

核电BOSS头Overlay焊缝缺陷等效分析

杨晓冬, 马明豪, 侯阳, 刘金平, 潘国伟, 冯英超

核工业工程研究设计有限公司 北京 101300

摘要: 核电BOSS头焊缝在服役过程中, 由于原始焊缝中缺陷的存在会导致结构寿命的缩短, 甚至可能发生泄漏事故, 因此有必要对存在原始缺陷的BOSS头焊缝进行研究分析。但在实际情况中, 缺陷的种类和分布情况均极为复杂, 通过射线检测手段难以确定其具体位置, 这也为后续研究带来了困难。对原始缺陷进行等效处理, 以利于后续工作的开展。从缺陷类型的等效处理、缺陷形状尺寸的等效处理、缺陷位置的确定三个方面进行分析, 得出等效结论。

关键词: 核电BOSS; 缺陷; 等效; 尺寸; 位置

1 序言

BOSS头焊缝^[1]是一种核电用三通类焊缝, 流通介质属于高温、高压、放射类介质, 焊缝内部存在裂纹、夹渣、气孔、未熔合及未焊透等缺陷。BOSS头焊缝出现缺陷^[2]时, 国内返修是先对管道区域进行核清洁, 待清洁完成后, 由焊接操作工以焊条电弧焊的形式进行返修, 耗时费力^[3]。国外返修采用过BOSS Overlay技术, 对BOSS头焊缝进行模型建立, 分析结构的几何特性及材料特性, 完成Overlay层焊接模拟, 根据模拟结果以自动焊的形式进行

BOSS头返修。在这一过程中, 需要将焊接缺陷添加到模型中, 实际情况中, 缺陷的种类和分布情况均极为复杂, 缺陷类型多、位置多、形状不规则, 因此有必要在模拟前对缺陷进行等效处理, 等效出最具代表性、最危险的焊接缺陷, 保证Overlay层模拟结果准确可靠。

2 缺陷类型的等效处理

对某核电机组BOSS头焊缝缺陷检测结果(见表1), 进行统计, 数据显示, 缺陷的类型包括夹渣、气孔、未熔合、未焊透、裂纹及根部内凹等, 其中

表2 埋弧焊焊接参数

焊道	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /cm·min ⁻¹	热输入 /kJ·cm ⁻¹
正1	650~700	30~32	35	44.8
反1	550~650	28~30	30	44.8

采用上述方法, 对公司另外20个同规格的筒节进行埋弧焊焊接, 焊后未发现图1所示的终端裂纹, 无损检测也未发现裂纹, 一次合格率达到100%。

6 结束语

综上所述, 埋弧焊终端裂纹在压力容器制造企业是一种常见的焊接缺陷, 这不仅增加了焊工的工作量, 也提高了产品的制造成本, 同时降低了产品的无损检测一次合格率。我们通过以上分析及试

验, 得出了有效避免终端裂纹的方法。采用上述方法基本可避免此类裂纹的发生, 从而大大提高生产效率, 降低生产企业的制造成本。

参考文献:

- [1] 俞宽铨. 锅炉压力容器焊工培训教材[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1992.
- [2] 陈裕川. 钢制压力容器焊接工艺[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [3] 杨松. 锅炉压力容器焊接技术培训教材[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [4] 苗龙. 16mnDR钢低温压力容器焊接接头缺陷原因分析[J]. 金属加工(热加工), 2020(5): 61-64.

MW 20201124

出现最多的是未熔合和夹渣，因此也着重考虑这两种缺陷。为简化分析，考虑将不同类型的缺陷等效为一种类型的缺陷。标准中提到，在缺陷等效过程中，应考虑将其等效为更保守的类型，以确保后续结论的安全、可靠。在所有缺陷类型中，裂纹是最严重的缺陷，因此应将各种类型的缺陷等效处理为最为严重的裂纹（未熔合）缺陷，便于后续分析过程，并同时确保结论的可靠性。

表1 某核电机组BOSS头焊缝检测结果

BOSS头尺寸 /in (1in=25.4mm)	合格 /处	不合格 /处	不合格具体数据/处					
			夹渣	气孔	未熔合	未焊透	裂纹	根部内凹
0.25	4	0	0	0	0	0	0	0
0.5	113	18	8	1	8	0	1	0
0.75	77	19	5	1	10	0	0	1
1	32	5	0	1	12	2	0	0
2	4	3	3	0	0	0	0	0
合计	230	45	16	3	22	2	1	1

