

薄板焊接失稳变形的简化模型及其应用

上海交通大学 材料科学与工程学院(200030) 陆 皓 陈俊梅 刘俊龔
中国造船集团公司第十一研究所(200031) 陈家本 郑慧锦

摘要 提出了基于固有应变对接薄板失稳分析的基本方程。通过将固有应变等效为焊缝及热影响区的热载荷,可以进行线性失稳分析确定临界载荷,然后采用非线性失稳分析确定失稳变形的大小。对不同焊接工艺条件下的低碳钢薄板对接焊变形进行了研究,比较了数值分析与试验测量结果,并且数值计算考虑了薄板不平整度的影响。最后,使用该简化的方法对有加强筋板分段结构的焊接变形进行预测。研究表明,基于固有应变等效载荷的失稳变形计算方法是简单、有效的。

关键词: 失稳变形 薄板焊接结构 固有应变
中图分类号: TG404

0 引言

焊接失稳变形是薄板焊接结构中常见的现象,当发生焊接失稳变形时,变形模式及大小与稳定结构焊接变形有明显的差异,给焊接失稳变形的分析带来了很大困难。近年来,国内外对薄板结构焊接失稳变形进行了许多数值分析^[1-3],采用热弹塑性有限元法可以确定薄板焊接中失稳发生的位置与时间^[4]。通常有如下三种方法可以确定焊接失稳变形的大小:①采用大变形的三维热弹塑性有限元方法;②采用小变形线性和非线性的热弹塑性有限元方法;③采用基于固有应变等效载荷的有限元方法。对于简单结构,大变形的三维热弹塑性有限元方法是可行的方法,但是对于大型结构,计算工作量非常大,难以满足实际的需要。第二种方法主要通过二维热弹塑性有限元方法获取残余应力的分布,随后将残余应力等效为热载荷,最后进行增量热载荷方式下的失稳条件与变形大小分析。显然,二维热弹塑性有限元方法计算残余应力可以减少计算时间。固有应变也可以等效热载荷,并应用到分析失稳条件与变形。

文中采用固有应变法建立等效载荷方程,结合失稳模式的假定和失稳方程,给出了一种简化的薄板失稳变形预测方法。将固有应变等效为热载荷,结合有限元法对低碳钢薄板对接焊下的失稳变形进行线性与非线性分析,讨论初始薄板不平整度的影响,对分段结

构焊接变形进行预测。

1 失稳变形分析模型

1.1 失稳临界载荷

线性失稳分析用于估计失稳临界载荷和变形,为求解如下方程的特征值问题:

$$([K] + \lambda_i [S]) \{\psi_i\} = \{0\} \quad (1)$$

式中: $[K]$ 为刚度矩阵; $[S]$ 为初始应力矩阵; λ_i 为第 i 个特征值; ψ_i 为第 i 个位移特征向量。

临界失稳载荷可以表示为:

$$P_{cr} = \lambda_{min} P \quad (2)$$

式中: λ_{min} 为最小特征值; P 为外载荷。

非线性失稳分析用于准确确定失稳载荷和变形大小,采用增量形式下的大变形分析,载荷以增量形式增加。

1.2 等效热载荷

焊接过程中被焊结构经历了焊接热循环,焊缝与热影响区受周围低温金属的约束产生了焊后等效的压缩塑性应变,又称为固有应变^[5,6]。固有应变是导致焊接残余应力与变形的根源。为了探讨薄板失稳特征,作如下假定:

- (1) 薄板厚度方向温度均匀;
- (2) 加热是同时施加到薄板上的,或分段施加的;
- (3) 纵向固有应变是导致失稳变形的主要原因;
- (4) 纵向固有应变的在横向局限于焊缝与周围临近区域。

根据上述假定,只有焊缝和附近的纵向固有应变

不为零,并能作为结构所受的等效热载荷:

$$\varepsilon = -\alpha \Delta T \quad (3)$$

式中:对于碳钢焊缝与热影响区的热膨胀系数 α 可取值 $1.3 \times 10^{-5} 1/^{\circ}\text{C}$,并假定一均匀的温度载荷施加到整个结构, ΔT 为温差。

