

基于抵抗疲劳和断裂的桥梁允许最大钢板厚度的确定

王应良

(中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 湖北武汉 430050)

摘要: 我国公路桥梁设计规范没有给出允许的最大钢板厚度, 铁路桥梁规范允许的最大钢板厚度为 50mm, 欧洲钢桥设计规范中允许使用的最大板厚相对较厚。以防止钢桥疲劳和断裂为目标, 提出一种钢材选材和钢板最大允许厚度的确定方法。疲劳裂纹的扩展采用断裂力学理论, 裂纹端部的应力强度因子基于同时考虑脆性断裂和塑性屈服断裂影响的 R6 破坏模式, 采用冲击功和相应温度确定含裂纹钢板的低温断裂韧性, 并考虑了桥梁中焊接残余应力、加载的应变速率、钢板弯曲成型等因素对最大允许板厚的影响。根据以上理论和方法开发了计算程序, 并以重庆市江津观音岩长江大桥为例, 确定了钢材的种类和允许的最大钢板厚度。

关键词: 断裂韧性; 应力强度因子; 允许最大钢板厚度; 缺口冲击功; 钢桥

中图分类号: U442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-431X(2012) 10-0145-07

Permissible maximum plate thickness assessment of steel bridges based on resistance fatigue and fracture

Wang Yingliang

(China Major Bridge Reconnaissance and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430050, China)

Abstract: Permissible maximum plate thickness is not given in the China road steel bridge design specification, while it is determined as 50mm in China railway steel bridge design specification. The maximum plate thickness in Eurocode is bigger than those of China steel bridge design code. A method to assess the permissible maximum plate thickness and choose steel bridge material is presented, whose goal is to prevent fatigue and fracture. The crack propagation adopts the principles of fracture mechanics theory. The determination of stress intensity factor of crack tips is based on the R6 failure method, which takes into account the risk of brittle fracture and plastic collapse. Low-temperature fracture toughness is determined by Charpy impact test energy and corresponding temperature, and some factors, such as welding residual stress, strain rates of loading and forming degree of steel plate, are taken into account. Computer software was developed and used on the determination of steel material type and the permissible maximum plate thickness of Jiangjin Guanyinyan Yangtze River bridge in Chongqing, China.

Keywords: fracture toughness; stress intensity factor; permissible maximum plate thickness; charpy impact test energy; steel bridge

E-mail: yingliangwangcd@yahoo.com.cn

引 言

我国公路桥涵钢木结构设计规范 (JTJ 025—1986)^[1] 和国家桥梁用结构钢标准 (GB/T 714—2008)^[2] 没有给出公路钢桥钢板的最大使用厚度。现行铁路钢桥设计规范 (TB 10002.2—2005)^[3] 对最大板厚给出了规定, 国产 Q370qD 和 Q370qE 用于铁路钢桥时最大板厚不能超过 50mm。

欧洲钢结构设计规范^[4-5] 给出了桥梁允许使用的最大板厚相对较厚, 在确定钢板的厚度时考虑了裂纹的扩展并采用损伤容限法进行防低温脆性断裂设计。目前欧洲设计的铁路钢桥的最大钢板厚度为 80mm。

在大跨度宽桥面的公路桥梁设计中, 需要使用厚度超过 60mm 的国产钢板。例如: 在重庆江津观音岩长江大桥中就大量使用了厚度 80mm 的国产 Q370 钢板^[6]。国内规范对如何确定厚度大于 50mm 钢板的允许最大板厚基本是空白。本文以断裂力学理论为基础, 以防止钢桥疲劳和断裂为目标, 提出了最大允许钢板厚度的确定方法。

基于抵抗疲劳和断裂的目的, 采用断裂力学理论

基金项目: 铁道部科技项目 (2010G004-B, 20110019A)

作者简介: 王应良, 博士, 教授级高级工程师

收稿日期: 2011-06-29

对钢板进行选材和确定允许最大厚度的基本思路是:首先根据结构细节,假定初始裂纹的深度和长度,根据荷载循环次数和应力幅,计算出裂纹端部的应力强度因子设计值,再根据材料的冲击功和设计最低温度等影响因素计算出含裂纹钢板的断裂韧性。根据裂纹端部的应力强度因子不大于材料的断裂韧性确定允许的最大钢板厚度。

1 应力强度因子

1.1 表面初始裂纹深度、长度的假定和裂纹的扩展

桥梁钢结构中对接焊的钢板,带纵向或横向加劲肋的钢板,最常见的初始裂纹为椭圆形的表面裂纹,工程中常见的焊缝咬边也可以认为是初始裂纹。厚度为 t 的钢板(如图 1 所示),初始裂纹的深度 a_0 和长度 $2c_0$ 一般假定为^[7]:

$$a_0 = \begin{cases} 0.5 \ln(1+t) & t < 15 \text{ mm} \\ 0.5 \ln t & t \geq 15 \text{ mm} \end{cases} \quad (1)$$

