

低匹配十字接头的“等承载”设计

赵智力¹, 张远健¹, 方洪渊², 刘雪松²

(1. 哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150040;

2. 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)

摘 要:为提高低匹配接头的静载承载能力和疲劳抗力,根据提出的“等承载”设计思想和实现条件,在确定十字接头应力集中最小化的焊缝形状方案的基础上,通过有限元计算及其结果的回归分析,建立了十字接头几何参数与焊趾、焊根应力集中系数的关系方程,进行了0.571匹配比十字接头等承载目的的接头形状参数设计。结果表明,设计延缓了拉伸及弯曲过程中低强焊缝和焊趾应力的增长速度,低强焊缝不先于母材屈服,应变集中先位于焊趾,随后向母材转移,接头断裂模式转变为安全的全面屈服断裂。该设计对高强度钢低匹配接头的应用具有重要意义。

关键词:低匹配; 十字接头; 等承载能力; 形状参数设计; 全面屈服断裂

中图分类号: TG 407 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)06-0099-04

0 序 言

高强度钢低匹配接头的优势在于软质焊缝能够有效降低结构的拘束应力、减少冷裂纹发生,同时还可降低预热温度或进行不预热焊接,因此得到广泛重视^[1]。但静载承载能力和疲劳抗力相对较低的不足,成为低匹配接头广泛应用的主要障碍,很多场合高强度钢的低匹配焊接结构通常只能被降低载荷使用^[1,2]。

为提高高强度钢低匹配接头的承载能力,方洪渊组织开展了以“等承载”能力(equal load-carrying capacity-ELCC)为目标的相关工作,以使低强焊缝具有与高强母材相等的静载承载能力和疲劳抗力。之前曾提出了一个以全面屈服准则为判据的ELCC设计思想,并在此基础上确定了低匹配对接接头实现ELCC的条件,实现了低匹配对接接头的ELCC设计,有限元计算和试验结果均验证了该设计对接接头在静载拉伸和拉伸疲劳载荷下的可行性和显著效果^[3,4]。随后王涛等人^[5,6]进行了满足ELCC几何条件的对接接头的随焊整形及弯曲载荷下ELCC的可行性研究,而针对低匹配十字接头的相关工作还未开展。

文中在忽略焊缝冶金及力学强化作用、焊接残余应力作用的前提下,依据ELCC设计思想,进行了使低匹配十字接头焊缝与母材承载能力相等的EL-

CC设计,并借助有限元软件考察了拉伸和弯曲载荷下的ELCC效果。

1 ELCC 设计思想

若以强度和塑性变形能力两个结构安全性指标作为接头承载能力的评定指标,因强度失匹配接头的不同断裂模式类型能够同时反映接头的强度、塑性变形能力以及焊缝与母材之间塑性变形的非均匀程度,提出了如下以断裂模式类型为判据的ELCC设计思想,即低匹配接头的断裂模式至少应为焊缝与母材同时发生塑性变形的全面屈服断裂。焊缝与母材塑性变形的同步发生,在确保静载承载能力相等的同时,还可避免低匹配接头的高强母材区还处于高周应力疲劳的同时、低强焊缝区过早进入低周应变疲劳。这可以借助几何形状设计调整接头内部的应力分布来实现。因此ELCC设计的实质是寻求特定匹配比条件下低匹配接头焊缝与母材同时发生塑性变形所需的接头几何参数的过程。建立特定匹配比条件下全面屈服断裂与接头几何参数之间的关系是实现ELCC的关键。

