

# 可调拘束实验测量的焊接凝固裂纹阻力曲线的有限元法修正\*

董志波 魏艳红

(哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

刘仁培

(南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京 210016)

**摘 要** 利用有限元法对横向可调拘束实验进行了数值模拟, 得到了不同弯曲应变条件下熔池尾部的局部应变, 结果表明: 在进行可调拘束实验过程中, 焊接熔池尾部确实存在应变集中, 从而对实验测得的平均应变即材料凝固裂纹阻力进行了修正。此外, 将横向可调拘束实验模拟得到的局部应变与采用高速摄影和可调拘束相结合测量得到的局部应变进行了对比, 能够较好的吻合。同时, 计算了不锈钢 SUS310 焊接凝固裂纹驱动力, 并与修正后的阻力曲线进行比较, 预测了凝固裂纹敏感性, 预测结果与实验结果相符。说明利用横向可调拘束实验结合数值模拟方法, 能够定量预测焊接凝固裂纹。

**关键词** 凝固裂纹阻力, 横向可调拘束实验, 局部应变, 有限元方法

中图分类号 TG44

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2005)07-0780-05

## FEM MODIFYING THE RESISTANCE CURVE OF WELD METAL SOLIDIFICATION CRACK MEASURED BY TRANS-VARESTRAINT TEST

DONG Zhibo, WEI Yanhong

State Key Laboratory of Advanced Welding Technology Production, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001

LIU Renpei

Department of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016

Correspondent: DONG Zhibo, Tel: (0451)86417650, E-mail: dongzhibo@hit.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.50375038)

Manuscript received 2004-11-04, in revised form 2005-02-21

**ABSTRACT** The Trans-Varestraint test was modeled with finite element method (FEM) and the local strains in the trail of weld molten pool were obtained with different bending strains. The results show that there is a strain concentration in the train of weld molten pool during Trans-Varestraint testing and the calculated local strains thus modify the tested average strains, that is the material resistance to weld solidification cracks. Moreover, the calculated local strains agree well with the measured local strains got with the combination of high speed CCD camera and the Trans-Varestraint test. Furthermore, the driving force to the solidification crack of the stainless steel SUS310 was calculated and compared with the modified resistance so that the weld solidification crack was predicted, which agrees well with the experimental results. The results indicate that the weld solidification crack can be predicted with combination of Trans-Varestraint test and FEM.

**KEY WORDS** material resistance of weld solidification crack, Trans-Varestraint test, local strain, finite element method (FEM)

为了避免凝固裂纹的产生, 从上个世纪 50 年代开始, 各国就先后采用各种实验方法来定量评定材料的凝固

裂纹的敏感性<sup>[1]</sup>。其中, 可调拘束实验法是 60 年代中期创始于美国, 后来被日本及西欧各国改进并且广泛采用的一种定量评定材料热裂纹敏感性实验方法<sup>[2-5]</sup>。它除了能测得比较直观的反映材料凝固裂纹敏感性的裂纹总长度, 条数等参数外, 还能定量地测出材料产生裂纹的临界应变变量, 脆性温度区间 (BTR), 在 BTR 内的塑性变形能

\* 国家自然科学基金资助项目 50375038

收到初稿日期: 2004-11-04, 收到修改稿日期: 2005-02-21

作者简介: 董志波, 男, 1975 年出生, 博士生

力-凝固塑性曲线, 以及产生凝固裂纹的临界应变速率等定量参数. 这些参数的确定有利于进一步研究凝固裂纹的形成机理, 影响因素和防止措施, 横向可调拘束实验法得到广泛的应用.