对于无焊接细节和带有纵向加劲肋的结构细节,裂纹长度一般采用 $2c_0 = 5a_0$ 。对带有横向加劲肋的结构细节,初始裂纹长度一般采用 $2c_0 = 40a_0/3$ 。带纵向加劲肋钢板表面初始裂纹的深度和长度与板厚之间的关系如图 2 所示。

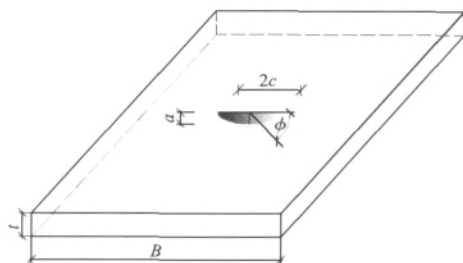


图 1 表面裂纹的几何参数

Fig. 1 Geometry parameters of surface crack

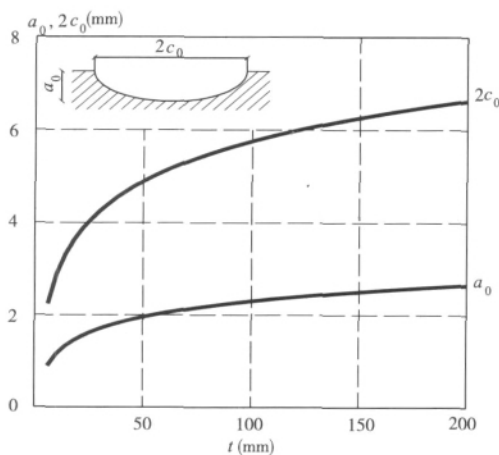


图 2 表面初始裂纹的深度和长度

Fig. 2 Depth and length of initial surface crack

实际上许多钢结构都是带初始裂纹工作的,在循环荷载作用下,裂纹的深度和长度都随着循环荷载增加而增加。裂纹的扩展可以采用 Paris 公式预测,该公式是基于金属结构材料的经验公式,但是和试验结果符合的很好。Paris 公式如式(2)所示。

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (2)$$

式中: da/dN 为裂纹的扩展速率; C 、 m 均为描述材料疲劳裂纹扩展性能的基本参数。对于铁素体结构钢一般取^[7] $m = 3$, $C = 5.69 \times 10^{-12}$ (m/周)。Paris 公式基于弹性理论并忽略了裂纹内部的塑性效应。

应力强度因子幅为:

$$\Delta K = \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot Y \cdot M_k \quad (3)$$

式中: Y 为裂纹的位置和形状修正系数。对于表面为椭圆形的裂纹, M_k 为应力集中系数,依赖于裂纹深度和其他几何参数,例如:翼缘厚度 t 、焊缝高度 h 和焊缝角度 θ 。对于带竖向加劲肋的钢板梁局部构造,如图 3 所示,应力集中系数代表由于不同结构细节而考虑的放大系数。本文采用经典的计算方法计算 Y 和 M_k ^[7-8]。

$$Y = F_s / \sqrt{1 + 1.464(a/c)^{1.65}} \quad (4)$$

$$F_s = \left[M_1 + M_2 \cdot \left(\frac{a}{t} \right)^2 + M_3 \cdot \left(\frac{a}{t} \right)^4 \right] \cdot g \cdot f_\varphi \cdot f_w$$

$$M_1 = 1.13 - 0.09(a/c)$$

$$M_2 = -0.54 + \frac{0.89}{0.2 + (a/c)}$$

$$M_3 = 0.54 - \frac{1}{0.65 + (a/c)} + 14 \cdot (1 - a/c)^{24}$$

$$f_\varphi = [(a/c)^2 \cdot \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi]^{0.25}$$

$$f_w = \left[1 / \cos \left(\frac{\pi \cdot c}{B} \sqrt{\frac{a}{t}} \right) \right]^{0.5}$$

$$g = 1 + [0.1 + 0.35 \cdot (a/t)^2] \cdot (1 - \sin \varphi)^2 \quad (5)$$

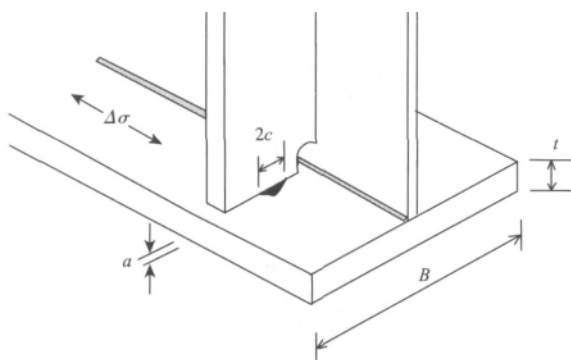
$$M_k = v \cdot \left(\frac{a}{b} \right)^w$$

$$v = 0.8086 - 0.1554 \cdot \left(\frac{h}{t} \right) + 0.0429 \cdot \left(\frac{h}{t} \right)^2 + 0.0784 \cdot \left(\frac{h}{t} \right) \cdot \tan \theta$$