对于线性失稳分析,临界失稳载荷可以定义为:

$$F_{cr} = -\lambda_{\min} \frac{E}{1-\nu^2} A \alpha \Delta T_1 \quad (4)$$

式中: E 为弹性模量; A 为载荷施加的截面, ΔT_1 为单位温差, $\Delta T_1 = 1$, ν 为泊松比。

等效固有应变载荷可以表示为:

$$F_{\text{wxx}} = -\frac{E}{1-\nu^2} A \alpha \Delta T_w \quad (5)$$

表 1 试验条件与结果

编号	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	热输入 $E/(\text{J} \cdot \text{mm}^{-1})$	施加等效焊缝载荷 $/\text{kN}$	测量变形 $/\text{mm}$	计算变形 $/\text{mm}$
1	220	24.5	202	34.7	6.2	4.0
2	235	25.5	225	38.7	6.2	5.3
3	235	29.5	260	44.7	6.7	7.1
4	245	29	266	45.8	8.7	7.4
5	250	28.5	267	45.9	7.5	7.4
6	260	27.5	268	46.1	8.4	7.5

2.2 变形测量

采用激光传感器、采集卡、机器人等组成的焊接变形测量系统,如图 1 所示。激光传感器安装于机器人手臂,测量过程为先对试样的外形进行测量,焊接后进行第二次测量获取焊接变形数据。变形测量结果见表 1。



图 1 变形测量系统

3 有限元分析

3.1 热载荷确定

薄板对接焊条件下,单位长度总的纵向固有应变表示为^[7]:

式中: $\Delta T_w = \varepsilon/\alpha$ 定义为等效热载荷, ε 是纵向固有应变。

如果满足 $F_{\text{wxx}} \geq F_{cr}$, 发生失稳。进一步进行非线性失稳分析,这里 ΔT_w 分步施加达到临界值,并确定变形大小。

2 理论分析与试验验证

2.1 试验方法

试验采用两块 $600 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 低碳钢板进行对接焊,焊接方法采用 MAG 焊,保护气体为含 92% Ar + 8% CO_2 的混合气体,两块钢板先进行定位焊,随后进行连续焊接,焊接参数见表 1,其中焊接速度 ν 为 2 cm/s 。

$$W = 0.355 \frac{\alpha \eta UI}{c \rho \nu} (\text{cm}^2) \quad (6)$$

式中: c 为金属材料比热; ρ 为金属材料的密度; $\frac{\eta UI}{\nu}$ 表示热输入,由熔敷效率 η ,电弧电压 U ,焊接电流 I 和焊接速度 ν 决定。

纵向应变 ε 表示为:

$$\varepsilon = W/F \quad (7)$$

式中: F 是总应变 W 的分布区,考虑薄板厚度方向大小一致,分布宽度假定为实际焊缝宽度的 2 倍。

3.2 失稳分析

采用 ANSYS 通用软件进行失稳的线性和非线性分析。首先进行线性分析计算临界失稳载荷。对于 $600 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 对接试板,计算临界载荷为 31 kN。对比表 1,这表明对于表中所有的试板均发生结构失稳。为此采用大变形分析确定变形大小,假定对接试板存在初始的不平整度,该数值假定为线性失稳分析得到变形模式的 1%,其它计算用的数据为:弹性模量 $E = 200 \text{ GPa}$;泊松比 $\nu = 0.3$ 。

图 2 为 $600 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 对接焊薄板非线性

性失稳分析与试验测量结果。计算值用焊缝长度方向的下表面中心点与端点的差值表示。计算表明,变形随载荷线性增大,直到接近临界载荷的范围。在临界载荷附近,焊接变形随载荷增大而快速变大。由于考虑试样的不平整度,非线性分析的临界载荷比线性分析的临界载荷略小。计算与试验测试结果一致,计算值与试验测量值的误差主要是忽略了收缩引起的角变形、高温性能等因素^[8]。