横向可调拘束实验是根据纯弯曲的方法测量凝固裂纹的应变变量, 以试件表面所受的平均应变作为裂纹产生区的局部应变, 忽略了焊接熔池尾部的应变集中. 20 世纪 80 年代以来, 一些学者<sup>[6]</sup>采用摄像法, 研究了对熔池尾部裂纹萌生和扩展过程中凝固裂纹尖端附近的局部延性, 结果表明用这种技术测量的临界应变变量通常比可调拘束实验的结果要高一个数量级, 因此用横向可调拘束实验得到的平均应变与实际熔池尾部的局部应变相比有一定的误差. 由此而获得的材料凝固塑性曲线和临界应变速率不能真实反映材料的凝固裂纹阻力, 即以往获得的材料的焊接凝固裂纹阻力曲线也有一定的误差. 因此要进行定量的焊接凝固裂纹敏感性的预测, 需要对横向可调拘束实验测量的凝固裂纹阻力曲线进行修正.

本文利用横向可调拘束实验机测量奥氏体不锈钢 SUS310 的凝固裂纹阻力曲线, 通过数值模拟横向可调拘束实验得到熔池尾部的局部应变, 从而修正横向可调拘束实验测得的平均应变, 并与模拟得到的驱动力曲线进行比较来预测焊接凝固裂纹敏感性.

## 1 横向可调拘束实验的数值模拟

### 1.1 横向可调拘束实验测量阻力曲线

横向可调拘束实验原理如图 1a 所示. 施加应变的方向垂直于焊接轴线方向, 实验时将试件的一端以悬臂梁的形式固定在弯曲模块的上方, 然后用 TIG 电弧, 在试件上从 A 点到 C 点进行焊接. 当电弧移动到 B 点时, 施加  $\vec{F}$  力由行程开关控制, 用气-液联动的作弧线运动的压头施加  $\vec{F}$  使试件以某一速度单向弯曲, 直到试件与弯曲模块完全贴合为止. 电弧在 B 点弯曲之后继续前进, 直至 C 点停车断弧. 实验材料为不锈钢 SUS310, 试件尺寸如图 1b 所示.

在焊接过程中对试板施加的应变均由弯曲模块的曲率半径来控制, 试件表面所受应变根据纯弯曲的变形公式简化成

$$\varepsilon(\%) = \frac{\frac{t}{2}}{R + \frac{t}{2}} \times 100\% \approx \frac{t}{2R} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $t$  为试件厚度,  $R$  为弯曲模块曲率半径.

实验时可通过变换不同曲率半径的弯曲模块, 在焊缝金属表面施加任意的应变变量. 当应变变量超过某一数值后, 在焊缝上就会出现裂纹, 此应变变量称为临界应变变量. 通过快速加载的横向可调拘束实验中测得的最大裂纹极限长度和焊道中央的温度分布曲线, 可以得出各应变变量  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots$  下最大裂纹长度所对应的温度区间  $\Delta T_1, \Delta T_2, \dots$ . 在  $\varepsilon-T$  坐标上, 把这些点连成曲线,

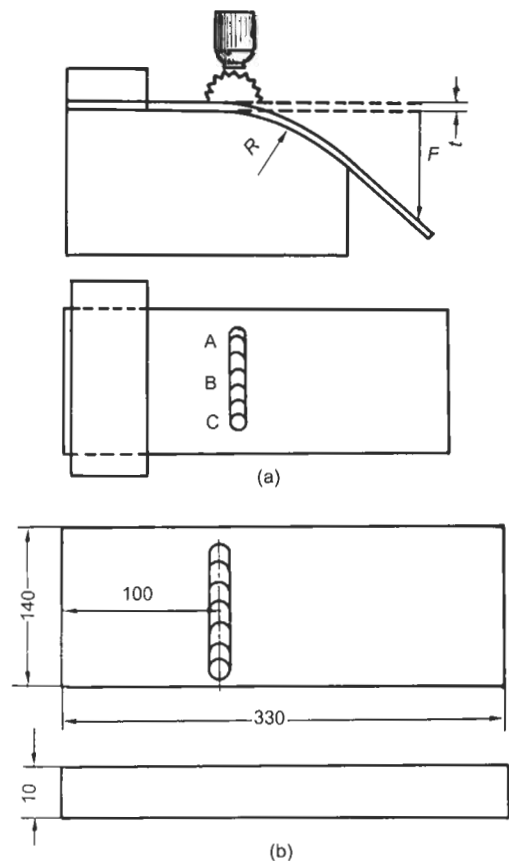


图 1 可调拘束实验装置及不锈钢试样尺寸示意图

Fig.1 Schematics of the Trans-Varestraint test (a) and the workpiece of stainless steel used in testing (b)

