

# 温度对焊接热模拟 X80 管线钢断裂韧性的影响

徐杰, 李朋朋, 樊宇, 孙智

(中国矿业大学 材料科学与工程学院, 江苏 221116)

**摘要:** 通过试验和 3D 有限元模拟相结合的方法分析了焊接热模拟 X80 管线钢在不同温度( -90, -60, -30 和 0 ℃)下的断裂韧度。文中选取标准三点弯曲试样在不同温度下进行断裂韧度测试, 同时对测试件进行三维有限元实体建模与分析计算。结果表明, X80 管线钢的断裂韧性随温度降低显著减小, 并使其倾向于脆性断裂。材料在不同温度下的真实应力—应变曲线行为从光滑拉伸到断裂力学试样具有良好的可传递性, 温度对材料的硬化行为没有明显影响, 有限元计算的结果表明, 应用该方法可以准确地计算 X80 钢焊接热影响区不同温度下的 CTOD 值。

**关键词:** 焊接热模拟; X80 管线钢; 断裂韧性; 有限元分析

中图分类号: TG 407 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2017)01-0022-05

## 0 序 言

X80 管线钢作为新一代高强度级别钢, 具有良好的抗延性断裂能力。但随着温度降低, 管线钢的塑性和韧性也随着温度的降低而下降, 构件的断裂行为也由韧性断裂向脆性断裂发生转变, 从而大大降低了管线钢的服役安全性能<sup>[1,2]</sup>。同时, 管线钢焊接过程中形成的热影响区(heat-affected zone, HAZ), 尤其是粗晶粒区(coarse-grained HAZ, CGHAZ), 其微观组织分布不均匀, 且具有高的局部化特征, 使得该区域力学性能变差, 容易形成诱发裂纹的局部脆性区, 往往是整个焊接结构的薄弱地带<sup>[3]</sup>。由于这一区域相对狭窄, 因此测量其韧性有许多困难, 而焊接热模拟技术为解决这一问题提供了有效的途径。大量热模拟试样与实际焊接试样对比分析表明, 目前已有的热模拟方法得到的 HAZ 和实际焊接过程得到的 HAZ 在组织和性能上具有良好的一致性<sup>[4]</sup>, 以往的分析结果表明, 通过应用焊接热模拟方法与对实际焊接件在韧/脆转变下转移区(lower transition)的断裂行为进行预测的结果非常吻合<sup>[5]</sup>。

文中分析的主要目的是考查温度对焊接热模拟 X80 管线钢在韧/脆转变区断裂韧度的影响。分析中采用试验测试和三维有限元模拟相结合。将 X80 管线钢加工成标准的单边缺口弯曲(single edge notched bending, SENB)断裂力学试样, 并应用焊接

模拟技术在裂纹尖端附近区域制备 X80 钢的粗晶热影响区(CGHAZ); 在不同温度下, 即: -90, -60, -30 和 0 ℃, 对测试件分别进行 CTOD(即裂纹尖端张开位移)断裂韧度测试; 同时对测试件进行三维有限元实体建模, 并计算其在不同温度下的 CTOD 值; 对试验测试结果和有限元模拟计算的结果进行比较分析, 为 X80 高级钢管线钢的断裂韧性评估提供依据和参考。

## 1 CTOD 断裂韧性测试

### 1.1 试验材料

试验所用材料为 X80 管线钢, 外径为 510 mm, 厚度为 14.6 mm, 其典型的名义成分如表 1 所示。

表 1 X80 钢的名义化学成分(质量分数, %).

