

Simulation Analysis of Three-dimensional Crack Propagation of X80 Pipeline Steel Welded Joint Based on XFEM

ZHANG Jingang^{1,2}, CHAO Lining^{1,2}, LI Yuanzheng^{1,2}, ZHOU Xinyi^{1,2},
TANG Jiarui^{1,2}, CHEN Haoming^{1,2}, WEI Feng^{1,2}

(1. Chinese National Engineering Research Center for Petroleum and Natural Gas Tubular Goods Co., Ltd.,
Xi'an 710018, China; 2. CNPC Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Baoji 721008, Shaanxi, China)

Abstract: The crack propagation morphology of welded joints with X groove and V groove under tensile load is numerically simulated and analyzed using extended finite element method (XFEM) by ABAQUS, taking welded joints of X80 pipeline steel with different groove forms as the research object. The results show that the stress concentration first appears at the crack tip, and the stress distribution trend is roughly the same as the shape of the plastic zone calculated theoretically. The XFEM method was used to simulate the free propagation of crack tip. The crack of the welded joint of X groove and V groove first appeared at the weld and close to the fusion line, and the propagation path of both was the same. Under the same conditions, the crack appeared first at the welded joint of X groove, and the crack appeared later at the welded joint of V groove than at the X groove.

Key words: X80 pipeline steel; welded joint; crack growth; XFEM; stress concentration

0 前 言

随着石油天然气需求的不断增加, X80管线

钢成为目前应用量最大的高强度管材^[1]。其具有高强度、高韧性、焊接性能好、经济效益高等优点, 并在长距离、高压等恶劣条件具有良好的

*基金项目: 中国石油集团公司重大科技攻关项目“自动化与高效钻完井新装备新工具研制”(项目编号2020B-4020)。

服役能力。在应用过程中，X80管线钢焊接接头是否能够安全使用，关键是如何控制裂纹的产生^[2]。

管线钢管焊接接头在服役过程中易发生延性损伤与断裂。由于焊接接头的断裂过程涉及到材料、力学、腐蚀环境等因素的共同作用，情况复杂，采用固体力学理论直接求解焊接接头不均匀性问题比较困难，多数情况下要进行简化处理或借助于实验进行分析，而详尽的应力应变分析要采用数值方法进行求解。

传统的有限元法在分析含裂纹等缺陷结构时，在裂纹面和裂纹尖端必须划分高密度的网格，在裂纹扩展过程中需要不断重新划分，才能使单元边界与结构几何的不连续达到一致，但是这种网格划分方式会导致结构计算量大、计算效率低。21世纪以来，Duan^[3]采用扩展有限元法（即XFEM），通过不断更新裂纹尖端扩展区域，解决了这种几何不连续的问题。通过引入跳跃函数和渐进场函数，使几何裂纹与有限元网格划分相互独立。2012年，Haboussa^[4]运用XFEM研究了三维动态裂纹与孔洞之间的关系，分析证明，运用XFEM分析复杂的一些三维裂纹有其独特的优点。该方法不但拥有不需要在裂纹尖端高应力应变区进行高密度网格划分，而且在扩展过程中无需预先指定路径和重复划分网格^[5]。

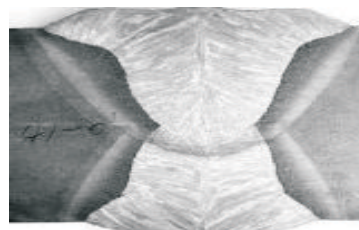
本研究基于XFEM的方法，针对X形坡口和V形坡口的焊接接头，在无预制裂纹的情况下施加拉力，使得焊接接头产生裂纹，并在拉力的持续作用下裂纹朝任意方向扩展。通过模拟焊接接头的断裂过程，做出断裂过程中载荷位移曲线，计算出拉伸极限载荷，研究结果对于焊接接头延性断裂行为预测和结构安全评定具有一定的指导意义。