即为金属在脆性温度区间内的塑性曲线, 称为凝固阻力曲线, 其物理意义为焊接熔池凝固过程中在各温度下产生凝固裂纹时的临界应变变量.

可见横向可调拘束实验中得到的平均应变仅与试板的厚度和弯曲模块半径有关, 并不考虑焊接过程产生的应变变量, 更重要的是它忽略了焊接熔池尾部应变集中. 实际上在一定的焊接条件下, 对某种材料进行定量的凝固裂纹敏感性预测, 需要得到焊接熔池尾部的阻力曲线和驱动力曲线. 因此在传统的横向可调拘束实验中, 用平均应变作为熔池尾部裂纹产生区所受的局部应变值有较大误差, 需要对其进行有效的修正.

### 1.2 横向可调拘束实验的有限元模型

焊接熔池尾部局部应变的测量方法十分复杂, 测量过程很困难, 需要大量的人力、物力和时间. 因此, 本文开展了对横向可调拘束实验数值模拟的工作, 通过数值模拟得到焊接熔池尾部的局部应变, 对横向可调拘束实验测量的结果进行修正, 并与实测结果进行了比较, 预测实验条件下 SUS310 材料的凝固裂纹.

横向可调拘束实验计算模型尺寸与可调拘束实验中试件相同, 即为 330 mm×140 mm×10 mm, 如图 2 所

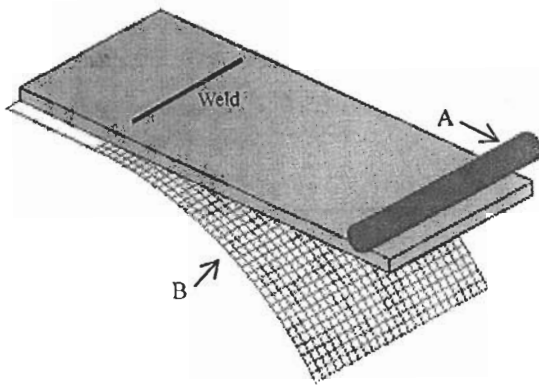


图2 横向可调拘束实验计算模型

Fig.2 Finite element model of the Trans-Varestraint test

示. 模拟计算采用商用软件 MARC/MENTAT 进行. SUS310 型奥氏体不锈钢材料的力学性能参数采用文献 [7] 中的数据. 热源模型采用 Goldak 提出的双椭球形热源模型 [8], 焊接参数为: 电流 200 A, 电压 13.5 V, 焊接速度 2 mm/s, 并在机械模型中利用单元再生方法消除凝固过程对模拟结果的影响.

模型中试件与弯曲模块间采用三维接触问题模拟, 弯曲载荷由一个圆柱面刚体 A 来定义, 在刚体 A 与变形体试件间有一个初始的 5 mm 间隙, 以至于在弯曲载荷施加前, 允许变形体试件自由变形. 弯曲模块用一个八分之一的圆柱面刚体 B 来定义, 其半径由弯曲模块曲率半径  $R$  来定义, 通过改变刚体 B 的半径, 来变化弯曲模块的半径  $R$ , 从而对焊缝金属表面施加任意的应变量. 焊接电弧在距试件端 30 mm 处起弧, 当电弧稳定后, 施加弯曲载荷, 刚体 A 立即与试件接触, 进行迅速加载, 加载速度很快, 在 1—2 s 内完成全部加载过程.

