

团 体 标 准

T/CNS 53—2021

反应堆压力容器顶盖贯穿件 J 坡口 焊缝模拟件残余应力检测方法

Determination of residual stresses in J-groove
weld mockup of RPV head penetration

2021-07-26 发布

2021-11-01 实施

中 国 核 学 会 发 布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 符号和说明 1

5 J 坡口焊缝残余应力测量要求 2

6 测量设备 3

7 测量步骤 4

8 测量人员 5

9 应力计算系数 5

10 试验报告..... 6

附录 A（规范性） 不同测量条件下的应力计算方法 7

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国核学会提出。

本文件由核工业标准化研究所归口。

本文件起草单位：中国科学院金属研究所、苏州热工研究院有限公司、武汉华拓量测科技有限公司。

本文件主要起草人：陈静、陈怀宁、姜云禄、鲁立、杨佳、梁振新、黎咏清。

反应堆压力容器顶盖贯穿件 J 坡口 焊缝模拟件残余应力检测方法

1 范围

本文件规定了压水堆核电厂反应堆压力容器顶盖贯穿件 J 坡口密封焊缝模拟件的残余应力检测方法,包含残余应力的测量要求、测量设备、测量步骤和试验报告等。

本文件适用于压水堆核电厂反应堆压力容器顶盖贯穿件 J 坡口焊缝模拟件残余应力检测。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 231.2	金属材料	布氏硬度试验	第 2 部分:硬度计的检验与校准
GB/T 24179	金属材料	残余应力测定	压痕应变法
GB/T 31218	金属材料	残余应力测定	全释放应变法
GB/T 31310	金属材料	残余应力测定	钻孔应变法
JJG 623	电阻应变仪检定规程		

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

应变差值 **strain difference value**

$\Delta\epsilon$

在材料表面钻孔或制造压痕或切割解剖后,相应产生的应变变化量。

3.2

应力计算系数 **stress calculation coefficients**

在钻孔应变法或压痕应变法测量残余应力时,与被测材料、应变片型号、孔径或球形压痕直径有关,联系应变差值和残余应力(应变)关系的系数。

4 符号和说明

本文件使用的符号和说明见表 1。

表 1 符号和说明

符号	说明	单位
$\Delta\epsilon$	应变差值	—
β	J 坡口工件上接管轴线与锻件底板法线的夹角	°

5 J 坡口焊缝残余应力测量要求

5.1 J 坡口焊缝的典型结构

常规的 J 坡口焊缝模拟件形状如图 1 所示,其中 β 一般为 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 之间的某个数值。其制造过程一般为:在锻件上带极堆焊不锈钢层,加工出 J 坡口窝,采用镍基焊材堆焊 J 坡口隔离层,热处理后加工 J 坡口和接管管孔,冷装插入接管后焊接 J 坡口焊缝。

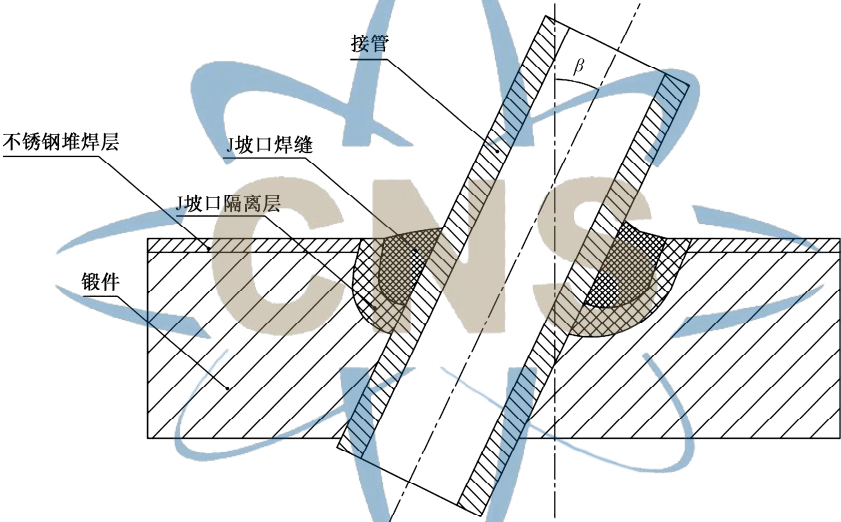


图 1 J 坡口焊缝模拟件结构示意图

5.2 测量位置要求

J 坡口焊缝焊接完成后,为了进行焊接工艺质量的评定,评估产生应力腐蚀开裂的风险,需要测量该焊缝周围的残余应力分布情况,确认最大应力峰值位置和数值大小。为此,一般需要按如图 2 位置所示进行应力测点的布置(■为示意应变片)。

