

# 基于 $J \sim Q$ 双参数准则的含缺陷焊接接头失效评定曲线(I)

张 敏, 马 博

(西安理工大学 材料科学与工程学院, 西安 710048)

**摘要:** 针对应力三轴性对裂纹尖端应力应变场的影响, 结合均匀材料裂纹结构应力应变场的研究成果, 提出了能反映焊接接头裂端实际应力应变场的  $J \sim Q$  双参数准则, 并在此基础上得到了含缺陷焊接接头失效评定曲线的建立方法。通过有限元计算, 分析了材料组配以及裂纹几何对文中所建立的焊接接头失效评定曲线的影响。基于工程实际, 最后讨论了  $J \sim Q$  双参数焊接接头失效评定曲线的应用。

**关键词:** 失效评定曲线;  $J \sim Q$  双参数准则; 焊接接头; 有限元方法

中图分类号: TG401 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2004)05-93-06



张 敏

## 0 序 言

随着科学技术的不断进步, 对化工容器、锅炉等重要焊接结构的安全及缺陷评定技术得到了迅速发展。自从英国中央电力局(CEGB)提出失效评定曲线, 并将其应用于含缺陷结构安全性评定以来, 世界各国普遍采用失效评定图技术, 并且标准趋向统一。近几年来, 失效评定曲线技术得到了长足的发展, 已引起国人的注意。目前, 将失效评定图技术应用于结构评定规范的主要有英国于 2001 年颁布的“R6—Revision 4: 2001”方法<sup>[1]</sup>, 欧洲委员会(European Commission)于 2000 年发布的《欧洲工业结构完整性评定方法》, 简称 SINTAP<sup>[2,3]</sup>。

由于焊接接头的材料和几何不均匀性对焊接接头力学性能造成了很大影响, 给失效评定曲线在焊接接头缺陷评定中的应用带来一定困难。从焊接构件安全性评价的影响因素方面进行考虑, 建立一个适合于焊接接头使用的失效评定曲线, 无疑是非常必要的。

## 1 基于 $J \sim Q$ 双参数准则的含缺陷焊接接头失效评定曲线的建立

### 1.1 失效评定曲线简述

目前, 失效评定曲线是在 EPRI 的 J 积分估计

方法问世后, 用弹塑性 J 积分分析代替了窄条屈服模型, 在基于“合于使用”原则的前提下, 定义的失效评定曲线(FAC)。其失效评定曲线<sup>[4]</sup>表示为

$$K_r = f(L_r) = (J_e / J_{ep})^{1/2}, \quad (1)$$

式中:  $f(L_r)$  为一个与载荷大小度量  $L_r$  有关的无量纲化函数, 通过同一裂纹结构在同一载荷作用下的线弹性 J 积分值  $J_e$  和弹塑性 J 积分值  $J_{ep}$  来进行计算。

对应于式(1)的失效评定曲线计算式, 针对某一评定试件, 无论其处于何种应力状态, 具体评定时评定点的坐标按下式计算

$$K_r = K_1 / K_c = (J_e / J_c)^{1/2}, \quad L_r = P / P_0, \quad (2)$$

式中:  $K_1$  和  $J_e$  为某一裂纹结构在  $L_r = P / P_0$  作用下的线弹性应力强度因子和线弹性 J 积分计算值;  $K_c$  和  $J_c$  是材料的断裂韧度;  $P$  为施加于结构的载荷,  $P_0$  为结构的塑性失稳极限载荷。对于含缺陷焊接结构件, 只需要计算焊接接头的  $J_e$  和  $J_{ep}$  的值, 就可以通过式(1)、式(2)建立失效评定曲线进行含缺陷焊接结构的完整性评定。

平面应力状态下, 文献[5]对含缺陷焊接接头裂纹尖端应力应变场的研究表明, 单参数断裂参量 J 积分能够描述焊接接头实际应力场的强弱大小; 但是, 对于处于平面应变状态下的焊接接头, 单参数 J 积分已不能完全反映实际应力场的强弱大小, 需要寻求一种新的断裂参量来衡量应力场的强度。与此同时, 在平面应变状态下, 用弹塑性 J 积分理论建立的含缺陷焊接接头失效评定曲线在评定断裂失效时

