# 国产压力容器用钢的概率失效评定曲线

骆红云 张玉波

(北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100083) (长春工业大学 机电工程学院, 长春 130012)

钟群鹏

(北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

**摘 要**: 随着概率安全评定技术(PSA,Probabilistic Safety Assessment)的发展,该技术已经开始逐步向工程应用领域渗透,但其在应用方面还存在若干的问题,失效评定曲线的概率化就是其主要问题之一. 对多个厂家、多种炉号、多种板厚4种国产钢种5种裂纹形式的大量失效评定曲线进行了概率分析,采用三段分析法和逼近法得到了不同可靠度下的4种国产钢的概率失效评定曲线及其表达式,以及一般长屈服平台国产钢在不同可靠度下的一般失效评定曲线及其表达式. 运用这些表达式可实现适合我国国产钢种含缺陷构件的工程概率安全评定分析.

**关 键 词**: 概率安全评定; 概率失效评定曲线; 国产压力容器用钢

**中图分类号**: O 213

**文献标识码**: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)04-0450-05

# Investigation of probability failure assessing curve of steel used as pressure vessel material produced in China

Luo Hongyun

(School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Zhang Yubo

(School of Mechanical Science and Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

Zhong Qunpeng

(School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract**: Along with the development of the theory and the technology of PSA (probabilistic safety assessment), the theory and the technology has been used on the engineering field. But there are many problems that are not clear both in theory and technology of PSA. Probabilize of failure assessment curve is one of the significant problems among them. To solve this problem plenty of probabilistic analysis have been carried on the failure assessment curves of 5 kinds of crack styles of four kinds of steel produced in different Chinese steel makers, different heat and different thickness. Probabilistic assessment curve of four kinds of steel and general steel which has long yield point elongation that manufactured in China on different reliability have been obtained by the three-part analysis way and closing approach. The equations are valuable for the engineering probabilistic safety assessment of the long yield point elongation steel manufactured in China.

**Key words**: probabilistic safety assessment; probability failure assessment curve; steel used as pressure vessel material produced in China

---

**收稿日期**: 2005-01-27

**基金项目**: 院士行项目资助(20030323)

**作者简介**: 骆红云(1970-),女,山东海洋人,教授, luo7128@163.com.

目前国内有许多大型机械设备,其主体钢结构经过较长时期的运行后,均存在不同程度的安全隐患,因此国内外对安全评定尤其是概率安全评定(PSA,Probabilistic Safety Assessment)技术越来越重视. 但目前在 PSA 中失效评定曲线通常被认为是某一固定的曲线,这是不科学的,因此,本文就国产压力容器用钢的概率失效评定曲线进行了研究.

## 1　国内外 PSA 分析

含缺陷构件(如压力容器等)的安全评定工作在早期一般采用确定性评定方法,在评定过程中,计算所采用的各参数均为确定值,然后通过取一定的安全系数,偏保守地保证判断的安全性,给出安全或不安全的评定. 它一般不能用于定量比较构件的危险程度和安全程度.

在实际当中,材料的强度是随机的,危险点的应力是随机的,同时缺陷的检测具有一定程度的不确定性或随机性. 由此可见,安全评定中应考虑上述的随机性,评定作出的判断也应该是不确定的,作出的判断应该是危险程度和安全程度的概率,即进行概率安全评定.

早在 30 ~ 40 年代,国际上就开始了对 PSA 方法的研究,英国中央电力局(CEGB)研究人员提出了利用 R6 失效评定曲线来计算结构失效概率的方法,这种方法在建立模型时综合考虑了模型中各种参数的实际离散性,对实际情况的描述与确定性安全评定方法相比更接近真实情况. 从 80 年代后期我国也开展了一系列这方面研究工作,并将前期的研究成功应用于实际当中,取得了良好的效果[1,2]. 目前国内外对 PSA 的研究可以分为 2 个方面:①评定参数的不确定性研究(即安全评定参量的概率分布特征的研究);②PSA 技术方法的研究(主要基于概率断裂力学、Monte-Carlo 模拟技术等)[3].