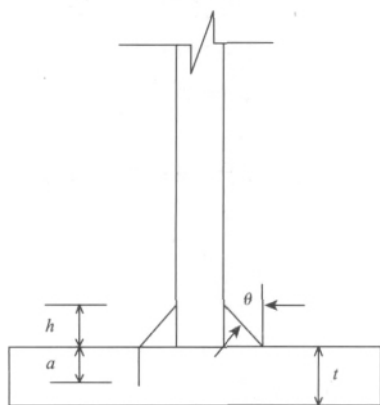
$$w = -0.01993 - 0.1839 \cdot \left(\frac{h}{t} \right) + 0.0495 \cdot \left(\frac{h}{t} \right)^2 + 0.0815 \cdot \left(\frac{h}{t} \right) \cdot \tan \theta \quad (6)$$

$\Delta \sigma$ 为应力幅,可以根据荷载和结构参数计算确定,也可以根据相应的规范取允许疲劳应力幅。在双对数坐标中裂纹扩展速率 da/dN 和应力强度因子幅 ΔK 如图 4 所示。Paris 公式只适用于应力强度因子幅大于应力强度因子幅门槛值 ΔK_{th} 和小于临界应力强

度因子幅的范围。



(a) 竖向加劲肋和下翼缘连接焊缝



(b) 腹板和下翼缘的连接焊缝

图3 竖向加劲肋、腹板和下翼缘的焊接连接示意

Fig. 3 Schematic of traverse stiffener and web to bottom-flange welding

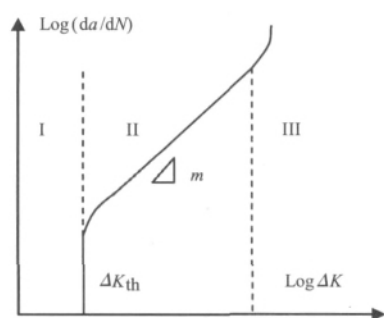


图4 $da/dN - \Delta K$ 曲线

Fig. 4 $da/dN - \Delta K$ curve

对式(2)积分如式(7)所示,得到经过 N_c 次循环荷载后的裂纹深度 a_d 如式(8)所示。

$$\int_{a_0}^{a_d} \frac{da}{C(Y \cdot M_k \cdot \Delta\sigma \cdot \sqrt{\pi a})^m} = \int_0^{N_c} dN \quad (7)$$

$$a_d =$$

$$\left[\frac{1}{a_0^{0.5m-1}} - \frac{1}{C \cdot N_c \cdot (m/2 - 1) \cdot \pi^{m/2} \cdot (Y \cdot M_k \cdot \Delta\sigma)^m} \right]^{1/(m/2-1)}$$

(8)

根据裂纹深度 a_d 得到设计荷载作用下裂纹端部

的弹性应力强度因子为:

$$K_{applied} = \sigma_{Ed} \cdot \sqrt{\pi \cdot a_d} \cdot Y \cdot M_k \quad (9)$$

其中: $\sigma_{Ed} = \sigma_P + \sigma_S$ 为工作应力,包括设计应力和焊接残余应力。设计应力 σ_P 在桥梁中一般取^[5-6,9]:

$$\sigma_P = \sigma_D + \sigma_{LT} + \psi_1 Q_K \quad (10)$$

式中: σ_D 为恒载应力; σ_{LT} 为最低温度时的温度应力; Q_K 为活载应力; ψ_1 为活载应力的折减系数,一般取 0.7~1.0, EN 1993-1-10^[4] 取 0.7; σ_S 为焊接总体残余拉应力,欧洲规范^[4] 中取 100MPa,如图5所示。

