

弹性状态低匹配焊接接头弯曲等承载设计准则与设计方法

王佳杰^{1,2}, 方洪渊¹, 张敬强¹, 董志波¹, 刘雪松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. 黑龙江工程学院 材料与化学工程学院, 哈尔滨 150050)

摘 要: 弹性状态以低匹配接头能够达到与母材“弯曲等承载能力”(EBLCC)为目标, 对低匹配对接接头焊缝几何形状临界条件进行了理论分析, 推导了低匹配接头满足弯曲等承载条件的最低余高以及最小熔宽, 并给出了弹性状态低匹配弯曲等承载接头设计准则. 分析了圆弧替代抛物线曲线的可行性, 给出了适用于工程应用方便的三圆相切低匹配弯曲等承载接头设计方法, 并进行了弯曲试验验证. 结果表明, 设计的三圆相切低匹配弯曲等承载接头能够达到与母材弯曲承载能力, 满足弯曲等承载要求. 文中给出的设计准则与设计方法可使低匹配接头按照母材的弯曲承载能力进行设计, 为弹性状态低匹配接头弯曲承载能力设计提供重要的理论依据.

关键词: 低匹配接头; 弯曲等承载; 设计准则; 设计方法; 试验验证

中图分类号: TG 404 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)07-0053-04

0 序 言

强度失配以及结构设计不合理等因素均是造成高强钢接头失效的重要原因^[1,2]. 低强匹配具有提高塑韧性、减少冷裂纹、简化焊接工艺、改善操作环境等诸多优点, 但是相对较低的承载能力成为限制其广泛应用的主要瓶颈^[2-6]. 通过控制冶金和工艺因素可以提高接头焊缝的强韧性, 但是这些措施对于提高低匹配接头的承载能力均有限^[4-6]. 如果从结构设计角度出发, 通过对接头几何形状的合理控制, 既行之有效, 又可以大幅度降低成本^[2,6]. 目前国内外关于对低匹配接头承载能力的研究, 目前已经有了一些设计准则与设计方法, 但是系统的设计准则与方法尚不完善. 因此文中提出低匹配接头弯曲等承载设计准则与适用于工程应用的弯曲等承载设计方法, 可以使低匹配接头能够按照母材的弯曲承载能力进行设计, 具有重要的理论研究和工程应用价值.

1 弯曲等承载设计理论分析

文献[6]提出了弹性状态使低匹配接头与母材

具有相等弯曲载荷的“弯曲等承载能力”概念、设计思想及实现条件. 对于强度失配的焊接接头, 焊缝低强度是造成低匹配接头弯曲承载能力较低的主要制约因素. 低匹配接头弯曲等承载接头设计的基本原理为: 可以利用低匹配接头的余高参与弯曲承载, 通过接头几何形状细节设计, 增加低强焊缝承载横截面积, 同时降低焊趾处应力集中程度, 使强度失配接头达到与母材弯曲等承载的目的. 弯曲等承载设计的核心问题为满足低匹配接头弯曲等承载条件的余高与熔宽等几何形状参数临界条件的确定.

与文献[6]推导过程相同, 可得出满足弯曲等承载条件的最低余高 $h_{\min}^e(x)$, 即

$$h_{\min}^e(x) = \left(\sqrt{\frac{l \pm 2x}{\mu_{\text{MMR}} l}} - 1 \right) t \quad (1)$$

式中: 以焊缝中心为坐标原点; l 为三点弯曲跨距; t 为半板厚; μ_{MMR} 为低匹配接头的屈服强度匹配比; x 表示与坐标原点的距离.