所谓概率安全评定一般都是建立在应力-强度干涉模型的基础上,$S_a$ 为强度概率分布函数,$\sigma_a$ 为应力概率分布函数,则有失效概率 $P_f$ 为

$$P_f = P(S_a \leqslant \sigma_a) \tag{1}$$

在典型的以应力 $\sigma$,裂纹深度 $a$,裂纹形状参数 $a/c$,断裂韧性 $K_{IC}$ 和材料流变应力 $\sigma_f$ 为变化参数的概率安全评定中,失效概率可用下式表达[4],

$$P_f = \int_0^{\infty} f(\sigma_f) \int_0^{\infty} f(\sigma_f) \int_0^{1} f(a/c) \int_0^{\infty} f(K_{IC}) \cdot \int_a^{t} f(a)\,\mathrm{d}a\mathrm{d}K_{IC}\mathrm{d}(a/c)\,\mathrm{d}\sigma_f\mathrm{d}\sigma \tag{2}$$

式中　$f(*)$ 为参数 $(*)$ 的概率密度函数. 通常为了反映参数的变化和随机特性,将各评定参数概率化,即计算评定时采用各参数的概率分布密度函数代替原来评定计算中的确定值,采用 Monte Carlo 计算程序及重要度抽样方法(或分段抽样)进行分析计算. 计算过程中,大部分文献[5 ~7]都认为 R6 失效评定曲线为某一固定曲线,其失效率为 0 或 1%,安全区是由横坐标轴 $L_r$,纵坐标轴 $K_r$,截止线和 R6 曲线围成的区域,非安全区为由相应的 R6 失效评定图所定义的失效域[4](如图 1 所示). 若计算点 $(L_{ri}, K_{ri})$ 落在失效域内,则认为失效一次,通过大量的模拟计算可以得出 $P_f = n_i$(失效的次数)/$N$(总的模拟次数).

然而,失效评定曲线本身并不是确定不变的曲线,它也是随构件材料及裂纹特性、形状以及温度等参数的变化而变化的曲线. 我国八五期间曾对长屈服平台钢进行了通用失效评定曲线的分析和研究,不同生产厂家的材料,不同热处理状态的材料,在不同温度下,不同缺陷位置,不同试样和缺陷形状等进行了大量的试验研究,得出了 800 多条失效评定曲线(失效评定曲线族),发现在 $L_r$>1. 0左右时,其中有约 10% 左右低于 R6 曲线.

因此,可以说以往的 PSA 方法在其根本上存在一定的缺欠,为此,本文进行了了大量的工作,试图找到不同可靠度的失效评定曲线,从而使 PSA 方法在真正意义上得以实现.

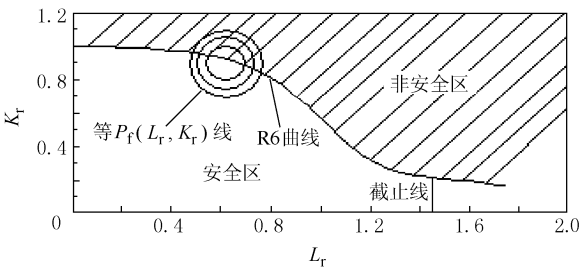


图 1　R6 失效评定曲线的原理示意图

## 2　研究材料和裂纹试样的选取

从八五的研究中[8]选取了国内最常用的结构及压力容器用钢 Q420, Q345, Q235 和 1Cr18Ni9Ti 作为研究材料. 为了尽可能地反映以上钢材的失效评定曲线的分散性,选用了多个厂家、多种炉号和多种板厚板材的拉伸实验所获得的真应力-应变曲线;另外根据 EPRI 手册中的说明不同结构的裂纹各有一套曲线或表格,因此为了反映各种裂纹结构各自的特点和分散性,具体材料来源,裂纹结构等如下.

材料来源:上海电力建设修造厂,上海化工机械三厂,武汉钢铁总厂.

材料状态:热轧态,正火态预应变量为5%,退火热处理,焊态.

原材料板厚(mm):22,24,8,14,18,25.

材料测试温度(℃):常温,-20,-30,-40,-65,-80,100,200,300,-40,100,200,250,300,350.

裂纹试样:①中心穿透裂纹板(CCP)试样;②紧凑拉伸(CT)试样;③三点弯曲(TPB)试样;④单边裂纹板(SECP)试样;⑤双边裂纹板(DECP)试样.

通常认为这几种试样基本包含了常见的几种裂纹结构.

## 3 概率失效评定曲线的分析研究

为了找到不同可靠度的失效评定曲线,即将失效评定曲线概率化,从而使PSA在真正意义上得以实现,主要进行了以下几个步骤的分析:

1) 不同$L_r$值下的失效评定曲线数据的分布情况分析;

2) 不同$L_r$值下各$K_r$分布曲线分位点(50%,60%,70%,80%,90%,99%)的计算分析;

3) 对不同材料不同分位点下的数据进行曲线拟合,最终可以得到不同材料(以上4种金属材料)不同可靠度的失效评定曲线.

下面对各部分进行详细分析.