3 缺陷形状尺寸的等效处理

依据缺陷尺寸、位置及分布状态，可划分为表面平面缺陷、深埋平面缺陷、复合平面缺陷、非平面缺陷、平行平面缺陷、层状缺陷、非链形共面缺陷、链形单独缺陷及线状缺陷等。对于实际情况中的缺陷，即便其类型已经确定，但由于其形态和分布状况仍较为复杂，故在后续处理过程中也有较大困难。

对于单个线状缺陷，将缺陷投影到厚度方向上，投影后缺陷的长度即为等效缺陷长度；对于多个分布状态不同的缺陷，在投影后参考美国ASME标准第XI卷中的缺陷形状和尺寸确定的图示，进行长度等效处理。根据实际射线检测报告，已知多数缺陷的总长度远大于管道厚度，但缺陷数量和位置未知。在当前情况下应选择更加保守的缺陷等效方式，因此不考虑缺陷的数量和分布状态，假设裂纹缺陷在厚度方向上已经贯穿管道，即等效长度等于管道壁厚。将线状缺陷等效为矩形处理，在确定缺

陷长度之后，还需要设定等效缺陷的宽度。标准中提到，若去除堆焊层后的矩形缺陷长度为 a 、宽度为 d ，则对于缺陷的深宽比应有 $a/d \leq 1$ ，即宽度 $d \geq a$ ，也即宽度不小于管道壁厚。

4 缺陷位置的确定

对于缺陷位置的处理，在能够确定缺陷实际位置的情况下，应如标准所述将缺陷置于实际的位置上进行处理。否则，应将缺陷等效为最危险位置的缺陷处理。根据标准，等效后的矩形缺陷，其深度 a 与内侧承压表面垂直，长度 l 应与内侧承压表面平行。此时缺陷存在投影周向和轴向两种情况，如图1所示。

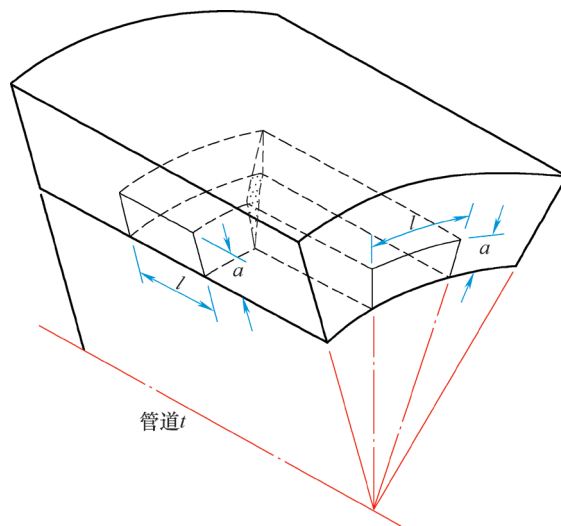


图1 缺陷投影到周向和轴向平面

为确定等效缺陷所在平面，需考虑周向和轴向缺陷的危险程度，尽量选择更保守的类型。在相同应力比、相同缺陷长度的情况下，轴向缺陷的允许深度更小，因此也是更危险的缺陷，等效缺陷应选择保守的轴向缺陷类型^[4, 5]。

基于射线检测难以获得缺陷的精确位置，因此将缺陷置于最危险位置等效处理。对原始焊缝的焊后应力采用MSC.Marc软件进行模拟，结果如图2所示。结果采用柱坐标系显示，原点为支管底部中心， y 轴沿支管轴向向上。图中网格为有限元单元，其中黄色部分表现为拉应力，蓝色部分表现为压应力。根据模拟结果，原始焊缝的起弧、收弧位置在焊后承受的三向拉应力最大，拉应力促进裂纹扩展，因此该处的裂纹扩展速度更快，相应地使用寿命更短，将缺陷置于此处是更保守的。