由式(1)可知, 理论推导的低匹配接头最低余高曲线为幂函数或抛物线形状. 当 $x=0$, 代入式(1)可得到焊缝中心满足弯曲等承载的最低余高 $h_{\min}^e(0)$, 即

$$h_{\min}^e(0) = \left(\sqrt{\frac{1}{\mu_{\text{MMR}}}} - 1 \right) t \quad (2)$$

低匹配接头焊趾为焊缝与母材交界点, 如果该点的弯曲应力等于低匹配接头焊缝金属的屈服强度, 则焊缝中心到焊趾处距离即为弯曲等承载条件

收稿日期: 2014-03-19

基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助项目(E201458); 先进焊接与连接国家重点实验室开放课题基金资助项目(AWJ-M13-14)和黑龙江工程学院博士科研基金资助项目(2015BJ11).

需要半熔宽 w_{\min}^e , 该参数是弯曲等承载接头设计重要参数之一。

当母材最大正应力达到母材金属的屈服强度时最大弹性弯曲载荷 F_b^e [7]

$$F_b^e = \frac{8bt^2}{3l} R_m^b \quad (3)$$

焊趾处应力应不高于焊缝金属的屈服强度为

$$R^w(x) = \frac{3F_w^e \left(\frac{1}{2}l \pm x \right)}{4bt^2} \leq R_m^w \quad (4)$$

根据弯曲等承载实现条件 $F_w^e = F_b^e$, 式(3)与式(4)相除, 可确定低匹配接头熔宽的边界范围为

$$x \leq \frac{1}{2}l(\mu_{\text{MMR}} - 1), x \geq \frac{1}{2}l(1 - \mu_{\text{MMR}}) \quad (5)$$

因此弯曲等承载设计中保证最小熔宽 $2w_{\min}^e$ 为

$$2w_{\min}^e \geq l(1 - \mu_{\text{MMR}\sigma_s}) \quad (6)$$

2 弯曲等承载设计准则

在特定匹配比条件下, 确定低匹配弯曲等承载接头的形状尺寸以保证低匹配接头能够达到母材的弯曲承载能力, 即确定弯曲等承载接头形状尺寸是设计关键。

对于接头横截面的焊缝金属为均质材料, 对应的余高几何形状按照理论推导的式(1)进行设计, 此时余高完全满足弯曲等承载。如果对于接头横截面的焊缝金属为非均质材料, 如果把这部分母材当作均质焊缝材料处理, 余高几何形状也按照式(1)进行设计, 这部分余高对于弯曲等承载存在一定的富裕。

余高抛物线形状且焊趾部位圆滑过渡形成的低匹配弯曲等承载接头形状如图1所示。接头形状参数包括板厚 $2t$ 、最低余高曲线 $h_{\min}^e(x)$ 、最小熔宽 $2w_{\min}^e$ 、焊趾半径 r 与盖面焊总熔宽 $2w^e$ 。

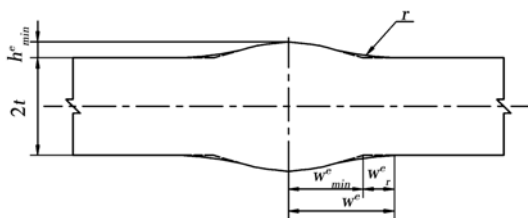


图1 抛物线形状弯曲等承载对接接头

Fig. 1 Parabolic under-matched EBLCC butt joint

结合以上分析过程, 给出弹性状态低匹配对接接头弯曲等承载设计准则。

(1) 确定屈服强度匹配比 μ_{MMR} : 根据国家标准 GB/T228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》及国

家标准 GB/T2652—2008《焊缝及熔敷金属拉伸试验方法》, 分别测试母材金属的屈服强度 R_m^b 以及焊缝金属的屈服强度 R_m^w , 获得低匹配接头的屈服强度匹配比。

(2) 确定焊缝最小熔宽 $2w_{\min}^e$: 焊缝最小熔宽宽度按照理论推导的式(6)进行设计。

(3) 确定最低余高曲线 $h_{\min}^e(x)$: 余高几何形状按照理论推导的最低余高公式(1)进行设计。

(4) 确定焊趾圆弧过渡半径 r : 依据机加条件或成形条件决定, 尽可能选择较大半径的砂轮或焊趾成形半径, 使焊趾部位圆弧过渡, 以降低焊趾部位的应力集中程度。