### 3.1 失效评定曲线数据的分布情况分析

针对以上4种材料在不同情况下(不同厂家、炉号、板厚、裂纹形状)获得失效评定曲线数值(130余条曲线)进行分布分析. 首先将这些曲线的数值离散化,即取出以间隔为0.05,$L_r$分别为0.1~1.5对应的$K_r$值,然后对每组$K_r$值进行分布检验.

主要采用2种方法对以上20组数据进行分布检验:概率纸法(如图2所示)和柯尔莫哥洛夫检验法. 两种检验的结果为每种材料的20组数据(共80组),检验结果表明所有组数据都符合正态分布.

### 3.2 求分位点

由上面的分析可知,80组数据在$L_r=C$(某一固定值时)都服从正态分布,因此可以采用正态分布规律来求分布曲线50%,60%,70%,80%,90%,99%分位点. 通过这些分位点即可拟合出不同材料、不同可靠度下的失效评定曲线.

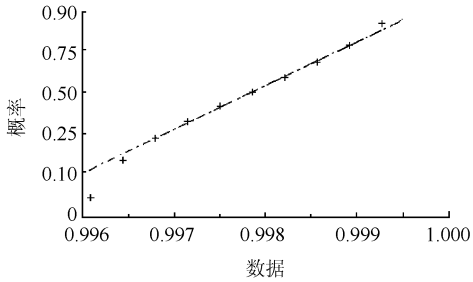


图2 分布检验的概率纸法

### 3.3 不同可靠度下失效评定曲线的获取

这里采用了两种方法来进行不同材料、不同可靠度曲线的拟合:三段分析法和逼近法.

#### 3.3.1 三段分析法

为了精确的描述不同材料、不同可靠度曲线,首先采用了三段拟合法. 通过对八五期间原始试验和计算得出的800余条曲线进行分析发现,可以将其分为上、中、下三段,对曲线分别进行拟合,即$L_r<0.6$,$0.6<L_r<1.0$和$1.0<L_r<1.5$.

拟合过程中选用了不同的模型,包括线性、指数、多项式、对数和峰值函数等[9],最终通过优选得到了拟合公式(1)和曲线(如图3所示),其中$A,B_1,B_2,B_3,t_1,t_2$为拟合系数,不同材料可靠度系数不同.

$$\left.\begin{aligned} K_r &= A + B_1 L_r \qquad L_r < 0.6 \\ K_r &= A + B_1 L_r + B_2 L_r^2 B_3 L_r^3 \\ &\quad 0.6 < L_r < 1.0 \\ K_r &= A + A_1 \exp(-L_r/t_1) + A_2 \exp(-L_r/t_2) \\ &\quad 1.0 < L_r < 1.5 \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

尽管三段分析法拟合的曲线精度比较高(相关系数$R>0.97$),但毕竟在形式上同国际通用的R6曲线有所差异. 因此为了同国际公认的评定方式接近,以便同国际接轨,本文又采用了逼近法对不同材料、不同可靠度下的失效评定曲线进行了分析和拟合.

#### 3.3.2 逼近法

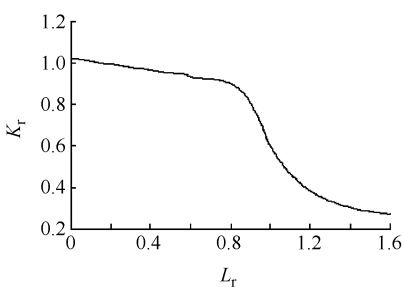


图3 三段拟合的失效评定曲线

目前国际通用的失效评定曲线 R6 如下式所示:

$$K_r = (1 - 0.14L_r^2)(0.3 + 0.7\exp(-0.65L_r^6)) \quad (4)$$

本文采用了同样的形式,将所有的系数变为未知量对现有的数据进行逼近拟合. 首先将 R6 曲线公式的所有系数改为变量,然后再对每个变量进行求导,分析各参数的敏感性,并根据参数敏感性进行系数调整逼近,最终得到了以上 4 种材料在 50%,60%,70%,90%,99% 可靠度下的概率失效评定曲线,如图 4 ~ 图 7 所示,并得到了多种材料综合的不同可靠度的失效评定曲线(如图 8 所示)及其拟合公式,如表 1 所示. 拟合的精度可以达到 0.95 以上,因此建议在今后的应用过程中以下面的逼近法获得的不同可靠度曲线为主.

