

# 非均质焊接接头裂纹尖端场的 HRR 主导性与 $J$ 积分断裂判据

康继东

耿雪霏

(南京航空航天大学)

(黑龙江交通高等专科学校)

**摘要** 采用反射式贴片云纹干涉法对焊接接头裂纹尖端位移场进行了测量, 并考察了非均质焊接接头中的 HRR 主导有效性与  $J$  积分断裂判据的应用可行性。结果表明, 至少对于本文所研究的情形而言, 无论是 A537 钢采用 LB52NS 焊条施焊的高匹配接头, 还是 9%Ni 钢, 采用 OK69.45 焊条施焊的低匹配接头, 横向位移场中 HRR 主导失效, 而纵向位移场中  $\lg v - \lg r$  的线性关系不同于焊缝或母材的  $1/(n+1)$ 。因此, 在非均质焊接接头中直接应用  $J$  积分作为断裂判据不合适。同时, 裂纹尖端采用奇异单元值得商榷。

**关键词:**  $J$  积分 非均质性 匹配 HRR 主导 焊接接头

## 0 序 言

自从均质材料裂纹尖端奇异场 (HRR 场) 理论提出以来<sup>[1,2]</sup>, 关于弹塑性裂纹尖端场的研究日益受到重视。近年来通过对裂纹尖端场的实际测试, 已有许多重要的发现。例如对于纵向场 ( $v$  场) 的研究表明, HRR 场成立, 但关于其主导范围及条件却有不同的结果<sup>[3,4]</sup>。对于横向场 ( $u$  场) 和纵向场的同时测试揭示出  $u$  场中  $J$  主导的失效<sup>[5]</sup>, 这也得到了精细有限元分析的证实<sup>[6]</sup>。

$J$  积分在非均质焊接接头中能否直接应用的关键, 除了考察其守恒性外, 还应考察所谓的  $J$  主导有效性, 即在加载过程中, 裂纹尖端是否存在一个由  $J$  积分控制的裂纹尖端场。但是, 这类研究到目前为止尚不多见。文献[7]、[8] 中报道了从有限元计算得到的应力场出发, 关于  $J$  积分主导有效性的结果, 认为对于与本文所研究的相同的情形, HRR 主导有效性是有条件存在的。事实上, 对真实接头裂纹尖端位移场的测试分析, 将更有助于 HRR 主导有效性的理解。

## 1 非均质焊接接头裂纹尖端位移场测试

对于本文所研究的实际接头, 结合小型宽板拉伸试验, 采用高灵敏度的云纹干涉法进行了测试。本文所用试件形式与尺寸、云纹干涉法实验原理、技术和测试结果见文献[9], 本文利用位移场来进一步验证焊接接头中的  $J$  主导有效性。表 1 中给出了相应的测试条件。

表 1 云纹干涉法测试条件

Table 1 Measuring conditions of Moire interferometry for welded joints

Welded joints	Crack size 2a/mm	Measuring conditions			
		Applied stress $\sigma/\text{MPa}$	Global strain $\epsilon_g/\epsilon_s^W$	$v$ -field $/\text{l}^\circ\text{mm}^{-1}$	$u$ -field $/\text{l}^\circ\text{mm}^{-1}$
A537+ LB52NS	10	351	1.83	666	666
	50	218	0.22	750	750
9%Ni+ OK69.45	10	532	0.42	1200	1200
	30	353	0.30	1200	1200

## 2 非均质焊接接头中的 HRR 主导有效性

由 I 型平面应力问题的裂纹尖端应力场的局部解——HRR 场<sup>[1, 2]</sup>, 有:

$$u_i(r, \theta) = \frac{\alpha\sigma_s}{E} \left( \frac{EJ}{\alpha\sigma_s^2 I_n} \right)^{\frac{n}{n+1}} r^{-\frac{1}{n+1}} u_i(r, \theta) \quad (1)$$