(5) 确定盖面焊总熔宽 $2w^e$: 焊趾半径除了进行圆滑过渡作用之外, 还增加了一定的熔宽 w_r , 同时使焊趾处的弯矩降低, 焊趾半径对于降低焊趾处应力集中有双重作用。因此盖面焊总熔宽为 $2w^e = 2(w_{\min}^e + w_r)$ 。

给出的弹性状态低匹配接头弯曲等承载设计准则适合于任何坡口形式的双面施焊对接接头。

3 三圆相切接头弯曲等承载设计方法

若要获得抛物线形状等承载接头, 除了依靠数控加工手段外, 其它的加工手段难以保证加工精度, 无疑增加了机加难度与成本。为了工程上应用方便, 探讨简单的圆弧形能否替代复杂抛物线形状的可行性。对于低匹配对接接头, 圆弧三点分别经过焊缝中心最低余高点 (B_1, B_2) 以及两个最小熔宽边界点 (A_1, A_2, C_1, C_2)。

选用具体材料, 抛物线与圆弧两种函数建立的条件为: 以焊缝中心为坐标原点, 选用 $\mu_{\text{MMR}} = 0.482$, $2t = 10 \text{ mm}$, $l = 70 \text{ mm}$ 。建立抛物线与圆弧两种函数关系曲线如图2所示, 其中, 虚线 1-1, 1-2, 2-1 与 2-2 为抛物线曲线, 实线 3-1 与 3-2 为圆弧曲线。

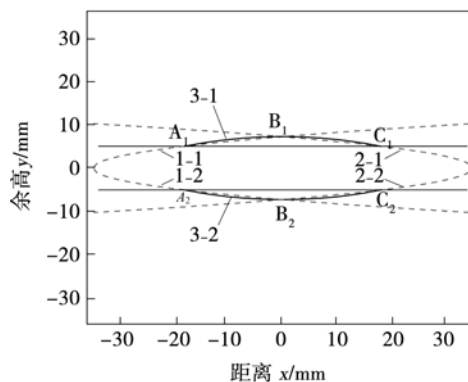


图2 抛物线与圆弧形比较

Fig. 2 Comparison of parabolic and arc shape

由图 2 分析可知,圆弧曲线均处于抛物线曲线之外,说明了圆弧形状可以替代抛物线形状. 焊趾圆弧半径分别与接头余高曲线和母材相切,形成三圆相切对接接头,如图 3 所示. 其中几何形状参数为:接头的形状参数包括板厚 $2t$ 、最低余高 h_{\min}^e 、最小熔宽 $2w_{\min}^e$ 、圆弧半径 R_{\min}^e 、焊趾圆弧过渡半径 r 与盖面焊总熔宽 $2w^e$.

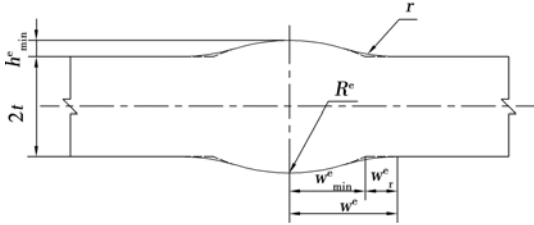


图 3 三圆相切低匹配对接接头

Fig. 3 Three-circle tangential under-matched EBLCC butt joint

依据弹性阶段弯曲等承载的设计准则,三圆相切低匹配对接接头所述的弯曲等承载设计方法在步骤(1)确定 μ_{MMR} 、步骤(2)确定 $2w_{\min}^e$ 与步骤(4)确定 r 等三个步骤均与上述准则相同,不同之处是:步骤(3)确定焊缝中心最低余高 h_{\min}^e ,根据式(2)计算获得低匹配接头最低余高 h_{\min}^e ;步骤(5)确定余高圆弧半径 R_{\min}^e :由步骤(2)确定的焊缝最小熔宽两个边界点和由步骤(2)确定最低余高高度点,此三点形成一个圆弧,其圆弧半径 R_{\min}^e 为

$$R_{\min}^e = \frac{(w_R^e)^2 + (h_{\min}^e)^2}{2h_{\min}^e} \quad (7)$$

步骤(6)确定盖面焊总熔宽 $2w^e$:盖面焊总熔宽 $2w^e = 2(w_{\min}^e + w_r)$,由图 4 三圆相切低匹配对接接头形状参数之间几何关系确定.