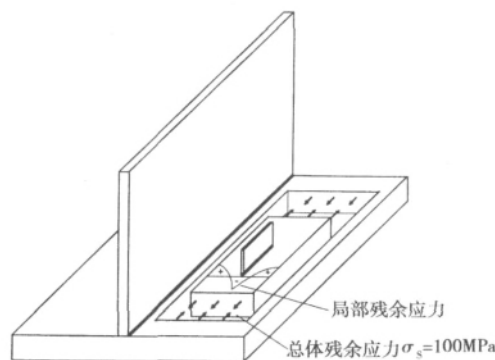


图5 焊接总体残余应力示意

Fig. 5 Schematic of global welding residual stress

1.2 考虑裂纹尖端局部塑性效应的应力强度因子

疲劳裂纹的尖端会发生局部的塑性效应,一般根据 CEB6-R6 破坏评估图考虑裂纹尖端的塑性对弹性应力强度因子的贡献^[8]:

$$K_{applied,correct}^* = \frac{K_{applied}}{K_{R6} - \rho} = \frac{\sigma_{Ed} \sqrt{\pi \cdot a_d} \cdot Y \cdot M_k}{K_{R6} - \rho} \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \quad (11)$$

式中: K_{R6} 为根据 R6 破坏模式评估图的塑性修正系数,取决于含裂纹结构接近于塑性的程度。如图6所示,采用式(12)计算^[7-8]。R6 破坏模式同时考虑了结构的脆性断裂和塑性屈服断裂。

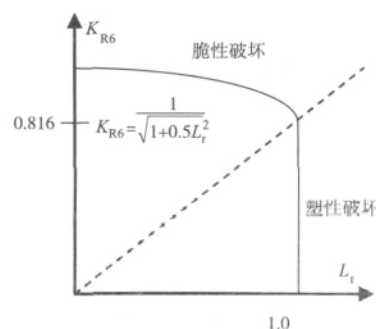


图6 R6 断裂破坏评估图

Fig. 6 Schematic of R6 failure assessment diagram

$$K_{R6} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{1 + 0.5L_r^2}} & L_r < 1 \\ 0.816 & L_r = 1 \end{cases} \quad (12)$$

L_r 为作用在结构上的荷载和结构塑性屈服荷载的比值,表示含裂纹结构接近塑性屈服的程度。塑性屈服荷载要考虑裂纹的影响,对于表面椭圆型的裂纹, L_r 采用式(13)计算。

$$L_r = \frac{\sigma_p}{f_{y(v)}} \cdot \frac{B \cdot t}{B \cdot t - \pi \cdot a \cdot c/2} \quad (13)$$

式中: B 为板的宽度; t 为板厚; a 为表面裂纹的深度; $2c$ 为表面裂纹的长度; $B \cdot t$ 为钢板的毛截面面积; $B \cdot t - \pi \cdot a \cdot c/2$ 为钢板的净截面面积。 ρ 为残余应力的修正系数,对于非焊接构件可以取 $\rho = 0$ 。 ρ 采用式(14)和式(15)计算。

$$\rho = \begin{cases} \rho_1 & L_r < 0.8 \\ 4\rho_1(1.05 - L_r) & 0.8 \leq L_r < 1.05 \\ 0 & L_r \geq 1.05 \end{cases} \quad (14)$$

$$\rho_1 =$$

$$\begin{cases} 0 & \psi \leq 0 \\ 0.1\psi^{0.714} - 0.007\psi^2 + 0.00003\psi^5 & 0 < \psi \leq 5.2 \\ 0.25 & \psi > 5.2 \end{cases}$$

$$\psi = \frac{\sigma_s \cdot L_r}{\sigma_p} \quad (15)$$

1.3 疲劳设计的安全寿命法和损伤容限法

疲劳设计一般有无限寿命设计,安全寿命设计,损伤容限设计和依据试验设计四种方法。以前钢桥设计采用大多安全寿命设计法。欧洲在 21 世纪大量使用损伤容限法。其实损伤容限法包含了安全寿命法。损伤容限设计是假定构件内部存在初始裂纹,再用断裂力学方法来估算其剩余寿命,并通过完善的检测方案来监测疲劳裂纹的扩展,当疲劳裂纹达到一个预设尺寸时,就对部分构件加以维修或更换,保证结构继续安全使用,如图 7 所示。

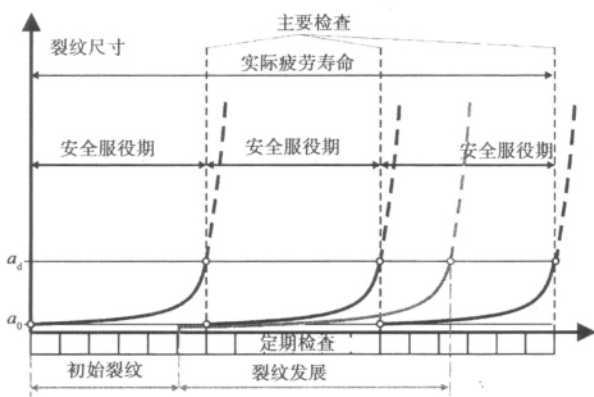


图 7 损伤容限设计法示意图

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Fig. 7 Schematic of damage tolerance design method