1 有限元分析

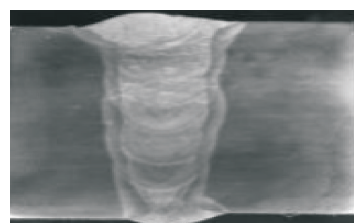
1.1 分析对象

研究对象为X形坡口和V形坡口的500 mm×500 mm×21.4 mm的焊接接头平板，材质为X80。焊接接头如图1所示，通过拉伸试验得

到的材料性能参数见表1。



(a) X形坡口



(b) V形坡口

图1 不同焊接接头坡口形式

表1 试验用X80材料性能参数

部位	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
管体	662	704	203	0.3
焊缝	672	735	221	0.3

1.2 基本假设

根据弹性力学理论，空间的三维物体可以按照其形状和受力情况按平面问题进行处理，具体分为平面应力、平面应变问题。本次模拟需要对焊接接头进行简化^[6]：①将焊接接头简化为不考虑热影响区和界面融合区材料，只考虑母材和焊缝的复合结构；②为了避免拉伸载荷对裂纹尖端应力应变场产生影响，宽板拉伸试样应该有足够的长度。

1.3 网格剖分

采用XFEM即扩展有限元法进行网格划分，如图2所示。本研究裂纹的扩展路径以及所需极限载荷，选用线性减缩积分C3D8R单元^[7]。由于裂纹尖端附近的单元尺寸会对数值模拟结果产生较大的影响，为了保证含裂纹缺陷的结构分析稳定性和结果的精确性，单元尺寸^[8]应满足

$$H \leq \frac{G_c E}{10(1 - \nu^2)\sigma_0} \quad (1)$$

式中： H ——沿裂纹扩展方向的单元尺寸；

G_c ——界面裂纹临界应变能释放率；

E ——弹性模量；

ν ——泊松比；

σ_0 ——拉伸强度。

根据以上原则，网格划分采用统一尺寸，不需要刻意细化裂纹尖端附近的网格，这是XFEM的优势所在。

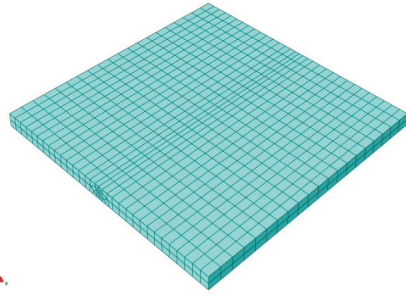


图2 焊接接头平板网格划分

1.4 边界条件及载荷施加

在平板两端建立参考点，并建立约束方程，使参考点与被约束区域在某一方向的运动保持一致，在参考点上施加空间约束和受力载荷，得出历史输出参考点在裂纹扩展过程中的载荷和位移情况。计算中打开几何非线性，保证计算的收敛性和结果的准确性。

2 基于XFEM的裂纹扩展准则

XFEM中的裂纹扩展准则，包含初始损伤准则和损伤演化准则^[9]。对受力结构所划分的无限小单元进行应力应变分析，单元中主面剪应力为零，最大主应力 $\sigma_{\max ps}$ 为垂直于主面的应力最大值。

根据Orowan理论^[10]，在裂纹扩展过程中，金属中裂纹扩展释放的变形能既用于表面能，又用于裂纹扩展前的塑形变形。应变能释放率 G_I 、 G_{II} 、 G_{III} ，它反映了材料的抗断能力，称为断裂韧度^[11]。利用POWER准则判断裂纹是否会失稳并扩展。

$$\frac{G_{\text{equiv}}}{G_{\text{equivc}}} = \left(\frac{G_I}{G_{IC}} \right)^{a_n} + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}} \right)^{a_n} + \left(\frac{G_{III}}{G_{IIIC}} \right)^{a_0} \quad (2)$$