其中  $I_n$  为一与  $n$  有关的常数, 可由积分算出<sup>[2]</sup>。

式(1)中  $u_i(\theta)$  表示各位移分量,  $\tilde{u}_i(\theta)$  是与  $\theta, n$  有关的角分布函数,  $r$  为极坐标下距裂纹尖端距离。 $n$  为 Ramberg-Osgood 关系式中硬化系数,  $n=1/N$ 。对式(1)两边取对数得:

$$\lg u = \frac{1}{n+1} \lg r + C \quad (2)$$

$$\lg v = \frac{1}{n+1} \lg r + C \quad (3)$$

式中  $C = \lg \left[ \frac{\alpha\sigma_s}{E} \left( \frac{EJ}{\alpha\sigma_s^2 I_n} \right)^{\frac{n}{n+1}} u_i(r, \theta) \right]$

式(2)、(3)表明在双对数坐标中, 给定角度  $\theta$  下,  $\lg u - \lg r$  及  $\lg v - \lg r$  应为一斜率为  $\frac{1}{n+1}$  的直线。

对试验得到的  $u, v$  场云纹图放大(放大倍数为 60~72 倍), 测试并绘制  $\lg v_i - \lg r_i$ ,  $\lg u_i$  与  $\lg r_i$  关系曲线。如图 1~4 所示。必须指出, 上述测试都是在裂纹尖端塑性区内进行的, 因而测试范围