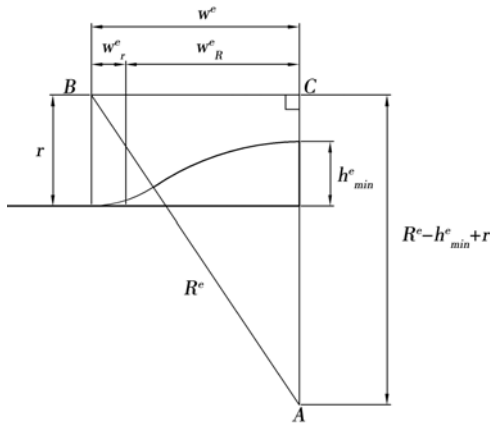


图 4 三圆相切对接接头形状参数之间几何关系

Fig. 4 Geometric relationship among shape parameters of three-circle tangential butt joint

由图 4 直角三角形几何关系可得盖面焊半熔宽 w^e 为

$$w^e = \sqrt{[2R_{\min}^e + 2r - h_{\min}^e(0)]h_{\min}^e(0)} \quad (8)$$

4 低匹配弯曲等承载接头试验验证

对三圆相切低匹配弯曲等承载对接接头进行弯曲试验验证,并与母材进行了对比试验. 选用母材为 HQ785T1 钢,填充材料为 J507 焊条,母材厚度为 10 mm,采用 X 形坡口,坡口间隙为 2 mm,坡口角度为 60° ,钝边高度为 2 mm. 采用 CO_2 焊,双面对称多层多道焊,在坡口两侧堆焊至一定高度和宽度的焊道. 第一道焊接电流为 120 ~ 130 A,电弧电压 24 ~ 26 V,第二道以后焊接电流均为 160 ~ 180 A,电弧电压 26 ~ 28 V. 焊后经磁粉与射线探伤合格,采用机加方法获得弯曲试样,试样宽度为 20 mm. 试验跨距为 70 mm,压头直径为 10 mm,两支辊直径为 30 mm. 试验采用 CSS44300 型电子万能试验机,试验温度为 20°C ,下压速率为 2 mm/min.

根据相应的接头设计方法,弯曲等承载接头形状参数为: $h_{\min}^e(0) = 2.202 \text{ mm}$, $w_R^e = 18.13 \text{ mm}$, $R^e = 75.74 \text{ mm}$, $r = 25 \text{ mm}$, $w^e = 20 \text{ mm}$. 母材与等承载接头试件分别如图 5 与图 6 所示,三个母材试样试验的最大弯曲载荷 F_b 为 23.631,23.371 与 23.504 kN. 等承载接头弯曲试验结果如表 1 所示.

