

# 基于 FAD 的铝合金车体焊接缺陷安全性 评价方法研究

刘俊杰, 卢耀辉, 党林媛, 肖柯宇, 张德文, 朱生长

(西南交通大学 机械工程学院, 成都 610031)

**摘要:** **目的** 确保高速列车运行安全, 采用先进的方法和理论对焊接缺陷进行评定显得非常重要。**方法** 采用断裂力学和有限元相结合的方法, 建立车体全比例有限元模型。采用热弹塑性法对焊接残余应力进行有限元数值仿真。基于标准 BS 7910 提供的焊接缺陷评价方法, 对焊接缺陷进行安全性评定。**结果** 对车体带焊缝的有限元模型, 依据 BS EN12663 标准施加车体所承受的载荷, 获取焊缝关注点的应力转化所得到一次应力。根据关注点信息建立所在焊缝处的接头模型进行热弹塑性仿真模拟, 从而获取该关注点残余应力数值及分布转化所得到二次应力。将焊接缺陷进行裂纹当量化, 从而计算得到载荷比与应力强度因子比值, 结合许用 FAD 曲线, 对高速列车铝合金车体上焊缝关注点进行安全性评价。**结论** 该方法对车体这种大型复杂焊接结构的安全性进行评价是可行的, 并对焊接缺陷是否合于使用提出质量控制的建议。

**关键词:** 铝合金焊接车体; 焊接缺陷; FAD 曲线; 安全性评价; 缺陷表征; 有限元分析

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2018.12.018

**中图分类号:** TG146.2+1 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2018)12-0098-06

## Methods for Safety Assessment of Welding Defects for Aluminum Alloy Body Based on FAD

LIU Jun-jie, LU Yao-hui, DANG Lin-yuan, XIAO Ke-yu, ZHANG De-wen, ZHU Sheng-chang  
(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**ABSTRACT: Objective** To ensure safety of high-speed trains, it is very important to evaluate welding defects with advanced method and theory. **Methods** Based on combination of fracture mechanics and finite element method, a full scale finite element model of body was established. Finite element numerical simulation of welding residual stress was carried out with the therm-elastic method. The safety of welding defects was evaluated based on the assessment of welding defects provided by standard BS7910. **Result** For the finite element model of the body including the weld seam, the load was applied to the body according to standard BS EN12663. The primary stress was obtained by transforming stress of the weld points of interest. According to the information of the point of interest, the finite element model of the welded joint was established. And the simulation was carried out based on the therm-elastic method to obtain the residual stress of the point of interest which is further transformed into the secondary stress. Finally, the welding defects were quantitatively in combination with the above-mentioned primary stress and secondary stress, the ratio of the load ratio to the stress intensity factor was further calculated. Combined with the FAD curve, safety of the focus points on the aluminum alloy body of the high-speed train was evaluated. **Conclusion** This

收稿日期: 2018-07-18; 修订日期: 2018-07-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51275428); 四川省科技厅国际合作项目(2018HH0072); 四川省大学生创新创业训练计划项目(SRTP: 2018019)

作者简介: 刘俊杰(1993—)男, 硕士研究生, 主要研究方向为车辆结构疲劳强度可靠性与动力学分析。

通讯作者: 卢耀辉(1973—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为车辆强度及可靠性。

method is feasible for evaluating the safety of a large and complex welded structure like the train body. Suggestions on quality control for the use of welding defects are proposed.