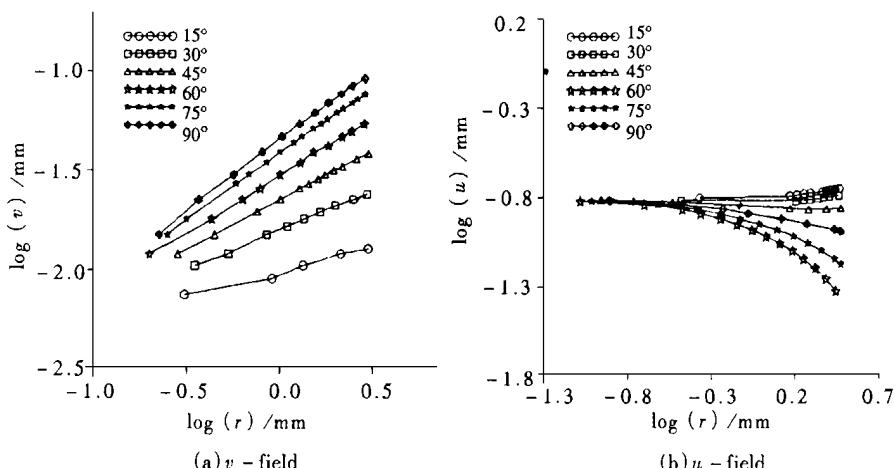
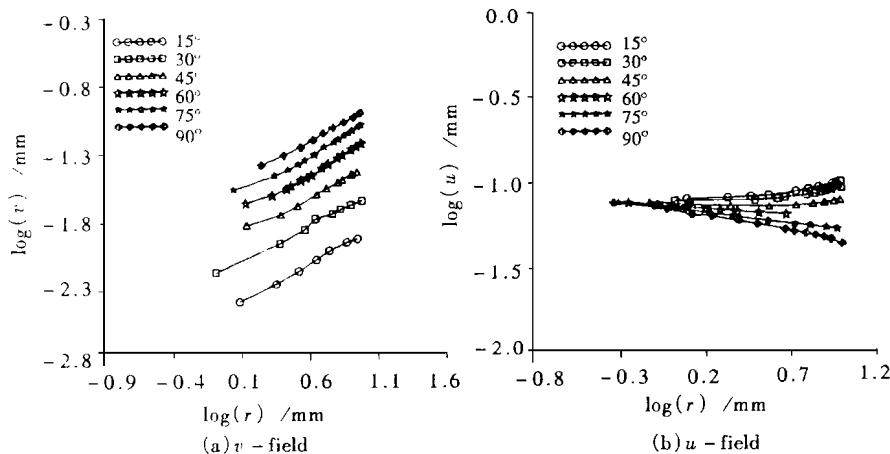
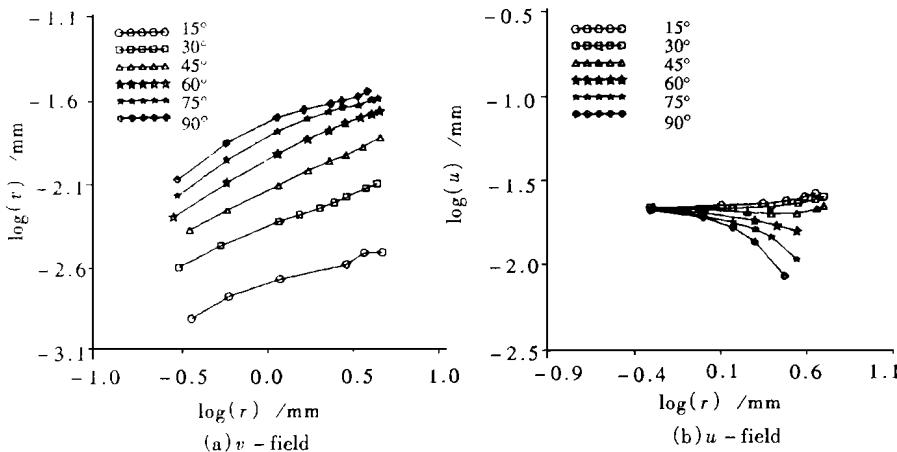
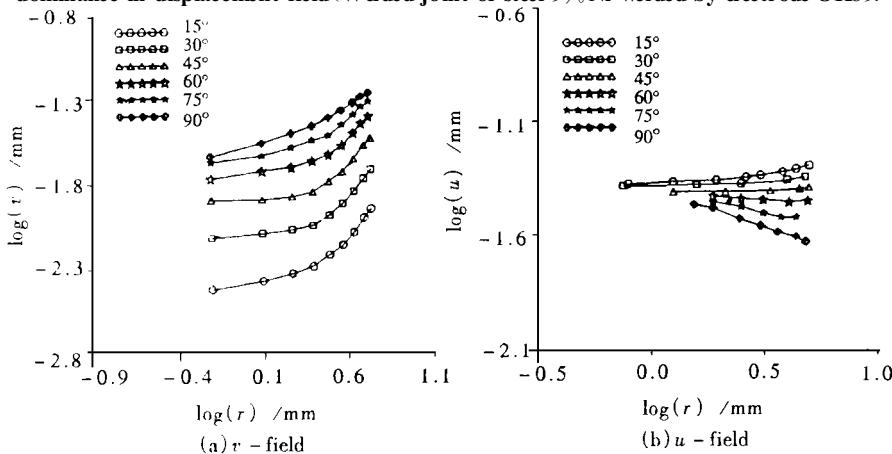


图 1 位移场中的 HRR 主导(LB52NS 焊条施焊的 A537 钢焊接接头,  $2a=10\text{mm}$ )

Fig. 1 HRR—dominance in displacement field

(Welded joint of steel A537 welded by electrode LB52NS  $2a=10\text{mm}$ )

图 2 位移场中的 HRR 主导(LB52NS 焊条施焊的 A537 钢焊接接头,  $2a=50\text{mm}$ )Fig. 2 HRR—dominance in displacement field(Welded joint of steel A537 welded by electrode LB52NS  $2a=50\text{mm}$ )图 3 位移场中的 HRR 主导(OK69.45 焊条施焊的 9%Ni 钢焊接接头,  $2a=10\text{mm}$ )Fig. 3 HRR—dominance in displacement field(Welded joint of steel 9%Ni welded by electrode OK69.45,  $2a=10\text{mm}$ )图 4 位移场中的 HRR 主导(OK69.45 焊条施焊的 9%Ni 钢焊接接头,  $2a=30\text{mm}$ )Fig. 4 HRR—dominance in displacement field(Welded joint of steel 9%Ni welded by electrode OK69.45,  $2a=30\text{mm}$ )