式中： G_{equiv} ——等效应变能释放率；

G_{equivc} ——临界等效应变能释放率；

G_I 、 G_{II} 、 G_{III} ——应变能释放率；

G_{IC} 、 G_{IIC} 、 G_{IIIC} ——临界应变能释放率；

a_n 、 a_n 、 a_0 ——常数。

裂纹尖端高应力应变会引起裂纹的扩展，因此利用最大主应力准则判断新裂纹是否萌生^[12]。当断裂指标 f 在一定误差 f_{tol} 达到1时，裂纹开始萌生，即

$$1.0 \leq f \leq 1.0 + f_{\text{tol}} \quad (3)$$

其中，断裂指标 f 可以表示为

$$f = \frac{\langle \sigma_{\max} \rangle}{\sigma_{\max}^0} \quad (4)$$

3 结果分析

3.1 不同坡口焊接接头的裂纹扩展

无预制裂纹的X形坡口和V形坡口焊接接头在拉伸载荷作用下，由于应力集中产生裂纹萌生，并在载荷不断增大的情况下进行扩展。图3所示为X形坡口焊接接头在拉伸条件下，裂纹在扩展过程中的形态变化。从图3可以看出，XFEM在模拟裂纹扩展时可以穿透单元，裂纹区域由真实裂纹（红色）和粘性裂纹（青色）组成。在时间步 $t=0$ s时，结构未受到载荷的作用，无裂纹产生。在时间步 $t=0.68$ s时，随着拉伸载荷的不断增大，焊缝上出现了应力集中，并且裂纹尖端的应力达到了最大主应力，裂纹尖端产生损伤并形成粘性裂纹，不断增大拉伸载荷，裂纹进行扩展，扩展方向与最大主应力垂直。在时间步 $t=0.7$ s时，裂纹尖端附近粘性裂纹的能量释放率达到了临界值 G_{Ic} ，粘性裂纹将完全分离，变为真实裂纹。

图4是V形坡口焊接接头裂纹在扩展过程中的形态变化。从图4可以看出，V形坡口裂纹在扩展过程中的裂纹的扩展与X形坡口的裂纹扩展路径一致。且应力集中在焊缝处，都从焊缝接近熔合线处进行启裂。随着时间步长的进行，裂纹从平板两端启裂，向平板中心进行扩展，V形裂纹扩展到 $t=0.9$ s时裂纹完全穿透平板。在整个裂纹扩展过程中，没有预制裂纹，裂纹由于应力集中产生并自由扩展，可以看到裂纹的路径不是一条直线。