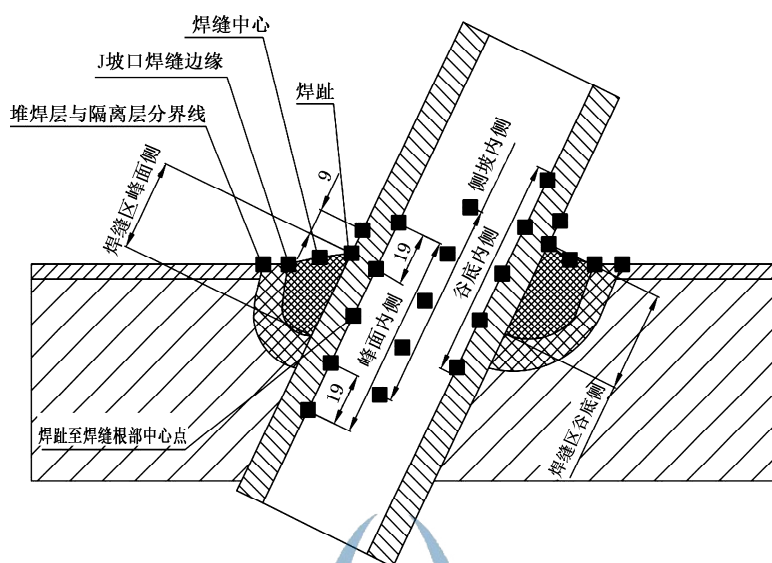


图2 J坡口焊缝残余应力测点位置参考图

5.2.1 在外表面,对应于峰面侧、谷底侧和一侧坡的J坡口焊缝中心、焊趾和边缘处,堆焊层与隔离层界面处,焊趾上方位与接管表面一定距离处均为主要特征测点,图中的测点间距可供参考。

5.2.2 对于接管内表面,也需要安排相应测点,即对应于外表面的峰面侧、谷底侧和一侧坡,以J坡口焊缝为对称中心,除了与焊趾、焊根和焊缝中心对应位置的3个测点外,至少在焊趾上方和焊根下方各取1处进行测量。

5.2.3 如上所述,J坡口焊缝残余应力测点数量一般为:每一坡侧里外表面至少各5点,当 β 不为零时,测点总数不少于30点。如果 β 为零,则任取一坡侧位置进行测量,测点总数不少于10点。

需要注意,为了避免测点之间的影响,采用钻孔或压痕应变方法测量时,测点之间的直线距离应不小于20 mm。对于距离较近的测点,可以采用之字形布置应变花。

5.3 测量方法的选择

5.3.1 目前可以准确测量此类焊缝表面残余应力的工程适用方法主要有钻孔应变法和压痕应变法,这类方法体现的表面应力数值区域约3 mm范围,厚度方向,钻孔应变法反应约2 mm范围内的应力值,压痕应变法反应约0.2 mm范围内的应力值。推荐采用此类方法进行J坡口焊缝残余应力检测,操作要求按GB/T 31310和GB/T 24179相关规定执行。

5.3.2 对于无法采用钻孔应变法或压痕应变法进行测量的位置,如 $\beta > 0$ 的谷底侧和接管内表面的部分测点,可以采用全释放应变法进行测量。但需要注意的是,由于应力梯度的影响,要求采用尽量小尺寸的应变片,以便解剖出来的包含应变片的块体尽量小;同时,还要减薄厚度,将包含应变片的小块厚度控制在2 mm~3 mm。在切割过程中,前期分解模拟件可采用锯切方法,后期减小块体和厚度减薄应采用电火花加工工艺,以最大化降低切割引起的附加应变的影响。除本文件规定外,其他要求按GB/T 31218相关规定执行。

6 测量设备

6.1 应变仪

应变仪至少应满足JJG 623中的1.0级要求。

6.2 应变片

6.2.1 钻孔应变法或压痕应变法测量残余应力时,可选用双向(有 2 个应变栅)或三向(有 3 个应变栅)的应变片,见图 3 所示。双向应变片中,应变栅 1 和应变栅 3 互相垂直;三向应变片中,应变栅 1 与应变栅 3 互相垂直,应变栅 1 与应变栅 2 成 45° 或 135° 夹角。应变栅电阻值一般为 $120\ \Omega$,片基厚度 $30\ \mu\text{m}\sim 60\ \mu\text{m}$ 。

