

交变载荷作用下平面应力状态焊接接头焊趾处应力应变理论解的推导

薛 钢^{1,2}, 王 涛², 宫旭辉², 方洪渊¹

(1. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001;
2. 中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 洛阳 471023)

摘要: 基于弹塑性力学理论计算对接接头交变载荷作用下焊趾处应力和应变, 以准确预测交变载荷作用下平面应力状态对接接头焊趾处的应力和应变值为目标, 考察了不同加载情况下平面应力状态对接接头焊趾处应力和应变的理论计算方法, 并给出了交变载荷作用下平面应力状态对接接头焊趾处应力和应变的理论解。结果表明, 在材料参数、载荷大小以及焊趾应力集中系数已知的前提下, 根据提出的理论解的计算式可获得相应载荷时接头焊趾处的应力应变, 为焊接接头在交变载荷下的疲劳失效预测提供理论指导。

关键词: 交变载荷; 平面应力; 焊趾应力应变; 理论解

中图分类号: TG 404 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2015)04-0097-04

0 序 言

疲劳断裂是金属结构失效的一种主要形式, 是构件经历一定次数的交变载荷作用后, 局部发生破坏的过程。研究材料的疲劳行为及影响因素, 是结构疲劳设计的基础^[1]。焊接为工程构件中一种主要连接方式, 焊接接头的疲劳破坏研究, 需要重点关注^[2-4]。

焊接接头处存在着严重的应力集中和较高的焊接残余应力, 都会使焊接结构更易产生疲劳裂纹, 导致疲劳断裂^[5]。在焊接接头中, 焊趾处作为焊缝与母材的过渡处, 其应力集中最为严重, 是焊接接头中的典型缺口^[6]。明确接头在交变载荷作用下焊趾处的应力应变演变历程, 对于接头疲劳失效的准确预测有着重要的意义。然而, 针对焊接接头承受不同加载情况的交变载荷时焊趾处的应力应变的理论解, 一直未有研究。

由于对接接头是最常见的接头形式, 根据接头尺寸和受力状态, 可将许多接头的受力状态简化为平面应力状态, 文中通过对交变载荷下平面应力状态对接接头在不同加载情况下的焊趾处应力应变值的理论计算, 给出了变载荷作用下平面应力状态对接接头焊趾处应力应变计算式, 为对接接头疲劳失效的准确预测及评价提供了重要技术支撑。

1 基本假设

文中研究对象为交变载荷下平面应力状态的对接接头, 接头横截面及其残余应力分布如图1所示。其中 K_t 为焊趾处弹性应力集中系数, σ_{\max} 和 σ_{\min} 分别为加载最大和最小时的名义应力。为方便分析, 假设材料为双线性属性, 且接头处于平面应力状态, 如图2所示。焊趾处可近似认为处以单向拉应力状态, 即 $\sigma_1 = \sigma_x$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, $\sigma_{\text{Mises}} = \sigma_x$ 。其中 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为主应力, σ_x 为单向拉应力, σ_{Mises} 为 Mises 应力。

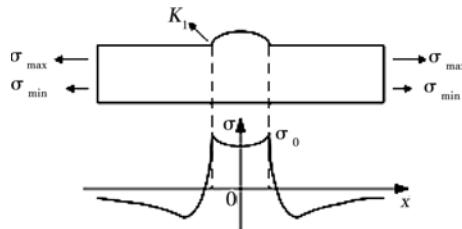


图1 对接接头及其残余应力示意图

Fig. 1 Butt joint and its residual stress

2 接头总体为弹性时焊趾处的应力应变理论解计算式

接头承受交变载荷时, 若其最大应力低于材料的屈服强度, 接头总体处于弹性状态。由于焊趾处

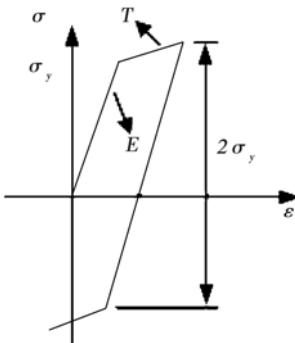


图2 材料双线性属性示意图

Fig. 2 Schematic diagram of bilinear material property

的应力集中及焊接残余拉应力的存在,当接头加载至最大应力时,焊趾处应力可能超过材料的屈服强度,使得焊趾处发生塑性变形。

以下就接头总体为弹性状态时,焊趾处为弹性变形和塑性变形的情况进行讨论,给出相应的焊趾处应力应变计算式。

2.1 焊趾处为弹性变形

接头总体为弹性状态,焊趾处也为弹性变形时,其受力条件如式(1)。

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_0 + K_t \cdot \sigma_{\max} \leq \sigma_y \\ \sigma_0 + K_t \cdot \sigma_{\min} \geq -\sigma_y \end{array} \right\} \quad (1)$$