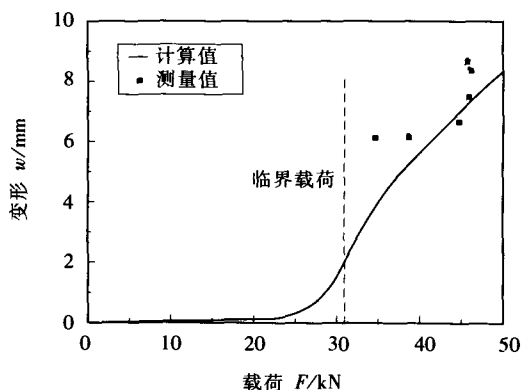


图2 计算与试验结果对比

4 结 论

基于固有应变等效载荷的线性与非线性失稳分析是一种简单、有效的方法。该等效载荷公式结合失稳分析可以实现焊接失稳变形预测。

(1) 对 3 mm 薄板对接,失稳在焊接过程就产生了,预测的失稳变形大小与试验测定的一致,但比试验略小,主要是忽略了焊缝横向收缩的影响。

(2) 线性失稳分析得到的临界失稳载荷略大,相

对非线性分析忽略了试板不平整度的影响。

参 考 文 献

- [1] Michaleris P, Debicari A. Prediction of welding distortion [J]. Welding Research Supplement, 1997(4):172-181.
- [2] 钟小敏, Murakawa Hidekazu and Ueda Yukio. Buckling behavior of plates under idealized inherent strain [J]. Trans. JWRI, 1995, 24(2):172-181.
- [3] 杨新歧, 霍立兴, 张玉凤, etc. Prediction analysis of buckling distortion of thin-plate Structure [J]. China Welding, 2002(11):138-142.
- [4] 汪建华, 陆 皓. An FEM model of buckling distortions during welding of thin plate [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 1999, E-4(2):69-72.
- [5] Ueda Y, Kim Y C, Yuan M G. A predicting method of welding residual stress using source of residual stress (Report I) - Characteristics of inherent strain (Source of residual stress) [J]. J Trans of JWRI, 1989, 18(1):135s-141s.
- [6] Ueda Y, Yuan M G. Prediction of residual stressed in butt welded plates using inherent strains [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1993, 115(10):417s-423s.
- [7] 汪建华, 陆 皓. Prediction of welding deformations by FEM based on inherent strains [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2000, E-5(2):83-86.
- [8] 关 桥. Today and tomorrow in science and technology of welding and joining [A]. Proc. of the 7th Int. symposium of JWS [C]. Kobe, Japan, 2001.

作者简介: 陆 皓, 1965 年出生, 工学博士, 教授, 博士生导师。主要从事焊接数值模拟研究, 已发表论文 60 余篇。

(出
版
社
附
录)

江苏省吴江市环宇胀管器有限公司

本公司专业制造各种胀器和胀管机, 该产品广泛用于锅炉、化机、电站、炼油、制冷等行业的制造、检修及安装, 换热器、冷凝器、冷却器等压力容器的胀管, 是上佳的胀接工具。

胀管器: 直筒式、翻边式、轴承式、深孔式、深孔调节式等 12 种系列, 2000 多种规格。

胀管机: P3Z1-13、19、25、38、51、76、102 等 7 种规格。

可胀接管径范围 $\phi 6 \sim 102$ mm, 管板厚度范围 10~400 mm。

用万向节头联接胀管器与胀管机, 即可胀管, 工作速度快、效率高。同时, 提供各种挖槽器、削平器及内切管器等。



地址: 江苏省吴江市屯村镇南大街 12 号
邮编: 215216 联系人: 梅丽华
销售部: 0512-63373381 (电话)
0512-63374198 (兼传真)
经理: 俞建新 手机: 013801550860
<http://www.hyzgq.com>
Email: huanayu@hyzgq.com

种类最多

规格齐全

保证质量

信守合同

代办邮递

欢迎咨询