

· 中日防灾减灾环保研究院专家特约稿 ·

# 堆焊修复的裂纹管道的失效评价方法

李银生

(日本原子能研究开发机构,日本茨城319-1195)

**摘要:** 经过长期运营的核电站,由于疲劳以及应力腐蚀等老化现象,其管道系统会出现裂纹。对含有裂纹的管道,美国机械工程师协会锅炉和压力容器规范第11卷给出了在管道外部进行堆焊的WOL修复法,但对修复后管道的失效评价和原管存在裂纹时的评价方法一致,是单一材料构成的含有裂纹管道的失效评价方法。针对这一问题,本文在简要介绍WOL修复法的基础上,推导了由WOL修复法修复的双层结构管道的失效评价方法,并利用已有的奥氏体不锈钢管的实验数据对失效评价方法进行验证,结果表明该方法是有效的,可应用于工程实际。

**关键词:** 核电站;管道系统;应力腐蚀开裂;WOL修复法;失效评价方法;纯截面应力

中图分类号: TH132; O344 文献标志码: A 文章编号: 1673-159X(2020)01-0012-11

doi:[10.12198/j.issn.1673-159X.0501](https://doi.org/10.12198/j.issn.1673-159X.0501)

## Failure Estimation Method for Cracked Pipe Repaired with Weld Overlay Method

LI Yinsheng

(Japan Atomic Energy Agency, Ibaraki 319-1195 Japan)

**Abstract:** Flaw may be initiated in the piping systems in long-term operation nuclear power plants due to the age-related degradations such as fatigue or stress corrosion cracking. For cracked pipes, a weld overlay repair method has been provided in ASME BPV Code Section XI. However, the failure evaluation of the repaired pipe is the same as that of the original pipe with cracks, which is a failure evaluation method for cracked pipe made of a kind of material. Addressing this issue, in this paper, the brief description of this repair method is provided. The failure evaluation method of double-layer structure pipeline repaired by WOL repair method is derived, and the failure evaluation method is verified by using the existing experimental data of austenitic stainless steel pipe. The results show that the method is effective and can be applied to engineering.

**Keywords:** nuclear power plant; piping system; stress corrosion cracking; weld overlay repairmen; failure estimation method; net-section stress approach

---

收稿日期:2019-11-18

作者简介:李银生(1964—),男,博士,研究部长,主要研究方向为核电设备结构完整性评估以及概率断裂力学。

ORCID: 0000-0002-5056-781X E-mail: li.yinsheng@jaea.go.jp

引用格式:李银生. 堆焊修复的裂纹管道的失效评价方法[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2020, 39(1): 12-22.

LI Yinsheng. Failure Estimation Method for Cracked Pipe Repaired with Weld Overlay Method [J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2020, 39(1): 12-22.

核电站经过长期运行后,其管道系统由于疲劳、应力腐蚀等老化现象而出现裂纹<sup>[1-2]</sup>。近年来,各国核电站的重要管道系统都相继确认了裂纹的存在。对出现裂纹的管道,需要进行结构完整性评估,如果强度不能满足要求,则需要采取更换管道等措施,这样就会提高核电站的运营成本。为此,对含有裂纹的管道,美国机械工程师协会锅炉和压力容器规范第11卷(ASME BPV Code Sec. XI)给出了在管道外部进行堆焊的WOL(Weld Overlay)修复法,在保证含有裂纹管道具有足够强度的同时,提高了核电站运营的经济性<sup>[3]</sup>。本文简要介绍WOL修复法,推导了由WOL修复法进行修复的管道失效评价方法,并利用已有实验数据对失效评价方法进行了验证。

## 1 WOL修复法概述

WOL修复法的模式图如图1所示(图中,  $R_o$  为管外半径,  $t_B$  为原管壁厚)。它是对发生裂纹的管道外表面,以低碳不锈钢等抗应力腐蚀开裂材料作为焊接材料,利用气体保护钨极弧焊GTAW(Gas tungsten arc welding)进行多层堆焊,从而防止管道服役期间出现泄漏或失效的修复方法。在保证裂纹管道具有足够强度的基础上,使修复管道得以继续服役,实现了安全性和经济性的统一。因此,WOL修复法在世界上得到了广泛应用,目前拥有1000例以上的使用实例,具有普及其他工业应用的潜力。

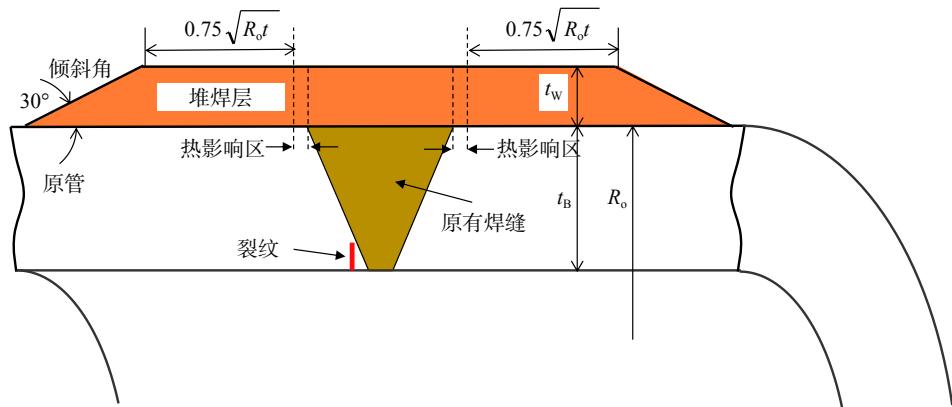


图1 WOL修复法的模式图

以奥氏体不锈钢管为例,WOL修复法修复裂纹管道时应满足以下要求:即使裂纹成为360°穿透裂纹,修复管道的结构强度也必须得到满足;裂纹深度不得超过原管壁厚和堆焊层厚度之和的75%;裂纹深度需要考虑服役期间由于疲劳所引起的裂纹扩展量;把测量的铁素体数(FN)的平均值在7.5及以上、最小值在5.0及以上的堆焊层厚度作为有效厚度;原管焊缝热影响区外侧的长度需要超过 $0.75\sqrt{R_o t_B}$ ;堆焊层端部的角度应在30°以下,等等<sup>[3]</sup>。