式中: σ_y 为屈服应力; σ_0 为焊趾处初始内应力, $-\sigma_y \leq \sigma_0 \leq \sigma_y$; K_t 为焊趾处弹性应力集中系数(可根据经验数据或者有限元计算获得); σ_{\max} 为加载最大名义应力, $\sigma_{\max} \geq 0$; σ_{\min} 为加载最小名义应力, $\sigma_{\min} < \sigma_{\max}$ 。

加载至最大和最小应力时,焊趾处的应力应变计算式如式(2)所示。

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_1 = \sigma_0 + K_t \cdot \sigma_{\max} \\ \varepsilon_t^1 = \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{E} = \frac{K_t \cdot \sigma_{\max}}{E} \\ \varepsilon_e^1 = \varepsilon_t^1 = \frac{K_t \cdot \sigma_{\max}}{E} \\ \varepsilon_p^1 = 0 \\ \sigma_u = \sigma_0 + K_t \cdot \sigma_{\min} \\ \varepsilon_t^u = \frac{\sigma_u - \sigma_0}{E} = \frac{K_t \cdot \sigma_{\min}}{E} \\ \varepsilon_e^u = \varepsilon_t^u = \frac{K_t \cdot \sigma_{\min}}{E} \\ \varepsilon_p^u = 0 \end{array} \right\} \quad (2)$$

式中: σ_1 为加载至最大应力时焊趾处应力; E 为弹性模量; σ_u 为加载至最小应力时焊趾处应力; ε_t^1 为加载至最大应力时焊趾处应变; ε_e^1 为加载至最大应力时焊趾处弹性应变; ε_p^1 为加载至最大应力时焊趾处塑性应变; ε_t^u 为加载至最小应力时焊趾处应变; ε_e^u

为加载至最小应力时焊趾处弹性应变; ε_p^u 为加载至最小应力时焊趾处塑性应变。

2.2 焊趾加载至最大应力时发生塑性变形

2.2.1 由 σ_{\max} 变为 σ_{\min} 时未发生二次塑变

接头总体为弹性状态,加载至最大应力时发生塑性变形,由最大应力变为最小应力时,焊趾处未发生二次塑性变形时,其受力条件如式(3)。其应力应变曲线如图3所示。

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_0 + K_t \cdot \sigma_{\max} > \sigma_y \\ 0 < \sigma_{\max} < \sigma_y \\ K_t (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \leq 2\sigma_y \end{array} \right\} \quad (3)$$

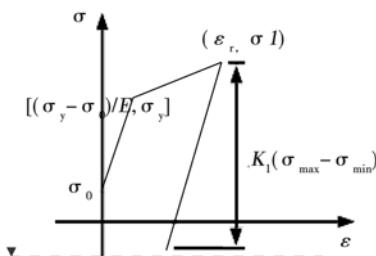


图3 焊趾未发生二次塑变时的应力应变曲线

Fig. 3 Stress and strain curve of no recurrence plastic deformation at weld toe

① 加载至 σ_{\max} 时

由材料双线性关系,得

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_y}{\varepsilon_t^1 - (\sigma_y - \sigma_0)/E} = T \quad (4)$$

式中: T 为硬化模量。

整理得

$$\varepsilon_t^1 = \frac{\sigma_1 - \sigma_y}{T} + \frac{\sigma_y - \sigma_0}{E} \quad (5)$$

由 Newber 公式得

$$K_t^2 = K_\sigma \cdot K_\varepsilon = \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\sigma_{\max}} \cdot \frac{\varepsilon_t^1}{\sigma_{\max}/E} \quad (6)$$

