

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202603002



# 双金属复合管焊接节点残余应力试验

姜航<sup>1</sup>, 谢文超<sup>1</sup>, 任泽林<sup>1</sup>, 叶勇<sup>1,2</sup>, 郭子雄<sup>1,2</sup>

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 福建省结构工程与防灾重点实验室, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 为研究不锈钢(外)-碳素钢(内)双金属复合管 T 形焊接节点的残余应力分布规律,采用盲孔法对 9 个不同构造形式的节点试件进行系统试验,分析混凝土填充、浇筑与焊接顺序、腹杆截面类型等对焊缝区域残余应力大小及分布的影响。结果表明:钻孔过程中可明显感知外层不锈钢及冶金结合区硬度较大;焊缝区域残余应力释放具有规律性,各测点应力值集中于 140~240 MPa;多条焊缝交汇处测点残余应力显著高于单一焊缝区域,角部测点较边中部高出 30%~50%;混凝土浇筑顺序对残余应力幅值影响不显著,但未填充混凝土试件在某些测点处应力略低。

**关键词:** 双金属复合管; T 形焊接节点; 残余应力; 钢管混凝土; 不锈钢

**中图分类号:** TU 398; TU 392.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5013(2026)04-0450-08

## Experiment on Residual Stress of Welded Joints of Bimetallic Composite Tubes

JIANG Hang<sup>1</sup>, XIE Wenchao<sup>1</sup>, REN Zelin<sup>1</sup>,  
YE Yong<sup>1,2</sup>, GUO Zixiong<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Key Laboratory of Structural Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province,  
Huaqiao University, Xiamen, 361021, China)

**Abstract:** To investigate the residual stress distribution in T-shaped welded joints of stainless steel (outer)-carbon steel (inner) bimetallic tubes, systematic experiment is conducted on 9 joint specimens with different structural forms using the blind-hole method. The effects of concrete filling, casting and welding sequence, section type of web member etc on the magnitude and distribution of residual stress are analyzed in the welded zone. The results show that during drilling, the hardness of the outer layer stainless steel and the metallurgical bonding region is significantly higher. The release of residual stress in the welded region follow a regularity, with 140-240 MPa measured stress at each point. Measuring points at the intersections of multiple welds exhibit significantly higher residual stress than those in single-weld regions, the values at corner measuring points are 30%-50% higher than those at the mid-points of the sides. The concrete casting sequence has no significant effect on the magnitude of residual stress, but the stress at some measuring points of unfilled concrete specimens is slightly lower.

**Keywords:** bimetallic composite tube; T-shaped welded joint; residual stress; concrete-filled steel tube; stainless steel

**收稿日期:** 2026-03-02

**通信作者:** 叶勇(1985—),男,教授,博士,博士生导师,主要从事钢-混凝土组合结构的研究。E-mail: qzyeyong@hqu.edu.cn。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(52278182)

腐蚀是影响钢结构耐久性和安全性的关键因素,会导致金属材料强度、塑性和韧性降低,造成构件几何形状损伤,显著缩短结构使用寿命,引发严重的经济损失。为有效减轻金属腐蚀,工程实践中主要采取电化学保护、喷漆覆盖和材料替代 3 种措施。前两种措施需要定期检查更换,不仅维护成本较高且劳动力需求量大。材料替代法无需长期更换,从根本上解决普通钢材腐蚀和维护问题。耐候钢、铝合金和不锈钢是常用的耐腐蚀金属材料,然而,耐候钢在富盐空气环境和有积水条件下腐蚀速率会加快;铝合金材料密度较小,同比条件下强度不如钢材;不锈钢虽然性能优异,但生产过程中需加入稀有金属材料,价格约为普通碳素钢的 3~4 倍,限制了其大规模应用<sup>[1]</sup>。将碳素钢与不锈钢合理结合,能够有效解决不锈钢成本高和普通钢材易腐蚀的问题。不锈钢-碳素钢双金属材料通过特殊复合工艺将低碳钢与不锈钢结合起来,双金属兼具碳素钢的力学强度与不锈钢的耐腐蚀性,在工程领域具有良好的研究与应用前景<sup>[2-4]</sup>。将双金属复合管应用于钢管混凝土结构,提出不锈钢(外)-碳素钢(内)双金属复合管混凝土(CFBT)构件形式,该类组合结构可替代现有钢管混凝土构件,兼具承载力高、抗震性能好、施工方便等优点,同时解决了防腐和造价问题<sup>[5-11]</sup>。