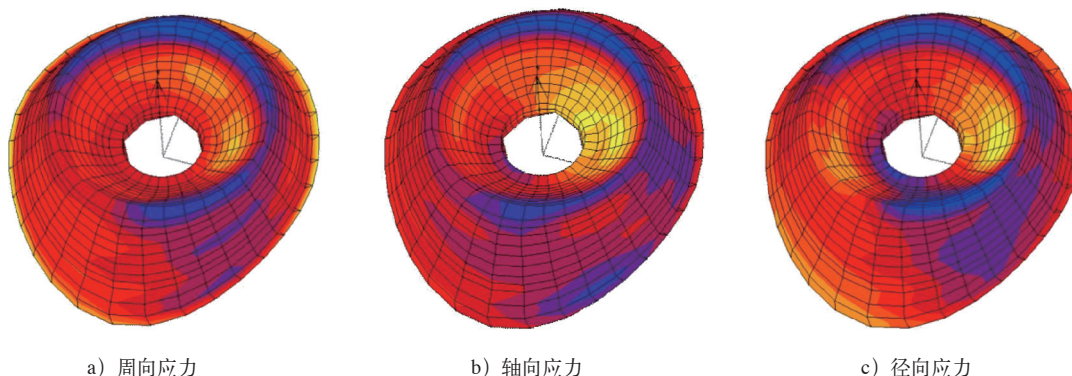
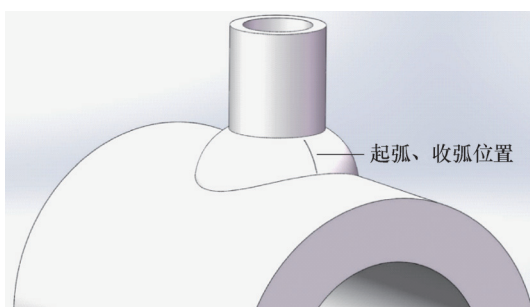


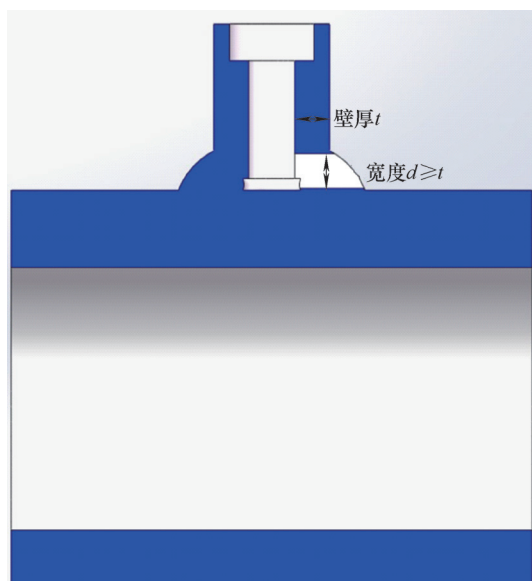
图2 原始焊缝焊后应力模拟云图

5 等效模型

根据实际缺陷检测结果与等效原理，最终将缺陷等效为裂纹形式进行处理，形状为矩形，径向上的深度为贯穿管壁，轴向上的宽度不小于支管壁厚，置于起弧与收弧位置，且处于焊缝中心部位，如图3所示。最后依据此等效缺陷位置和尺寸，进行后续可靠性评估和计算。



a) 等效缺陷位置



b) 等效缺陷截面及尺寸

图3 等效缺陷

6 结束语

本文对BOSS头焊缝缺陷等效方式进行研究，从缺陷类型、缺陷形状尺寸、缺陷位置三个方面进行分析，具体结论如下。

1) 对于缺陷类型，等效时应将缺陷等效为更加保守的类型，因此将缺陷类型统一等效为裂纹处理。

2) 对于缺陷形状尺寸，将缺陷形状等效为矩形，并使其能够覆盖整个缺陷范围，将缺陷在深度方向上贯穿壁厚，缺陷宽度等效为垂直方向上不小于支管壁厚。

3) 对于缺陷位置，将缺陷等效置于起弧、收弧位置，因为该处三向拉应力最大，也是缺陷最易产生和扩展的位置。

参考文献：

- [1] 方江, 赵永明, 杨云斐, 等. 核电厂高剂量区BOSS头焊缝返修策略分析[J]. 全面腐蚀控制, 2020 (8): 51-53, 81.
- [2] 顾明帮. 核电厂BOSS头焊缝的无损检测[J]. 智能城市, 2019 (21): 186-187.
- [3] 张士朋, 刘震顺, 吴高峰, 等. 某核级管道BOSS头含缺陷焊缝处置方案优化研究[J]. 压力容器, 2019 (10): 56-61.
- [4] 高会英. 复杂应力状态下焊接接头的疲劳寿命预测方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [5] 高博. 焊接残余应力对船体结构疲劳强度影响的分析[D]. 厦门: 集美大学, 2014.

MW 20201124