式中: K_σ 为焊趾处应力集中系数; K_ε 为焊趾处应变集中系数。

整理得

$$\varepsilon_t^1 = \frac{(K_t \cdot \sigma_{\max})^2}{E(\sigma_1 - \sigma_0)} \quad (7)$$

联合式(5)和式(7)求解,结合 $\sigma_1 > \sigma_y$,得

$$\sigma_1 = \frac{1}{2E} [(E + T)\sigma_0 + (E - T)\sigma_y + A] \quad (8)$$

式中: $A = [(E - T)^2 (\sigma_y - \sigma_0)^2 + 4ET(K_t \cdot \sigma_{\max})^2]^{1/2}$ 。

将式(8)带入式(5),得

$$\varepsilon_t^1 = \frac{1}{2ET} [(T - E)(\sigma_y - \sigma_0) + A] \quad (9)$$

$$\varepsilon_e^1 = \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{E} = \frac{1}{2E^2} [(E-T)(\sigma_y - \sigma_0) + A] \quad (10)$$

$$\varepsilon_p^1 = \varepsilon_t^1 - \varepsilon_e^1 = \frac{(T^2 - E^2)(\sigma_y - \sigma_0)}{2E^2 T} + \frac{E-T}{2E^2 T} A \quad (11)$$

② 载荷由 σ_{\max} 变为 σ_{\min} 时

$$\sigma_u = \sigma_1 - K_t(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) = -K_t(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) + \frac{1}{2E} [(E+T)\sigma_0 + (E-T)\sigma_y + A] \quad (12)$$

$$\varepsilon_t^u = \varepsilon_t^1 - \frac{K_t(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}{E} = \frac{1}{2ET} [A - (E-T)(\sigma_y - \sigma_0)] - \frac{K_t(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}{E} \quad (13)$$

$$\varepsilon_e^u = \varepsilon_e^1 - \frac{K_t(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}{E} = -\frac{K_t(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}{E} + \frac{1}{2E^2} [(E-T)(\sigma_y - \sigma_0) + A] \quad (14)$$

$$\varepsilon_p^u = \varepsilon_p^1 = \frac{E-T}{2E^2 T} A - \frac{(E^2 - T^2)(\sigma_y - \sigma_0)}{2E^2 T} \quad (15)$$

焊趾经过不同处理后,其初始内应力不同。无初始内应力时, $\sigma_0 = 0$;对于焊接接头而言,焊趾处残余应力最大为材料屈服强度, $\sigma_0 = \sigma_y$;当焊趾经过降应力处理时,其初始内应力可为压应力且最多达到屈服强度, $\sigma_0 = -\sigma_y$;对于削平接头而言,焊趾处无应力集中, $K_t = 1$ 。将不同情况下的 σ_0 和 K_t 代入式(8)~式(15),可获得相应条件下焊趾处的应力及应变值。

2.2.2 加载至 σ_{\min} 时发生二次塑变

接头总体为弹性状态,加载至最大应力时发生塑性变形,由最大应力变为最小应力时,焊趾处发生二次塑性变形时,其受力条件如式(16)。其应力应变曲线如图4所示。

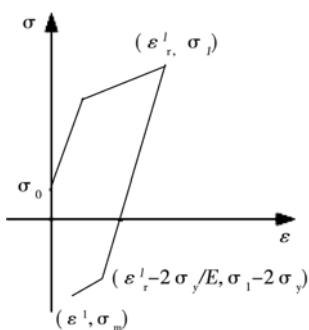


图4 焊趾发生二次塑变时的力应变曲线

Fig. 4 Stress and strain curve of recurrence plastic deformation at weld toe

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_0 + K_t \cdot \sigma_{\max} > \sigma_y \\ 0 < \sigma_{\max} < \sigma_y \\ K_t(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) > 2\sigma_y \end{array} \right\} \quad (16)$$

① 加载至 σ_{\max} 时

$\sigma_1, \varepsilon_t^1, \varepsilon_e^1, \varepsilon_p^1$ 计算式分别为式(8)~式(11)。

② 载荷由 σ_{\max} 变为 σ_{\min} 时

假设材料拉伸和压缩时均表现为相同的双线性特性,则有

$$\frac{\sigma_u - (\sigma_1 - 2\sigma_y)}{\varepsilon_t^u - (\varepsilon_t^1 - 2\sigma_y/E)} = T \quad (17)$$