对于由WOL修复法修复的管道,美国机械工程师协会锅炉和压力容器规范第11卷给出了管道的失效评价方法。由WOL修复法修复的管道为原管和堆焊层构成的双重结构,各层结构的强度特性各有差异,美国机械工程师协会锅炉和压力容器规范给出的对修复管道的失效评价方法和原管存在裂纹时的失效评价方法相同,这显然不够合理。为了有效地进行WOL修复法的结构设计以及修复管道在役期间的结构完整性评价,近年出现了很多对修复管道的失效评价方法的研究<sup>[4-8]</sup>,代表性的研究有Deardorff等<sup>[4]</sup>、Limpus等<sup>[5]</sup>的理论研究以及Scott等<sup>[8]</sup>的断裂实验。本文在考虑WOL修复法修复管道的双重结构的基础上,推导了适用于修复管道的失效评价方法,并利用已有实验数据对失效评价方法进行了验证。

## 2 WOL修复法修复的含有裂纹管道的失效评价方法

美国机械工程师协会锅炉和压力容器规范给出的对WOL修复法修复管道的失效评价方法和原管存在裂纹时的失效评价方法相同,是单一材料构成的含有裂纹管道的失效评价方法。

## 2.1 由单一材料构成的含有裂纹管道的失效评价方法

美国机械工程师协会锅炉和压力容器规范第 11 卷给出了由单一材料构成的含有裂纹管道的失效评价方法<sup>[3]</sup>。世界各国普遍采用该方法对裂纹管道进行失效评价和结构完整性评价。该方法基于纯截面应力和薄壁理论提出<sup>[9-10]</sup>, 其达到失效时的应力分布如图 2 所示(图中,  $R$  为管平均半径;  $t$  为管壁厚;  $a$  为裂纹深度;  $2\theta$  为裂纹角度;  $\beta$  为中性角;  $\sigma_m$  为膜应力;  $\sigma_f$  为流动应力), 认为当包括裂纹断面的应力全部均匀达到流动应力时将会产生管道失效。失效弯矩和失效弯曲应力如下式所示<sup>[3]</sup>:

$$M_B = 2\sigma_f R^2 t \left[ 2\sin\beta - \frac{a}{t} \sin\theta \right] \quad (1)$$

$$\sigma_b^c = \frac{2\sigma_f}{\pi} \left[ 2\sin\beta - \frac{a}{t} \sin\theta \right] \quad (2)$$

式中:  $a$  为裂纹深度;  $2\theta$  为裂纹角度;  $R$  为管平均半径;  $t$  为管壁厚;  $\sigma_m$  为由于内压而引起的膜应力;  $\sigma_f$  为由材料的屈服应力和拉伸强度的平均值所定义的流动应力;  $\beta$  为中性角, 如下式所示:

$$\beta = \frac{1}{2} \left[ \pi - \frac{a}{t} \theta - \pi \frac{\sigma_m}{\sigma_f} \right] \quad (3)$$

式(1)至(3)是裂纹角度较小( $\theta + \beta \leq \pi$ )时的失效评价公式。当裂纹角度较大( $\theta + \beta > \pi$ ), 进入压缩应力一侧时的失效弯矩和失效弯曲应力评价公式如下式所示:

$$M_B = 2\sigma_f R^2 t \left[ 2 - \frac{a}{t} \right] \sin\beta \quad (4)$$

$$\sigma_b^c = \frac{2\sigma_f}{\pi} \left[ 2 - \frac{a}{t} \right] \sin\beta \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\pi}{2 - a/t} \left[ 1 - \frac{a}{t} - \frac{\sigma_m}{\sigma_f} \right] \quad (6)$$

该方法适用于不锈钢以及镍合金钢等韧性较高的材料, 并可以借助 Z 系数法应用于碳钢及焊缝等中等韧性材料。

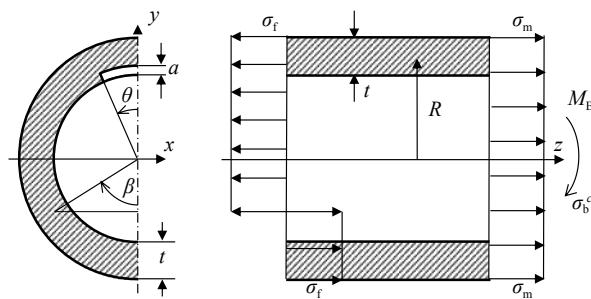


图 2 含有裂纹的管道及其达到失效状态时的应力分布

在美国机械工程师协会锅炉和压力容器规范所给出的 WOL 结构的设计方法中, 规定用式(1)和式(4)来评价 WOL 修复法修复的双重结构管道的失效强度。如果管道同一断面存在的裂纹为多个裂纹, 需要考虑多个裂纹的合体裂纹。如果合体裂纹的角度  $2\theta$  在  $36^\circ$  以下, 则以原管的厚度作为裂纹的深度, 以合体裂纹的角度作为裂纹的角度进行结构设计; 如果合体裂纹的角度  $2\theta$  超过  $36^\circ$ , 则考虑深度为原管厚度的  $360^\circ$  穿透裂纹进行结构设计。

## 2.2 双层材料构成的含有裂纹管道的失效评价方法

由 WOL 修复法修复的管道在裂纹位置附近为双层材料结构, 各层结构的流动应力等材料特性不同, 按照美国机械工程师协会锅炉和压力容器规范所给出的适用于单一材料构成的含有裂纹管道的失效评价方法进行评价显然不够合理。为了对修复管道在役期间的结构完整性进行合理评价, 本文推导由双层材

料构成的含有裂纹管道的失效弯矩和弯曲应力。

和现有单一材料构成的含有裂纹管道的失效评价方法相同,公式诱导基于纯截面应力概念和薄壁理论,认为当包括裂纹所在断面的应力全部均匀达到流动应力时将会产生管道的失效<sup>[9-10]</sup>。