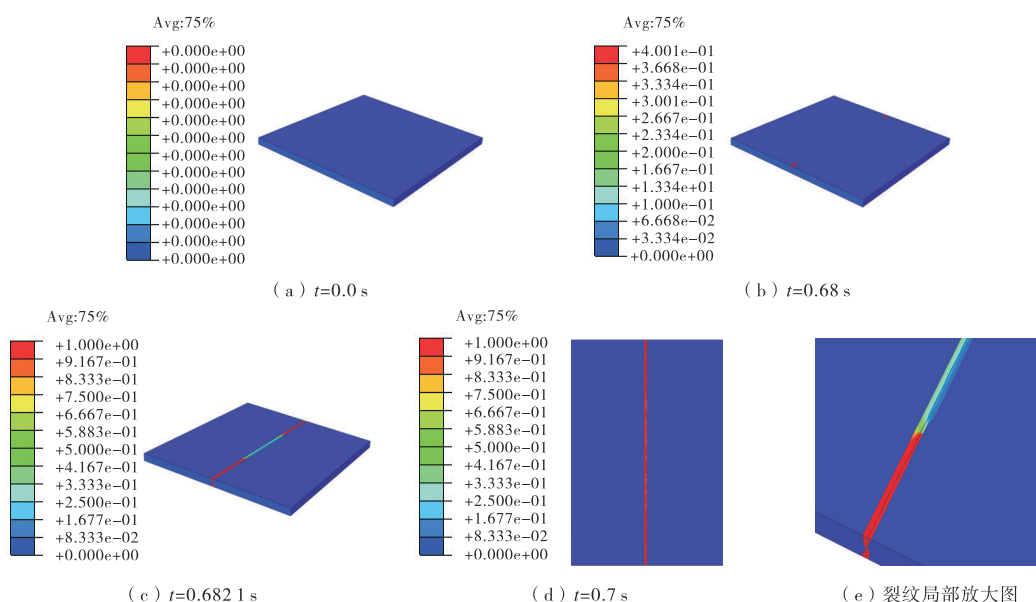


图3 X形坡口焊接接头裂纹在扩展过程中的形态变化

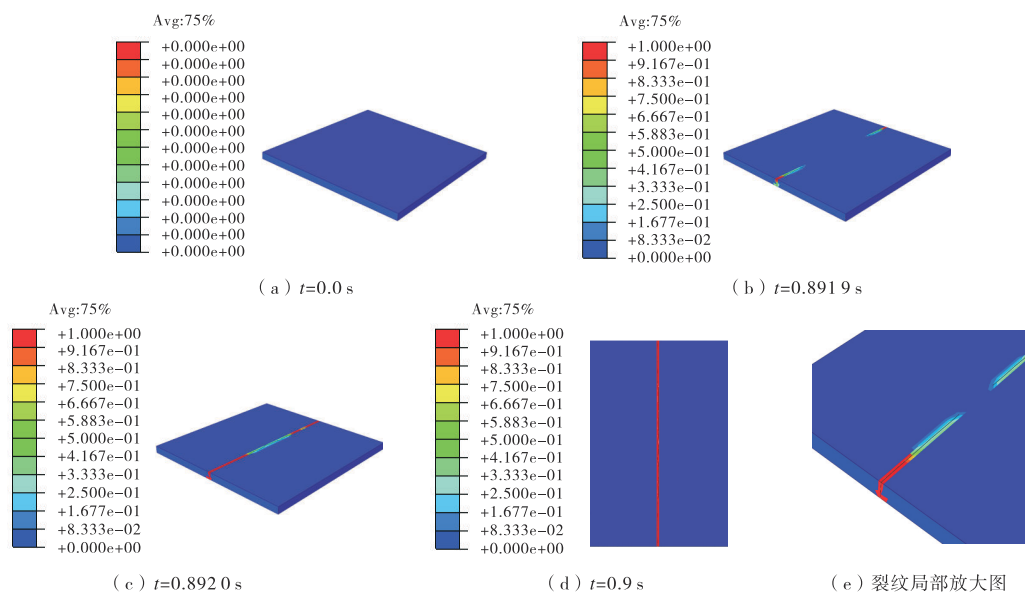


图4 V形坡口焊接接头裂纹在扩展过程中的形态变化

3.2 不同坡口焊接接头裂纹扩展 MISES 应力

图5是X形坡口裂纹扩展过程中裂纹尖端区域不同分析步时间所对应的MISES应力云图。从图5可以看出, $t=0.6819$ s时, X形坡口焊缝的应力集中明显, 应力最大值为712 MPa, 已经达到初始损伤准则中的预设值, 焊接接头开始萌生裂纹, 裂纹出现在焊缝偏熔合线处, 由于均匀拉伸, 因此焊缝两端均出现对称裂纹, 并且随着拉力的增大, 裂纹先出现在焊缝表面, 再往深度方向扩展。随着裂纹的失稳扩展, 裂纹尖端的应力得以释放, 应力值迅速减小, 当载荷继续增大,

上述过程一直持续到结构最终断裂。

X形坡口焊接接头裂纹形态如图6所示, 拉伸载荷从0开始不断增加, 当裂纹尖端的能量释放率达到裂纹扩展阻力 G_c 时, 裂纹尖端处的粘接裂纹开始扩展并形成了真实裂纹, 单元损伤达到临界值, 焊接接头开始失效, 裂纹失去平衡, 开始失稳扩展, 真实裂纹形成并不断扩展。图6(a)~图6(c)的过程是裂纹的萌生过程, 图6(d)裂纹失稳扩展, 焊接接头失效。