**KEY WORDS:** aluminum alloy welded body; welding defects; FAD curve; safety assessment; characterization of defects; finite element analysis

高速铁路在我国获得了跨越式的发展, 不仅成为当今便民出行的主要交通工具, 同时带动着国家区域经济的发展。高速列车是高速铁路的主体, 又是保障乘行人员安全的最直接载体。因此, 在国家战略中有着重大影响<sup>[1-2]</sup>。随着高速列车运行速度的提高, 将导致其部件承受的载荷更加复杂和恶劣, 对高速列车的运行安全可靠提出了更大的挑战<sup>[3]</sup>。一方面, 车体由铝合金型材焊接组装成一个整体, 其焊接结构中的裂纹和缺陷经常在制造过程或检查过程中出现<sup>[4]</sup>。有些缺陷具有尖锐的缺口, 极容易导致脆性断裂。因而具有缺陷的焊接结构实现断裂评定是可靠性检验的又一道防线。另一方面, 目前在轨道交通设备的疲劳评估研究中广泛采用的方法, 只能对裂纹萌生寿命进行分析, 对于本身就含有缺陷的焊接结构来说, 裂纹的产生则极为平常。假如评价标准是含有裂纹就要进行后一步检修处理, 就会增加车体制造成本, 进而降低高速列车整体的经济性<sup>[5]</sup>。为了保证带裂纹焊接结构的使用安全, 减少工程事故, 同时减少不必要的检修带来的经济损失。在评估高速列车车体时, 对含裂纹工作状态下的焊接结构进行安全性评估是科学合理的, 并且具有重要意义。过往评估的实现仅仅依靠传统的材料力学强度理论和焊接结构理论, 已无法对含缺陷焊接结构的安全性作出可靠评估, 基于断裂力学的失效评定图 (Failure Assessment Diagram, FAD) 方法为含裂纹缺陷结构的安全性评估提供了新的途径。王元清<sup>[6]</sup>基于 SINTAP-FAD 方法对具有裂纹缺陷钢结构构件安全性进行了评价研究。Lie<sup>[7]</sup>等对含裂纹的压缩天然气瓶失效预测, 采用试验和数值模拟相结合的方式对其进行了安全性评定研究。RA Ainsworth<sup>[8]</sup>考虑约束效应, 对各种管径和不同裂纹尺寸的大型直管以及弯曲管道进行断裂失效评估。发现约束的影响不是引发裂缝评估的主要因素, 但可能对延性裂缝扩展有一些影响。杨绍坤<sup>[9]</sup>选用 BS 7910 标准中的 2A 级评定来对具有裂纹的 T 型板进行了安全评估研究。罗友红<sup>[10]</sup>等基于失效评定图 (FAD), 通过 Monte Carlo 方法计算了箱形梁的失效概率, 并对其裂纹缺陷进行了概率安全评估。Xudong Qian<sup>[11]</sup>对圆形空心截面 X 和 K 接头进行了安全断裂评估。然而现在此类评估方法还仅仅停留在对压力容器管道和单一承重接头结构的评价上, 在轨道交通设备的使用研究还处于探索时期, 还没有得到很好的成果, 所以对车辆结构进行以断裂力学为基础的 FAD 方法对含裂纹缺陷结构的安全性评定是有必要的。

## 1 FAD 方法介绍

失效评估图 (FAD) 是对承载结构脆性断裂和塑性失效进行统一评估的方法。在以往对结构进行研究时, 仅仅是针对单方面进行分析, 没有考虑两个方面之间的相互关系。而该方法则将其体现出来, 从而提高分析评估的准确性。两者之间的影响通过失效评估曲线 (FAC) 体现, 纵坐标表现的是脆性断裂, 横坐标表现的是塑性失效, 该曲线代表着失效的临界值, 如图 1 所示。评估点坐标则是由进行评估点处裂纹形状、应力状态、结构尺寸、材料参数所决定的。其中横坐标取决于裂纹形状和外载荷所产生的应力状态, 而纵坐标则还需要考虑焊接残余应力的作用影响。当评估坐标位于临界线以内时, 该评估点所代表的裂纹尺寸则为安全, 反之, 则为不安全<sup>[12-14]</sup>。