也存在一定缺陷, 不能真实反映裂端场的实质。

基于上述原因, 文中在考虑应力三轴性对裂纹尖端应力应变场影响的基础上, 从寻求反映焊接接头裂端实际应力应变场的断裂参量出发, 对焊接接头失效评定曲线的建立途径, 以及焊接接头材料组配、裂纹几何对其失效评定曲线产生的影响进行了讨论。

## 1.2 焊接接头的 $J \sim Q$ 双参数准则

在平面应变条件下, 考虑到工程界常用的幂硬化材料, 参照文献[6~8]的结果, 双参数的应力场计算式表示为

$$\frac{\sigma_{ij}}{\sigma_y} = \left( \frac{J}{\alpha \sigma_y I_{nr}} \right)^{\frac{1}{n+1}} \tilde{\sigma}_{ij}(\theta, n) + Q \left( \frac{r \alpha}{J} \right)^{\lambda} \tilde{\sigma}_{ij}(\theta) + \text{高阶项} \quad (3)$$

式中: 右端第一项为 HRR 场的理论场解; 第二项为考虑了应力三轴性高次项对应力场影响后的修正项, 其中,  $J$  是 Rice 的  $J$  积分;  $Q$  是材料裂纹体的应力三轴性参数;  $\alpha$ 、 $\sigma_y$ 、 $\epsilon_y$ 、 $I_{nr}$ 、 $n$  是裂端场材料常数;  $\tilde{\sigma}_{ij}(\theta, n)$ ,  $\tilde{\sigma}_{ij}(\theta)$  是应力角分布函数;  $r$  是极距;  $\lambda$  是与材料应变硬化指数有关的常数系数, 可用有限元方法计算<sup>[9]</sup>。

由于焊接接头的  $J$  积分路径无关性与均匀材料基本一致, 也即随着距离裂纹尖端的无量纲长度参量  $r\sigma_y/J$  的增加, 裂端正应力值越来越小, 并且在  $r\sigma_y/J > 1.0$  以后, 各曲线没有交叉。因此采用文献[5]的研究结果, 将焊接接头裂端应力场新的断裂参量可以表示为

$$J_{mw} = J_w \left( 1 - \frac{Q_w}{\sigma_{yyw} / \sigma_{yw}} \right)^{-(n_w + 1)}, \quad (4)$$

式中:  $\sigma_{yw}$  是焊缝区材料的屈服强度;  $J_{mw}$  是焊接接头  $J \sim Q$  双参数断裂描述方法中的断裂驱动力;  $J_w$  是焊接接头  $J$  积分裂纹扩展驱动力;  $Q_w$  是焊接接头裂端韧带上无量纲距离参数  $r = r_i$  处  $Q$  因子的计算值;  $n_w$  是焊缝材料的应变硬化指数;  $\sigma_{yyw}$  为某一载荷作用下裂端韧带上的主应力。

假设上式中裂端韧带上的第一主应力在其特征点达到临界状态, 焊接接头断裂失效, 此时的  $J_w$  积分参量、 $Q_w$  参量也均达到断裂临界值, 取  $J_{mw}^c$  为焊接接头断裂临界状态时的  $J_{mw}$  应力场幅值因子, 同样按照式(4)的形式, 可得到如下的  $J_{mw}^c$  表达式

$$J_{mw}^c = J_{cw} \left( 1 - \frac{Q_{cw}}{\sigma_{yyw}^c / \sigma_{yw}} \right)^{-(n_w + 1)}, \quad r = r_c, \quad \theta = 0, \quad (5)$$

式中:  $J_{cw}$  表示焊接接头断裂临界状态时  $J$  积分值, 也即材料的断裂韧度;  $Q_{cw}$  则表示焊接接头断裂临界状态时  $Q_w$  参量的大小;  $\sigma_{yyw}^c$  为焊接接头断裂临界状