整理得

$$\varepsilon_t^u - \varepsilon_t^1 = \frac{(\sigma_u - \sigma_1) + 2\sigma_y}{T} - \frac{2\sigma_y}{E} \quad (18)$$

由 Newber 关系式可得

$$K_t^2 = K_\sigma \cdot K_\varepsilon = \frac{\sigma_u - \sigma_1}{\sigma_{\min} - \sigma_{\max}} \cdot \frac{\varepsilon_t^u - \varepsilon_t^1}{(\sigma_{\min} - \sigma_{\max})/E} \quad (19)$$

整理得

$$\varepsilon_t^u - \varepsilon_t^1 = \frac{K_t^2(\sigma_{\min} - \sigma_{\max})^2}{E(\sigma_u - \sigma_1)} \quad (20)$$

联合式(18)和式(20),得

$$\sigma_u - \sigma_1 = -\frac{E-T}{E}\sigma_y - \frac{B}{E} \quad (21)$$

式中: $B = [(E-T)^2\sigma_y^2 + ETK_{12}(\sigma_{\min} - \sigma_{\max})^2]^{1/2}$.

将式(8)代入式(21),得

$$\sigma_u = \frac{E+T}{2E}\sigma_0 - \frac{E-T}{2E}\sigma_y + \frac{A}{2E} - \frac{B}{E} \quad (22)$$

将式(21),(9)代入式(18),得

$$\varepsilon_t^u = \frac{E-T}{2ET}(\sigma_0 + \sigma_y) + \frac{A}{2ET} - \frac{B}{ET} \quad (23)$$

$$\varepsilon_e^u = \varepsilon_e^1 - \frac{\sigma_1 - \sigma_u}{E} = \frac{A - 2B}{2E^2} - \frac{E-T}{2E^2}(\sigma_y + \sigma_0) \quad (24)$$

$$\varepsilon_p^u = \varepsilon_p^1 - \varepsilon_e^u = \frac{E-T}{2E^2 T} [A - 2B + (E+T)(\sigma_y + \sigma_0)] \quad (25)$$

3 接头总体为塑性时焊趾处的应力应变理论解

3.1 由 σ_{\max} 变为 σ_{\min} 时未发生二次塑变

接头总体为塑性状态,加载至最大应力时发生塑性变形,由最大应力变为最小应力时,焊趾处未发生二次塑性变形时,其受力条件如式(26)。

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_0 + K_t \sigma_{\max} > \sigma_y \\ \sigma_{\max} > \sigma_y \\ \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \leq K_t(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \leq 2\sigma_y \end{array} \right\} \quad (26)$$

3.1.1 加载至 σ_{\max} 时

材料名义应力 - 应变曲线如图5所示。

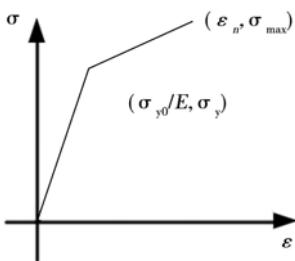


图5 材料名义应力 - 应变曲线示意图

Fig. 5 Material nominal stress and strain curve

名义应力 - 应变满足：

$$\frac{\sigma_{\max} - \sigma_y}{\varepsilon_n - \sigma_y/E} = T \quad (27)$$

式中: ε_n 为名义应变。

整理得

$$\varepsilon_n = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_y}{T} + \frac{\sigma_y}{E} \quad (28)$$

由材料双线性属性, 焊趾处应力 - 应变满足下式:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_y}{\varepsilon_t^1 - (\sigma_y - \sigma_0)/E} = T \quad (29)$$

整理得

$$\varepsilon_t^1 = \frac{\sigma_1 - \sigma_y}{T} + \frac{\sigma_y - \sigma_0}{E} \quad (30)$$

由 Newber 关系, 得

$$K_t^2 = K_\sigma \cdot K_\varepsilon = \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\sigma_{\max}} \cdot \frac{\varepsilon_t^1}{\varepsilon_n} \quad (31)$$

整理得

$$\varepsilon_t^1 = \frac{K_t^2 \sigma_{\max} \varepsilon_n}{\sigma_1 - \sigma_0} \quad (32)$$

将式(28)代入式(32), 得

$$\varepsilon_t^1 = \frac{E K_t^2 \sigma_{\max}^2 - (E - T) K_t^2 \sigma_{\max} \sigma_y}{E T (\sigma_1 - \sigma_0)} \quad (33)$$

由式(30)代入式(33)联合求解 σ_1 , 得

$$\sigma_1 = \frac{1}{2E} [(E - T) \sigma_y + (E + T) \sigma_0 + C] \quad (34)$$

式中: $C = [(E - T)^2 (\sigma_y - \sigma_0)^2 + 4 E K_{12} \sigma_{\max} (E \sigma_{\max} - E \sigma_y + T \sigma_y)]^{1/2}$.