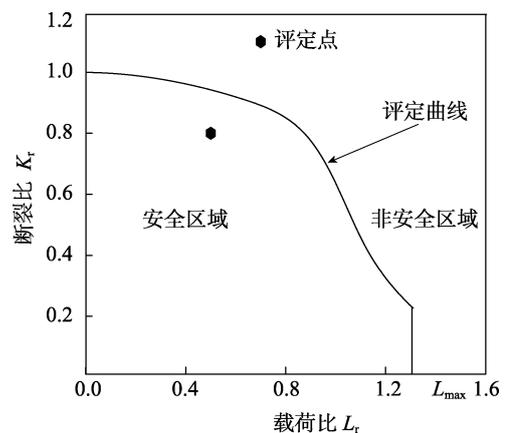


图 1 失效评定图

标准 BS7910 广泛应用于安全性评估。它由三个评估等级组成, 其中一级评定为简单评估方法; 二级评定为常规评估方法, 又分为 2A 和 2B 两种评估方法; 三级评定适用于延性材料。2A 级评估是常规的评估方法。对于含有裂纹的给定结构部件, FAD 使用两个归一化参数载荷比  $L_r$  和应力强度因子比值  $K_t$  同时评估断裂和塑性变形过程<sup>[15-16]</sup>, 其表达式为:

$$K_t = \frac{K_I}{K_{mat}} \quad (1)$$

$$L_r = \frac{P}{P_L} \quad (2)$$

式中:  $P$  为施加载荷;  $P_L$  为极限载荷;  $K_I$  为应力强度因子;  $K_{mat}$  是通过测量的材料断裂韧度。

$L_r$  也可以用式 (3) 表示:

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_Y} \tag{3}$$

式中： $\sigma_{ref}$ 为参考应力，以方程（2）乘以屈服应力得到； $\sigma_Y$ 是材料屈服应力。

$L_r$ 反映结构的塑性失效情况， $K_r$ 反映组件抗断裂的情况，评估组件由 $(L_r, K_r)$ 表示评估点坐标。

在任何情况下，FAD 都遵循作为  $L_r$  函数的表达式：

$$K_r = f(L_r) \tag{4}$$

创建 FAD 的最后一步是在水平轴上引入一个截止值  $L_{r,max}$ ，这代表了极限载荷标准。

## 2 铝合金焊接缺陷 FAD 评价曲线计算

文中利用焊接接头试样进行拉伸试验获得其屈服强度和抗拉强度。因为铝合金为无明显屈服平台的连续屈服材料，所以在文中选取的失效评定曲线为英国标准协会 BS 7910 评定标准中 level 2A 曲线。 $L_{r,max}$ 为载荷比  $L_r$  的极限值，其值可表示为：

$$L_{r,max} = \frac{\sigma_Y + \sigma_u}{2\sigma_Y} \tag{5}$$

式中： $\sigma_Y$ 为材料的屈服强度； $\sigma_u$ 为材料的抗拉强度。

$$K_r = f(L_r) =$$

$$\begin{cases} (1 + 0.5L_r^2)^{-0.5} [0.3 + 0.7 \exp(-\mu L_r^6)] & L_r \leq 1 \\ f(1)L_r^{(N-1)/(2N)} & 1 < L_r < L_{r,max} \\ 0 & L_r \geq L_{r,max} \end{cases} \tag{6}$$

$$\text{式中：} \mu = \min\left(0.001 \frac{E}{\sigma_Y}, 0.6\right), N = 0.3 \left(1 - \frac{\sigma_Y}{\sigma_u}\right),$$

$E$ 为弹性模量。

铝合金焊接接头的弹性模量、屈服强度、抗拉强度分别为 69 GPa、170 MPa、220 MPa，结合 BS 7910 评定标准中提供计算程序，可以得到铝合金焊接缺陷 FAD 图评价曲线。其标准等级为 2A。如图 2 所示。