态时裂端韧带上的主应力值。

联立式(4)、(5)可以得到一个由应力控制的焊接接头断裂准则, 如下式

$$J_{mw} \leq J_{mw}^c. \quad (6)$$

与以往断裂准则的概念相比较,  $J_{mw}^c$  可以理解为焊接接头的断裂韧度,  $J_{mw}$  为某一载荷作用下, 焊接接头的裂纹扩展驱动力。

## 1.3 基于 $J \sim Q$ 双参数准则焊接接头失效评定曲线的建立

为了符合焊接接头裂端实际的应力应变场, 考虑到新建立的  $J_{mw}$  断裂参量, 参照式(1)的形式, 基于  $J \sim Q$  双参数准则, 将含缺陷焊接接头失效评定曲线可以表示为

$$K_r = f(L_r) = (J_e / J_{mw})^{1/2}. \quad (7)$$

相应于含缺陷焊接接头的失效评定曲线计算式(7), 针对某一评定试件, 无论其处于何种应力状态, 具体评定时评定点的坐标按下式计算

$$K_r = K_1 / K_{mw}^c = (J_e / J_{mw}^c)^{1/2}, \quad L_r = P / P_o. \quad (8)$$

式中:  $K_{mw}^c$  和  $J_{mw}^c$  是焊接接头的断裂韧度, 其它符号意义和式(2)相同。断裂韧度  $K_{mw}^c$  和  $J_{mw}^c$  的联系可由下式得到

$$J_{mw}^c = (K_{mw}^c)^2 / E', \quad (9)$$

式中: 平面应变状态下  $E' = E / (1 - \nu^2)$ ,  $\nu$  为材料的泊松比, 平面应力状态下  $E' = E$ 。

式(7)是在平面应变状态下, 基于  $J \sim Q$  双参数准则建立的焊接接头失效评定曲线, 对于处于平面应力状态的焊接接头, 由式(4)可知, 单参数  $J$  积分能够作为衡量焊接接头实际应力场强弱的断裂参量, 应力三轴性参数  $Q_w$  因子的影响并不存在,  $J_{mw}$  也就是  $J$  积分。因此, 在平面应力状态下, 用式(7)建立的含缺陷焊接接头失效评定曲线与采用式(1)所建立的是一致的。同样地, 评定点的计算与式(2)也是相同的。由此可见, 文中所建立的失效评定曲线可以应用于不同的平面状态下, 含缺陷结构的焊接接头的失效评定。

## 2 焊接接头材料组配及裂纹几何对双参数准则失效评定曲线的影响

对于工程上常用的幂硬化材料, 影响材料力学性能的参数主要是屈服强度和幂硬化指数。因此, 由幂硬化材料组成的焊接接头, 其材料不均匀性主要表现为屈服强度和幂硬化指数的组配不同, 因此文中主要讨论在平面应变条件下, 这两个参数对焊

接接头失效评定曲线的影响规律。

焊接接头由焊缝、热影响区和母材三部分组成, 为了讨论的方便, 简单认为接头是由焊缝金属和母材金属两部分组成, 并认为两部分性能宏观均匀。所计算的焊接接头中心裂纹试样简化为图 1 所示的模型, 裂纹几何分别取  $a/W=0.10, 0.30, 0.50$ , 裂纹尖端采用钝化模型,  $\rho=0.005 \text{ mm}$ 。参照文献[10]的研究成果, 计算模型有限元网格划分如图 2 所示。

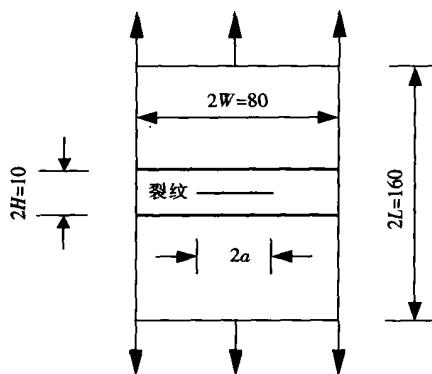


图 1 中心裂纹焊接接头拉伸试样

Fig. 1 Tensile specimen of welded joints with center crack

为了符合工程实际, 该文有限元计算中所模拟的不同组配焊接接头, 均是采用改变焊缝材料的屈服强度和幂硬化指数来达到这一目的, 计算时采用的材料性能参数如下。

(1) 对于强度组配

$\sigma_{yw}=300, 400, 500, 600, 700 \text{ MPa}$ ;  $\sigma_{yb}=500 \text{ MPa}$ ;  $n_w=n_b=10$ 。