2 ELCC 实现条件

考虑到高强度钢接头缺口效应显著、应用载荷大的特点,文中ELCC设计仅针对作为工作焊缝的、开坡口焊透的K形焊缝十字接头。

2.1 焊缝与母材同步变形的控制

横向加载的 K 形焊缝十字接头,坡口内部低强焊缝区、焊根位置的应力最大,见图 1,若定义坡口内部最大应力与载荷的平均应力的比值为焊根应力集中系数 K_{root} ,则 K_{root} 越小,低强焊缝的应力就越低,低匹配接头承载能力就越大.当母材承受的平均应力值达到自身屈服强度时,如果此时坡口内部的峰值应力恰好为焊缝熔敷金属的屈服强度,则尽管焊缝强度低于母材强度,也将会出现焊缝与母材同时屈服的情形,因此 ELCC 的实现条件为

$$K_{\text{root}} = \frac{R_{\text{eL}}^{\text{w}}}{R_{\text{eL}}^{\text{B}}} = \frac{\sigma_{\text{s}}^{\text{w}}}{\sigma_{\text{s}}^{\text{B}}} = \mu_{\text{MMR}} \quad (1)$$

式中: $\sigma_{\text{s}}^{\text{w}}$ 为坡口内部的峰值应力; $\sigma_{\text{s}}^{\text{B}}$ 为母材承受的平均应力; R_{eL}^{B} , R_{eL}^{w} 分别为母材和焊缝熔敷金属的屈服强度; μ_{MMR} 为接头屈服强度匹配比.

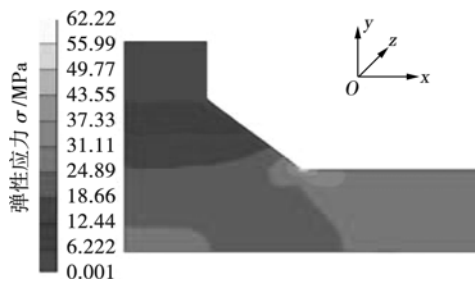


图 1 1/4 十字接头拉伸载荷下的弹性应力分布

Fig. 1 Elastic stress of 1/4 cruciform joint under tensile load

2.2 焊趾应力集中控制

尽管存在冶金强化作用,在材料低强与应力集中双重作用下,低匹配接头焊趾附近区域的疲劳抗力必然会显著降低.但根据 Mattheck 等人^[7]的理论成果,借助形状设计是能够完全消除结构的应力集中的.因此调整接头几何参数使应力分布满足式(1)并尽可能使焊趾应力集中系数 K_{toe} 最小化,即可达到静载拉伸和疲劳的 ELCC 的设计目的.

3 ELCC 设计

3.1 焊缝形状方案

根据图 1 应力分布,确定应力集中最小化的焊缝形状方案,两板之间选图 2 的 Mattheck 曲线过渡,该曲线由 45°折线和大半径的圆弧曲线组成.

3.2 应力集中系数关系方程的建立

对 0.50 ~ 0.80 匹配比、焊脚尺寸 h 在 $h_{\text{min}} \sim 2h_{\text{min}}$ 之间变化的横向拉伸十字接头的有限元结果进行拟合,得到水平板厚 $2t$ 、竖直接厚 $2w_0$ 、焊趾半径 r

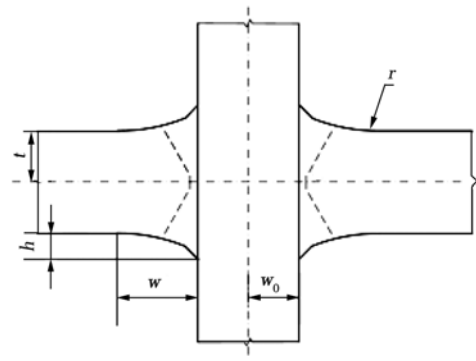


图 2 十字接头焊缝形状方案

Fig. 2 Weld shape proposals of K groove cruciform joint

的接头形状参数与水平板 K_{toe} 的关系式(2)~式(4)、与 K_{root} 的关系式(5)~式(6), h_{min} 为 ELCC 对接接头的最小余高值,见式(7).