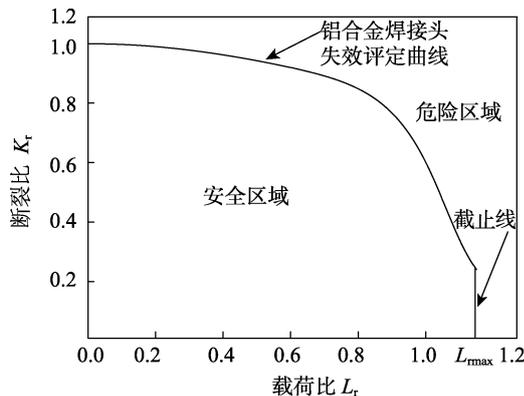


图 2 铝合金焊接接头失效评定曲线

## 3 基于 FAD 的车体焊接缺陷安全性评价方法

此次研究将以高速列车铝合金焊接车体为研究对象，探讨其含缺陷车体焊接结构 2A 级别的断裂评定方法。并根据高速列车车体的有限元分析结果，通过焊接车体结构裂纹断裂评定计算和失效评定图绘制，最终评定得出该含缺陷高速列车是否仍可继续安全服役，从而探索出一套适用于高速列车铝合金焊接车体的断裂评定流程和方法。基于 FAD 的焊接缺陷安全性评价方法流程如图 3 所示。

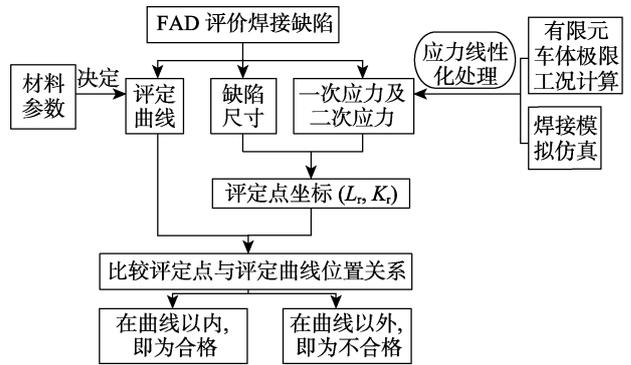


图 3 基于 FAD 的焊接缺陷安全性评价方法流程

### 3.1 焊趾处表面缺陷表征当量裂纹

大型结构的轻量化设计导致铝合金焊接结构获得广泛的应用，但由于铝合金材料本身的物理特性以及焊接接头组织性能的不均匀性，导致了焊接结构无法避免缺陷的产生。

采用基于 FAD 图的焊接缺陷安全性评价方法，需要将结构中的焊缝缺陷表征为裂纹。由于焊接本身的性质致使所产生的缺陷类型以及尺寸各异，并且没有办法直接对其进行分析评价。因此，需要对这些已知的缺陷进行分类，以较为统一合理的方法进行规范化处理，以便于进一步的分析评估。为了使分析结果更具有参考价值，需要将存在于焊缝的缺陷以一定保守程度的数据尺寸来表征。

对缺陷进行表征当量裂纹，通常分为两个步骤。第一步，确定其规则化后的缺陷形状，对于表面缺陷来说，一般有半椭圆形和矩形。第二步，确定当量裂纹的尺寸，以规则化后的缺陷形状沿厚度方向的最大深度为当量裂纹的长度，其在表面的最大长度为当量裂纹的宽度。

若当量裂纹的宽度为  $l$ ，长度为  $h$ ，则当  $h \leq 0.7t$  ( $t$ 为材料厚度) 时，若  $h < l/2$ ，规则化为  $c=l/2, a=h$  的半椭圆表面裂纹 (如图 4a 所示)；若  $h > l/2$ ，对于断裂评定，规则化为  $c=a=h$  的半圆形表面裂纹 (如图