从图6所示MISES应力分布可以看出, 裂纹尖端首先出现了应力集中, 当裂纹尖端附近的应力

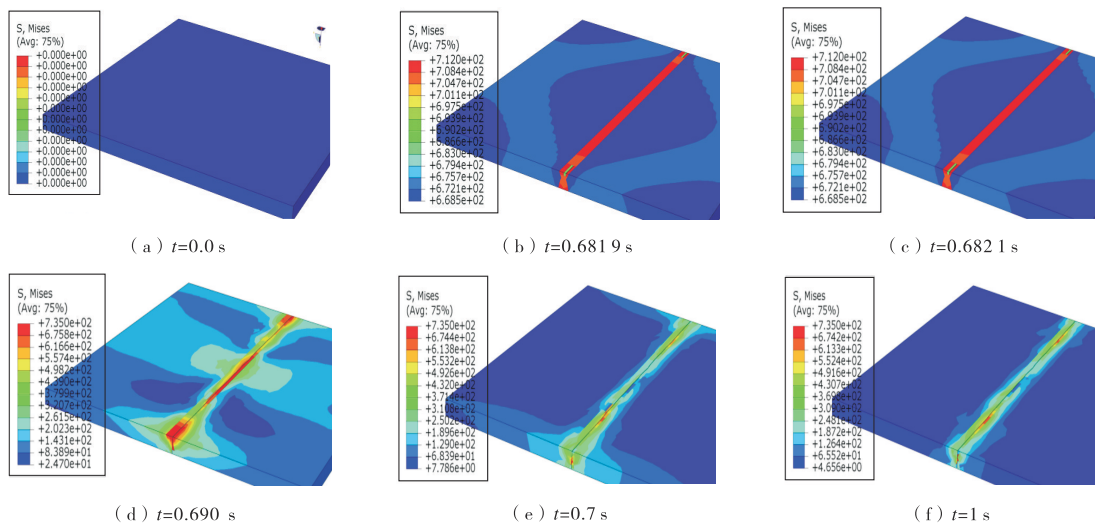


图5 X形坡口焊接接头MISES应力分布

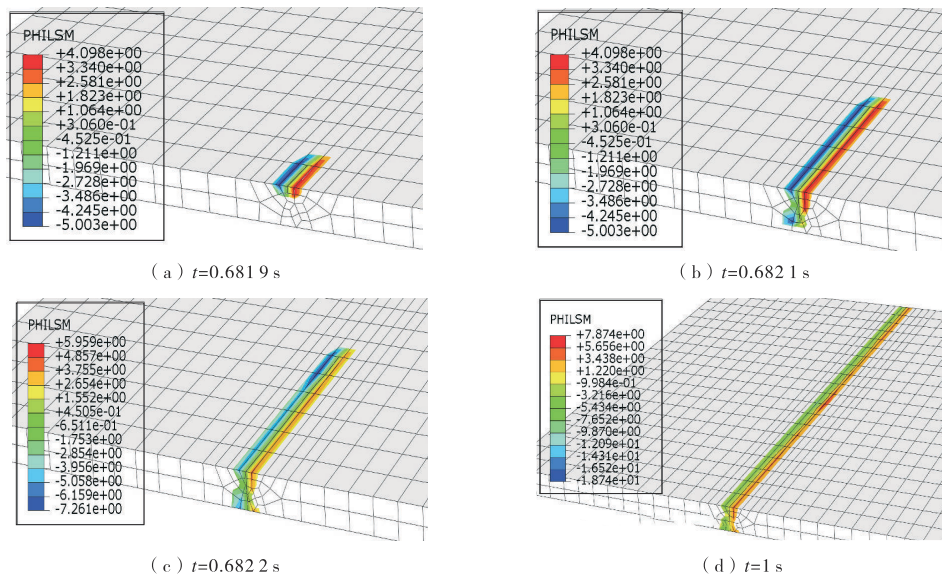


图6 X形坡口焊接接头裂纹形态分布

增大到材料的屈服强度时,就会在围绕裂纹尖端处形成一个小塑性区,这是和断裂力学理论符合的。观察裂纹附近的应力场分布,如图6(d)所示,可以看出应力分布趋势与理论计算的塑性区形状大致相同。理论计算的塑性区形状如图7所示。