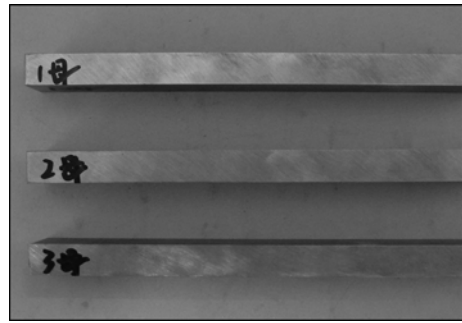


图 5 母材弯曲试件

Fig. 5 Bending specimen of base metal

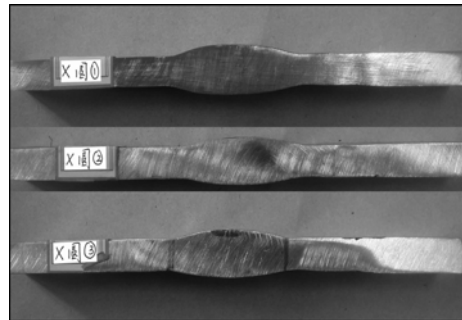


图 6 弯曲等承载对接接头弯曲试件

Fig. 6 Bending specimen of three-circle tangential EBLCC butt joint

表 1 等承载接头弯曲试验结果

Table 1 Bending experiment results of EBLCC butt joint

试 件	中心余高 $h^e(0)/\text{mm}$	圆弧半径 R^e/mm	焊趾过 渡半径 r/mm	盖面焊 半熔宽 w^e/mm	最大弯 曲载荷 F_w^e/kN
1	2.26	76	15	21.2	24.146
2	2.22	76	15	21.5	26.668
3	2.32	76	15	22.2	27.434

表 1 中弯曲等承载接头的实际尺寸均大于工程设计的形状尺寸. 弯曲试验结果表明, 经过弯曲等承载设计, 弹性状态三圆相切弯曲等承载接头试件均能达到母材的弯曲承载能力, 满足弹性状态弯曲等承载要求. 由于焊接冶金力学强化作用使得焊缝的实际强度高于熔敷金属的强度, 也是造成弯曲等承载接头较母材弯曲承载能力提高的重要原因.

5 结 论

(1) 针对弹性状态低匹配弯曲等承载对接接头几何形状临界条件进行了理论研究, 分别推导了低匹配对接接头满足弯曲等承载条件的最低余高以及最小熔宽, 给出了弹性状态低匹配接头弯曲等承载设计准则.

(2) 分析了圆弧替代抛物线可行性, 给出了弹性状态三圆相切低匹配接头弯曲等承载设计方法, 并按照该方法获得了满足弯曲等承载要求的接头几何形状参数.

(3) 对三圆相切低匹配弯曲等承载对接接头进行了弯曲试验验证, 结果表明, 低匹配弯曲等承载接头能够达到母材的弯曲承载能力, 满足弯曲等承载要求.

参考文献:

[1] Mohtadi-Bonab M A, Szpunar J A, Razavi-Tousi S S. A comparative study of hydrogen induced cracking behavior in API5L X60 and X70 pipeline steels[J]. Engineering Failure Analysis, 2013 (33): 163 – 175.

[2] Wang T, Yang J G, Liu X S, *et al.* Solution of stress intensity factor for mode I centre crack in undermatched butt joint with certain reinforcement[J]. Science & Technology of Welding & Joining, 2012, 17(3): 191 – 195.

[3] Hao S, Schwalbe K H, Cornec A. The effect of yield strength mismatch on the fracture analysis of welded joints: slip-line field solutions for pure bending[J]. International Journal of Solids and Structures, 2000, 37(39): 5385 – 5411.

[4] 赵智力, 杨建国, 方洪渊, 等. 基于等承载能力原则的低匹配对接接头设计[J]. 焊接学报, 2008, 29(10): 93 – 96.
Zhao Zhili, Yang Jianguo, Fang Hongyuan, *et al.* Design of undermatching butt joint based on equal load-carrying ability[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(10): 93 – 96.

[5] 赵智力, 方洪渊, 杨建国, 等. 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, Yang Jianguo, *et al.* 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.

[6] 王佳杰, 董志波, 刘雪松, 等. 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, Liu Xuesong, *et al.* 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] 刘鸿文. 材料力学(Ⅱ)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.

作者简介: 王佳杰, 男, 1975 年出生, 博士研究生, 副教授, 国际焊接工程师. 主要从事焊接结构可靠性分析和热喷涂科研与教学工作. 发表论文 10 余篇. Email: wangjiajie2006@126.com

通讯作者: 方洪渊, 男, 教授, 博士研究生导师. Email: hyfang@hit.edu.cn