Table 1 Chemical compositions of X80 steel

C	Si	Mn	P	S	其它
0.04~0.07	~0.25	≤1.8	≤0.01	≤0.001	Mo, Ni, Cu, Ti, Nb, V, Al

### 1.2 焊接热模拟

焊接热模拟技术是分析焊接热循环对 HAZ 组织和性能影响最为有力的手段, 即采用焊接热模拟设备, 根据工况条件改变焊接热循环参数, 从而考查 HAZ 的组织演变和性能变化。

由于单道焊中形成的粗晶热影响区是韧性最为薄弱的环节, 尤其在韧/脆转变区, 其对构件整体性能的发挥具有至关重要的影响。文中的目的旨在分析焊接热模拟 X80 管线钢 CGHAZ 在韧/脆转变区

的断裂韧性,分析中首先采用焊接热模拟设备对试样进行单次热循环,具体工艺是将试样加热至1350℃后冷却15 s( $\Delta t_{8/5}$ ). 图1给出了热模拟过程的热循环曲线.

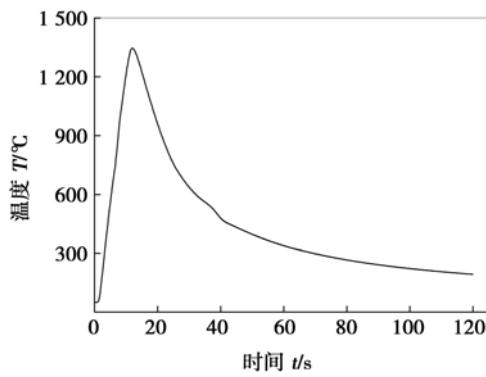


图1 焊接热模拟的热循环曲线

Fig. 1 Whole temperature vs. time history applied during weld thermal simulation

### 1.3 真实应力应变曲线

焊接热模拟X80管线钢粗晶热影响区的真实应力—应变曲线通过光滑拉伸棒在不同温度下进行拉伸测试得到名义应力应变曲线,后经计算而得到,结果如图2所示.由结果可知材料的屈服强度随温度降低而升高,可见温度对材料的硬化行为没有明显的影响.

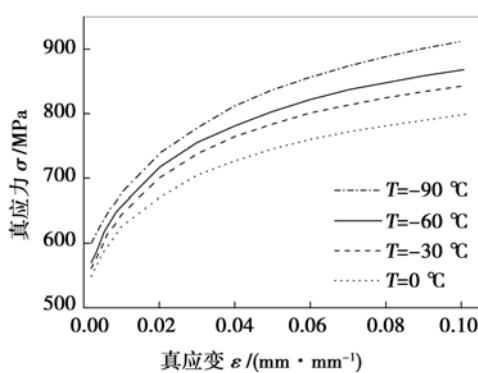


图2 X80钢焊接热影响区不同温度下真实应力-应变曲线  
Fig. 2 True stress-strain curves of X80 at various temperatures

### 1.4 试样几何尺寸及测试方法

文中选取标准SENB断裂力学试样进行测试,所有试样均直接取自X80管线钢,取样方向为取试样长度方向平行于管子的轴向方向,试样中裂纹沿管壁厚度方向扩展.试样几何尺寸如图3所示,所

有试样的厚度( $B$ )和宽度( $W$ )均取为10 mm.对于SENB试样,根据标准规定取其裂纹大小( $a$ )与试样宽度( $W$ )比为 $a/W = 0.5$ ,加载跨距( $S$ )与宽度比为 $S/W = 4$ ,同时按照英国标准金属 $K_{IC}$ ,临界 $CTOD$ 值和 $J$ 积分值的测试方法BS7448:1991—Part I<sup>[6]</sup>的三点弯曲标准试样加工并进行断裂韧度测试.所有试件在加工成规定的尺寸后,预制疲劳裂纹以备接下来的断裂韧度测试.