### 2.2.1 裂纹存在于原管时的失效评价方法

裂纹存在于原管时由WOL修复法修复的管道达到失效状态,即包括裂纹所在断面的应力全部均匀达到流动应力时的应力分布如图3所示。图中: $R_B$ 、 $t_B$ 、 $\sigma_{fB}$ 分别为原管的平均半径、管壁厚、流动应力; $R_W$ 、 $t_W$ 、 $\sigma_{fW}$ 分别为堆焊层的平均半径、管壁厚、流动应力; $\beta_{wol}$ 、 $M_{b,wol}$ 、 $\sigma_{b,wol}$ 分别为双层材料结构管道的中性角、失效弯矩、弯曲应力; $\sigma_m$ 为膜应力。

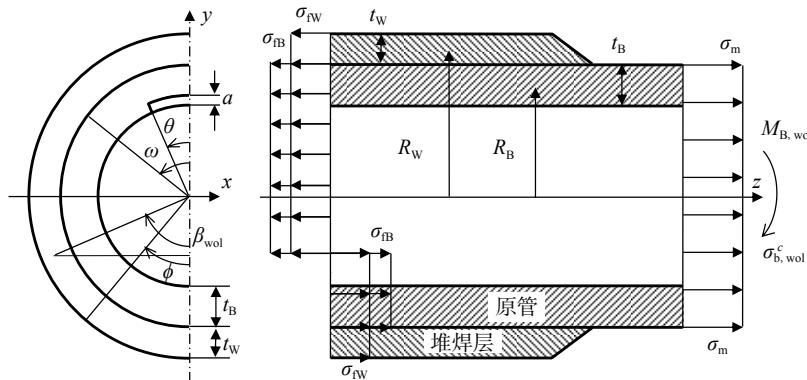


图3 角度较小的裂纹存在于原管时的双层材料结构管道及其达到失效状态时的应力分布

当裂纹角度较小( $\theta + \beta \leq \pi$ )时,轴向受力平衡方程式为

$$R_B t_B (\pi - \beta_{wol}) \sigma_{fB} + R_W t_W (\pi - \beta_{wol}) \sigma_{fW} - R_B a \theta \sigma_{fB} - R_B t_B \beta_{wol} \sigma_{fB} - R_W t_W \beta_{wol} \sigma_{fW} = \pi \sigma_m R_B t_B \quad (7)$$

整理式(7),可得到以下中性角 $\beta_{wol}$ 的表达式:

$$\beta_{wol} = \frac{1}{2} \frac{\pi (R_B t_B \sigma_{fB} + R_W t_W \sigma_{fW}) - R_B a \theta \sigma_{fB} - \pi \sigma_m R_B t_B}{R_B t_B \sigma_{fB} + R_W t_W \sigma_{fW}} = \frac{1}{2} \left[ \pi - \left( \frac{a}{t_B} \theta + \pi \frac{\sigma_m}{\sigma_{fB}} \right) / (1 + r_{sf} r_R r_t) \right] \quad (8)$$

式中, $r_R$ 、 $r_t$ 、 $r_{sf}$ 分别为堆焊层的平均半径、管壁厚、流动应力和原管的平均半径、管壁厚、流动应力的比,如下式所示:

$$r_R = \frac{R_W}{R_B} = 1 + \frac{1}{2} \frac{t_B}{R_B} (1 + r_t), \quad r_t = \frac{t_W}{t_B}, \quad r_{sf} = \frac{\sigma_{fW}}{\sigma_{fB}} \quad (9)$$

式中: $r_R$ 、 $r_t$ 表示堆焊层的尺寸效果; $r_{sf}$ 表示双层材料的流动应力的不同。

根据图3所示应力分布,可得失效弯矩 $M_{b,wol}$ 为

$$\begin{aligned} M_{b,wol} = & 2\sigma_{fB} R_B^2 t_B \int_0^{\beta_{wol}} \cos \phi d\phi + 2\sigma_{fW} R_W^2 t_W \int_0^{\beta_{wol}} \cos \phi d\phi + 2\sigma_{fB} R_B^2 t_B \int_0^{\pi - \beta_{wol}} \cos \omega d\omega + \\ & 2\sigma_{fW} R_W^2 t_W \int_0^{\pi - \beta_{wol}} \cos \omega d\omega - 2\sigma_{fB} R_B^2 a \int_0^\theta \cos \omega d\omega = \\ & 2\sigma_{fB} R_B^2 t_B \left[ 2 \sin \beta_{wol} - \frac{a}{t_B} \sin \theta + 2r_{sf} r_R^2 r_t \sin \beta_{wol} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

根据失效弯矩,可以求解失效弯曲应力为

$$\sigma_{b,wol}^c = \frac{2\sigma_{fB}}{\pi} \left[ 2 \sin \beta_{wol} - \frac{a}{t_B} \sin \theta + 2r_{sf} r_R^2 r_t \sin \beta_{wol} \right] \quad (11)$$

当裂纹角度较大( $\theta + \beta > \pi$ ),进入压缩应力一侧时,双层材料结构管道及其达到失效状态时的应力分布如图4所示。轴向受力平衡方程式为

$$R_B (t_B - a) (\pi - \beta_{wol}) \sigma_{fB} + R_W t_W (\pi - \beta_{wol}) \sigma_{fW} - R_B t_B \beta_{wol} \sigma_{fB} - R_W t_W \beta_{wol} \sigma_{fW} = \pi \sigma_m R_B t_B \quad (12)$$