如果认为结构设计寿命内的荷载循环次数为 $N_c = 2 \times 10^6$, 在结构的设计寿命内进行 n 次检查和维修, 每次在裂纹长度扩展到预先设定的裂纹长度之前进行修补, 则结构亦可安全使用到其设计寿命, EN1993-4-9^[9-10] 中各种疲劳细节对应的疲劳强度就是假定在其设计寿命内, 检查并维修 3 次。每次检查期间结构的累积损伤如式(16)所示。

$$\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta\sigma_i^m \cdot n_i)}{2 \times 10^6 \cdot \Delta\sigma_c^m} \leq \frac{1}{4} \quad (16)$$

式中: N 为变幅应力幅 $\Delta\sigma_i$ 的总数; $\Delta\sigma_i$ 为变幅应力幅值; n_i 为应力幅 $\Delta\sigma_i$ 的循环次数; m 为双对数坐标轴中应力-循环次数的斜率; $\Delta\sigma_c$ 为循环次数为 200 万次时的疲劳强度。

如果在整个设计寿命的不进行检查和焊缝修补, 损伤容限法就转化为安全寿命法。

2 材料断裂韧性的确定

2.1 材料断裂韧性和温度之间关系

含裂纹钢板的断裂韧性与温度和裂纹长度有关, 温度越低, 裂纹长度越长, 钢板的断裂韧性越低。在确定允许的最大板厚时, 要建立钢板断裂韧性和温度的关系。

含裂纹钢板在不同温度下的断裂韧性最好采用试验的方法确定, 例如: 威尔斯宽板低温拉伸试验或裂纹尖端张开位移 (CTOD) 试验等, 但是这些试验比较麻烦。一般规范中的钢材韧性指标采用 V 形缺口冲击功和对应的温度给出。V 形缺口冲击功和断裂韧性是相互联系的, 国际上已经建立起比较完备的断裂力学步骤和标准, 通过钢板的 V 形缺口冲击功和转变温度来确定含裂纹钢板材料的韧性。例如: 国际上流行的 BS7910^[11] 等标准。根据 BS7910 可知, 包含裂纹的钢板断裂韧性与 V 形缺口冲击、相应的转变温度之间的关系式为:

$$K_{Mat} = 20 + \left(77 \cdot e^{\frac{T_{min} - T_{K100} - T_K}{52}} + 11 \right) \cdot \left(\frac{25}{b_{eff}} \right)^{0.25} \cdot \left(\ln \frac{1}{1 - p_f} \right)^{0.25} \quad (17)$$

式中: K_{Mat} 为钢板的断裂韧性; $T_K = 13(0.5 - p_f)$ 为在破坏概率水平 p_f 下, 材料断裂韧性 K_{Mat} 和 T_{K100} 之间的标准差; T_{min} 为结构的设计等效最低温度; b_{eff} 为裂纹长度; T_{K100} 为钢板的断裂韧性等于 $100\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 时的温度。

做冲击韧性试验的试件, V 形缺口一般都是靠近

板的表面($\leq 2\text{mm}$) ,钢板的冲击韧性一般都是从表面到板的中心处降低 ,结构初始裂纹经过发展以后可以到达板的中心处。采用式(18)考虑板厚对冲击功的影响^[12]。

$$\Delta T_t = 12.9 \tanh(21 \ln(t) - 7.6) + 12.8 \quad (18)$$

T_{K100} 和 T_{27J} 之间的关系按照式(19)计算^[7,11]:

$$T_{K100} = T_{27J} + \Delta T_t - 18 \quad (19)$$

2.2 采用任意温度下的冲击功确定 T_{27J}

有时候规范或试验给出的材料的冲击功不是以 27J 为基础的,例如: 国产 Q370qE 规范给出的冲击功要求是 -40°C 时 41J, 这样就需要确定冲击功为 27J 时对应的温度 T_{27J} 。一般采用 Burdekin^[12] 公式等效。

$$T_{27J} = T_{KV} + 41.33 - 8.16 \times \sqrt{KV - 1.373} \quad (20)$$

但式(20)要满足: $16\text{J} \leq KV \leq 67\text{J}$ 和 $17^\circ\text{C} \leq T_{KV} - T_{27J} \leq 25^\circ\text{C}$,该式如图 8 所示。