(2) 对于幂硬化指数组配

$n_w=7, 8, 9, 10, 11, 12, 13$ ;  $n_b=10$ ;  $\sigma_{yw}=\sigma_{yb}=500 \text{ MPa}$

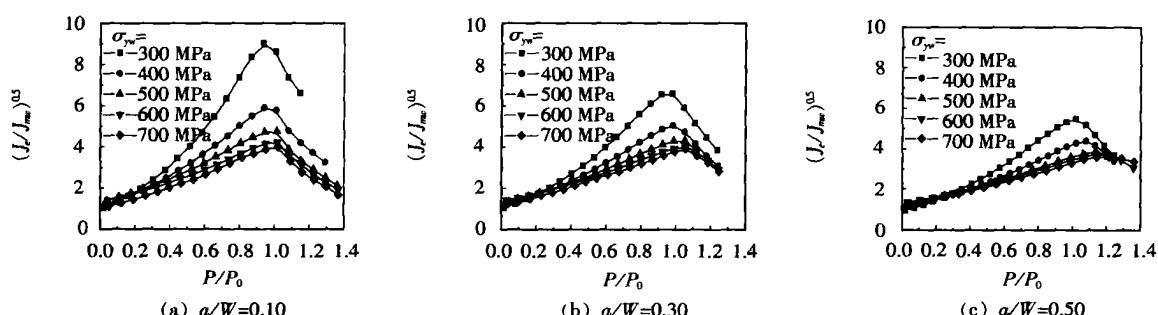
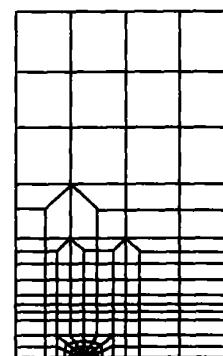
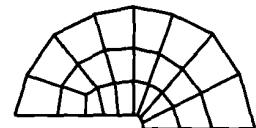


图 3 不同裂纹几何及不同强度组配焊接接头的  $J \sim Q$  双参数失效评定曲线( $n_b=n_w=10$ ,  $\sigma_{yb}=500 \text{ MPa}$ )

Fig. 3 Failure assessment curve (FAC) of double-parameter  $J \sim Q$  under different geometrical dimensions and mismatched strengths of welded joints



(a) 整体网格的划分



(b) 裂端网格的划分

图 2 有限元网络的划分

Fig. 2 Division of finite element mesh

式中:  $\sigma_{yw}$ 、 $\sigma_{yb}$  为焊缝材料和母材材料的屈服强度值;  $n_w$ 、 $n_b$  为焊缝材料和母材材料的幂硬化指数。计算中焊缝和母材所用的材料常数均取为: 弹性模量  $E=200 \text{ GPa}$ , 泊松比  $\nu=0.3$ 。

对于中心裂纹板, 平面应变条件下焊接接头的极限载荷按下式来进行计算<sup>[11]</sup>

$$P_0=1.155 \cdot \sigma_y \cdot (2W-2a), \quad (10)$$

式中:  $2W$  是中心裂纹板的宽度;  $2a$  是裂纹的长度。需要说明的一点是, 文中是按母材材料的屈服强度来计算  $P_0$  值的。

在对焊缝材料性能发生变化时, 该文对基于  $J \sim Q$  双参数准则建立的含裂纹体焊接接头失效评定曲线的变化情况进行了有限元计算, 结果示于图 3 和图 4 中。

由图 3 可以看出, 在母材保持不变, 焊缝材料发生变化时,  $J \sim Q$  双参数焊接接头失效评定曲线差别较大。在同一载荷水平作用下, 相对于母材, 焊缝的屈服强度越低, 也就是说, 焊接接头的强度组配因子  $M$  值越小, 其安全区范围越大, 失效评定曲线越趋于评定图的上方。从图 4 中焊缝幂硬化指数的变