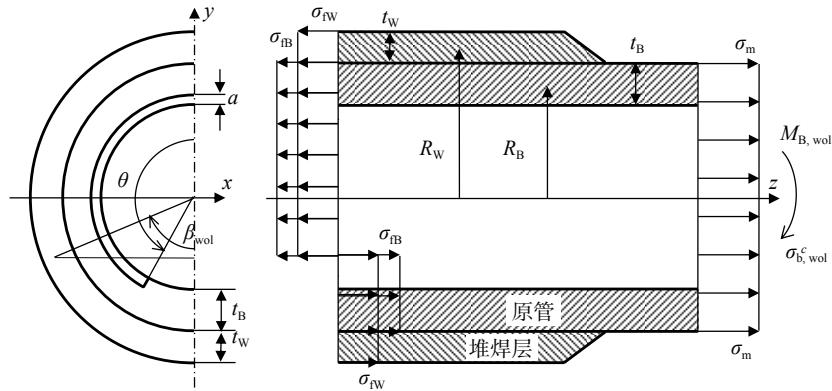


图 4 角度较大的裂纹存在于原管时的双层材料结构管道及其达到失效状态时的应力分布

由此,可得到以下中性角  $\beta_{wol}$  的表达式:

$$\beta_{wol} = \frac{\pi R_B (t_B - a) \sigma_{fB} + \pi R_W t_W \sigma_{fW} - \pi \sigma_m R_B t_B}{R_B (t_B - a) \sigma_{fB} + R_W t_W \sigma_{fW} + R_B t_B \sigma_{fB} + R_W t_W \sigma_{fW}} = \pi \left( 1 - \frac{a}{t_B} - \frac{\sigma_m}{\sigma_{fB}} + r_{sf} r_R r_t \right) / \left( 2 - \frac{a}{t_B} + 2 r_{sf} r_R r_t \right) \quad (13)$$

同样,根据达到失效状态时的应力分布,可得失效弯矩  $M_{B,wol}$  为

$$\begin{aligned} M_{B,wol} = & 2 \sigma_{fB} R_B^2 t_B \int_0^{\beta_{wol}} \cos \phi d\phi + 2 \sigma_{fW} R_W^2 t_W \int_0^{\beta_{wol}} \cos \phi d\phi + \\ & 2 \sigma_{fB} R_B^2 (t_B - a) \int_0^{\pi - \beta_{wol}} \cos \omega d\omega + 2 \sigma_{fW} R_W^2 t_W \int_0^{\pi - \beta_{wol}} \cos \omega d\omega = \\ & 2 \sigma_{fB} R_B^2 t_B \left[ 2 - \frac{a}{t_B} + 2 r_{sf} r_R^2 r_t \right] \sin \beta_{wol} \end{aligned} \quad (14)$$

由此,可以得到失效弯曲应力  $\sigma_{b,wol}^c$  为

$$\sigma_{b,wol}^c = \frac{2 \sigma_{fB}}{\pi} \left[ 2 - \frac{a}{t_B} + 2 r_{sf} r_R^2 r_t \right] \sin \beta_{wol} \quad (15)$$

## 2.2.2 裂纹存在于堆焊层时的失效评价方法

由于裂纹的疲劳扩展等原因,对由 WOL 修复法修复的管道,不能否定裂纹进入堆焊层的可能性。存在于堆焊层的裂纹角度较小( $\theta + \beta \leq \pi$ )时,达到失效状态时的应力分布如图 5 所示。存在于堆焊层的裂纹角度较大( $\theta + \beta > \pi$ )时,达到失效状态时的应力分布如图 6 所示。

裂纹角度较小( $\theta + \beta \leq \pi$ )时,根据图 5 的应力分布,可以得到以下轴向应力平衡方程的方程式:

$$\begin{aligned} & R_B t_B (\pi - \beta_{wol}) \sigma_{fB} + R_W t_W (\pi - \beta_{wol}) \sigma_{fW} - R_B t_B \theta \sigma_{fB} - R_W (a - t_B) \theta \sigma_{fW} - \\ & R_B t_B \beta_{wol} \sigma_{fB} - R_W t_W \beta_{wol} \sigma_{fW} = \pi \sigma_m R_B t_B \end{aligned} \quad (16)$$

由此,可以得到中性角  $\beta_{wol}$  的表达式:

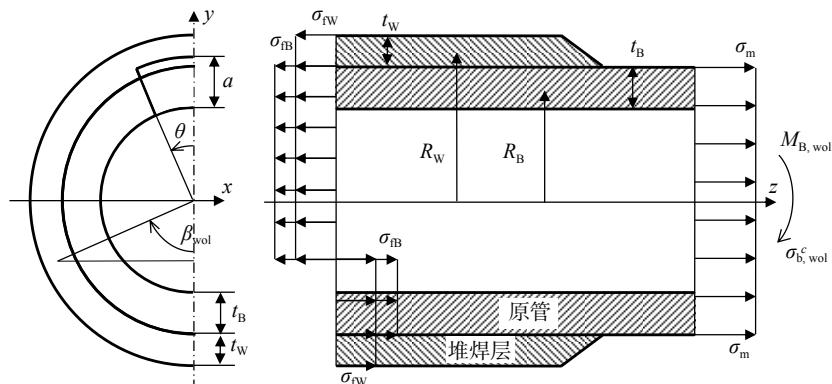


图 5 角度较小的裂纹存在于堆焊层时的双层材料结构管道及其达到失效状态时的应力分布

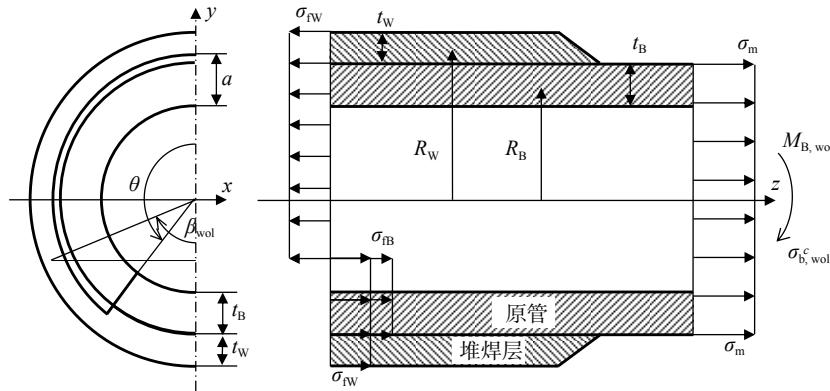


图 6 角度较大的裂纹存在于堆焊层时的双层材料结构管道及其达到失效状态时的应力分布

$$\beta_{wol} = \frac{1}{2} \frac{\pi(R_B t_B \sigma_{fb} + R_w t_w \sigma_{fw}) - R_B t_B \theta \sigma_{fb} - R_w (a - t_B) \theta \sigma_{fw} - \pi \sigma_m R_B t_B}{R_B t_B \sigma_{fb} + R_w t_w \sigma_{fw}} = \frac{1}{2} \left\{ \pi - \left[ \theta + r_{sf} r_R \left( \frac{a}{t_B} - 1 \right) \theta + \pi \frac{\sigma_m}{\sigma_{fb}} \right] / (1 + r_{sf} r_R r_t) \right\} \quad (17)$$