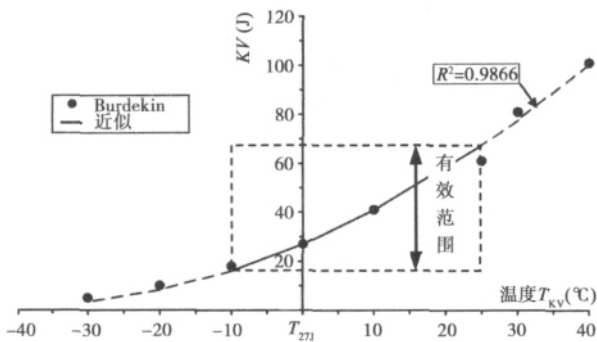


图 8 T_{27J} 和 T_{KV} 之间的关系图

Fig. 8 The Relationship between T_{27J} and T_{KV}

采用式(20)确定我国 Q370q 钢冲击功为 27J 时的温度 T_{27J} ,如表 1 所示。

表 1 Q370q 钢冲击功为 27J 时的温度 T_{27J}

Table 1 Charpy impact test energy 27J and corresponding temperature T_{27J}

钢种	冲击功 KV	试验温度 T_{KV}	T_{27J}
Q370qC	40	0	-9.4
Q370qD	41	-30	-40.0
Q370qE	41	-40	-50.0

2.3 结构设计等效最低温度 T_{min}

在桥梁工程结构中,结构加载的应变速率,钢板的弯曲成型都对其脆性断裂都有影响,一般是把这些因素转化为等效的温度降低来考虑的。结构的设计等效最低温度一般可以采用式(21)表示。

$$T_{min} = T_{Ed, min} + \Delta T_r + \Delta T_{\varepsilon} + \Delta T_{ecf} \quad (21)$$

式中: $T_{Ed, min}$ 为结构设计寿命内预期的最低空气温度; ΔT_r 为辐射损失的修正,一般采用 -5°C ; ΔT_{ε} 为不同

于参考应变速率的应变速率修正。通常瞬时和永久设计状态可用参照应变速率 $\varepsilon_0 = 4.0 \times 10^{-4} / \text{sec}$,对其他应变速率 ε ,可采用式(22)^[5]进行计算。

$$\Delta T_{\varepsilon}^* = - \left(\frac{1440 - f_y(t)}{550} + \frac{t}{2200} \right) \times \left(\ln \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^{1.5} \quad (22)$$

式中: ε 为荷载的实际应变速率; $f_y(t)$ 为对应钢板的屈服强度; ΔT_{ecf} 为考虑钢构件弯曲成型的温度调整系数,可以采用式(23)进行计算:

$$\Delta T_{ecf} = 3 \times DCF \quad (23)$$

式中: DCF 为弯曲成型的角度,对无弯曲成型的材料假定 $DCF = 0.0$,弯曲成型角度 DCF 可采用^[12-13]计算。

3 确定允许的最大钢板厚度

要使得钢板不发生低温脆性断裂就要满足:

$$K_{applied, correct}^* \leq K_{Mat} \quad (24)$$

应力强度因子 $K_{applied, correct}^*$ 是板厚 t 的函数,断裂韧性 K_{Mat} 是温度和裂纹长度的函数,因此可以用式(24)计算出允许的最大钢板厚度。

对式(24)两边取对数,也可转化为设计最低等效最低温度和脆性断裂抵抗温度之间的关系,例如:在失效概率 $p_f = 0.5$ 时,得到:

$$T_{min} - 52 \ln \left[\frac{(K_{applied, correct}^* - 20) \left(\frac{b_{eff}}{25} \right)^{0.25} - 10}{70} \right] + \Delta T_{\sigma} \geq$$

$$T_{27J} + \Delta T_t - 18 \quad (25)$$

式(25)就变为 EN 1993-1-10^[4-5] 中断裂韧性要求:

$$T_{Ed} \geq T_{Rd} \quad (26)$$

根据以上方法,编写了计算允许最大板厚的程序 max_thickness. for。

4 重庆江津观音岩长江大桥钢材选择和允许最大钢板厚度的确定

重庆江津观音岩长江大桥是一座主跨 436m 的结 合梁斜拉桥^[6],其横截面如图 9 所示。主梁采用双工字梁,工字梁下翼缘钢板的最大板厚为 80mm,该工字钢的下翼缘只焊接有竖向加劲肋,没有纵向加劲肋。

根据历史资料统计重庆最低设计温度可以取 -15°C ,太阳辐射损失取为 -5°C ,考虑工厂制造时的弯曲成型等效温度降低取 -10°C 。得到设计等效最低温度为 -30°C 。故采用带横向焊接接头的构造要求决定初始裂纹和疲劳允许应力幅。假定设计应力为 0.5 倍的屈服强度,钢板对接焊接的允许疲劳强度 $\Delta \sigma$ ^[9]

