

DOI: 10.11973/jxgccl201812002

桥梁钢裂纹尖端张开位移与试样厚度关系式的改进

陈春君, 苗张木

(武汉理工大学交通学院, 武汉 430063)

摘要: 分析了闫鹏帅等建立的裂纹尖端张开位移(CTOD)与厚度关系式(厚度效应关系式)在应用于桥梁钢时产生较大误差的原因,应用构造法对该关系式进行了改进;使用不同厚度桥梁钢试样(14MnNbq钢、14MnNbq钢接头焊缝、16Mnq钢)的CTOD试验值对改进后的厚度效应关系式进行了验证。结果表明:导致原厚度效应关系式误差较大的原因是平面应力部分的函数形式不合理,以概率密度函数替换该函数后,拟合得到的不同厚度桥梁钢试样的CTOD值与试验值的相对误差较小,改进后的厚度效应关系式适用于不同的桥梁钢。

关键词: 桥梁钢;裂纹尖端张开位移(CTOD);厚度效应关系式

中图分类号: TG407

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2018)12-0009-04

Improvement of Relational Expression between Crack Tip Opening Displacement and Specimen Thickness of Bridge Steel

CHEN Chunjun, MIAO Zhangmu

(School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: The reason why the relational expression between crack tip opening displacement (CTOD) and thickness (thickness effect expression), which was established by YAN Pengshuai et al., has relatively large errors in the application of bridge steels was analyzed, and then the expression was improved by construction method. The improved thickness effect expression was verified with test values of CTOD of bridge steel specimens (14MnNbq steel, weld of 14MnNbq steel joint, 16Mnq steel) with different thicknesses. The results show that the reason for relatively large errors by the original thickness effect expression was that the function form of the plane stress part was unreasonable. The expression was improved by replacing the unreasonable function with a probability density function. The relative errors between the fitted values by the improved expression and the test values of CTOD of the bridge steel samples with different thicknesses were relatively small. Therefore, the improved thickness effect expression is suitable for different bridge steels.

Key words: bridge steel; crack tip opening displacement (CTOD); thickness effect expression

0 引言

随着材料科学的发展与冶炼技术的提高,现有建筑钢材不仅种类繁多,而且力学性能也相差较大。在建造钢结构建筑物时,焊接是结构件常用的一种连接方式。焊接接头易萌生裂纹,在服役过程中,微裂纹在外载荷的作用下不断扩展,并逐步演化成肉

眼可见的大裂纹,最终导致结构件的失效。国外有关重要钢结构建筑的规范规定:在设计阶段,必须测试相应焊接工艺下接头的断裂韧度;只有当焊接接头的断裂韧度达到规范给出的允许值时,才允许进行施工。断裂韧度表征的是材料抵抗裂纹扩展的能力,包括应力强度因子 K_{IC} 、能量释放率 G 、裂纹尖端张开位移(CTOD)和 J 积分等4种参量。其中,CTOD的测试技术成熟、原理简单,是常用的断裂韧度指标^[1]。在测试CTOD时,常采用标准矩形截面的三点弯曲试样。在相同的试验温度下,同种材料不同厚度试样测得的断裂韧度是不同的;CTOD值随试样厚度的增加呈现出先增后降,最后稳定于

收稿日期:2017-09-07;修订日期:2018-09-12

基金项目:中央高校基本科研业务费资助项目(175202002)

作者简介:陈春君(1993—),男,重庆人,硕士研究生

导师:苗张木教授

常数的变化趋势^[2-5]。这种现象即为厚度效应,反映出试样厚度对断裂韧度的影响。

在CTOD与试样厚度的关系方面已有相关研究。2013年,闫鹏帅等^[6]首次提出了CTOD值 δ 与试样厚度 t 的关系式(厚度效应关系式)。然而,在用该关系式拟合不同厚度桥梁钢试样的CTOD值时,发现拟合值与试验数据间的误差较大,最大相对误差达到了15.6%,因此有必要对该厚度效应关系式进行改进。