根据图 5 所示达到失效状态时的应力分布, 可以得到修复管道的失效弯矩  $M_{B,wol}$  为

$$M_{B,wol} = 2\sigma_{fb} R_B^2 t_B \int_0^{\beta_{wol}} \cos \phi d\phi + 2\sigma_{fw} R_w^2 t_w \int_0^{\beta_{wol}} \cos \phi d\phi + 2\sigma_{fb} R_B^2 t_B \int_0^{\pi - \beta_{wol}} \cos \omega d\omega + 2\sigma_{fw} R_w^2 t_w \int_0^{\pi - \beta_{wol}} \cos \omega d\omega - 2\sigma_{fb} R_B^2 t_B \int_0^{\theta} \cos \omega d\omega - 2\sigma_{fw} R_w^2 (a - t_B) \int_0^{\theta} \cos \omega d\omega = 2\sigma_{fb} R_B^2 t_B \left\{ 2 \left( 1 + r_{sf} r_R^2 r_t \right) \sin \beta_{wol} - \left[ 1 + r_{sf} r_R^2 \left( \frac{a}{t_B} - 1 \right) \right] \sin \theta \right\} \quad (18)$$

由此可得修复管道的失效弯曲应力为

$$\sigma_{b,wol}^c = \frac{2\sigma_{fb}}{\pi} \left\{ 2 \left( 1 + r_{sf} r_R^2 r_t \right) \sin \beta_{wol} - \left[ 1 + r_{sf} r_R^2 \left( \frac{a}{t_B} - 1 \right) \right] \sin \theta \right\} \quad (19)$$

裂纹角度较大( $\theta + \beta > \pi$ )时, 根据图 6 的应力分布, 可得轴向应力平衡方程的方程式

$$R_w (t_w + t_B - a) (\pi - \beta_{wol}) \sigma_{fw} - R_B t_B \beta_{wol} \sigma_{fb} - R_w t_w \beta_{wol} \sigma_{fw} = \pi \sigma_m R_B t_B \quad (20)$$

由此可得中性角  $\beta_{wol}$  为

$$\beta_{wol} = \pi \frac{R_w t_w \sigma_{fw} - R_w (a - t_B) \sigma_{fw} - \sigma_m R_B t_B}{R_w t_w \sigma_{fw} - R_w (a - t_B) \sigma_{fw} + R_B t_B \sigma_{fb} + R_w t_w \sigma_{fw}} = \pi \left[ r_{sf} r_R r_t - r_{sf} r_R \left( \frac{a}{t_B} - 1 \right) - \frac{\sigma_m}{\sigma_{fb}} \right] / \left[ 1 + 2r_{sf} r_R r_t r_t - r_{sf} r_R \left( \frac{a}{t_B} - 1 \right) \right] \quad (21)$$

根据图 6 达到失效状态时的应力分布, 可得修复管道的失效弯矩  $M_{B,wol}$  为

$$M_{B,wol} = 2\sigma_{fb} R_B^2 t_B \int_0^{\beta_{wol}} \cos \phi d\phi + 2 \int_0^{\beta_{wol}} \cos \phi d\phi + 2\sigma_{fw} R_w^2 (t_w + t_B - a) \int_0^{\pi - \beta_{wol}} \cos \omega d\omega = 2\sigma_{fb} R_B^2 t_B \left[ 1 + 2r_{sf} r_R^2 r_t - r_{sf} r_R^2 \left( \frac{a}{t_B} - 1 \right) \right] \sin \beta_{wol} \quad (22)$$

由此可得修复管道的失效弯曲应力为

$$\sigma_{b,wol}^c = \frac{2\sigma_{fb}}{\pi} \left[ 1 + 2r_{sf} r_R^2 r_t - r_{sf} r_R^2 \left( \frac{a}{t_B} - 1 \right) \right] \sin \beta_{wol} \quad (23)$$

### 2.2.3 裂纹的存在位置以及焊接方法和流动应力评价方法的关系

以上修复管道的失效评价公式基于纯截面应力概念, 认为当包括裂纹断面的应力全部均匀达到流动应力时将会产生管道的失效, 适用于不锈钢以及镍合金钢等韧性较高的材料。当裂纹存在于碳钢以及焊缝等中等韧性材料时, 可以利用 Z 系数法, 把母材的流动应力除以 Z 系数来进行失效评价<sup>[3,11]</sup>。因此以上修复管道的失效评价公式中需要考虑裂纹的存在位置和具体焊接方法计算双层结构管道的流动应力比

$r_{sf}$ 。另外,  $Z$  系数的评价方法各国主要规范略有不同, 本文以日本机械学会 Fitness-For-Service 规范<sup>[1]</sup>为例进行考察。

例如, 当裂纹发生在奥氏体不锈钢管道时, WOL 修复法的堆焊层的焊接方法为 GTAW, 而原管焊缝的焊接方法可以为 GTAW, 焊条电弧焊 SMAW(Shielded metal arc welding)或埋弧焊 SAW( Submerged arc welding)焊接。因此, 根据裂纹的存在位置和焊接方法可以出现以下的可能性。