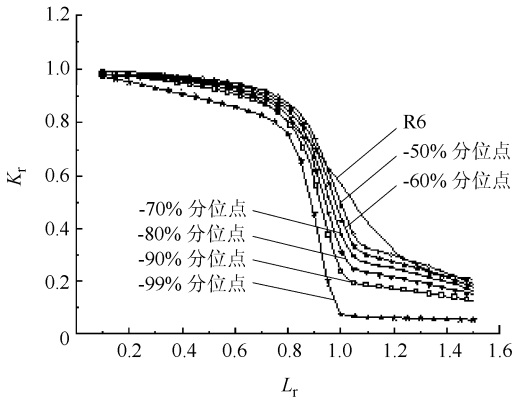


图 4　15MnR 在不同可靠度下的概率失效评定曲线

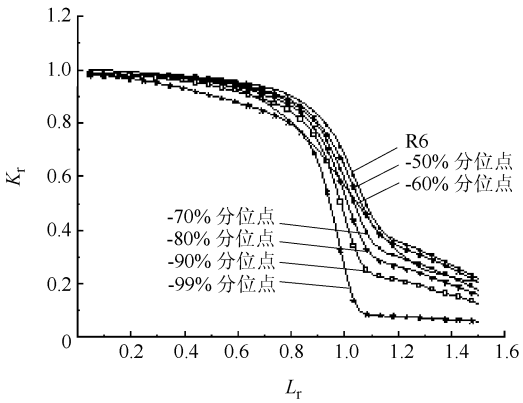


图 5　16MnR 在不同可靠度下的概率失效评定曲线

由图 8 可以看出,R6 曲线于不同材料、不同可靠度的拟合曲线有交叉,其特征亦可分为 3 个部分来讨论:第1部分为$L_r = 0 \sim 0.6$左右,此时

**表 1　一般长屈服平台国产钢在不同可靠度下的概率失效评定曲线公式**

| 可靠度/% | 拟合公式 |
|---|---|
| 50 | $K_r = (1-0.19L_r^{2.47})[0.53+0.46\exp(-0.566L_r^{12.5})]$ |
| 60 | $K_r = (1-0.24L_r^{2.05})[0.52+0.47\exp(-0.63L_r^{12.8})]$ |
| 70 | $K_r = (1-0.28L_r^{1.8})[0.5+0.5\exp(-0.74L_r^{13.5})]$ |
| 80 | $K_r = (1-0.33L_r^{1.6})[0.47+0.54\exp(-0.86L_r^{13.3})]$ |
| 90 | $K_r = (1-0.4L_r^{1.4})[0.41+0.6\exp(-1.08L_r^{13.6})]$ |
| 99 | $K_r = (1-0.5L_r^{1.8})[0.15+0.83\exp(-1.2L_r^{14.6})]$ |

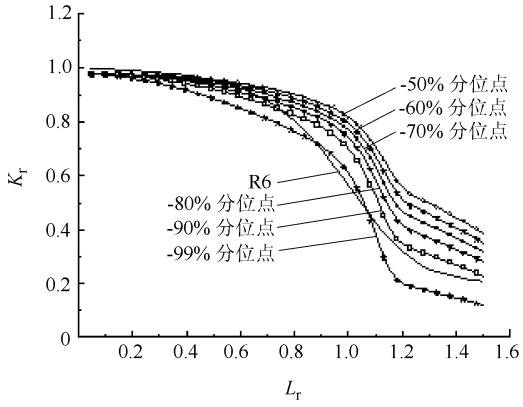


图 6　1Cr18Ni9Ti 在不同可靠度下的概率失效评定曲线

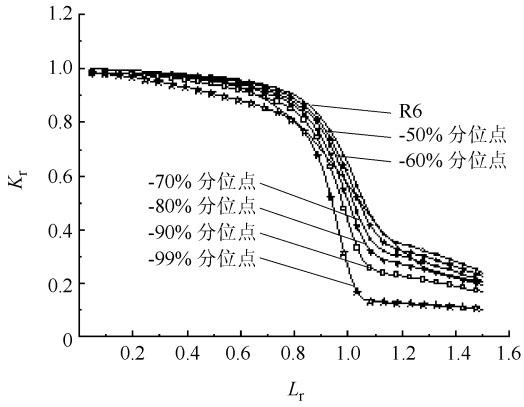


图 7　A3 钢在不同可靠度下的概率失效评定曲线

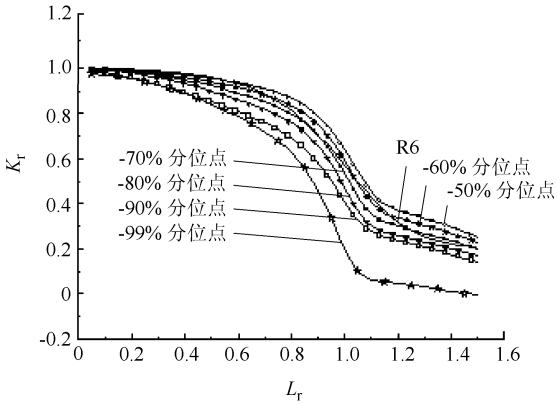


图 8　一般长屈服平台钢在不同可靠度下的概率失效评定曲线

R6 曲线与各可靠性曲线差别不大,但其在所有曲线中的位置偏高,位于 60% 可靠度曲线的上方;第 2 部分为 $L_r = 0.6 \sim 0.9$ 左右时,R6 曲线的可靠度提高,其在所有曲线中的位置有所下降,但基本