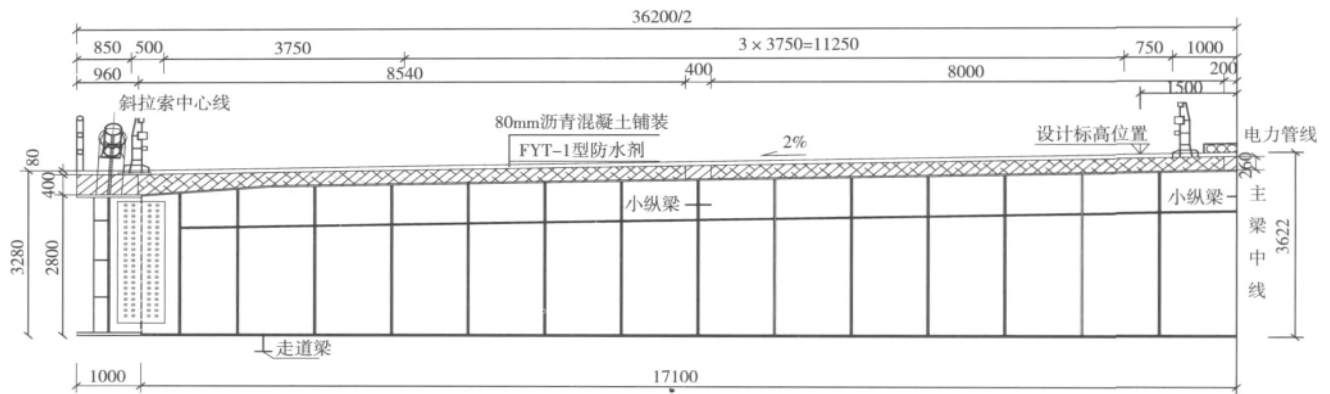


图 9 主梁横断面图 (单位: mm)

Fig. 9 Cross-section of the main girder (unit: mm)

取 90MPa, 考虑板厚度折减系数 $(25/80)^{0.25} = 0.7476$, 竖向加劲肋和下翼缘钢板焊接细节的疲劳强度为 80MPa。应力幅取 $\min(90 \times 0.7476 = 67.3, 80.0) = 67.3\text{MPa}$ 。试对采用国产的 Q370q 钢板进行选材和脆性断裂分析。

荷载循环次数 N_c 采用 5.0×10^5 、 1.0×10^6 、 1.5×10^6 和 2×10^6 分别计算, 得到结果如图 10 所示。由图 10 可以看出, 循环次数为 200 万次时采用 Q370qC,

Q370qD 均不满足要求, Q370qE 钢能满足要求。如果在桥梁使用到设计寿命 3/4 时, 对桥梁的焊缝进行修补, 则 Q370qD 也能满足要求。

如果将允许疲劳强度降低 15%, 即取 57.2MPa, 计算结果如图 11 所示。由图 11 可以看出, 循环次数为 200 万次时, Q370qC、Q370qD 和 Q370qE 钢均能满足要求。