图8为V形坡口裂纹扩展过程中裂纹尖端区域不同分析步时间所对应的MISES应力云图。从图8可以看出, $t=0.8919\text{ s}$ 时, V形坡口的焊接接头焊缝的应力明显集中, 应力最大值为 712 MPa , 已经达到初始损伤准则中的预设值, 焊接接头开始萌生裂纹, 跟X形坡口一样, 裂纹出现在焊缝偏熔合线处, 由于均

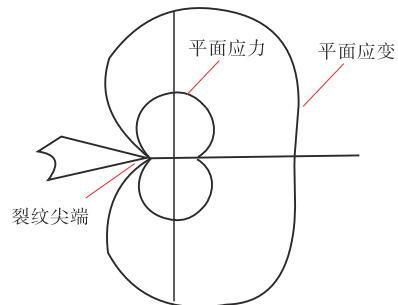


图7 根据米塞斯屈服准则得到塑性区形状

匀拉伸, 因此焊缝两端均出现对称裂纹, 并且随着拉力的增大, 裂纹先出现在焊缝表面, 再往深度方向扩展。随着裂纹的失稳扩展, 裂纹尖端的应力得以释放, 应力值迅速减小,

当载荷继续增大,上述过程一直持续到结构最终断裂。不同的是X形坡口的焊接接头在时间步0.681 9 s时裂纹开始萌生,也就是说在相同拉伸条件下,X形坡口的焊接接头先开始萌

生裂纹,原因是X形坡口较V形坡口尖角较多、形状复杂、容易产生应力集中,而裂纹最先从应力集中的地方萌生,并且扩展,因此X形坡口的焊接接头最先产生裂纹。

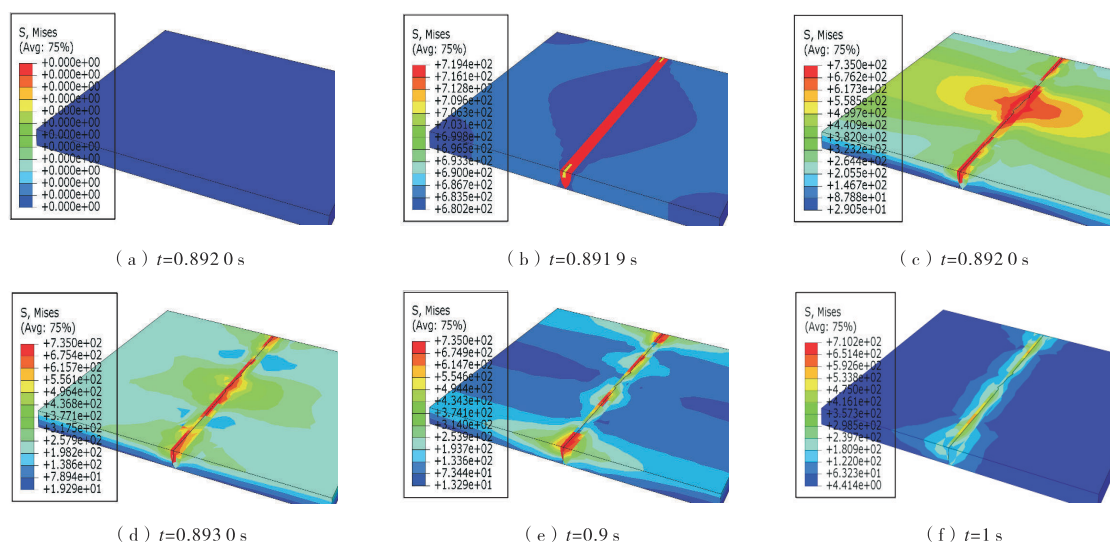


图8 V形坡口焊接接头MISES应力分布

V形坡口焊接接头裂纹形态如图9所示,载荷从0开始不断增加,随着裂尖的能量释放率达到裂纹扩展阻力 G_c ,裂尖处的粘接裂纹开始扩展形成真实裂纹,裂尖处的单元损伤达到临界值,焊接接头开始失效,裂纹失去平衡,开始失稳扩展,