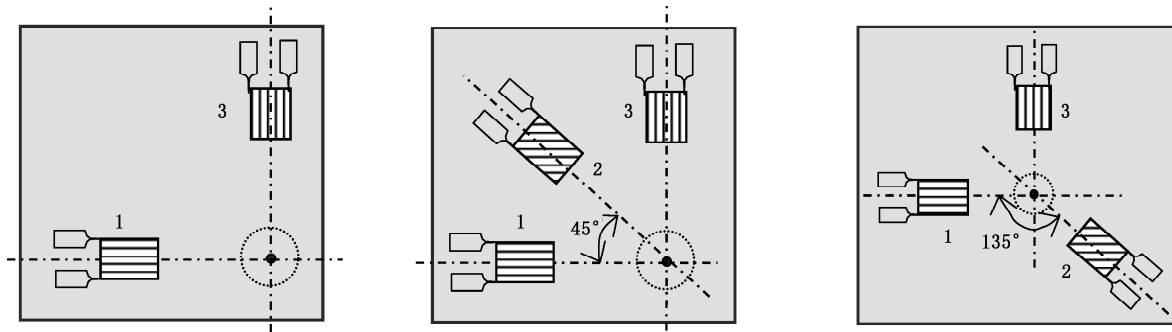


图 3 钻孔和压痕应变法测量残余应力用双向(左)和三向(中、右)应变片

6.2.2 如果希望测得最大主应力,应当使用三向应变片;如果要求测量沿着焊缝方向和垂直焊缝方向的应力,或是沿着接管轴向和环向的应力,使用二向应变片更加方便。注意,钻孔应变法和压痕应变法用应变片并不通用。

选用的应变片要满足 J 坡口焊缝模拟件应力测点的需求,建议在保证应力测量精度的前提下,尽量选用小尺寸的应变片,以便更好地反应测量区域的实际应力值。

6.2.3 为便于钻孔或制造压痕,所选应变片应该刻有应变栅轴线的交点,该交点到各应变栅端的距离相等,钻孔或压痕制造时要保证钻孔或压痕中心与该点重合。

6.2.4 全释放应变法测量残余应力时,可选用上述应变片,也可以选择其他可以满足测量要求的应变片。

6.3 钻孔或压痕对中装置

为准确地在应变片的交点位置钻孔或制造压痕,需要事先通过光学放大镜进行对中调试并通过相应的固定装置确保对中精度。对中装置应可检测钻孔或压痕直径及其偏心情况,建议选用放大倍数 $30\sim 40$ 倍、内置十字刻度线的显微镜。

6.4 钻孔、压痕制造和全释放应变法解剖用装置

6.4.1 钻孔用刀具直径取决于与市售应变片的配合,一般在 $1.5\ \text{mm}\sim 2.5\ \text{mm}$ 。由于空间位置的限制,只能采用人工钻孔。钻孔深度须不小于钻孔直径的 1.2 倍。

6.4.2 压痕制造建议采用冲击加载方式。压头直径和深度取决于与之匹配的应变片尺寸。压痕制造采用的球形压头一般采用硬质合金并应符合 GB/T 231.2 中的相关要求。

6.4.3 全释放应变法或构件解剖用切割装置推荐采用带锯切割和电火花切割的工艺,大块解剖时采用锯切法,包含应变片的小块切割时采用电火花工艺。

7 测量步骤

7.1 应力测量过程分为四个步骤:测点的表面准备、应变片粘贴、钻孔或制造压痕或结构解剖、数据

处理。

7.2 为方便测试过程中模拟件翻转,可以在测量前减小锻件在长宽方向的尺寸,但要保证切口到J坡口焊缝边缘的距离不小于100 mm。如果堆焊层上方接管的水平高度(沿锻件法线方向)超过70 mm,可将多余部分切除,便于粘贴内部应变片。

7.3 粘贴应变片前需要对焊缝附近区域不平整位置进行打磨抛光。参照图2或按照用户要求确定测量位置,打磨操作过程按GB/T 31310或GB/T 24179相关规定执行。