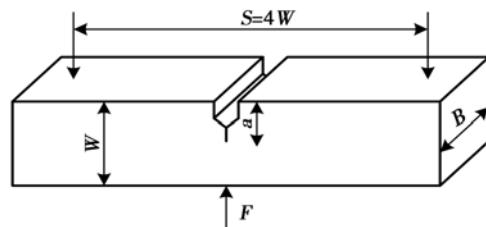


图3 SENB试样几何尺寸示意图

Fig. 3 Schematic plot of specimen geometry for SENB

试验中对焊接热模拟X80管线钢断裂力学试样在不同温度下分别进行三点弯曲测试.采用一次加载模式直至试样失稳破坏,加载速率控制在0.5 mm/min,试验过程中自动记录载荷 $F$ 和位移(即试样裂纹嘴张开位移,crack mouth opening displacement, CMOD)曲线.低温试验箱经液氮冷却,温度分别控制在-90,-60,-30和0℃(温度控制在误差为±2℃)以备测试.每个温度分别进行10个试样的平行测试.

试件失稳破坏后,将其在低温下快速压断,对断口清洁处理后,用光学显微镜测量试件的初始裂纹长度 $a_0$ 和裂纹长度 $a$ ,由此计算出裂纹扩展量 $\Delta a$ .测量的具体方法是:根据标准BS7448,沿试样厚度方向取9个测试位置分别测量,其中最外侧两个点位于距试样表面1% $B$ 处,然后在这两个点之间等间距地取7个测试位置,裂纹长度按下列公式进行计算,即

$$a_0 = \frac{1}{8} \left( \frac{a_{01} + a_{09}}{2} + \sum_{i=2}^{i=8} a_{0i} \right) \quad (1)$$

$$a = \frac{1}{8} \left( \frac{a_1 + a_9}{2} + \sum_{i=2}^{i=8} a_i \right) \quad (2)$$

$$\Delta a = a - a_0 \quad (3)$$

裂纹尖端张开位移根据标准BS7448由试验测得的载荷-位移(即 $F$ -CMOD)曲线上的最大载荷 $F$ (N)和对应最大载荷时的塑性张开位移 $V_p$ (mm)按BS7448 Part I中的下式(4)进行 $CTOD$ 值的计算,即

$$\delta_0 = \left[ \frac{FS}{BW^{1.5}} \times f\left(\frac{a_0}{W}\right) \right]^2 \frac{(1-\nu^2)}{2R_{el}E} + \frac{0.4(W-a_0)V_p}{0.6a_0+0.4W+z} \quad (4)$$

式中: $E$ 为弹性模量,(MPa); $\nu$ 为泊松比; $R_{el}$ 为屈服强度; $f(a_0/W)$ 为几何形状因子,可根据 $a_0/W$ 的数据直接查表得到.

## 2 有限元模型

文中采用ABAQUS V6.10有限元软件针对试验测试的断裂力学试样,即SENB试样进行三维有限元实体建模分析与计算.由于试样几何模型具有对称性,因此仅取试样的四分之一进行建模.图4给出了SENB试样的3D有限元模型(1/4模型)及其裂纹尖端网格划分,模型采用八节点六面体全积分单元(ABAQUS有限元单元类型均为C3D8),共分11450个单元,13497个节点.同时,在有限元计算中考虑采用钝化的初始裂纹缺口模型,即裂纹前端具有半径为0.002 mm的初始缺口,从而消除裂纹尖端应力场的奇异性,更符合实际裂纹尖端应力场的分布情况.