1) 可能性之 1: 裂纹存在于原管母材。

基于日本机械学会 Fitness-For-Service 规范, 考虑奥氏体不锈钢原管母材中存在的裂纹进行失效评价时, 无需考虑  $Z$  系数, 可以直接用原管母材的流动应力  $\sigma_{fb}$  进行失效评价。对于用 GTAW 法进行焊接的堆焊层, 则需要考虑以下所示的  $Z$  系数<sup>[1]</sup>:

$$Z_{GTAW} = 0.292 \log\left(\frac{OD}{25}\right) + 0.986 \quad (24)$$

式中, OD 为管道的公称直径(A)。

因此, 这种情况下的流动应力比  $r_{sf}$  可按下式计算:

$$r_{sf} = \frac{\sigma_{fb}/Z_{GTAW}}{\sigma_{fb}} = \frac{1}{Z_{GTAW}} \quad (25)$$

2) 可能性之 2: 裂纹存在于 GTAW 或 SMAW 焊缝。

当裂纹存在于由 GTAW 或 SMAW 焊接法焊接的焊缝时, 其  $Z$  系数和堆焊层的  $Z$  系数相同<sup>[1]</sup>, 因此这种情况下的流动应力比  $r_{sf} = 1$ 。

3) 可能性之 3: 裂纹存在于 SAW 焊缝。

当裂纹存在于由 SAW 焊接法焊接的焊缝时, 其  $Z$  系数由下式计算<sup>[1]</sup>:

$$Z_{SAW} = 0.350 \log\left(\frac{OD}{25}\right) + 1.215 \quad (26)$$

因此, 这种情况下的流动应力比  $r_{sf}$  由下式计算:

$$r_{sf} = \frac{\sigma_{fb}/Z_{GTAW}}{\sigma_{fb}/Z_{SAW}} = \frac{Z_{SAW}}{Z_{GTAW}} \quad (27)$$

### 3 由 WOL 修复法修复管道的失效评价方法的实验验证

如上所述, 本文推导的 WOL 修复法修复管道的失效评价方法简单易用, 基本维持了原有原管中存在裂纹时的失效评价方法的简便性, 方便于工程实际应用。为了确认其有效性, 本文利用既存实验数据对推导的失效评价方法进行验证。

Scott 等对 WOL 修复法修复的双层管道进行了破坏实验<sup>[8]</sup>。实验在 Battelle Columbus Laboratories 进行, 对 4 根由 WOL 修复法修复的 Type 304 奥氏体不锈钢管在高温环境中进行了 4 点弯曲破坏实验, 获得了失效弯矩数据。4 根钢管试样当中, 3 根钢管的口径为 150A Sch.120, 另一根为 400A Sch.100。在管道试样的制备过程中, 首先用电火花加工法 EDM(Electric Discharge Machining)在原管的母材中导入了深度为管壁厚一半的缺口, 之后通过高周疲劳负载实验实现穿透裂纹, 最后对口径为 150A 的管道进行了 2 层堆焊, 对口径为 400A 的管道进行了 3 层堆焊。试验管道均采用 WOL 修复技术, 各堆焊层的铁素体数测量值都在 8 及以上。

实验温度为 288 °C。进行破坏实验时, 首先用高温水实现内压负载, 然后通过控制变形量以 4 点弯曲的形式负载弯矩, 直至失效状态, 得到失效弯矩。主要实验条件、材料特性以及实验结果如表 1 所示。

用本文评价公式计算失效弯矩时需要考虑流动应力比  $r_{sf}$ 。基于日本机械学会 Fitness-For-Service 规范, 本文利用式(24)计算 GTAW 焊接堆焊层的  $Z$  系数, 利用式(25)计算流动应力比  $r_{sf}$ 。同样基于日本机械学会 Fitness-For-Service 规范的计算方法计算管道母材的流动应力。当有试样材料的屈服应力和拉伸强

度的实测值时,用实测值的平均值计算流动应力。如果没有实测值,流动应力可用  $2.7 S_m$  计算,其中  $S_m$  为材料的设计应力强度<sup>[12]</sup>。本文应用了这两种方式,对试样管道的失效强度进行了预测。由两种方式计算的流动应力如表 2 所示。

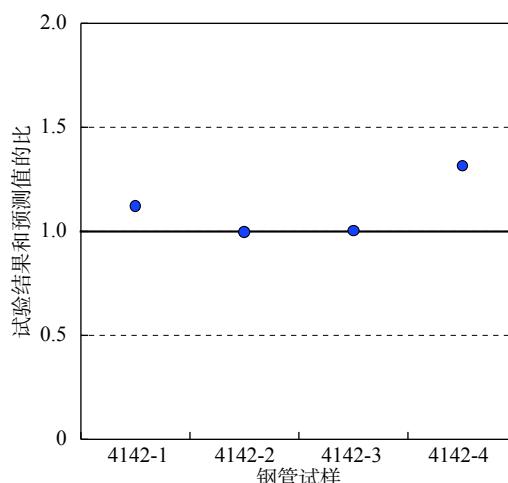
表 1 实验条件以及实验结果

项目	钢管试样			
	4142-1	4142-2	4142-3	4142-4
钢管外径/ mm	168	168	168	416
原管壁厚/ mm	14.6	14.4	14.7	25.6
堆焊层厚度/ mm	7.77	8.25	7.92	13.5
内压/ MPa	7.93	32.75	39.3	22.4
裂纹位置	母材金属	母材金属	母材金属	母材金属
裂纹深度/原管壁厚	1.0	1.0	1.0	1.0
裂纹角度 $\theta$ / (°)	180	180	180	137
钢管材料	TP304	TP304	TP304	TP304
实验温度 /℃	288	288	288	288
堆焊层的焊接方法	GTAW	GTAW	GTAW	GTAW
原管的拉伸屈服应力/ MPa	139	139	139	180.1
原管的拉伸强度/ MPa	449.6	449.6	449.6	458.8
最大实验弯矩/(kN·m)	93.3	63.3	53.7	992.5

表 2 用于失效弯矩预测的流动应力

实例	钢管或堆焊层	评估方法	钢管试样的流动应力/MPa			
			4142-1	4142-2	4142-3	4142-4
1	钢管	$\sigma_{fb} = 2.7 S_m$	311	311	311	311
	堆焊层	$\sigma_{fw} = \sigma_{fb} / Z_{GTAW}$	245	245	245	222
2	钢管	$\sigma_{fb} = (\sigma_{yb} + \sigma_{ub}) / 2$	294	294	294	319
	堆焊层	$\sigma_{fw} = \sigma_{fb} / Z_{GTAW}$	232	232	232	228