将式(34)代入式(30), 得

$$\varepsilon_t^1 = \frac{C - (E - T) (\sigma_y - \sigma_0)}{2ET} \quad (35)$$

$$\varepsilon_e^1 = \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{E} = \frac{C + (E - T) (\sigma_y - \sigma_0)}{2E^2} \quad (36)$$

$$\varepsilon_p^1 = \varepsilon_t^1 - \varepsilon_e^1 = \frac{(E - T) C - (E^2 - T^2) (\sigma_y - \sigma_0)}{2E^2 T} \quad (37)$$

3.1.2 载荷由 σ_{\max} 变为 σ_{\min} 时

$$\begin{aligned} \sigma_u &= \sigma_1 - K_t (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) = -K_t (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \\ &\quad + \frac{1}{2E} [(E - T) \sigma_y + (E + T) \sigma_0 + C] \end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_t^u &= \varepsilon_t^1 - \frac{K_t (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}{E} \\ &= \frac{C - (E - T) (\sigma_y - \sigma_0)}{2ET} - \frac{K_t (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}{E} \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_e^u &= \varepsilon_e^1 - \frac{K_t (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}{E} = -\frac{K_t (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}{E} \\ &\quad + \frac{1}{2E^2} [C + (E - T) (\sigma_y - \sigma_0)] \end{aligned} \quad (40)$$

$$\varepsilon_p^u = \varepsilon_p^1 = \frac{E - T}{2E^2 T} C - \frac{E^2 - T^2}{2E^2 T} (\sigma_y - \sigma_0) \quad (41)$$

3.2 由 σ_{\max} 变为 σ_{\min} 时发生二次塑变

接头总体为塑性状态, 加载至最大应力时发生塑性变形, 由最大应力变为最小应力时, 焊趾处发生二次塑性变形时, 其受力条件如式(42).

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_0 + K_t \cdot \sigma_{\max} > \sigma_y \\ \sigma_{\max} > \sigma_y \\ \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \leqslant 2\sigma_y \\ K_t (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) > 2\sigma_y \end{array} \right\} \quad (42)$$

3.2.1 加载至 σ_{\max} 时

$\sigma_1, \varepsilon_t^1, \varepsilon_e^1, \varepsilon_p^1$ 计算式分别为式(8) ~ 式(11).

3.2.2 载荷由 σ_{\max} 变为 σ_{\min} 时

由双线性材料属性式(17)和 Newber 关系式(19)联合, 得

$$\sigma_u = \sigma_1 - \frac{E - T}{E} \sigma_y - \frac{B}{E} \quad (43)$$

将式(34)代入式(43), 得

$$\sigma_u = \frac{E + T}{2E} \sigma_0 - \frac{E - T}{2E} \sigma_y + \frac{C - 2B}{2E} \quad (44)$$

将式(44)代入式(17), 求解

$$\begin{aligned} \varepsilon_t^u &= \varepsilon_t^1 + \frac{\sigma_u - \sigma_1 + 2\sigma_y}{T} - \frac{2\sigma_y}{E} \\ &= \frac{1}{2ET} C - \frac{1}{ET} B + \frac{E - T}{2ET} (\sigma_0 + \sigma_y) \end{aligned} \quad (45)$$

$$\varepsilon_e^u = \varepsilon_e^1 + \frac{\sigma_u - \sigma_1}{E} = \frac{1}{2E^2} C - \frac{1}{E^2} B - \frac{E - T}{2E^2} (\sigma_y + \sigma_0) \quad (46)$$

$$\varepsilon_p^u = \varepsilon_p^1 - \varepsilon_e^u = \frac{E - T}{2E^2 T} [C - 2B + (E + T) (\sigma_y + \sigma_0)] \quad (47)$$