位于80%可靠度曲线的上方;第3部分为$L_r$>0.9左右时,其在所有曲线中的位置又有所上升,其可靠度下降,有时可靠度会在70%之上.

通过前面的分析进一步证实了直接采用R6曲线作为评定我国国产钢的99%可靠性评定曲线的不可靠性.

当然,这并不意味着R6曲线是不安全的.一方面,由于国外钢同我国国产钢的成分、性能等方面都存在很大差异,以上的研究只反映了R6曲线对于我国国产钢种应用时的一些不适应性;另一方面,通过概率论的观点可知,事件发生在3倍方差(在99.6%分位点)的可能性是非常低的,这种情况只有在特殊场合(如航空、航天、核工业等)才可能用到,因此不能盲目否定R6曲线.

## 4 结 论

通过对国内外概率安全评定的现状分析,指出了失效评定曲线概率化研究对概率安全评定的重要意义.因此在八五攻关成果的基础上对多个厂家、多种炉号、多种板厚4种国产钢,5种裂纹形式的大量失效评定曲线进行了的分析研究,首先采用概率纸法和柯尔莫哥洛夫检验法对不同*Lr*值下的失效评定曲线数据的分布情况分析,发现这些曲线都服从正态分布;在此基础上求出各分布曲线50%,60%,70%,80%,90%,99%分位点,然后采用三段分析法和逼近法两种方法得到了不同可靠度下的4种国产钢的概率失效评定曲线及其表达式,以及一般长屈服平台国产钢在不同可靠度下的一般失效评定曲线及其表达式.这些概率失效评定曲线及表达式的获得对实现适合我国国产钢含缺陷构件的工程概率安全评定分析具有重要意义.

## 参考文献(**References**)

[1] 王明娥,戴树和. 高温高压换热器的可靠性分析——FTA方法的应用[J].压力容器,1986,3(1):23~31
Wang Minge, Dai Shuhe. Application of reliability analysis——FTA on high temperature high pressure heat exchanger[J]. Pressure Vessel, 1986,3(1):23~31(in Chinese)

[2] Dai Shuhe. Life extension, reliability analysis and expert system for the assessment of fatigue damage in structure with welded defects——a study of applications of high technology in reliability analysis for pressure vessel technology[J]. Int J Pres Ves & Piping, 1993,56(3):263~273

[3] Bullough R, Green V R, Tomkins B, *et al*. Areview of methods and applications of reliability analysis for structural integrity assessment of UK nuclear plant[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1999,76(13):909~919

[4] 武淮生,钟群鹏. 飞机发动机零部件结构完整性的概率R6评定[J].航空学报,2000,21(4):96~99
Wu Huaisheng, Zhong Qunpeng. Probabilistic R6 assessment for structure integrity of aircraft engine componets[J]. Acta Aeronautic et Astronautica Sinica,2000,21(4):96~99

[5] Jin X, Zhong Q P. A probalilistic fracture mechanics assessment method based on the R6 procedure[J]. Int J Pres Ves and Piping, 1997,73(2):161~163

[6] Wu H S, Zhong Q P. Assessment for integrity of structures containing defects[J]. Int J Pres Ves and Piping, 1998,75(4):343~346

[7] Giribone R, lValette B. Principles of failure probability assessment(PoF)[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping,2004,81(10-11):797~806

[8] 王志文.在役压力容器对接焊缝区面型缺陷弹塑性断裂分析及评定研究[R].上海:上海理工大学,85-924-02-02,1995
Wang Zhiwen, Investigation of elastic-plastic fracture analysis and assessment for surface defects on butt welding district of in-service pressure vessles.[R]. Shanghai: East China University of Science & Technology, 85-924-02-02, 1995

[9] 叶卫平,方安平,于本方. Origin 7.0科技绘图及数据分析[M].北京:机械工业出版社,2004
Ye Weiping, Fang Anping, Yu Benfang. Origin 7.0 science & technology drawing and data analysis[M]. Beijing: Mechanical Industry Press,2004