真实裂纹形成并不断扩展。图9(a)~图9(d)的过程是裂纹的萌生过程,图9(e)中裂纹失稳扩展,焊接接头失效,与X形坡口的焊接接头相比,V形坡口的焊接接头裂纹萌生和扩展的时间比较靠后。

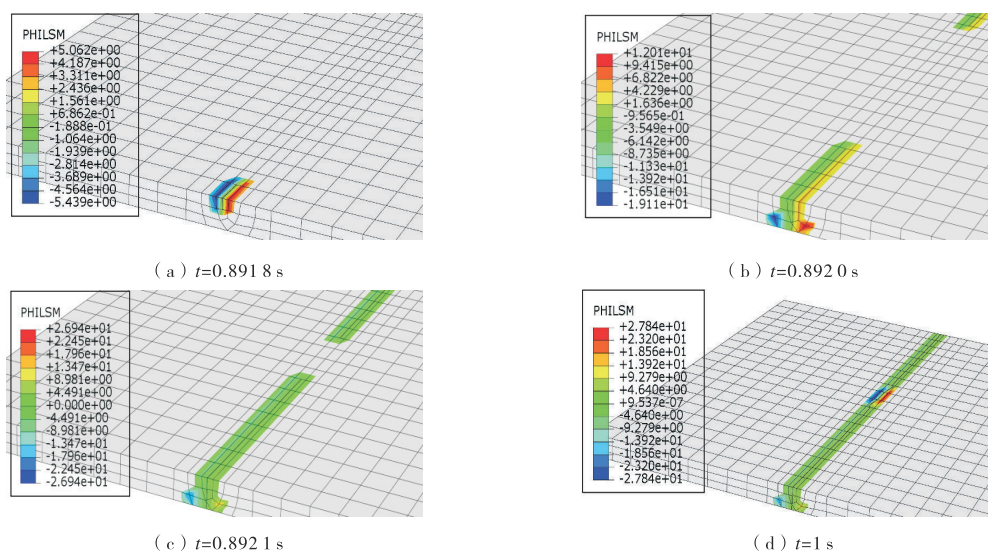


图9 V形坡口焊接接头裂纹形态分布

3.3 不同坡口焊接接头裂纹扩展的载荷-位移曲线

图10所示为两种坡口焊接接头的载荷-位移曲线。X形坡口的焊接接头位移小于0.78 mm之前,平板两端受到的拉力随着载荷的增加而缓慢

增大,呈现线性变化。当位移超过上述值时,加载点受到的力趋于平衡,裂纹在发生塑性变形,并且载荷在逐渐增大,但是增大的幅度不大,最大载荷为715 kN。当位移超过2.045 6 mm后,载

荷迅速减小,裂纹开始失稳扩展,直到模型完全断裂。V形坡口的焊接接头位移小于0.807 mm之前,平板两端受到的拉力随着载荷的增加而缓慢增大,呈现线性变化,这个趋势跟X形坡口的焊接接头趋势一致。当位移超过上述值时,加载点受

到的力趋于平衡,裂纹在发生塑性变形,并且载荷在逐渐增大,但是增大的幅度不大,最大载荷为723 kN,比X形坡口所需的最大载荷要大。当位移超过3.567 3 mm后,载荷迅速减小,裂纹开始失稳扩展,直到模型完全断裂。