4 结论

- (1) 基于弹塑性力学理论给出了交变载荷作用

[下转第 105 页]

- 58(4): 1252–1260.
- [9] Mandal S, Ray A K, Ray A K. Correlation between the mechanical properties and the microstructural behaviour of Al₂O₃-(Ag-Cu-Ti) brazed joints[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 383(2): 235–244.
- [10] 刘桂武, 乔冠军. 活化钼-锰法陶瓷金属封接研究的进展[J]. 硅酸盐学报, 2006, 34(12): 1522–1527.
Liu Guiwu, Qiao Guanjun. Research progress on ceramic-metal seals via the activated molybdenum-manganese[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2006, 34(12): 1522–1527.
- [11] Kozlova O, Voytovych R, Eustathopoulos N. Initial stages of wetting of alumina by reactive CuAgTi alloys[J]. Scripta Materialia, 2011, 65(1): 13–16.
- [12] Voytovych R, Robaut F, Eustathopoulos N. The relation between wetting and interfacial chemistry in the CuAgTi/alumina system [J]. Acta Materialia, 2006, 54(8): 2205–2214.
- [13] 曾月梅, 汤铁装, 周剑, 等. 劣质高危废镁真空蒸馏回收[J]. 铸造, 2012, 61(2): 219–222.
Zeng Yuemei, Tang Tiezhuang, Zhou Jian, et al. Vacuum distillation recycling of dangerous and low-grade magnesium scrap[J]. China Foundry, 2012, 61(2): 219–222.

作者简介: 朱成俊,男,1977年出生,博士研究生,副教授。主要从事机械设计、焊接工艺、先进材料连接技术等方面的研究。发表论文20余篇。Email: zhchj222@sina.com

[上接第100页]

下平面应力状态对接接头焊趾处应力和应变的计算式。

(2) 在材料参数、载荷大小以及焊趾应力集中系数已知的前提下,根据提出的计算式可计算出相应载荷时接头焊趾处的应力应变,为焊接接头在交变载荷下的疲劳失效预测提供理论指导。

参考文献:

- [1] 张彦华. 焊接结构疲劳分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [2] 赵文忠, 魏鸿亮, 方吉. 基于主S-N曲线法的焊接结构虚拟疲劳试验理论与应用[J]. 焊接学报, 2014, 35(5): 75–78.
Zhao Wenzhong, Wei Hongliang, Fang Ji. The theory and application of the virtual fatigue test of welded structures based on the master S-N curve method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(5): 75–78.
- [3] 李明娜, 刘峰. 拉保持对316L奥氏体不锈钢焊接接头低周疲劳循环应力响应及损伤机制的影响[J]. 焊接学报, 2014, 35(9): 87–91.
Li Mingna, Liu Feng. Effect of tensile dwell on low cycle fatigue cyclic stress response and damage mechanism of 316L austenitic stainless steel welding joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(9): 87–91.
- [4] 张涛, 王东坡, 邓彩艳. 双周疲劳载荷作用下焊接接头线性累计损伤分析[J]. 焊接学报, 2014, 35(3): 61–65.
Zhang Tao, Wang Dongpo, Deng Caiyan. Linear cumulative damage analysis of welded joints under combined cycle fatigue[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(3): 61–65.
- [5] 薛钢, 王涛, 方洪渊. 异质接头应力集中系数与坡口角度和材料差异度的关系方程[J]. 焊接学报, 2014, 35(8): 95–98.
Xue Gang, Wang Tao, Fang Hongyuan. Stress concentration factor equation of heterogeneity joint based on slope angle and material difference[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(8): 95–98.
- [6] 王佳杰, 董志波, 方洪渊. 低匹配对接接头形状参数对三点弯曲应力集中系数的影响[J]. 焊接学报, 2013, 34(1): 73–76.
Wang Jajie, Dong Zhibo, Fang Hongyuan. Influence of joint geometric parameters on stress concentration factor for under-matched butt joint under three-point bending load[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(1): 73–76.

作者简介: 薛钢,男,1978年出生,博士研究生。主要从事焊接结构安全可靠性的研究工作。发表论文30余篇。Email: xuegang_29@163.com

通讯作者: 方洪渊,男,博士生导师,教授。Email: hyfang@hit.edu.cn