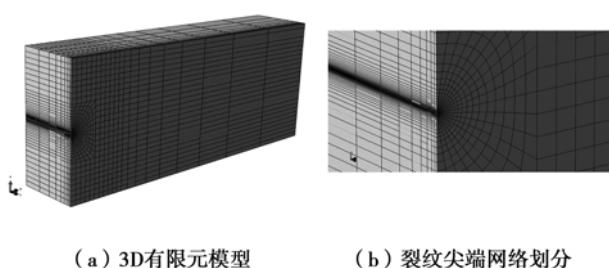


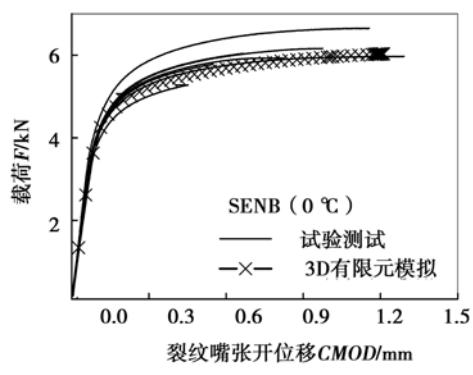
图4 3D有限元模型及其裂纹尖端网格划分

Fig. 4 3D finite element model and mesh arrangement around crack tip

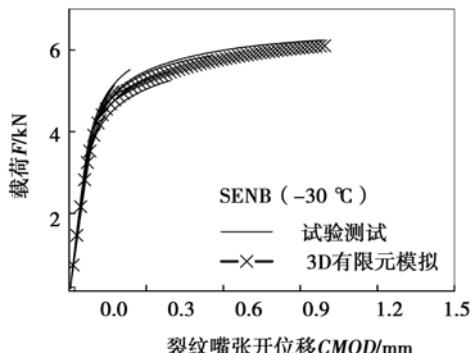
## 3 结果分析与讨论

### 3.1 载荷位移曲线

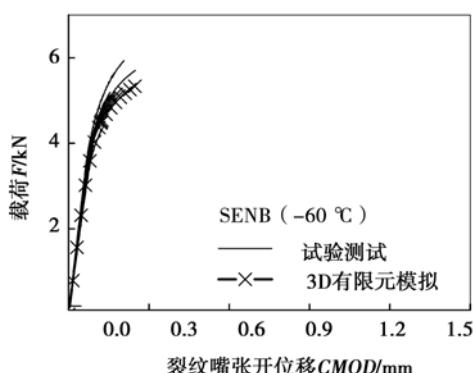
图5给出了通过试验测试和3D有限元模拟计算得到的SENB试样在不同温度下的 $F-CMOD$ 曲线.由结果可知,各温度下SENB试样有限元模拟计算得到的结果与试验测试结果非常吻合.另外,对比计算和测试得到的 $F-CMOD$ 曲线可以看出,所分析材料在不同温度下的真实应力-应变曲线从光滑拉伸棒到断裂力学试样的传递性非常好,亦即将由光滑拉伸棒测试得到的真应力应变曲线作为材料的本构输入到断裂试样的计算过程中,可对试样的拉伸力学行为进行准确地描述.



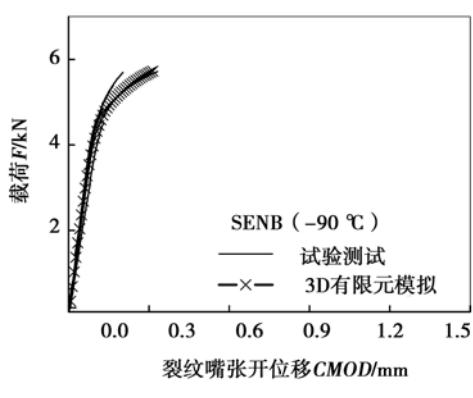
(a) 0 °C



(b) -30 °C



(c) -60 °C



(d) -90 °C

图5 不同温度下测试和计算得到的载荷-位移曲线

Fig. 5 Measured and calculated  $F-CMOD$  curves at various temperatures

由试验结果可知,材料在低温下变得非常脆,如温度为-90和-60℃,由测试样断口形貌可见断裂面非常平整,并且从光学显微镜下观察没有发现明显的裂纹扩展。试样在-30和0℃时,仅观察到少量的裂纹扩展现象( $\Delta a < 0.2$  mm)。文中为了便于比较且易于进行三维有限元建模与计算,所使用的3D模型中并未考虑裂纹扩展的影响。另外,这里需要说明的是,每个温度下模型中试样裂纹大小均取10个平行试样所具有的初始裂纹大小的平均值进行3D有限元建模分析与计算。