的径向尺寸均小于塑性区在相应方向最小分布尺寸。同时, 由于本节所述结果均系根据试验数据即由云纹干涉法试验获得的云纹图所表征的位移场分析得到, 并未对裂纹尖端场进行任何假定, 因而  $\lg v - \lg r$ ,  $\lg u - \lg r$  结果应具有客观性。

由图 1~4 可见: ①无论是高匹配的 LB52NS 焊条施焊的 A537 钢焊接接头还是低匹配的 OK69.45 焊条施焊的 9%Ni 钢焊接接头,  $\lg v - \lg r$  关系曲线在全面屈服断裂裂纹尺寸与韧带屈服断裂裂纹尺寸下均有一较好的线性关系, 但其斜率与母材或焊缝金属的  $\frac{1}{n+1}$  均不同, 且并不在两者之间。这就意味在焊接接头中即使存在着  $v$  位移场的奇异性, 那么它与 HRR 场所要求的奇异性也是不相同的。②对于横向位移场, 则存在着截然不同的情况。无论是高、低匹配的接头在不同裂纹尺寸下均出现了一临界角度作为分界点, 以  $\theta = 45^\circ$  角为分界线在  $15^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$  内  $\lg v - \lg r$  为正斜率,  $45^\circ < \theta \leq 90^\circ$ ,  $\lg v - \lg r$  为负斜率, 同时曲线的末端偏离各自所在的直线段。这表明焊接接头中横向位移场的变化是一个极其复杂的过程, 在给定  $\theta$  下,  $u$  场的分布与  $r$  有关而不独立于  $r$ 。因此可以认为, 横向位移场中 HRR 主导失效。

### 3 讨 论

关于塑性区分布及其扩展规律的研究表明<sup>[11~13]</sup>, 本文所研究的各种情形下, 从小范围屈服直至韧带屈服或全面屈服, 在  $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  (仅考察对称的半平面) 上塑性区尺度因  $\theta$  而异, 在  $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  上塑性区的尺度远小于  $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  上的塑性区尺度。这就表明即使存在一个关于  $v$  场的  $J$  主导区, 那么它在  $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  的分布也是有可能不均匀的或极小的, 因为 HRR 场总是要包含在塑性区内的。

顺便指出, 本文的研究结果提示着横向位移场中  $J$  主导的失效, 即其并不具备 HRR 奇异性, 那么在数值分析中裂纹尖端引入满足 HRR 奇异性的单元的做法就值得商榷。由于裂纹尖端奇异单元比如将单元边中点移至  $1/4$  位置处而引入  $1/\sqrt{r}$  奇异性的 8 节点等参元, 以及将单元的一条边缩成一个点而引入  $1/r$  奇异性的 8 节点退化单元或“崩开”型单元, 都是在裂纹尖端对纵横向场强制假定随  $K$  场或 HRR 场变化的奇异性, 而由本文研究结果, 至少对于本文所研究的接头几何构形而言,  $u$ ,  $v$  场是不能同时满足 HRR 奇异性的。事实上  $u$  场中 HRR 主导失效。

### 4 结 论

(1) 关于焊接接头裂纹尖端位移场的  $J$  主导的研究表明: 横向位移场中 HRR 主导失效, 纵向位移场中  $\lg v - \lg r$  的线性关系不同于焊缝金属或母材的  $1/(n+1)$ 。因此, 在非均质焊接接头中直接应用  $J$  积分作为断裂判据是不合适的。