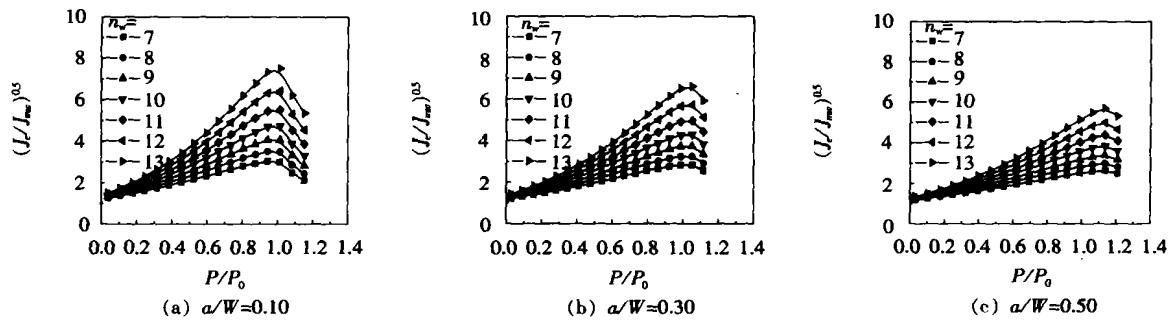


图 4 不同裂纹几何及不同幂硬化指数组配焊接接头的  $J \sim Q$  双参数失效评定曲线 ( $\sigma_{yb} = \sigma_{yw} = 500$  MPa,  $n_b = 10$ )

Fig. 4 FAC of double-parameter  $J \sim Q$  under different geometrical dimensions and power-hardening exponents of welded joints

化情况来看, 焊缝的幂硬化指数越大, 失效评定曲线的安全区的范围也越大。这与屈服强度变化的结果相反。从失效评定曲线与屈服强度和幂硬化指数的依赖性不难发现, 焊缝屈服强度和幂硬化指数的变化对其接头失效评定曲线都有十分显著的影响。

为了研究裂纹几何对不同组配  $J \sim Q$  双参数焊接接头失效评定曲线的影响, 利用有限元计算了含

中心裂纹焊接接头裂纹几何变化时, 其接头失效评定曲线的变化规律, 结果示于图 5。

从图 5 中可以看出, 无论是屈服强度还是幂硬化指数组配变化的情况下, 裂纹几何对  $J \sim Q$  双参数焊接接头失效评定曲线的影响规律大致相同。也即随着裂纹深度的增加, 失效评定曲线越趋于评定图的下方, 其安全区的范围亦越小。