4b 所示)；对疲劳评定，规则化为  $c=l/2$ ， $a=h$  的半椭圆表面裂纹（如图 4c 所示）。

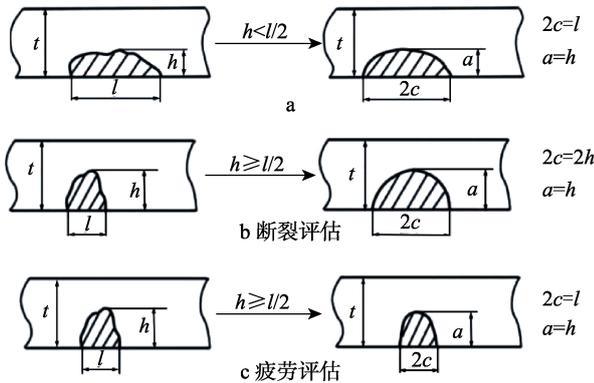


图 4 表面缺陷的规则化图例

### 3.2 应力的线性化处理

在进行 FAD 图对焊接缺陷的安全评价过程中，外载荷对结构作用产生的应力和焊接时产生的自平衡残余应力都对结构有着重大影响。因为两者的类型不同，所以需要进行统一的处理，已达到充分考虑两者的目的。处理方式如图 5 所示。

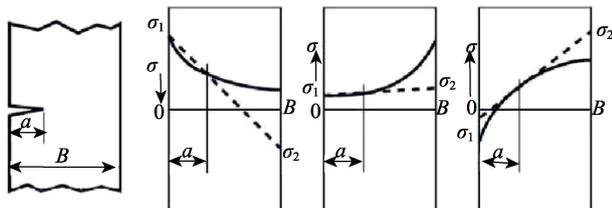


图 5 应力线性化处理

$$\begin{cases} \sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \\ \sigma_b = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \end{cases} \quad (7)$$

式中： $\sigma_m$  为一次应力的膜应力； $\sigma_b$  为一次应力的弯曲应力； $\sigma_1$  为上表面应力； $\sigma_2$  为下表面应力。二次应力的膜应力和弯曲应力可由残余应力结果同理计算得到。

### 3.3 极限工况下有限元车体计算及焊接接头残余应力仿真

FAD 图对焊接缺陷的安全评价过程中，所需要的一次应力、二次应力则是分别由外载荷作用产生的应力和焊接残余应力通过应力线性化处理得到。建立有限元车体，如图 6 所示，进行极限工况的加载计算，得到应力结果云图，如图 7 所示。从整车应力云图上可以准确地找到焊缝关注点，即应力较大的焊缝关注点，并获取其信息（材料参数、接头形式、板厚、焊接工艺等），便于下一步建模进行焊接仿真。

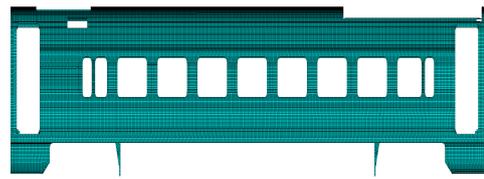


图 6 有限元车体模型

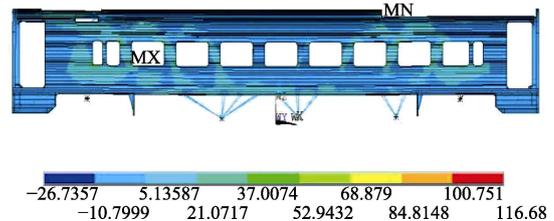


图 7 整车应力云图

根据上述信息建立焊接接头有限元模型，通过热弹塑性法进行焊接仿真，可得出其残余应力的云图，从而获得其残余应力的分布及数值。图 8 为焊接接头有限元模型，图 9 为计算后的得到的残余应力分布。