7.4 J坡口的焊缝边界,可采用腐蚀的方法进行确定。腐蚀液可以采用硫酸铜+盐酸+水或草酸水溶液等金相组织实验常用腐蚀液,腐蚀时间一般为3 min~5 min。

7.5 粘贴外表面钻孔或压痕应变法测量用应变片,采用钻孔或压痕应变法测量外表面所有测点的残余应力。对于设备不可达的测点位置,需粘贴全释放用应变片。

7.6 粘贴应变片应按GB/T 24179、GB/T 31310或GB/T 31218中的相关规定执行。粘贴在焊缝附近的应变片,可采用双向应变片,使两向互相垂直的应变栅分别平行和垂直于焊缝。粘贴在接管表面的应变片,使两向互相垂直的应变栅分别平行于管子的轴向和周向。

7.7 对于需要采用钻孔或压痕应变法测量的接管内表面测点,需要粘贴钻孔或压痕应变法测量用应变片。待应变片干燥后读取应变初值,然后按图4将模拟件从接管中心沿切割线剖开,读取应变变化值,按虎克定律计算解剖过程引起的应力释放量。在此操作过程中,需要保护待测应变片,以免受潮或破坏。在解剖后的构件上采用钻孔应变法或压痕应变法测量残余应力,并与解剖过程引起的应力释放量进行叠加。钻孔或压痕制造过程严格按GB/T 31310和GB/T 24179相关要求执行。

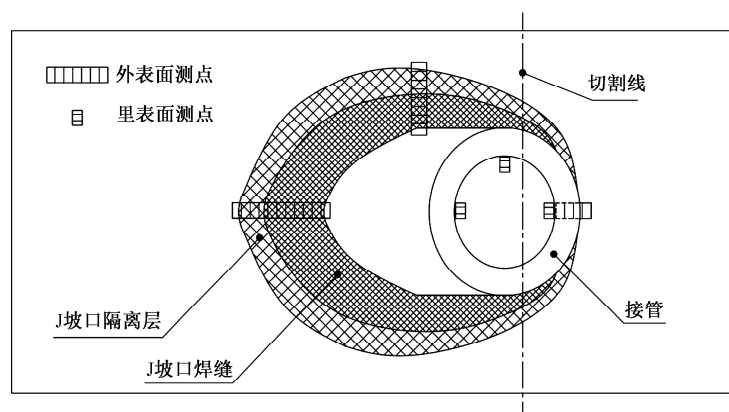


图4 接管解剖方式

7.8 对于不利于进行钻孔或制造压痕的测点,可以采用解剖的方法将粘贴应变片的金属小块切割下来完成应力测量,测量过程按照GB/T 31218中相关要求执行。

7.9 按照GB/T 31310、GB/T 24179或GB/T 31218中的相关公式进行数据处理,附录A给出了相关计算公式及其说明。

8 测量人员

参加应力测量的人员应事先经过严格的培训,并取得相应授权后方可进行测量。

9 应力计算系数

9.1 应力计算系数宜通过试验标定或结合模拟计算的方式获得。

9.2 应力计算系数的标定按照 GB/T 31310 和 GB/T 24179 有关规定执行,测量残余应力时所用设备和应变片要与标定时完全一致。

10 试验报告

试验报告应包括但不限于以下内容:

- a) 本文件编号;
- b) 残余应力测点位置及测量结果;
- c) 被测构件(包括焊缝金属)的说明;
- d) 测试方法,测量设备及应变片型号的说明;
- e) 测量人员和测量日期;
- f) 测量过程的其他说明,可以包括不确定度分析。



附录 A

(规范性)

不同测量条件下的应力计算方法

A.1 钻孔应变法的应力计算方法

A.1.1 依据 GB 31310 附录 A 的标定内容进行试验标定或模拟计算获得待测材料的应力计算系数 A 、 B 值。

A.1.2 根据钻孔获得 $\Delta\epsilon_1$ 和 $\Delta\epsilon_3$ (一般的, 1 方向和 3 方向分别平行和垂直焊缝方向或者为接管轴向和周向方向), 按式(A.1)和式(A.2)计算残余应力:

$$\sigma_1 = C_1(\Delta\epsilon_1 + C_2\Delta\epsilon_3) \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

$$\sigma_3 = C_1(\Delta\epsilon_3 + C_2\Delta\epsilon_1) \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

$$C_1 = (A+B)/4AB;$$

$$C_2 = (B-A)/(A+B)。$$

A.1.3 按式(A.1)和式(A.2)初次计算应力时, 采用低应力水平 $0.3\sigma_s$ 下标定获得的 A 和 B 值; 若所计算的应力结果接近材料的 $0.7\sigma_s$ 或更大, 则要选用高应力水平 $0.7\sigma_s$ 下标定的 A 和 B 值重新计算应力。