原管母材的流动应力用  $2.7 S_m$  计算时的失效弯矩实验结果和预测值的比如图 7 所示。流动应力用试样材料的实测值计算时的失效弯矩实验结果和预测值的比如图 8 所示。原管母材的流动应力用  $2.7 S_m$  计算时,失效弯矩实验结果和预测值的比在 1.0 至 1.3 之间。流动应力用试样材料的实测值计算时,失效弯矩

图 7 原管母材的流动应力用  $2.7 S_m$  计算时的失效弯矩实验结果和预测值的对比

实验结果和预测值的比在 1.1 至 1.3 之间。失效弯矩实验结果和预测值的比如果大于 1.0, 说明失效评价方法有一定的保守性。失效弯矩实验结果和预测值的比如果接近 1.0, 说明失效评价方法和实验结果良好吻合。从图 7 和图 8 可以发现, 无论原管的口径大小以及流动应力的计算方式, 失效弯矩的预测值和实验数据都有良好的吻合。由此可知本文的有关 WOL 修复法修复管道的失效评价方法妥当合理。

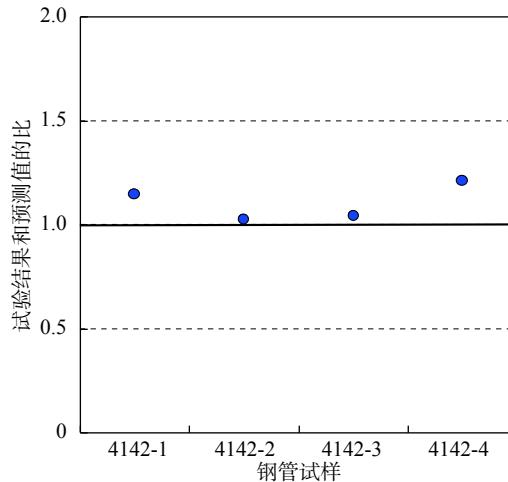


图 8 原管母材的流动应力用试样材料实测值计算时的失效弯矩实验结果和预测值的对比

#### 4 由 WOL 修复法修复管道的强度改善效果

本文以口径为 600A Sch.80 的奥氏体不锈钢管为例, 定量考察裂纹存在时 WOL 修复法的强度改善效果。WOL 修复法修复管道的失效弯矩表示为  $M_{B,wol}$ , 原管的失效弯矩表示为  $M_B$ 。管道的材料为不锈钢 Type 316L, 其在 300 °C 的流动应力  $\sigma_f = 257 \text{ MPa}$ <sup>[12]</sup>。

当裂纹深度为  $a/t_B = 1.0$ , 由于内压所引起的膜应力  $\sigma_m$  和流动应力  $\sigma_f$  的比为 0.3 时, 对于不同的裂纹角度  $2\theta$ , 失效强度比  $(M_{B,wol}/M_B)$  和堆焊层厚度的关系如图 9 所示。从图 9 可以看出, 裂纹角度越大, 堆焊层厚度越厚, WOL 修复法对裂纹管道的强度改善效果越明显。

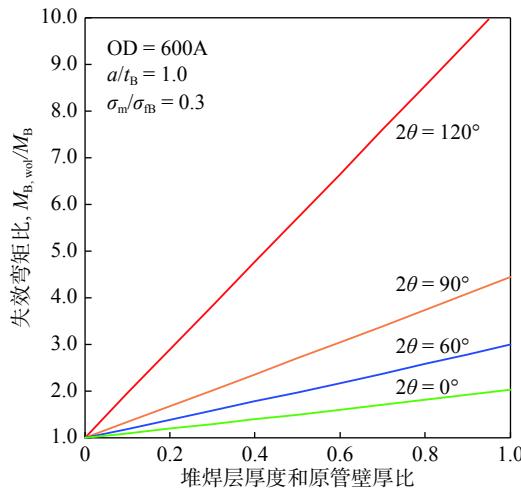


图 9 在不同裂纹角度的条件下失效弯矩比和堆焊层厚度的关系

裂纹角度  $2\theta$  为  $120^\circ$ , 由于内压所引起的膜应力  $\sigma_m$  和流动应力  $\sigma_f$  的比为 0.3 时, 对于不同的裂纹深度, 失效弯矩比  $(M_{B,wol}/M_B)$  和堆焊层厚度的关系如图 10 所示。从图 10 可以看出, 裂纹深度越深, 堆焊层厚度越厚, WOL 修复法对裂纹管道的强度改善效果越明显。

在堆焊层厚度  $t_w/t_B = 0.5$ , 由于内压所引起的膜应力  $\sigma_m/\sigma_{fb} = 0.3$  的条件下, 不同裂纹深度时, 管道修复