在双金属焊接应力方面,Dhib 等<sup>[12]</sup>研究发现,热轧复合板焊后仍能维持高界面强度;Wei 等<sup>[13]</sup>首次揭示冷弯方管角部存在外拉内压自平衡场;赵平宇等<sup>[14]</sup>与 Zhao 等<sup>[15]</sup>进一步给出圆管与箱形截面的全厚度实测,证实多道焊使不锈钢覆层出现双轴拉应力峰值,成为疲劳裂纹潜在源。上述研究从板材到冷弯闭口构件,系统刻画了不锈钢复合钢结构焊接残余应力的分布特征。然而,现有研究多聚焦于复合板或单一构件本身的残余应力场,针对双金属复合管焊接节点,特别是工程中常见的 T 形相贯节点的研究鲜见报道。T 形焊接节点由于两支管相交,焊缝空间几何形态复杂,热量集中且散热不均,其残余应力分布相较平板对接或构件自身焊缝更为复杂。研究其分布规律可为优化焊接工艺、改进节点构造及建立设计标准提供依据,对保障结构安全性、经济性、耐久性至关重要。

焊缝残余应力的主要测量方法可分为有损检测与无损检测两大类。有损检测通过释放应力并测量应变进行反演计算,包括盲孔法、套取芯法等;无损检测则基于物理性质变化实现检测,包括 X 射线衍射法、超声波法和磁性法等。盲孔法操作简便,仅需在工件表面钻制直径约 1~2 mm、深度为孔径 1.0~1.2 倍的盲孔即可,配合应变花,即可完成测量。该方法设备便携、成本低廉,特别适用于现场测试与工程应用,同时,理论基础成熟、重复性好、对构件损伤微小,可准确获取测点处平面应力状态。尽管属于局部破坏性测量,但因其综合性能优异,已成为焊接残余应力检测领域应用最广泛的标准方法之一<sup>[16-18]</sup>。基于上述背景,本文针对不锈钢(外)-碳素钢(内)双金属复合管 T 形焊接节点,采用盲孔法开展焊接残余应力试验。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

对残余应力进行盲孔试验,共设计 9 个双金属复合管 T 形焊接节点试件,其中,空钢管试件 3 个,先浇筑混凝土后焊接腹杆试件 3 个,先焊接腹杆后浇筑混凝土试件 3 个。试件主要参数包括 3 种腹杆类型(18# 工字钢、 $\Phi 133\text{ mm}\times 4.0\text{ mm}$  圆钢管、 $150\text{ mm}\times 4.75\text{ mm}$  方钢管)及 2 种加工方式(先浇筑后焊接、先焊接后浇筑)。

试件分为弦杆与腹杆两部分。弦杆根据平均焊接影响范围和常用径厚比确定尺寸,长度  $L$  均为 500 mm,直径  $D$  均为 200 mm,采用不锈钢(外)-碳素钢(内)双金属复合钢材。因市面上没有符合设计要求的成品双金属钢管,故采用双金属复合钢板进行卷制后焊接。双金属复合板基层为 Q235 碳素钢,厚度  $t_{\text{cs}}=5\text{ mm}$ ,覆层为 304 不锈钢,厚度  $t_{\text{ss}}=1\text{ mm}$ 。基层与覆层之间通过冶金结合,复合处未见明显边界线。腹杆高度  $l$  均为 200 mm,材质均为 Q235 碳素钢。腹杆与弦杆间通过焊缝连接,采用 A042 (JWE309LMo-16)焊条,焊接电流为 157 A,焊脚尺寸控制约为 4 mm。

对于混凝土试件,试件编号由 4 节组成:前两节编号中的 P 和 W 分别代表浇筑和焊接,P 与 W 的先后顺序代表加工顺序;第 3 节编号中的 U、C 和 R 分别代表腹杆类型为工字钢、圆钢管和方钢管;第 4 节编号中的数字代表弦杆内混凝土设计强度。对于空钢管试件,试件编号由 3 节组成:第 1 节编号 W 代表试件仅进行焊接;第 2、3 节编号与混凝土试件的 3、4 节编号含义相同。试件示意图,如图 1 所示。