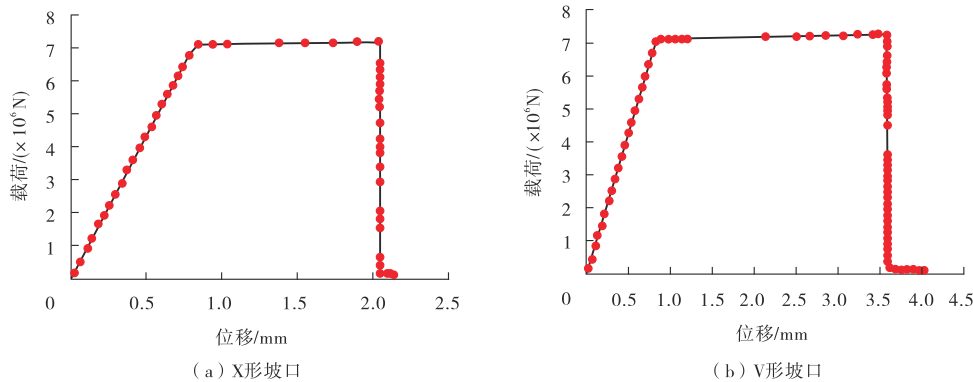


图10 不同坡口焊接接头的载荷-位移曲线

4 结 论

(1) 基于XFEM扩展有限元法计算了由于应力集中造成的裂纹萌生、扩展过程,裂纹尖端首先出现了应力集中,应力分布趋势与理论计算的塑性区形状大致相同。

(2) 利用XFEM方法模拟裂纹尖端自由扩展,X形坡口和V形坡口的焊接接头裂纹首先出现在焊缝并靠近熔合线处,且二者的扩展路径一致。

(3) 在相同条件相同的拉伸载荷下,X形坡口的焊接接头焊缝处最先出现裂纹,且其所需的最大拉力为715 kN,V形坡口的焊接接头焊缝处裂纹出现的时间较X形坡口出现裂纹的时间晚,且其所需要的最大拉伸载荷为723 kN。

参考文献:

- [1] 胡少伟,米正祥.基于扩展有限元法的混凝土裂缝扩展过程数值模拟[J].水利学报,2014(增刊1):51-56.
- [2] 彭英,杨平,柯叶君.基于XFEM的平板斜裂纹动态扩展数值模拟[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2019,43(2):222-225.
- [3] DUAN Q, SONG J H, MENOILLARD T, et al. Element-local level set method for three-dimension dynamic crack growth [J]. International Journal for Numerical Methods in

Engineering,2009,80(12):1520-1543.

- [4] HABOUSSA D, GREGOIRE D. XFEM analysis of the effects of holes or other cracks on dynamic crack propagations [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2011,86(1):618-636.
- [5] 陈先锋,张立军,张德培,等.基于XFEM的加载参数对棒料V型槽尖端起裂影响规律[J].塑性工程学报,2018,25(4):254-261.
- [6] 底月兰,王海斗,董丽虹.扩展有限元法在裂纹扩展问题中的应用[J].材料导报,2017,31(3):70-74.
- [7] 晁利宁,刘云,苑清英,等.特殊螺纹接头弹塑性有限元模拟与试验研究[J].塑性工程学报,2020,27(10):156-164.
- [8] 李卧东,王元汉,陈晓波.无网格法在断裂力学中的应用[J].岩石力学与工程报,2001,20(4):462-466.
- [9] 张行.断裂与损伤力学[M].北京:北京航空航天大学出版社,2006.
- [10] 张彦华.焊接力学与结构完整性原理[M].北京:北京航空航天大学出版社,2006.
- [11] 解德,钱勤,李长安.断裂力学中的数值计算方法及工程应用[M].北京:科学出版社,2009.
- [12] 赵治枢.复合型裂纹扩展的应变能准则[J].固体力学学报,1987(1):65-69.

作者简介:张锦刚(1977—),男,教授级高级工程师,主要研究方向为焊接材料开发和焊接工艺。

收稿日期:2023-03-02

修改返回日期:2023-11-11

编辑:黄蔚莉