$$K_{\text{toe}} = 1 + \alpha r^{(0.403 \frac{t}{h+t} - 1.031)} \quad (2)$$

式中: α 为形状系数,按最大主应力计算时

$$\alpha = 3.285 - 2.541 \left(\frac{t}{h+t} \right)^2 \quad (3)$$

按等效 Von Mises 应力计算时

$$\alpha = 3.030 - 2.300 \left(\frac{t}{h+t} \right)^2 \quad (4)$$

按最大主应力计算时

$$K_{\text{root}} = 0.05405 \left(\frac{t+h}{w_0} \right)^2 - 0.42926 \frac{t+h}{w_0} + 1.30677 \quad (5)$$

按等效 Von Mises 应力计算时

$$K_{\text{root}} = 0.03154 \left(\frac{t+h}{w_0} \right)^2 - 0.29865 \frac{t+h}{w_0} + 1.18464 \quad (6)$$

$$h_{\text{min}} = \frac{t}{\mu_{\text{MMR}}} - t \quad (7)$$

比较有限元结果与拟合方程的计算值,误差在 3% 以内. 式(2)~式(4)与 ELCC 对接接头相同的原因是焊缝形状相近及竖直接板仅在有限长度范围内分担载荷,见图 3.

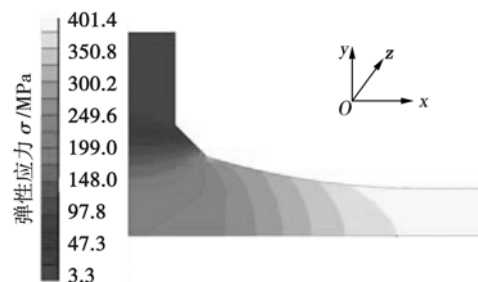


图 3 1/4 ELCC 十字接头弹性应力

Fig. 3 Elastic stress of 1/4 ELCC joint under tensile load

3.3 ELCC 设计步骤

因 t, w_0, μ_{MMR} 已知, 首先令式(5)或式(6)等于 μ_{MMR} , 可确定十字接头 ELCC 所需的焊脚尺寸 h ; 其次以焊趾应力集中系数在 1.05 以内为设计标准, 由式(2)反推可得最小焊趾半径 r_{min} ; 最后, 根据图 2 的几何参数关系, 获得盖面焊道半宽 w 为

$$w = \frac{h}{2} + \left[r^2 - \left(r - \frac{h}{2} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (8)$$

上述焊缝形状可通过在焊趾外侧堆焊焊道及随后的机械加工获得。

3.4 ELCC 设计在弯矩载荷下的适用性

由材料力学可知, 弯矩作用下等截面梁的应力分布与距离成正比。图 4 是匹配比为 0.60 的按单轴拉伸 ELCC 设计的接头在弯矩载荷下的应力, 其应力集中的控制情况不易观察。提取相同条件焊脚尺寸为 3.5 mm 的普通接头和 ELCC 接头水平板上表面节点的应力, 分别除以按正比关系变化的对应应力, 得到图 5 的相对应力集中分布, 不仅焊趾应力集中低于 1.05, 而且焊缝应力集中远低于 1.00。单轴拉伸载荷下的接头设计适用于弯矩载荷下的 ELCC 要求, 原因是采用的 Mattheck 形状优化曲线本身适用于弯矩载荷^[7]。