### 1.3 横向可调拘束实验的数值模拟结果

在横向可调拘束实验数值模拟过程中, 对不锈钢 SUS310 试件施加的弯曲应变范围是 0.15%—6.0%. 其中施加 2.0% 弯曲应变载荷前后焊接熔池尾部局部应变分布情况如图 3 所示.

从图中可以明显看出施加弯曲载荷前, 在试件上表面的焊接熔池尾部只有较小的应变集中, 只是在焊缝起弧位置存在 1.3% 左右的拉伸应变, 而施加弯曲应变载荷以后, 在焊接熔池尾部裂纹敏感性温度区间内出现较大的应变集中, 试件上表面熔池尾部的局部应变超过了 6%, 远远大于施加的弯曲应变 2.0%, 说明施加弯曲载荷后, 焊接熔池尾部产生了较大的应变集中, 即熔池尾部实际产生的局部应变比可调拘束实验中的平均应变要大得多.

在 2.0% 弯曲应变载荷的冷弯曲 (无焊接的纯弯曲) 实验中, 试件表面的三维横向应变分布如图 4 所示.

从图 4 中可以看出, 在试件上表面产生的应变平均为

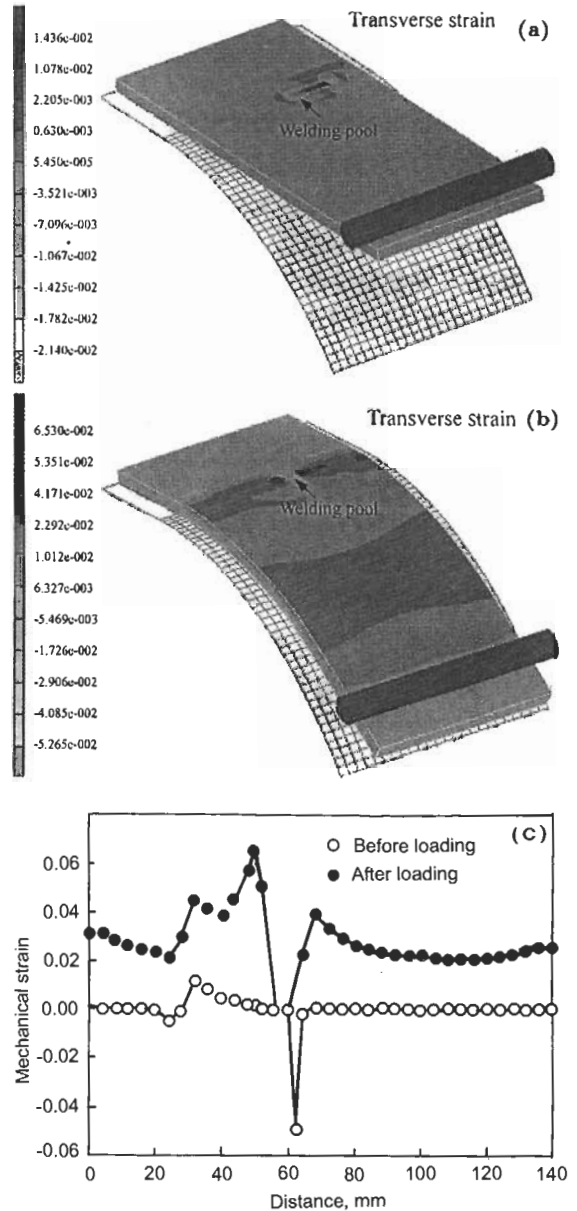


图3 弯曲载荷加载前后焊缝处的三维应变分布

Fig.3 Transverse strain distributions at 1.5% bending strain before (a) and after (b) loading, and mechanical strain distribution (c)

2.0% 左右, 这说明在冷弯曲条件下, 试件上表面并不会产生应变集中, 与施加的弯曲应变载荷几乎相等. 而在横向可调拘束实验中, 由于焊接过程, 使焊接试件的整体刚度和材料性能等都发生很大的变化, 从而试件上产生了应变集中, 得到熔池尾部的局部应变比平均应变要大的多. 因此, 用平均应变作为凝固裂纹的阻力曲线有较大的误差, 对平均应变必须进行修正.