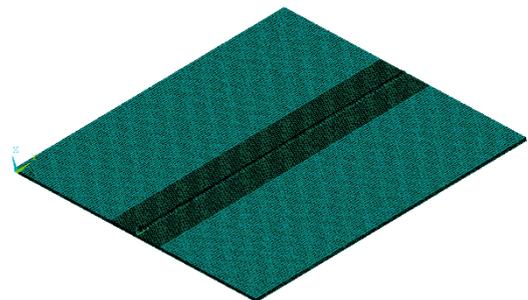


图 8 对接接头有限元模型

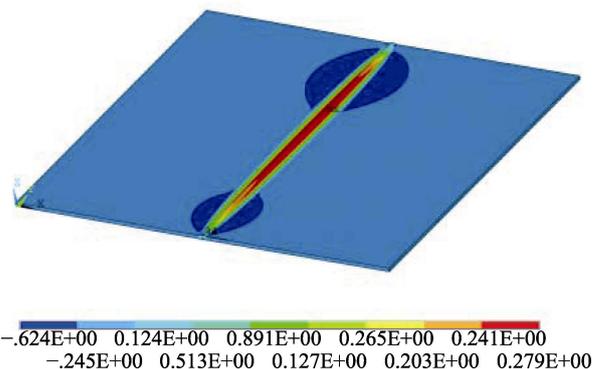


图 9 对接接头残余应力云图

### 3.4 焊缝缺陷评价结果

在进行了上述计算的基础上，选取两个应力大且较为危险的关注点，如图 10 所示。关注点 1 位置临近窗角，存在几何应力集中，外载荷作用下应力大，所在焊缝为对接焊缝，板厚 4.5 mm。关注点 2 位于侧墙与车顶交接处，也存在应力集中，焊缝同为对接

焊缝,板厚 3.5 mm。焊缝缺陷关注点评价结果如图 11 所示。

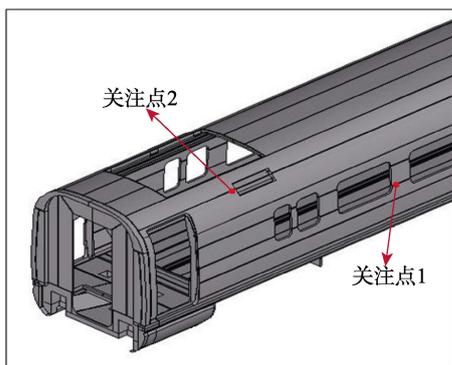


图 10 车体关注点位置

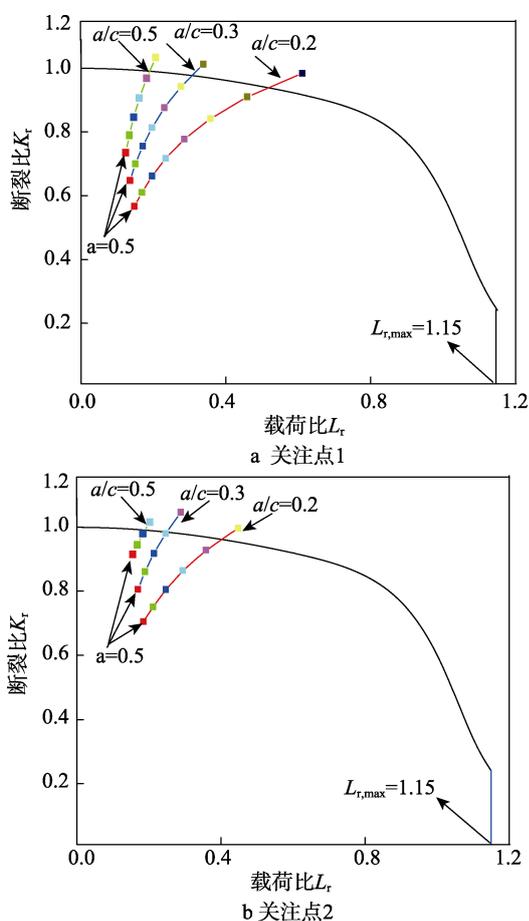


图 11 评估结果

图 11 中初始裂纹长度为 0.5 mm,每次裂纹长度增进 0.1 mm,在不同的  $a/c$  下,接近临界线的趋势不同。 $a/c$  越大,趋势越容易接近临界线。在相同的  $a/c$  下,关注点 2 比关注点 1 要较为危险。由于两者的应力状态接近,导致趋势不同的主要原因在于板厚的不同。