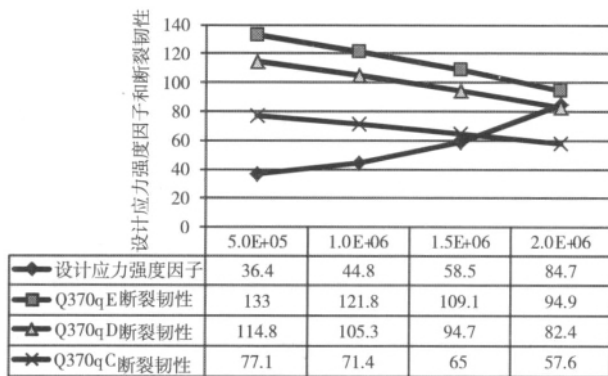


图 10 $\Delta\sigma = 67.3\text{MPa}$ 时不同循环次数的计算结果

Fig. 10 Result based on $\Delta\sigma = 67.3\text{MPa}$ and cycle number

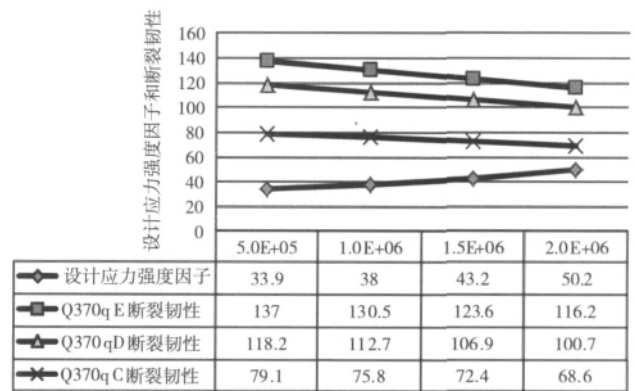


图 11 $\Delta\sigma = 57.2\text{MPa}$ 时不同循环次数的计算结果

Fig. 11 Result based on $\Delta\sigma = 57.2\text{MPa}$ and cycle number

5 结论

本文基于断裂力学理论, 提出了抵抗疲劳和断裂的桥梁允许最大钢板厚度的确定方法。以重庆观音岩长江大桥为例, 对 80mm 厚的 Q370qC、Q370qD 和 Q370qE 分别钢板进行了抵抗疲劳和断裂的计算。并考虑了桥梁结构中整体残余应力, 应变速率和钢板弯曲成型等因素的影响。同时得到以下结论:

(1) 本方法适用于所有钢桥基于抵抗疲劳和断裂的最大板厚确定, 尤其是不能采用试验直接确定含焊接裂纹钢板断裂韧性的情况, 并为钢桥的材料选择提供

了一种理论依据。

(2) 通过该理论编写了钢桥最大允许钢板厚度的计算机程序, 能够根据考虑焊接残余应力, 应变速率和弯曲成型等因素对低温脆断的影响, 考虑板厚对冲击功的影响, 并能根据冲击韧性试验中的冲击功和对应的温度, 等效得到冲击功为 27J 时对应的转变温度。

(3) 在桥梁的疲劳强度不控制设计时, 可以采用降低疲劳强度的方法来增加允许的钢板厚度。也可以通过增加桥梁使用寿命内的全面检查并将开裂的裂纹修补好的方法来增加允许的钢板厚度和防止脆性断裂。结构使用寿命中检查的次数和相应的裂纹长度也可以采用本文中的方法确定。

(4) 对于江津观音岩长江大桥,如果工字梁下翼缘钢板的厚度取 80mm,不降低其疲劳强度,要满足 200 万次的循环次数,Q370qC 和 Q370qD 钢板均不满足要求,Q370qE 钢板满足要求。

参考文献

- [1] JTJ 025—1986 公路桥涵钢结构及木结构设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,1987(JTJ 025—1986 Specifications for design of steel structure and timber structure highway bridges and culverts[S]. Beijing: China Communications Press,1987(in Chinese))
- [2] GB/T 714—2008 桥梁用结构钢[S]. 北京:中国标准出版社,2009(GB/T 714—2008 Structural steel for bridge[S]. Beijing: Standards Press of China,2009(in Chinese))
- [3] TB 10002.2—2005 铁路钢桥设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2005(TB 10002.2—2005 Code for design on steel structure of railway bridge[S]. Beijing: China Railway Publishing House,2005(in Chinese))
- [4] BS EN 1993-1-10 Design of steel structures. Part 1-10: material toughness and through thickness properties[S]. London,UK: British Standards Institutions,2006
- [5] Sedlacek G,Eisel H,Hensen W,et al. Leitfaden zum DIN fachbericht 103 stahlbrücken[M]. Berlin: Ernst & Sohn Verlag,2004
- [6] 王应良,郑旭峰,庄卫林等. 江津观音岩长江大桥设计[J]. 桥梁建设,2009(2):40-43(Wang Yingliang,Zheng Xufeng,Zhuang Weilin,et al. Design of Guanyinyan Changjiang River Bridge in Jiangjin[J]. Bridge Construction,2009(2):40-43(in Chinese))
- [7] Sedlacek G,Stranghoner N,Kuhn B,et al. Composite bridge design improvement for high-speed railways[R]. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities,2001:61-68
- [8] Harrison R P,Loosemore K,Milne I. Assessment of the integrity of structures containing defects[R]. UK: Central Electricity Generating Board,1976:60-73
- [9] BS EN 1993-1-9:2005 Eurocode 3: design of steel structures. Part 1-9: fatigue[S]. London,UK: British Standards Institutions,2005
- [10] DIN Fachbericht 103, stahlbrücken[S]. Berlin: Beuth Verlag,2009
- [11] BS 7910:2005 Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures[S]. London,UK: British Standards Institutions,2005:120-126
- [12] Kühn B. Beitrag zur vereinheitlichung der europäischen regelungen zur vermeidung von sprödbbruch[D]. Aachen,Germany: Rheinische-Westfael Technische Hochschule,2005
- [13] Kuhn B,Sedlacek G. Innovative rules in Eurocode 3,Part 1-10 for the choice of material toughness and the wide range of applicability[C]//Proceedings of the NSCC 2009. 2009:25-32

王应良(1972-)男,博士,教授级高级工程师。主要从事钢结构、组合结构的设计和研究工作。