为了验证横向可调拘束实验数值模拟后, 不同弯曲应变条件下得到的凝固裂纹敏感性温度区间内裂纹开裂的临界应变值的准确性, 模拟结果与用摄像方法测量的焊接熔

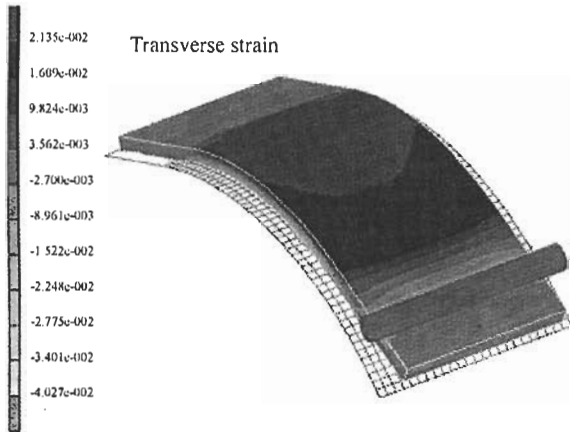


图 4 冷弯曲条件下试件的三维应变分布  
Fig.4 Transverse strain distribution under 1.5% cold bending strain and no welding process

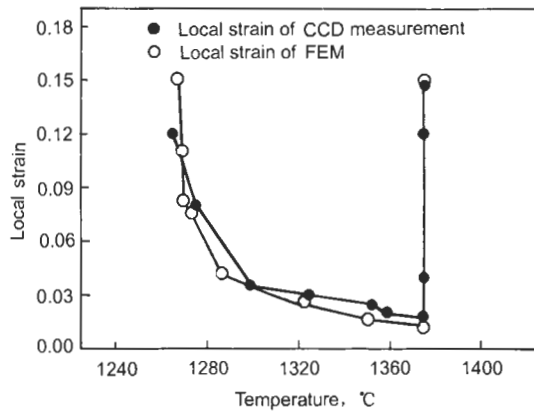


图 5 模拟的局部应变与实验结果比较  
Fig.5 Comparison of the local strains between the Trans-Varestraint tests and measurements

池尾部的局部应变进行了比较,如图 5 所示,可以看出两者能够较好的吻合,说明横向可调拘束实验模拟计算得到的局部应变值的准确性和可靠性。

### 2 凝固裂纹敏感性预测

在凝固裂纹驱动力计算过程中采用的模型尺寸为 100 mm×100 mm×10 mm,材料为 SUS310 不锈钢.由于对称性取其一半进行分析,网格划分如图 6 所示.网格划分时在焊缝金属及其附近区域进行了细分,而在远离焊缝的地方网格划得较粗,这样不仅可以减少模型的计算量,又保证了焊缝附近计算的精度.热源模型和焊接参数与模拟横向可调拘束实验中的条件相同。

横向可调拘束裂纹实验中测量的平均应变和横向可调拘束实验模拟得到裂纹开裂的临界应变如表 1 所示,并把它们与数值模拟得到的驱动曲线绘制到同一坐标图中,如图 7 所示.根据凝固裂纹驱动力曲线与凝固裂纹阻力曲线的相对位置,可以预测凝固裂纹。