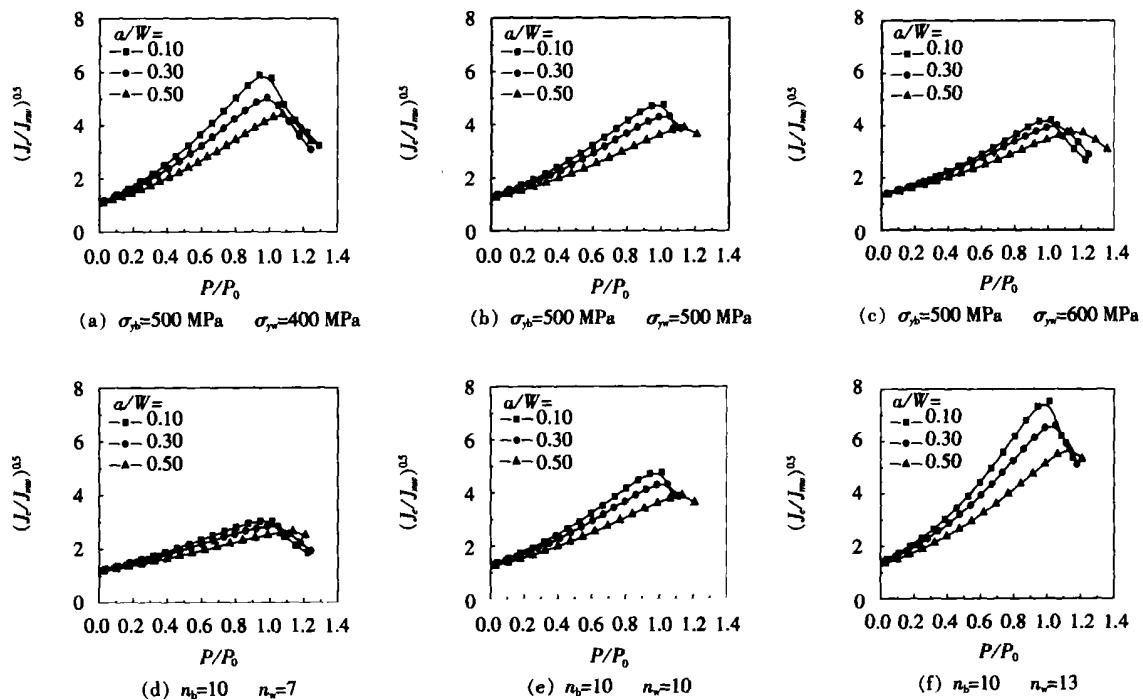


图 5 裂纹几何对  $J \sim Q$  双参数焊接接头失效评定曲线的影响

Fig. 5 Effects on FAC of double-parameter  $J \sim Q$  of welded joints under different geometrical dimensions

### 3 基于工程应用的讨论

为了讨论在工程实际中, 能否应用全母材或全焊缝材料的性能代替焊接接头来建立平面应变条件

下焊接结构的失效评定曲线, 文中对不同强度和幂硬化指数组配情况下, 全母材、全焊缝及其所组成的焊接接头的  $J \sim Q$  双参数失效评定曲线进行了比较, 其结果示于图 6 和图 7 中。

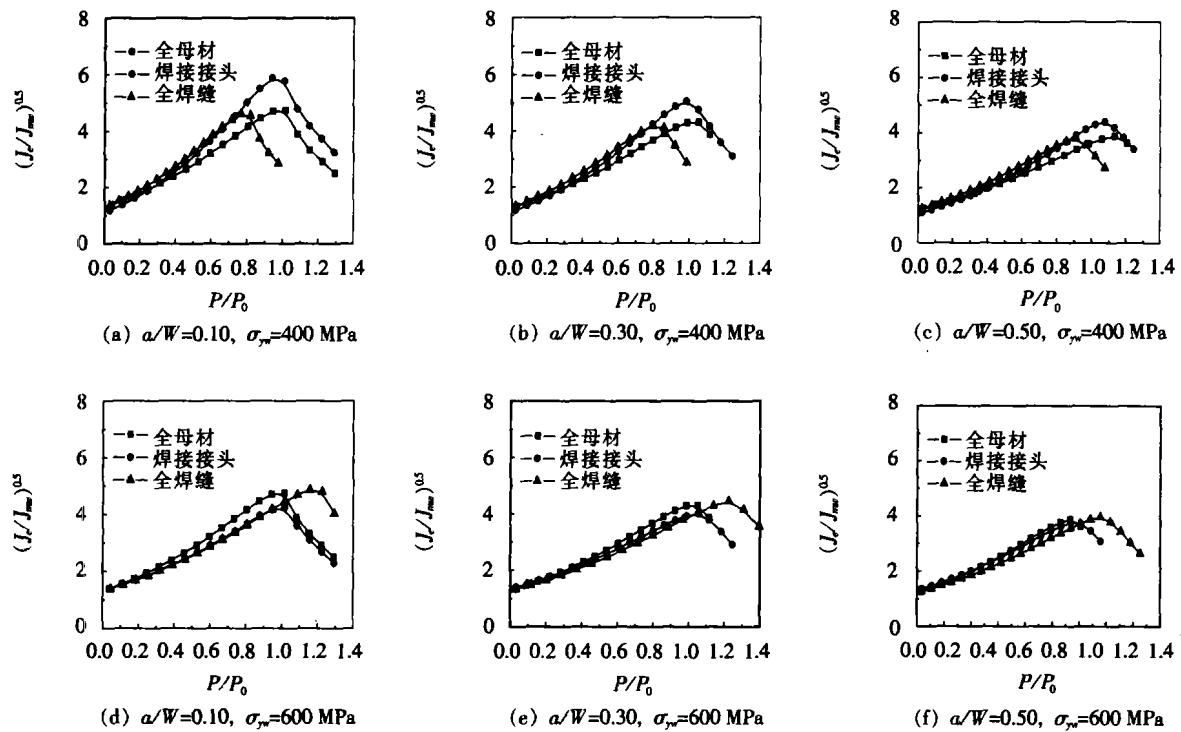
图 6 强度组配不同时均质材料与焊接接头  $J \sim Q$  双参数失效评定曲线的比较 ( $n_b = n_w = 10, \sigma_{yb} = 500 \text{ MPa}$ )