A.2 压痕应变法的应力计算方法

A.2.1 依据 GB 24179 的标定内容进行试验标定或模拟计算获得压痕应变法应力计算函数, 见式(A.3):

$$\Delta\epsilon = B + A_1\epsilon_e + A_2\epsilon_e^2 + A_3\epsilon_e^3 \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

B 、 A_1 、 A_2 、 A_3 ——应力计算系数, 由标定曲线确定的应力计算函数的系数, 其中 B 是零应力下的应变增量;

$\Delta\epsilon$ ——压痕应变差值;

ϵ_e ——残余弹性应变。

A.2.2 根据压痕制造获得 $\Delta\epsilon_1$ 和 $\Delta\epsilon_3$ (一般的, 1 方向和 3 方向分别平行和垂直焊缝方向), 按式(A.3)计算出相应的 ϵ_{e1} 和 ϵ_{e3} , 然后按照式(A.4)和式(A.5)进行应力计算:

$$\sigma_1 = E(\epsilon_{e1} + \nu\epsilon_{e3})/(1 - \nu^2) \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

$$\sigma_3 = E(\epsilon_{e3} + \nu\epsilon_{e1})/(1 - \nu^2) \quad \dots\dots\dots (A.5)$$

式中:

E ——材料的弹性模量;

ν ——材料的泊松比。

A.2.3 按式(A.3)计算 ϵ_e 时, 若 ϵ_{e1} 或 ϵ_{e3} 大于 ϵ_m (ϵ_m 是材料的大于 $0.5\epsilon_s$ 的某一个值, 与材料的具体标定曲线有关), 而另一个方向的 ϵ_{e3} 或 ϵ_{e1} 小于 ϵ_m 时, 需要对小应变方向的应变差值 $\Delta\epsilon$ 进行修正。假设此时 ϵ_{e1} 大于 ϵ_m , ϵ_{e3} 小于 ϵ_m , 可按以下步骤进行修正:

a) 由应变差值 $\Delta\epsilon_1$ 得到弹性应变 ϵ_{e1} ;

b) 按 $-\nu\epsilon_{e1}$ 得到 $\Delta\epsilon_p$;

c) 按 $(\Delta\epsilon_3 - \Delta\epsilon_p)$ 得到弹性应变 ϵ_{e3} ;

d) 将 a) 步骤计算得到的 ϵ_{e1} 和 c) 步骤计算得到的 ϵ_{e3} 带入式(A.4)和式(A.5)进行应力计算。

A.3 全释放应变法的应力计算方法

A.3.1 全释放应变法测试残余应力时,切割完成后的应变值减去切割前的初始应变值就是释放应变差值,具体步骤可参照 GB 31218 进行。

A.3.2 全释放应变法的应力计算公式采用经典的虎克定律。根据释放应变差值 $\Delta\epsilon_1$ 和 $\Delta\epsilon_3$ (一般的, 1 方向和 3 方向分别平行和垂直焊缝方向或者为接管轴向和周向方向),按式(A.6)和式(A.7)计算出相应的应力 σ_1 和 σ_3 :

$$\sigma_1 = -E(\Delta\epsilon_1 + \nu\Delta\epsilon_3)/(1 - \nu^2) \quad \dots\dots\dots (A.6)$$

$$\sigma_3 = -E(\Delta\epsilon_3 + \nu\Delta\epsilon_1)/(1 - \nu^2) \quad \dots\dots\dots (A.7)$$

式中:

E ——材料的弹性模量;

ν ——材料的泊松比。

中国核学会
团体标准
反应堆压力容器顶盖贯穿件 J 坡口
焊缝模拟件残余应力检测方法
T/CNS 53—2021

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲 2 号(100029)
北京市西城区三里河北街 16 号(100045)
网址 www.spc.net.cn
总编室:(010)68533533 发行中心:(010)51780238
读者服务部:(010)68523946
中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

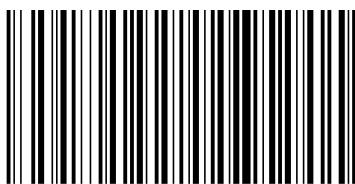
*

开本 880×1230 1/16 印张 1 字数 24 千字
2022 年 1 月第一版 2022 年 1 月第一次印刷

*

书号: 155066·5-3747 定价 18.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68510107



T/CNS 53-2021



码上扫一扫 正版服务到