作者介绍了闫鹏帅等所得厚度效应关系式的具体推导过程,分析了其拟合值误差较大的原因,并对其进行了改进;使用不同厚度桥梁钢试样的CTOD试验数据对改进后的厚度效应关系式进行了验证。

1 厚度效应关系式

1.1 原关系式的推导

根据Griffith表面能理论,对于含中心穿透裂纹的无限大板,裂纹扩展时 G 与表面能 S 存在如下关系^[7]:

$$G = 2S \quad (1)$$

对于I型裂纹, G 与 K_C 的关系为

$$G = \frac{K_C^2}{E'} \quad (2)$$

式中: E' 为广义弹性模量。

当试样厚度较小时,试样处于平面应力状态, $E' = E$ (E 为弹性模量);当试样厚度较大时,试样处于平面应变状态, $E' = E/(1 - \nu^2)$ (ν 为泊松比)。

将式(2)代入式(1),得到

$$K_C = \sqrt{2E'S} \quad (3)$$

根据Barenblatt吸附力理论与Dugdale带状屈服模型,在平面应力状态下,式(3)可变换成如下形式^[8]:

$$K_C = \sqrt{Et \int_0^{\epsilon'} \sigma(\epsilon) d\epsilon} \quad (4)$$

式中: σ 为裂尖垂直于裂纹扩展面的应力; ϵ 为裂尖塑性区正应变; ϵ' 为正应变极限值。

由式(4)可以看出,在平面应力状态下, K_C 与 \sqrt{t} 成正比。在小范围屈服时, δ 与 K_C 的关系式^[9]为

$$\delta = \frac{4K_C^2}{\pi E \sigma_s} \quad (5)$$

式中: σ_s 为屈服强度。

联立式(4)和式(5)可知,当 t 趋近于0且试样处于平面应力状态时, δ 与 t 成正比。当 t 很大时,

由试验结果可知, δ 会稳定于常数 δ_m (即平面应变下的CTOD值)。以这两点为基础,闫鹏帅等应用构造法提出了 δ 与 t 的关系式,如下:

$$\delta = \xi t \exp(-kt^h) + \delta_m [1 - \exp(-kt^h)] \quad (6)$$

式中: ξ, k 为材料参数; h 为厚度 t 的幂,其功能是调节曲线形状。

式(6)由两部分构成:第一部分即 $\xi t \exp(-kt^h)$,代表的是平面应力区域对断裂韧度的贡献;第二部分即 $\delta_m [1 - \exp(-kt^h)]$,代表的是平面应变区域的贡献。当 t 从0逐步增大时:第一部分中的 $\exp(-kt^h)$ 将从1减小至0,表明平面应力对断裂韧度的贡献逐渐减小;第二部分中的 $1 - \exp(-kt^h)$ 将从0增大至1,表明平面应变对断裂韧度的贡献逐渐增大。

1.2 原关系式存在的问题及改进

闫鹏帅等^[6]在用式(6)拟合桥梁钢的CTOD试验值时,效果不甚理想,最大相对误差达15.6%。作者认为这一问题出在式(6)所用的函数形式上。令 $\xi = 0.35, k = 0.15, \delta_m = 0.5 \text{ mm}, h = 1$,则式(6)的函数曲线见图1。

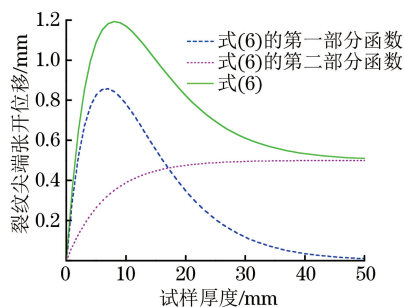


图1 式(6)的函数曲线

Fig.1 Function curves of Eq. (6)