### 3.2 不同温度下测试的断裂韧度值

图6给出了不同温度下测试得到的 $CTOD$ 值。由结果可知,温度对断裂韧性有明显地影响,随着温度降低断裂韧性显著减小,并使钢材由延性断裂向脆性断裂转变。另外,不同温度下测得的断裂韧度值均具有一定的分散性,且分散程度随温度升高明显增大,这可能是由于温度较高时解理断裂的起裂是由韧性裂纹扩展而引起的,关于该问题还有待于进一步分析。

### 3.3 $CTOD-CMOD$ 曲线

由3.1小节的结果可知,文中建立的三维有限

元模型可以准确地计算断裂试样在不同温度下的 $F-CMOD$ 曲线,针对有限元模拟计算得到局部断裂参量,即 $CTOD$ 值进行对比分析,这里采用 $CTOD-CMOD$ 曲线进行比较说明,结果见图7所示。对于SENB试样,3D有限元模拟可以准确地计算试样在不同温度下的 $CTOD$ 值,这对于X80高强度级别钢焊接热影响区测试困难的问题提供了非常有效且准确的分析方法。

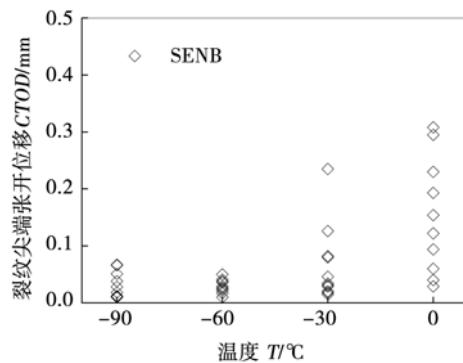


图6 不同温度下测试得到的 $CTOD$ 值

Fig. 6 Measured  $CTODs$  at various temperatures

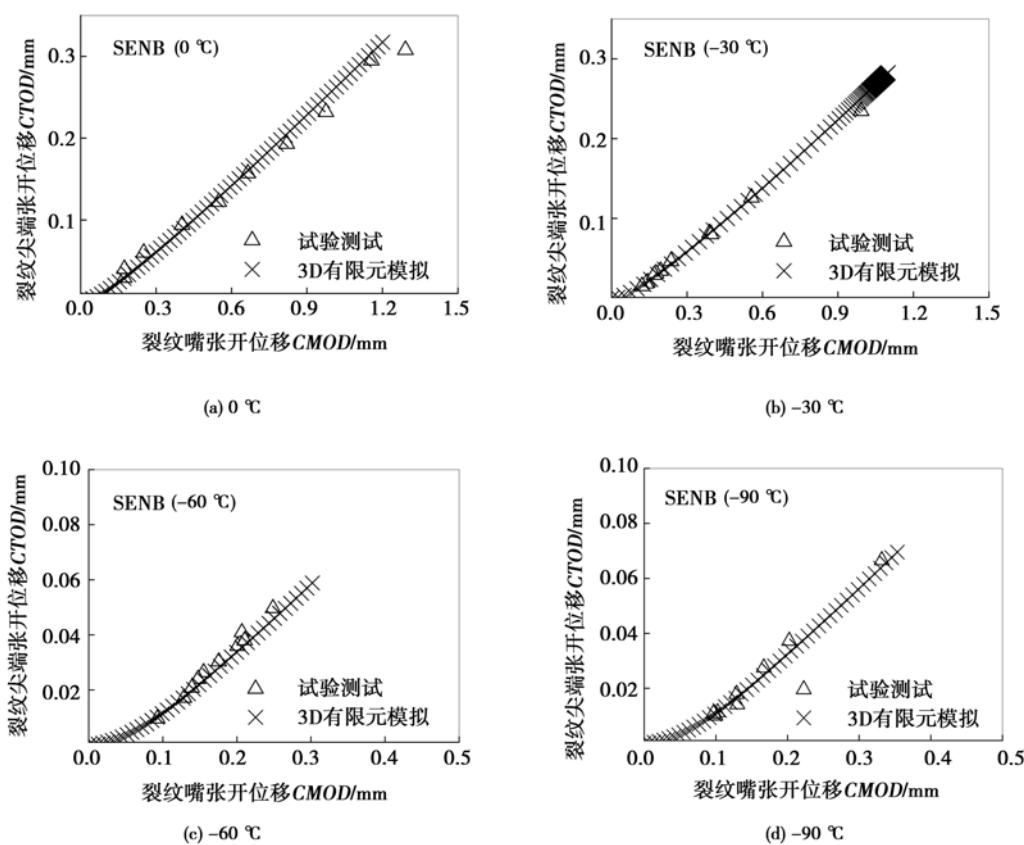


图7 不同温度下测试和计算得到的 $CTOD-CMOD$ 曲线

Fig. 7 Measured and calculated  $CTOD-CMOD$  curves at various temperatures

## 4 结 论

(1) 温度对断裂韧性具有明显影响,随着温度降低,断裂韧性显著减小,并使钢材由延性断裂向脆性断裂转变。另外,不同温度下测得的断裂韧度值均具有一定的分散性,且分散程度随温度升高而明显增大。

(2) 试验测试与有限元模拟结果表明,焊接热模拟X80管线钢粗晶热影响区不同温度(-90℃,-60℃,-30℃和0℃)下的真实应力—应变曲线行为从光滑拉伸棒到断裂力学试样具有良好的可传递性,亦即将由光滑拉伸棒测试得到的真应力应变曲线作为材料的本构输入到断裂试样的计算过程中,可对材料的拉伸力学行为进行准确地描述。另外,温度对材料的硬化行为没有明显地影响。

(3) SENB试样3D有限元模拟计算得到的不同温度下的F-CMOD曲线与试验测试结果非常吻合,同时,该模型亦可以准确地计算不同温度下的CTOD值,为焊接热影响区断裂韧性测试难的问题提供了有效、准确的计算方法。

### 参考文献:

- [1] 肖光春,荆洪阳,徐连勇,等.预应变下高强结构钢低温断裂性能[J].焊接学报,2011,32(3):41-44.  
Xiao Guangchun, Jing Hongyang, Xu Lianyong, et al. Research on fracture toughness of high-strength structural steel with prestrain at low temperature[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(3): 41-44.