Fig. 6 FAC of double-parameter  $J \sim Q$  of welded joints compared with homogeneous materials under different mismatched strengths

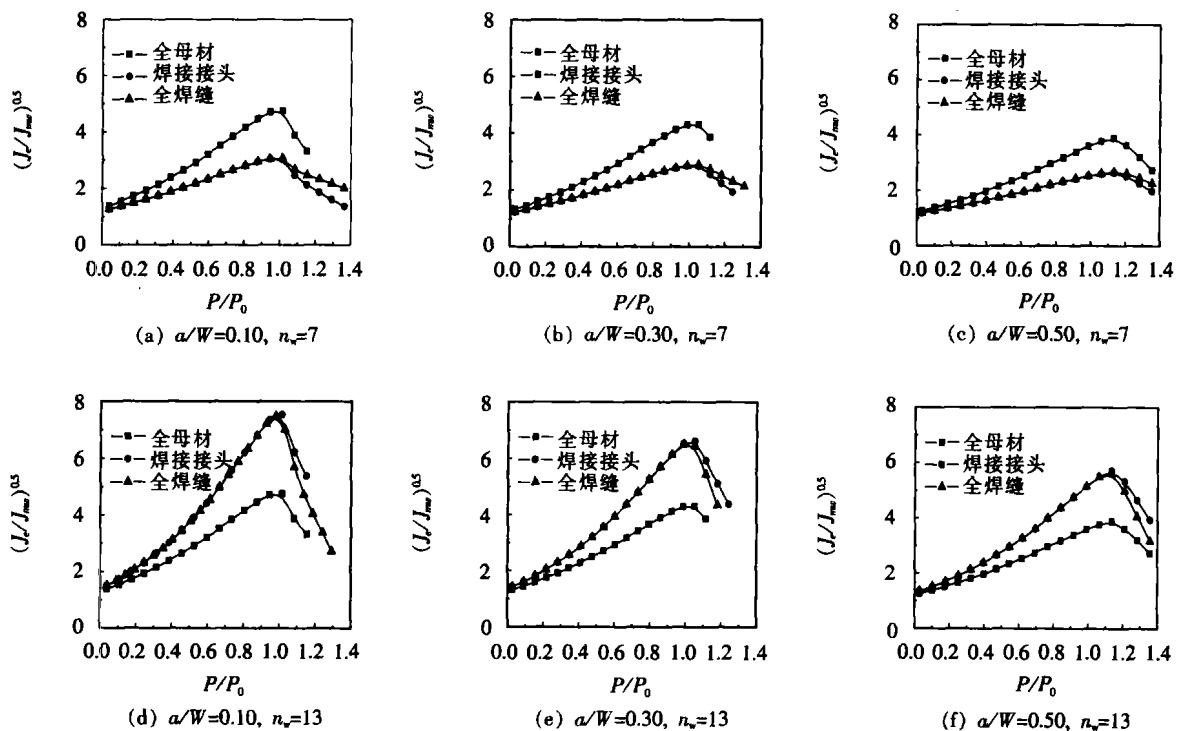
图 7 软硬化指数组配不同时均质材料与焊接接头  $J \sim Q$  双参数失效评定曲线的比较 ( $\sigma_{yb} = \sigma_{yw} = 500 \text{ MPa}, n_b = 10$ )

Fig. 7 FAC of double-parameter  $J \sim Q$  of welded joints compared with homogeneous materials under different power-hardening exponents

从图 6 中可以看出, 对于焊缝屈服强度低于母

材的低组配各种深度裂纹, 其接头的失效评定曲线

都位于用均质母材和均质焊缝所计算的失效评定曲线的上方。因此,对低组配焊接接头,无论用母材或者焊缝单一材料的性能建立的失效评定曲线,其所得到的结果都是偏向保守的。对高组配焊接接头来说,其失效评定曲线位于均质母材和均质焊缝所计算的失效评定曲线的下方,应用单一母材或焊缝材料的性能所建立的失效评定曲线,其得到的结果都是偏向不安全的。