由图1可以看出,式(6)的函数曲线与断裂韧度随试样厚度变化的趋势是一致的。然而由文献^[10]中不同厚度3种桥梁钢的CTOD试验结果可知:当试样厚度为30 mm左右时,CTOD值最大;当试样厚度达到50 mm左右时,CTOD值渐渐趋于常数。通过调节式(6)中的参数大小,使其拟合曲线与桥梁钢的CTOD试验结果相重合。式(6)的第二部分只需将 δ_m 调整至桥梁钢在平面应变下的CTOD值即可;而在对第一部分的参数进行调整时,当将峰值位置向右调整到 t 为30 mm处时,函数曲线会变得“矮胖”,在 t 为30~50 mm间,CTOD值不可能陡降到0。因此,式(6)第一部分的函数形式不合理。

要改进式(6),就需要找到“山峰”形曲线的函

数,并且该函数在波峰的右边能迅速减小至0。由此,作者联想到了极值分布的概率密度函数,因为该函数曲线正好满足上述要求。用概率密度函数替换式(6)的第一部分函数,得到的厚度效应改进关系式为

$$\delta = \xi \beta^{-1} \exp\left(\frac{t-\mu}{\beta}\right) \exp\left[-\exp\left(\frac{t-\mu}{\beta}\right)\right] + \delta_m [1 - \exp(-kt)] \quad (7)$$

式中: μ, β 为材料参数。

在 Matlab 软件平台上对曲线进行拟合,为了避免由于参数初始值设置不当而得到局部最优解,分成两个步骤进行拟合。第一步,试参数。编程描出试验数据点,在同一幅二维图像中,绘制出式(7)的函数曲线;手动调节式(7)中的参数,使曲线尽可能靠近数据点,但无需穿过数据点;当曲线离数据点比较近时,记录下此时曲线的参数,作为下一步拟合时的初始参数值。第二步,曲线拟合。利用软件自带的曲线拟合函数 lsqcurvefit,将上一步记录的拟合初始参数值代入该函数中,随后程序自动按最小二乘法计算出最合适的参数值。按照这两个步骤,便可得到全局最优解。

2 试验验证

用文献[10]中室温下 14MnNbq 钢、14MnNbq 钢接头焊缝和 16Mnq 钢的 CTOD 试验值对式(7)进行验证。

2.1 对 14MnNbq 钢的适用性

按照前文所说的拟合步骤,对 14MnNbq 钢的 CTOD 试验值进行拟合,拟合曲线见图 2,拟合关系式为

$$\delta = \frac{13.9}{5.38} \exp\left(\frac{t-32.8}{5.38}\right) \exp\left(-\exp\frac{t-32.8}{5.38}\right) + 1.4[1 - \exp(-0.075t)] \quad (8)$$

利用式(8)计算得到的 δ 及其与试验值的相对误差见表 1。

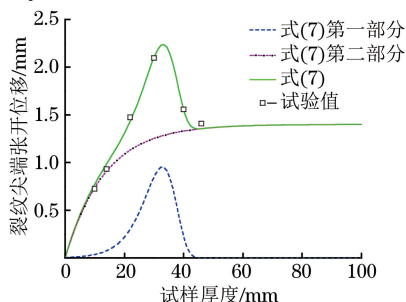


图 2 14MnNbq 钢 CTOD 试验值及其拟合曲线

Fig.2 CTOD test values and the fitting curves for 14MnNbq steel

表 1 不同厚度 14MnNbq 钢 CTOD 的试验值和式(8)计算值及其相对误差

Table 1 CTOD test values and calculation values from Eq. (8) and their relative errors for 14MnNbq steel with different thicknesses

t/mm	δ/mm		相对误差/%
	试验值	计算值	
10	0.724 3	0.775 5	7.06
14	0.931 5	0.986 2	5.87
22	1.474 0	1.434 7	2.67
30	2.094 8	2.102 4	0.36
40	1.556 3	1.553 7	0.17
46	1.408 2	1.355 8	3.72