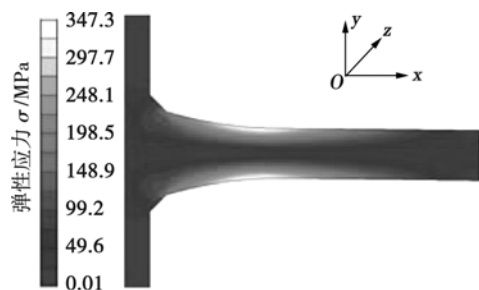


图 4 弯矩载荷下 1/2 十字接头的应力

Fig. 4 Stress of 1/2 cruciform joint under bending moment

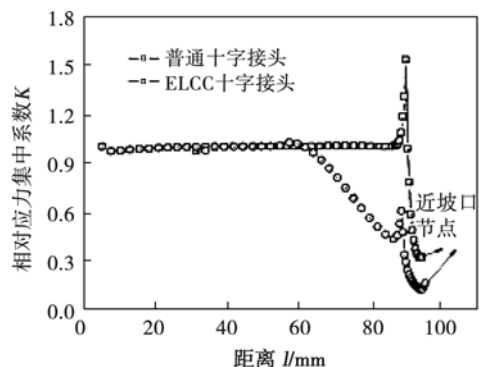


图 5 弯矩载荷下十字接头的相对应力集中系数

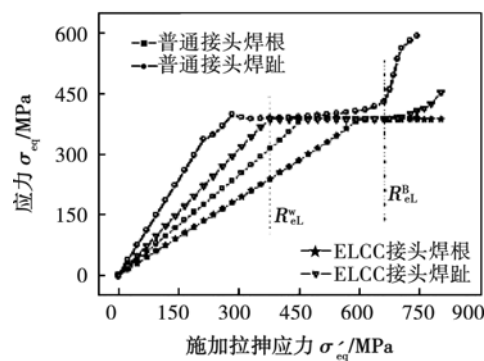
Fig. 5 Relative stress concentration factors of cruciform joint under bending moment

4 断裂模式及承载优势

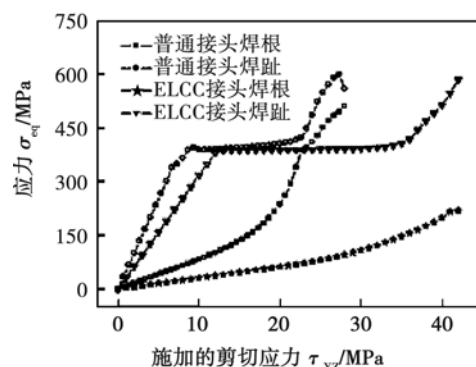
上述 ELCC 设计是在弹性变形范围内进行的, 但焊缝内部应力的非均匀分布及焊缝、母材塑性性能的差异必然影响接头承载, 下面借助数值模拟考察。高强度钢母材 10CrNi3MoV 配 J422 焊条, 屈服强度分别为 662, 378 MPa, 抗拉强度 718, 484 MPa, 匹配比 0.571。两板厚均为 14 mm, ELCC 接头的 $h = 10.52$ mm, $r = 80.97$ mm, 盖面焊道半宽 $w = 33.97$ mm、坡口间隙、钝边高度均为 2 mm, 坡口角度 45° 。

4.1 承载优势

图 6 为拉伸及弯曲载荷下普通十字接头和 ELCC 十字接头焊趾、焊根节点的等效应力变化, 可以看到 ELCC 设计大大延缓了低强焊缝和焊趾区的应力增加速度, 静载承载能力和疲劳抗力增加。



(a) 拉伸载荷



(b) 弯曲载荷

图 6 焊趾及焊根处焊缝应力历程

Fig. 6 Stress histories of weld near weld toe and weld root

4.2 断裂位置及断裂模式

与普通接头不同, ELCC 接头拉伸、弯曲时随载荷增加等效塑性应峰值变均首先位于焊趾, 载荷超过母材屈服强度后, 母材应变迅速增加, 应变峰值均移至焊趾外母材, 见图 7。这种变化的应变峰值位置意味着不同载荷水平下疲劳裂纹的萌生及断裂位置。