(2) 由于横向位移场中 HRR 主导失效, 因而裂纹尖端采用奇异单元值得商榷, 因为奇异单元将导致裂纹尖端场的不正确描述。

(1997-09-25 收到初稿, 1998-04-27 收到修改稿)

## 参考文献

- 1 Hutchinson J W. J. Mech. Phys. Solids 1968, 16(1): 13~31
- 2 Rice J R. Rosengren G R. J. Mech. Phys. Solids, 1968, 16(1): 1~12
- 3 Xiao Wei, et al. Engng Fract. Mech., 1992, 42(5): 815~824
- 4 刘宝琛等. 静止裂纹尖端实验的 HRR 奇异场. 力学学报, 1993, 25(1): 69~75
- 5 Dadkhah M S., et al. Proc. 1989 SEM Annual Meeting Cambridge, 1989, 311~315
- 6 Zhang Y, et al. Proc. Int. Conf. on Num. Meth. in Fract. Mech., Pineridge Press, 1990, 557~559
- 7 康继东, 陈士煊, 徐志怀等. 平面应力条件下非均质焊接接头中的 J 主导. 航空动力学报, 1995, 10(4): 343~346
- 8 Kang Jidong, Huo Lixing. J—dominance in welded joint with an over matching weld. Acta Mechanica Solida Sinica, 1995, 8(s): 469~472
- 9 康继东, 张玉凤, 霍立兴. 焊接接头裂纹尖端应变场的云纹干涉法. 焊接学报, 1996, 17(2): 99~103
- 10 康继东. 云纹干涉—有限元混合法及其在非均匀体断裂力学研究中的应用. 南京大学学报, 1994, 30(s): 177~183
- 11 Kang Jidong, Wen Weidong, Zhang Yufeng, Huo Lixing. Path dependence of J—integral in welded joint with an overmatching weld. Trans. of NUAA, 1995, 12(1): 1~8
- 12 康继东, 张玉凤, 霍立兴. 非均质焊接接头裂纹尖端塑性区. 机械强度, 1996, 18(3): 49~52
- 13 康继东. 非均匀体中的 J 积分参量及其应用可行性研究. [学位论文]. 天津: 天津大学, 1994.

### HRR Dominance and $J$ —integral as Fracture Parameter in Heterogeneous Welded Joint

Kang Jidong

(Nanjing University of Aeronautics & Astronautics)

Geng Xuefei

(Heilongjiang Communication College of Higher Learning)

**Abstract** HRR—dominance and the application feasibility of  $J$ —integral in heterogeneous welded joints is investigated by Moire interferometry of reflected sticking film. The results showed that at least for cases studied in this paper, for either the welded joint of steel A537 welded by electrode LB52NS with an overmatching weld in strength or the welded joint of steel 9%Ni welded by electrode OK69.45 with an undermatching weld in strength, HRR—dominance is failure in horizontal displacement field while the slope of  $l_{gv}$ — $l_{gr}$  in vertical displacement field is not agreement with  $1/(n+1)$  of base metal or weld metal. So, it is doubtful to directly use the  $J$ —integral as a fracture criterion in heterogeneous welded joints. By the way, it is also not correct to use singularity elements in vicinity of the crack tip in welded joint.

**Key words**  $J$ —integral, heterogeneity, mismatching, HRR—dominance, welded joint

**作者简介** 康继东, 男, 1967 年 4 月生, 江西遂川人。工学博士、博士后。现任南京航空航天大学 202 教研室副教授, 中国焊接学会 X V 委委员。从事焊接、实验力学、航空发动机的研究。主要科研方向为焊接结构强度与断裂、结构疲劳与可靠性、焊接应力与变形控制。作为负责人或参加人完成国家自然科学基金、航空基础科学基金, 博士后科学基金和航空发动机结构完整性题目等 7 项。1997 年获美国 UTC—容闳科技教育奖。在国内外核心期刊及重要学术会议上发表论文 30 余篇。