由图 2 可以看出,由式(7)拟合得到的曲线能很好地反映 14MnNbq 钢 CTOD 试验值变化的规律。式(7)的第一部分对提高拟合结果准确性的贡献最大。由表 1 可以看出,由式(8)计算得到的 CTOD 值与试验数据的最大相对误差为 7.06%,最小为 0.17%。由此可见,作者提出的厚度效应关系式的改进方法是合理且有效的。

2.2 对 14MnNbq 钢接头焊缝的适用性

同理,按照前文所说的拟合步骤对 14MnNbq 钢接头焊缝的 CTOD 试验值进行拟合,拟合曲线见图 3,拟合关系式为

$$\delta = \frac{16.8}{7.48} \exp\frac{t-27.5}{7.48} \exp\left(-\exp\frac{t-27.5}{7.48}\right) + 0.15[1 - \exp(-0.08t)] \quad (9)$$

利用式(9)计算得到的 δ 及其与试验值的相对误差见表 2。

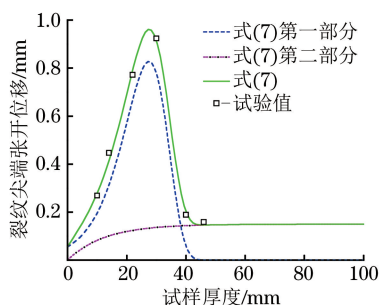


图 3 14MnNbq 钢接头焊缝 CTOD 试验值及其拟合曲线

Fig.3 CTOD test values and the fitting curves for weld of 14MnNbq steel joint

由图 3 和表 2 可以看出,改进后的厚度效应关系式对 14MnNbq 钢接头焊缝 CTOD 试验值的拟合准确性较高,最大相对误差为 7.63%,最小为 0.95%。由此可见,改进后的厚度效应关系式适用于 14MnNbq 钢接头焊缝。

表2 不同厚度 14MnNbq 钢接头焊缝 CTOD 的试验值和式(9)计算值及其相对误差

Table 2 CTOD test values and calculation values from Eq.(9) and their relative errors for weld of 14MnNbq steel joint with different thicknesses

t/mm	δ/mm		相对误差/%
	试验值	计算值	
10	0.268 8	0.279 6	4.01
14	0.446 3	0.415 1	6.99
22	0.771 7	0.792 2	2.65
30	0.923 7	0.914 9	0.95
40	0.188 9	0.203 0	7.49
46	0.158 5	0.146 4	7.63

2.3 对 16Mnq 钢的适用性

按照前文所说的拟合步骤对 16Mnq 钢的 CTOD 试验值进行拟合,拟合曲线见图 4,拟合关系式为

$$\delta = \frac{9.14}{8.18} \exp \frac{t-19.2}{8.18} \exp \left(-\exp \frac{t-19.2}{8.18} \right) + 0.54 [1 - \exp(-0.21t)] \quad (10)$$

利用式(10)计算得到的 δ 及其与试验值的相对误差见表 3。

从图 4 和表 3 可以看出,改进后的厚度效应关

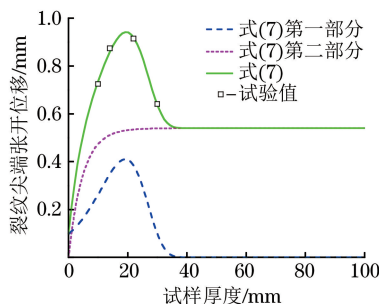


图 4 16Mnq 钢 CTOD 试验值及其拟合曲线

Fig.4 CTOD test values and the fitting curves of 16Mnq steel

表3 不同厚度 16Mnq 钢 CTOD 的试验值和式(10)计算值及其相对误差

Table 3 CTOD test values and calculation values from Eq.(10) and their relative errors for 16Mnq steel with different thicknesses

t/mm	δ/mm		相对误差/%
	试验值	计算值	
10	0.724 4	0.736 5	1.66
14	0.874 0	0.860 2	1.58
22	0.913 9	0.919 1	0.57
30	0.640 7	0.637 2	0.54