## 4 结语

文中对高速列车焊接车体的断裂安全性评估先

进方法进行了仔细的阐述,对其中涉及的关键方法进行了总结,对高速列车铝合金车体上焊缝薄弱点进行断裂可靠性评价。

1) 在外载荷的作用下,车体的应力集中点多处于几何突变处,如窗角,门角等。因此,在此处的焊缝需要特别关注。

2) 影响安全性评价的主要因素有裂纹长宽比  $a/c$ 、应力状态和残余应力分布、板厚以及材料属性。因此在进行分析时,应该充分考虑到主要因素,以保证评估准确性。

3) 该方法对车体这种大型复杂焊接结构的安全性进行评价是可行的。其评估结果可以对焊接缺陷是否合于使用提出质量控制上的建议。

## 参考文献:

- [1] 杨国伟,魏宇杰,赵桂林,等. 高速列车的关键力学问题[J]. 力学进展, 2015, 45(1): 217-460.
- [2] 林建辉,易彩,张卫华,等. 高速列车服役性能研究[J]. 中国工程科学, 2015, 17(4): 83-89.
- [3] 张卫华,王伯铭. 中国高速列车的创新发展[J]. 机车电传动, 2010(1): 8-12.
- [4] 马思群,谷理想,袁永文,等. 焊接缺陷对动车组铝合金车体疲劳寿命影响研究[J]. 铁道学报, 2014(2): 42-48.
- [5] MÄDLER K, ZERBST U, HINTZE H. Fracture Mechanics in Railway Applications an Overview[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2005, 72(2): 163-194.
- [6] 王元清,廖小伟,周晖,等. 基于 SINTAP-FAD 方法的含裂纹缺陷钢结构构件安全性评定研究[J]. 工程力学, 2017, 34(5): 42-51.
- [7] Lie S T, Li T. Failure Pressure Prediction of a Cracked Compressed Natural Gas (CNG) Cylinder Using Failure Assessment Diagram[J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2014, 18: 474-483.
- [8] AINSWORTH R A, GINTALAS M, SAHU M K, ET AL. Application of failure assessment diagram methods to cracked straight pipes and elbows[J]. International Journal of Pressure Vessels & Piping, 2016, 148: 26-35.
- [9] 杨绍坤,王欣,贾兴军,等. 基于 BS7910 对含裂纹 T 型板的安全性评估研究[J]. 机械强度, 2016(6): 1306-1311.
- [10] 罗友红,吴晓,熊刚,等. 桥(门)式起重机箱形梁结构概率安全评定研究[J]. 机械强度, 2017(5): 207-212.
- [11] QIAN X. Failure Assessment Diagrams for Circular Hollow Section X- and K-joints[J]. International Journal of Pressure Vessels & Piping, 2013, 104(4): 43-56.
- [12] BS 7910-Amendment 1. Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures[S].
- [13] 邵永波,宋生志,李涛. 基于失效评定图(FAD)研究含

- 疲劳裂纹 T 型圆钢管节点的安全性[J]. 工程力学, 2013, 30(9): 184-193.
- [14] 潘建宾, 王国珍, 轩福贞, 等. 核压力容器接管安全端不同焊接结构的失效评定图[J]. 核技术, 2017, 40(5): 82-88.
- [15] MADRAZO V, CICERO S, GARCÍA T. Assessment of Notched Structural Steel Components Using Failure Assessment Diagrams and the Theory of Critical Distances[J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 36(16): 104-120.
- [16] HAN J J, LARROSA N, KIMA Y J, et al. Blunt Defect Assessment in the Framework of the Failure Assessment Diagram[J]. International Journal of Pressure Vessels & Piping, 2016, 146: 39-54.