从图 7 中可以看出,焊缝收弧点处的驱动力曲线与横

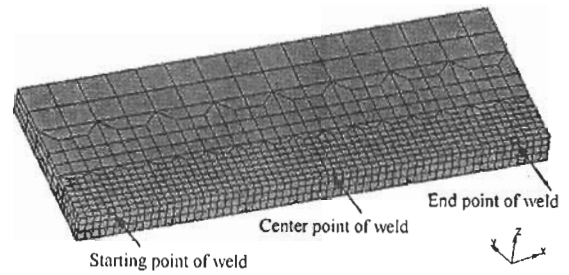


图 6 有限元网格划分  
Fig.6 Finite element mesh used in calculation

表 1 数值模拟方法修正平均应变  
Table 1 Modifying the applied average strains of Trans-Varestraint test

Temp., °C	Average strain, %	Local strain, %
1375	0.15	1.2
1350	0.25	1.6
1322	0.5	2.4
1287	1.0	4.1
1273	2.5	7.6
1270	3.0	8.2
1268	4.0	10.1
1266	6.0	15.3

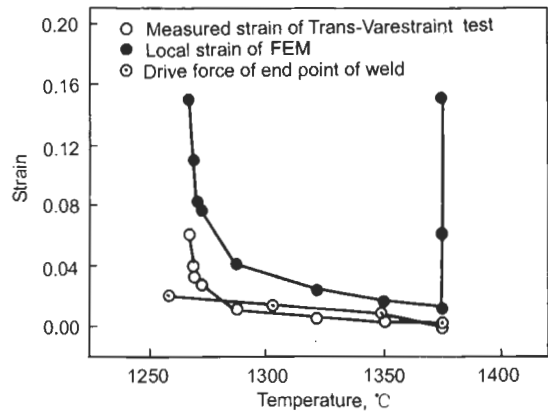


图 7 预测焊接凝固裂纹  
Fig.7 The prediction of weld metal solidification cracking

向可调拘束实验测得的凝固裂纹阻力曲线相交,但驱动力曲线并没有与模拟修正后的阻力曲线相交,说明可调拘束实验测得的平均应变并不是熔池尾部的局部应变,比实际焊接熔池尾部的局部应变要小得多。

本文对 100 mm×100 mm×10 mm 的试件进行了焊接实验,采用焊接参数与数值模拟相同,结果发现在焊接试件上并没有产生凝固裂纹,说明在这样的焊接条件下,

SUS310 不锈钢并不会产生凝固裂纹,这与图 7 中修正后的凝固裂纹阻力与驱动力曲线预测的结果相同.

#### 4 结论

利用横向可调拘束实验机,测量了实验条件下 SUS310 不锈钢的凝固裂纹阻力曲线,并对横向可调拘束实验进行了数值模拟,得到了不同弯曲应变载荷条件下焊接熔池尾部的局部应变,并与实验测量的熔池尾部的局部应变进行了比较,能够较好吻合,说明横向可调拘束实验数值模拟得到的焊接熔池尾部局部应变数据的可靠性和正确性.同时预测了实验条件下凝固裂纹敏感性,结果表明,驱动力曲线没有与模拟修正后的阻力曲线相交,焊

件不会产生凝固裂纹,这与实验结果相符,说明利用数值模拟方法修正横向可调拘束实验结果是可行的.

#### 参考文献

- [1] Feng Z L. *PhD Dissertation*, Ohio State University, Ohio, 1993
- [2] Savage W F, Lundin C D. *Weld J*, 1965; 10: 433
- [3] Senda T, Matsuda F. *Trans Jpn Weld Soc*, 1971; 2(2):1
- [4] Arata Y, Matsuda F. *Trans JWRI*, 1976; 5(21): 53
- [5] Matsuda F, Arata Y. *Trans JWRI*, 1977; 6(21): 197
- [6] Matsuda F, Nakagawa H. *Trans JWRI*, 1983; 12(1):65
- [7] Wei Y H, Liu R P, Dong Z Z. *Chin Weld*, 2000, 9(1): 36
- [8] Goldak J. *Metall Trans*, 1984; 15B: 587