- [2] 肖晓华,卢东华,王丰,等.X80钢低温焊接接头组织与性能研究[J].热加工工艺,2014,43(13):169-172.  
Xiao Xiaohua, Lu Donghua, Wang Feng, et al. Study of microstructure and properties of welded joint of X80 steel at low temperature[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(13): 169-172.
- [3] 陈延清,杜则裕,许良红.X80管线钢焊接热影响区组织和性能分析[J].焊接学报,2010,31(5):101-104.  
Chen Yanqing, Du Zeyu, Xu Lianghong. Microstructure and mechanical properties of heat affected zone for X80 pipeline steel [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31 (5): 101-104.
- [4] 李青霞,徐学利.X80管线钢粗晶区的模拟研究[J].内蒙古石油化工,2008,34(16):76-78.  
Li Qingxia, Xu Xueli. Research of welding coarse grain heat-affected zone of X80 pipeline steel[J]. Inner Mongolia Petrochemical, 2008, 34(16): 76-78.
- [5] Sturel T, Fant M D, Carius H, et al. Coupling of metallurgical and mechanical models to predict the toughness properties of multi-pass welded joints[R]. Norway: the International Symposium on Safety in Application of High Strength Steel, 1997.
- [6] BSI. Part 1: 1991, Fracture mechanics toughness tests. Part 1: Method for determination of  $K_{Ic}$ , critical CTOD and critical J values of metallic materials. BS 7448[S]. London: BSI Publication, 1991.

**作者简介:**徐杰,女,1978年出生,博士,副教授,硕士研究生导师。主要从事焊接结构件断裂分析及焊接残余应力有限元模拟计算方面的科研和教学工作,发表论文20余篇。Email: j.xu@cumt.edu.cn