在母材与焊缝材料幂硬化指数组配不同的情况下,其失效评定曲线规律的对比如图 7 所示。从图中可以看出,应变硬化指数影响和强度组配一样明显,对于焊缝幂硬化指数小于母材的情况,焊接接头的失效评定曲线位于以均质母材和均质焊缝材料所计算的失效评定曲线的下方,应用单一母材或焊缝材料的性能所建立的失效评定曲线,其得到的结果都是偏向不安全的。对于焊缝幂硬化指数大于母材的情况,焊接接头的失效评定曲线位于均质母材和均质焊缝材料失效评定曲线的上方,在评定过程中,使用单一母材或焊缝材料的性能建立的评定曲线,所得到的结果都是偏保守的。

## 4 结 论

(1) 在平面应变条件下,针对单参数  $J$  积分不能完全反映焊接接头裂纹尖端应力应变场的特性,考虑到应力三轴性  $Q$  因子对焊接接头裂端场的影响,可以用  $J_{mw}$  断裂参量来表征应力应变场,这样所计算的断裂参量能够反映焊接接头裂端场的实质;更进一步,从符合裂端场的实质出发,可以应用相应的  $J_{mw}$  断裂参量来建立焊接接头失效评定曲线。

(2) 焊接接头的强度以及幂硬化指数组配对其接头的  $J \sim Q$  双参数失效评定曲线有很大的影响。在保持母材性能不变的情况下,随着焊缝材料屈服强度的增大,其失效评定曲线位置趋于评定图的下方,安全区范围变小;而随着焊缝幂硬化指数的增大,其安全区范围则增大。

(3) 对于低组配焊接接头,无论用母材或焊缝单一材料的性能建立的失效评定曲线,其所得到的评定结果都是偏向保守的。相反,对高组配焊接接头来说,无论采用单一母材或焊缝材料性能建立的失效评定曲线,其得到的结果都是不安全的。

(4) 焊缝幂硬化指数小于母材时,采用单一母材或单一焊缝材料性能建立的失效评定曲线,其评定结果都是偏向不安全的。相反,对于焊缝幂硬化指数大于母材的情况,使用单一母材或单一焊缝材料性能所建立的失效评定曲线,所得到的结果都是偏保守的。

## 参考文献:

- [1] 李培宁. 世界各国缺陷评定规范的发展 [A]. 压力容器分会第五届全国压力容器学术会议暨第五届委员会议 [C]. 南京: 2002.
- [2] Ainsworth R A, Gutierrez-Solana F, Ruiz Ocejo J. Analysis levels within the SINTAP defect assessment procedures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2000, 67(6): 515—527.
- [3] Ainsworth R A, Bannister A C, Zerbst U. An overview of the European flaw assessment procedure SINTAP and its validation [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2000, 77(14—15): 869—876.
- [4] 霍立兴. 焊接结构的断裂行为及评定 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [5] 张 敏. 带缺陷焊接机头完整性评价的工程方法研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 1997.
- [6] O'Dowd N P, Shih C F. Family of crack-tip fields characterized by a triaxiality parameter—I. structure of fields [J]. Journal of the Mechanics Physics and Solids, 1991, 39(8): 989—1015.
- [7] O'Dowd N P, Shih C F. Family of crack-tip fields characterized by a triaxiality parameter—II. fracture applications [J]. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 1991, 40(8): 939—963.
- [8] Sham S M, Aravav N. Determination of higher-order terms in asymptotic elastoplastic crack tip solutions [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1991, 39(8): 1043—1072.
- [9] Xia L, Wang T C. Higher order analysis of crack tip fields in elastic power-law hardening materials [J]. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 1993, 41(4): 665—687.
- [10] Zhang Min, Shi yaowu, Zhang Xinpeng. Influence of strength mis-matching on crack driving force and failure assessment curve of welding [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1997, 70(1): 33—41.
- [11] Miller A G. Review of limit loads of structure containing defects [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1988, 32(1—4): 179—482.

**作者简介:** 张 敏, 男, 1967 年 7 月出生, 工学博士, 副教授。主要从事焊接结构断裂强度及焊接工程结构方面的研究, 发表论文 20 余篇。

Email: ZHMMN@263.net