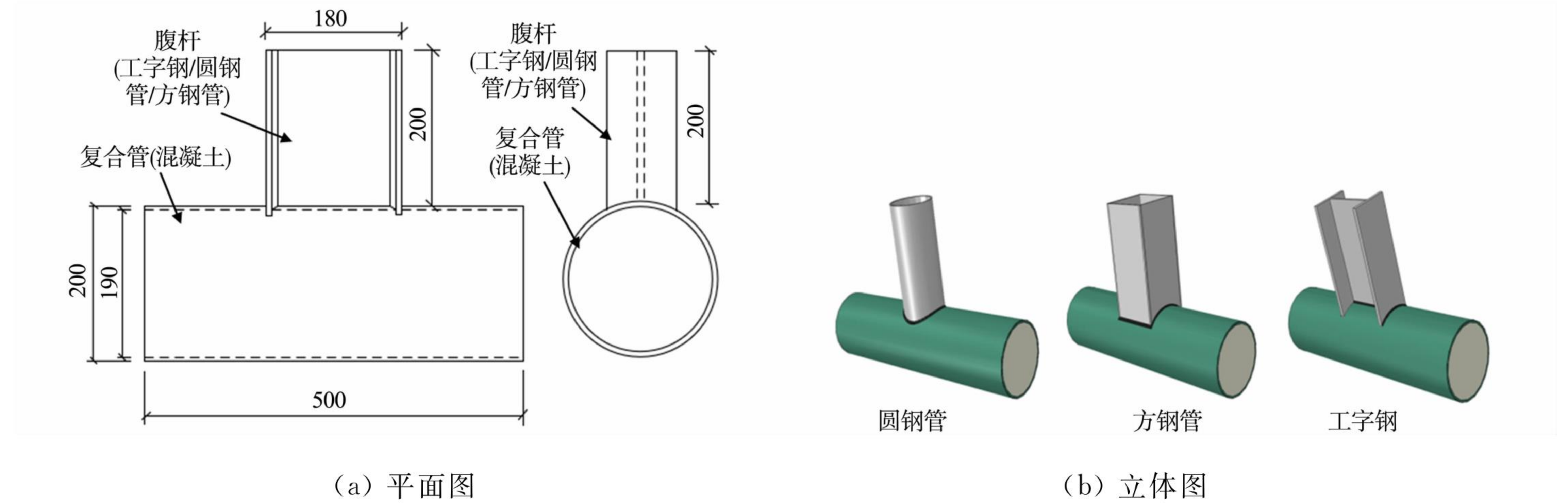


图 1 试件示意图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagrams of specimen (unit: mm)

1.2 试件制作

试件制作分为双金属复合管弦杆卷管焊接、型钢腹杆切割、节点焊接和试件浇筑 4 部分,其中,前 3 部分均在专业加工厂完成。双金属复合管弦杆由成品双金属复合板材经切割、压痕、开坡口、焊接、滚圆、压圆等工艺制作而成,加工后的试件能够保证尺寸准确性。型钢腹杆采用市场常见规格,仅需简单切割。节点焊接先在远离弦杆焊缝一侧画出基准中线,再将按照相贯线切割好的腹杆根据中线调整位置,并点焊固定,保证腹杆焊接在弦杆中心,随后采用 A042 焊条、157 A 电流进行细致焊接,焊脚尺寸  $h_f$  控制在约 4 mm。该试件不进行高强度力学性能试验加载,因此,未设计端板及加劲肋。

试件编号及主要参数,如表 1 所示。表 1 中: $f_{cu}$  为混凝土立方体抗压强度; $|\epsilon|_{max}$  为试件最大残余应变; $\sigma_{max}$  为试件最大残余应力;1 区为焊缝沿钢管环向排列;2 区为焊缝沿钢管纵向排列。

表 1 试件编号及主要参数

Tab. 1 Number and main parameters of specimens

| 试件编号     | $f_{cu}$ /MPa | 加工顺序   | 腹杆类型 | $ \epsilon _{max}/\times 10^{-6}$ | $\sigma_{max}$ /MPa | 位置  |
|----------|---------------|--------|------|-----------------------------------|---------------------|-----|
| P-W-U-30 | 30            | 先浇筑后焊接 | 工字钢  | −361.2                            | 238.9               | 2 区 |
| P-W-C-30 | 30            | 先浇筑后焊接 | 圆钢管  | −374.7                            | 255.1               | 2 区 |
| P-W-R-30 | 30            | 先浇筑后焊接 | 方钢管  | −517.7                            | 289.9               | 2 区 |
| W-P-U-30 | 30            | 先焊接后浇筑 | 工字钢  | −310.8                            | 243.1               | 1 区 |
| W-P-C-30 | 30            | 先焊接后浇筑 | 圆钢管  | −311.4                            | 243.2               | 2 区 |
| W-P-R-30 | 30            | 先焊接后浇筑 | 方钢管  | −271.2                            | 298.4               | 2 区 |
| W-U-0    | —             | 仅焊接    | 工字钢  | −323.7                            | 271.0               | 2 区 |
| W-C-0    | —             | 仅焊接    | 圆钢管  | −469.0                            | 288.9               | 2 区 |
| W-R-0    | —             | 仅焊接    | 方钢管  | −504.3                            | 289.1               | 2 区 |