与否的失效弯矩和裂纹角度的关系如图 11 所示。从图 11 可以看出, 堆焊层的厚度仅为原管壁厚的一半时, 其强度改善程度就达到了数倍的效果。

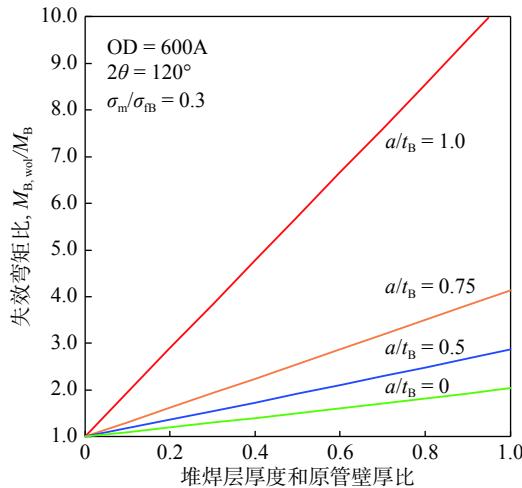


图 10 在不同裂纹深度的条件下失效弯矩比和堆焊层厚度的关系

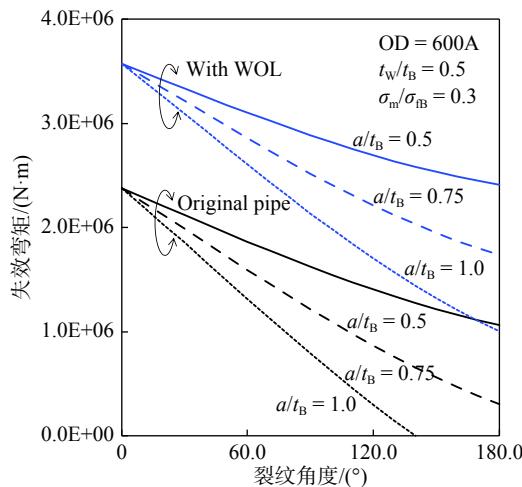


图 11 在不同裂纹深度的条件下管道修复与否的失效弯矩和裂纹角度的关系

通过以上考察, 可以发现 WOL 修复法对存在裂纹管道的失效强度的改善效果极为显著, 是有效的裂纹管道修复方法。

## 5 结论

经过长期运营的核电站, 其管道系统会出现裂纹。为了在保证含有裂纹管道具有足够强度的同时, 提高核电站运营的经济性, 美国机械工程师协会锅炉和压力容器规范第 11 卷给出了在管道外部进行堆焊的 WOL 修复法。本文推导了由 WOL 修复法修复管道的失效评价方法, 并利用已有实验数据对失效评价方法进行了验证。由本文推导的失效评价方法妥当合理, 失效弯矩的预测值和实验结果之间有良好的吻合。同时, 本文推导的评价公式基本维持了原有原管中存在裂纹时的失效评价方法的简便性, 便于工程实际应用。通过应用本文推导的评价公式进行定量考察, 明确了 WOL 修复法对存在裂纹的管道有良好的失效强度改善效果, 在保证核电管道安全的同时实现了合理的经济性, 有良好的实际应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] NAKAMURA T, TANIGUCHI K, HIRANO S, et al. Stress corrosion cracking in welds of reactor vessel nozzle at

Ohi-3 and of other vessel's nozzle at Japan's PWR plants [C]// Proceeding of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference. USA: PVP2009-77344, 2009: 1 – 9.

[2] LI Y, HASEGAWA K, ONIZAWA K, et al. Prediction of collapse stress for pipes with arbitrary multiple circumferential surface flaws [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2010, 132(6): 061204(1) – 061204(7).

[3] American Society of Mechanical Engineers. ASME boiler and pressure vessel code section XI, rules for inservice inspection of nuclear power plant components [S]. New York: ASME, 2019.

[4] DEARDORFF A F, COFIE N G, DIJAMCO D G, et al. Net section plastic collapse analysis of two-layered materials and application to weld overlay design [C]// Proceeding of the ASME 2006 Pressure Vessels and Piping Conference. Canada: PVP2006-ICPVT-11-93454, 2006: 1 – 9.

[5] LIMPUS C R, DIJAMCO D G, BAX R, et al. Effect of size of butt weld repairs on weld overlay residual stresses [C]// Proceeding of the ASME 2007 Pressure Vessels and Piping Conference. USA: PVP2007-26636, 2007: 1 – 7.

[6] IWAMATU F, YANAGIDA N, MIYAZAKI K. Effect of weld overlay repair on residual stress and crack propagation in a welding pipe [C]// Proceeding of the ASME 2007 Pressure Vessels and Piping Conference. USA: PVP2007-26516, 2007: 1 – 7.

[7] ZHANG T, WILKOWSKI G, RUDLAND D, et al. Weld-overlay analysis, an investigation of the effect of weld sequencing [C]// Proceeding of the ASME 2008 Pressure Vessels and Piping Conference. USA: PVP2008-61560, 2008: 1 – 10.

[8] SCOTT P M. Assessment of design basis for load-carrying capacity of weld-overlay repairs [R]. NUREG/CR-4877, Washington, DC (USA): Nuclear Regulatory Commission, 1987.

[9] KANNINEN M F, BROEK D, MARSCHALL C W, et al. Mechanical fracture predictions for sensitized stainless steel piping with circumferential cracks [R]. EPRI NP-192, Palo Alto, CA (USA): Electric Power Research Institute, 1976.

[10] 李银生. 考虑裂纹面压力和裂纹处管道壁厚变化的管道失效弯曲应力评价方法含有裂纹管道的失效弯曲应力评价方法 [J]. 西华大学学报(自然科学版), 2019, 38(1): 46 – 50.

[11] The Japan Society of Mechanical Engineers. Rules on materials for nuclear facilities: JSME S NJ1-2008 [S]. Tokyo: JSME, 2008.

[12] The Japan Society of Mechanical Engineers. Rules on materials for nuclear facilities: JSME S NJ1-2008 [S]. Tokyo: JSME, 2008.

### 特约专家介绍



李银生(1964—), 男, 汉族, 河北衡水市人, 工学博士。日本原子能研究开发机构安全研究中心核电材料与结构安全研究部兼结构完整性研究室主任。1985 年毕业于北京钢铁学院压力加工系获学士学位, 1986 年作为国家教委公派留学生到日本留学, 1992 年在日本长冈技术科学大学获得博士学位。在核电设备结构完整性评估领域以及概率断裂力学的研究领域取得了多项重要成果。最近 10 年领导并进行了来自日本经济产业省、日本文部科学省和日本原子能管理委员会的 10 多项研究项目。迄今已发表学术论文多篇, 获得多项研究奖项, 多次担任国际学术会议组委。同时, 还担任了国际经济合作与发展组织核能署(OECD/NEA)核设施安全委员会组件及结构完整性和老化工作组委员, 美国机械工程师协会锅炉与压力容器规格第 11 卷的技术委员, 日本机械学会核电设备规范委员会 Fitness-For-Service 规格的技术委员, 并在东京大学和日本原子能管理委员会人才教育中心兼职任教, 是国家教育部“春晖计划”专家。

(编校: 夏书林)