系式对 16Mnq 钢 CTOD 试验值的拟合准确性较高,最大相对误差为 1.66%,最小为 0.54%。由此可见,改进后的厚度效应关系式适用于 16Mnq 钢。

综上所述,改进后的厚度效应关系式对 3 种桥梁钢试样 CTOD 试验值的拟合准确性均较高,该关系式对桥梁钢具有普适性。

建立厚度效应关系式的主要目的是为了进行断裂韧性的预测。对于某一材料,若已知其在若干厚度下的 CTOD 值,则可以采用改进的厚度效应关系式拟合已知的 CTOD 值,再使用拟合曲线预测其在其他厚度下的 CTOD 值,以此来表征断裂韧性。已知的数据点越多,预测的结果就越接近真实值。由于数据点对拟合曲线有约束作用,所以作者给出的厚度效应改进关系式具有适用的厚度范围,预测试样的厚度应在试验数据测试时所用试样的最小厚度和最大厚度之间。在该厚度范围外,由于缺少试验数据的支撑,虽然有拟合曲线经过,仍无法保证预测结果的准确性。

3 结 论

(1) 闫鹏帅等建立的厚度效应关系式的第一部分(即平面应力部分)函数形式不合理,导致对 CTOD 值的预测不准确;用概率密度函数替换第一部分函数,得到厚度效应改进关系式。

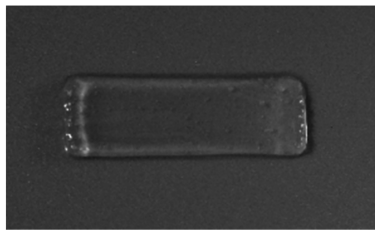
(2) 用不同厚度桥梁钢试样(14MnNbq 钢、14MnNbq 钢接头焊缝、16Mnq 钢)的 CTOD 试验值对厚度效应改进关系式进行验证,拟合得到的 CTOD 值与试验值的相对误差较小,说明厚度效应关系式的改进方法是合理有效的,并且厚度效应改进关系式适用于不同的桥梁钢。

(3) 利用该厚度效应改进关系式进行断裂韧性预测时,预测试样的厚度应在试验数据测试时所用试样的最小厚度与最大厚度之间,这样才能保证预测结果的准确;在此厚度范围外,由于缺少试验数据的约束,不建议进行断裂韧度的预测。

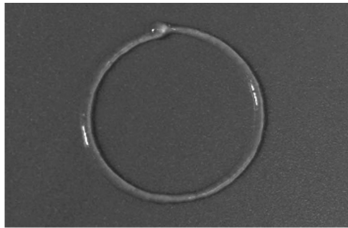
参考文献:

- [1] 苗张木. 厚钢板焊接接头韧度 CTOD 评定研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2005:7-12.
- [2] 张红胜. 钢结构桥梁 CTOD 断裂韧性研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2010:47-52.
- [3] PALOMBO M, SANDON S, DE MARCO M. An evaluation of size effect in CTOD-SENB fracture toughness tests[J]. Procedia Engineering, 2015, 109: 55-64.