焊缝延性高于母材,故母材将成为 ELCC 接头的拉伸断裂位置,断裂模式转变为安全的全面屈服断裂。

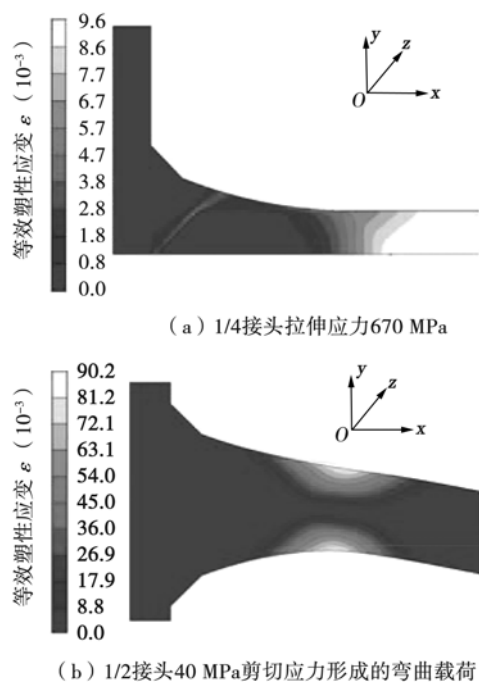


图 7 ELCC 接头等效塑性应变

Fig. 7 Equivalent plastic strain of ELCC joints

5 结 论

(1) 在确定 K 形焊缝十字接头应力集中最小化的焊缝形状方案基础上,根据提出的 ELCC 设计思想、实现条件和建立的焊趾、焊根应力集中系数关系方程,给出了低匹配十字接头实现拉伸、弯曲载荷下静载和疲劳 ELCC 的设计方法。

(2) 设计了 J422 焊条配 10CrNi3MoV 钢的低匹配 ELCC 十字接头,拉伸和弯曲的模拟结果表明,ELCC 设计大大延缓了低强焊缝和焊趾区应力应变的增加速度,断裂模式转变为安全的全面屈服断裂,静载承载能力和疲劳抗力将显著增加。

参考文献:

- [1] 李亚江,王娟,刘鹏. 低合金钢焊接及其工程应用[M]. 北京:化学工业出版社,2003.
- [2] 张玉凤,霍立兴,王立君. 焊缝匹配力学性能影响的综合研究[J]. 机械工程学报,1994,30(3):31-38.
Zhang Yufeng, Huo Lixing, Wang Lijun. General investigation on the influence of weld matching on mechanical behaviours[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1994, 30(3): 31-38.
- [3] 赵智力,方洪渊. 一种针对低匹配焊接接头的“等承载”设计方法[J]. 焊接学报,2011,32(4):87-90.
Zhao Zhili, Fang Hongyuan. A design method of equal load-carrying capacity for under-matching weld joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(4): 87-90.
- [4] 赵智力,方洪渊. 低匹配对接接头的“等承载”设计及拉伸疲劳行为[J]. 机械工程学报,2010,46(10):75-80.
Zhao Zhili, Fang Hongyuan. Design of undermatching butt joints for equal load-carrying capacity and tension and fatigue behaviors of joints[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(10): 75-80.
- [5] 杨建国,王涛. 焊缝含 I 型单边裂纹低匹配平余高对接接头形状参数对形状因子的影响[J]. 焊接学报,2012,33(9):85-88.
Yang Jianguo, Wang Tao. Influence of joint geometric parameters on shape factor of mode I edge-cracked under-matched butt joint with flat reinforcement[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(9): 85-88.
- [6] 王佳杰,董志波. 弹性阶段低匹配对接接头三点弯曲余高形状设计[J]. 焊接学报,2012,33(8):37-40.
Wang Jiajie, Dong Zhibo. Shape design of reinforcement for under-matched butt joints under three-point bending load in elastic stage[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(8): 37-40.
- [7] Mattheck C. Teacher tree; the evolution of notch shape optimization from complex to simple[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2006, 73: 1732-1742.

作者简介: 赵智力,女,1972 年出生,博士,副教授,硕士研究生导师. 主要从事焊接结构可靠性、微电子封装及可靠性方面的研究. 发表论文 20 余篇. Email: 860557798@qq.com