(下转第 46 页)



(a) 矩形件



(b) 空心圆环

图 6 采用最佳打印参数打印成形矩形件和空心圆环的外观

Fig.6 Appearance of rectangular part (a) and hollow ring (b) printed with optimum printing parameters

3 结 论

(1) 线材的挤出胀大率随溶液黏度的增加而减小,随挤出压力的增加而增大,挤出拉伸率随喷头速度的增加而增大;当溶液黏度为 $1.26 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、挤出压力为 80 kPa 、喷头速度为 $8 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,线材的成形效果较好,挤出胀大率和挤出拉伸率均相对较小,试验值和理论计算值的相对误差较小,该工艺参数最佳。

(2) 在最佳打印参数下,基于挤出胀大率和挤出拉伸率的理论计算结果对打印件尺寸进行调整,调整后打印出的矩形件与空心圆环的实际尺寸与设计尺寸的相对误差小于 5% ,打印精度较高。

参考文献:

[1] DENG J H, FU M W, CHAN W L. Size effect on material surface deformation behavior in micro-forming process[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(13): 4799-4806.

- [2] 贺超良, 汤朝晖, 田华雨, 等. 3D 打印技术制备生物医用高分子材料的研究进展[J]. 高分子学报, 2013, 52(6): 722-732.
- [3] PEREIRA R F, ALMEIDA H A, BÁRTOLO P J. Biofabrication of hydrogel constructs [M]//Drug Delivery Systems: Advanced Technologies Potentially Applicable in Personalised Treatment. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013: 225-254.
- [4] KHALIL S, SU W. Biopolymer deposition for freeform fabrication of hydrogel tissue constructs[J]. Materials Science and Engineering: C, 2007, 27: 469-478.
- [5] LI M G, TIAN X Y, CHEN X B. Modeling of flow rate, pore size, and porosity for the dispensing-based tissue scaffolds fabrication [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2009, 131: 034501.
- [6] 于永泽, 陈海萍, 胡庆夕. 生物凝胶微孔挤出胀大的有限元模拟与三维打印成形[J]. 机械工程学报, 2014, 50(19): 151-157.
- [7] 王秀娟, 张坤生, 任云霞, 等. 海藻酸钠凝胶特性的研究[J]. 食品工业科技, 2008(2): 259-262.
- [8] 戴元坎. 汽车橡胶密封条挤出成型过程的计算机模拟研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [9] 何红. 聚合物加工流变学基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- [10] 夏冰. 海藻酸钠凝胶特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [11] 程晋生. 海藻酸盐和明胶/海藻酸钠混合凝胶[J]. 明胶科学与技术, 2004(4): 169-177.
- [12] CHEW W C, WEEDON W H. A 3D perfectly matched medium from modified Maxwell's equations with stretched coordinates[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 1994, 7(13): 599-604.
- [13] 史铁钧, 吴德峰. 高分子流变学基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [14] 梁基照. 混炼胶长口型挤出胀大比的预测[J]. 合成橡胶工业, 1997(1): 44-45.
- [15] 赵良知, 吴舜英. 聚合物熔体在任意长径比圆锥口模的挤出胀大唯象研究[J]. 塑料, 2005, 34(4): 24-28.
- [16] TANNER R I. The swelling of plane extrudates at low Weissenberg numbers[J]. Journal of Non-newtonian Fluid Mechanics, 1980, 7(2/3): 265-267.

(上接第 12 页)

[4] PUTATUNDA S K. Fracture toughness of a high carbon and high silicon steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2001, 297(1/2): 31-43.

[5] HAN K J, SHUAI J, DENG X M, et al. The effect of constraint on CTOD fracture toughness of API X65 steel[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2014, 124: 167-181.

[6] 闫鹏帅, 苗张木, 夏子钰, 等. 试样厚度与 CTOD 临界值的拟合关系式[J]. 机械工程材料, 2013, 37(8): 95-97.

[7] 肖纪美. 金属的韧性与韧化[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980: 77-79.

[8] 杨继运, 张行. 材料断裂韧度与试样厚度关系研究[J]. 机械强度, 2003, 25(1): 76-80.

[9] WELLS A A. Application of fracture mechanics at and beyond general yielding[J]. British Welding Journal, 1963, 10(5): 563-570.

[10] 张玉玲. 大型铁路焊接钢桥疲劳断裂性能与安全设计[D]. 北京: 清华大学, 2004: 82-107.