1.3 材料力学性能

根据 GB/T 2975—2018《钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备》<sup>[19]</sup> 要求,在试件所用的 4 种金属母材上取样进行材料力学性能试验。材料性能试件(材性件)尺寸根据 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》<sup>[20]</sup> 设计,如图 2 所示。

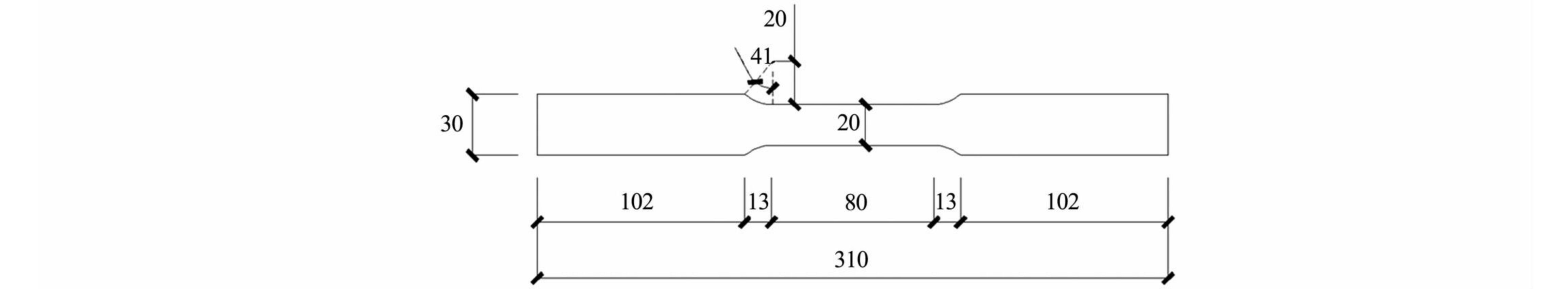


图 2 材料性能试件示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic diagram of material property specimen(unit: mm)

钢材材性试验在 2 000 kN 万能压剪试验机上完成,所有材性试件均被拉断。钢材材料性能,如表

2 所示。表 2 中: $t_0$  为钢材材性件平均厚度; $f_y$  为平均屈服强度; $f_u$  为平均极限强度; $E_s$  为平均弹性模量; $\delta$  为平均伸长率; $\nu$  为泊松比。

混凝土浇筑采用 C30 商用细石混凝土,混凝土的配合比为  $m(\text{水泥}):m(\text{粗骨料}):m(\text{细骨料}):m(\text{外加剂}):m(\text{掺合料})=332:1\,095:721:162:59$ ,在华侨大学土木试验大楼湿作业工作场地进行浇筑,共制作 12 个尺寸为  $150\text{ mm}\times150\text{ mm}\times150\text{ mm}$  的标准立方体试块,试块与试件同条件养护 28 d。根据 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》<sup>[21]</sup> 进行材性试验,测得混凝土平均立方体抗压强度为 31.4 MPa,平均轴心抗压强度为 21.0 MPa。

表 2 钢材材料性能  
Tab. 2 Material properties of steel

| 钢材种类    | $t_0/\text{mm}$ | $f_y/\text{MPa}$ | $f_u/\text{MPa}$ | $E_s/\text{GPa}$ | $\delta$ | $\nu$ |
|---------|-----------------|------------------|------------------|------------------|----------|-------|
| 双金属复合钢材 | 6.08            | 273.45           | 465.38           | 204.76           | 0.41     | 0.29  |
| 工字钢     | 6.23            | 357.72           | 494.47           | 202.22           | 0.28     | 0.30  |
| 方钢管     | 4.68            | 350.09           | 434.87           | 200.79           | 0.26     | 0.29  |
| 圆钢管     | 4.42            | 407.30           | 516.58           | 201.61           | 0.28     | 0.29  |

1.4 加载与测量方案

根据 GB/T 31310—2014《金属材料 残余应力测定 钻孔应变法》<sup>[17]</sup>,采用功率为 400 W、最大转速为  $3\,800\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  的手电钻进行钻孔。根据试件尺寸及金属硬度,选择直径为 1.5 mm 的高强金属钻头,配合手电钻进行钻孔,钻孔深度为 4 mm。

9 个试件根据腹杆不同可分为 3 类,每类试件的盲孔测点各不相同,3 种腹杆试件测点示意图,如图 3 所示。应变花坐标系示意图,如图 4 所示。图 4 中: $\varphi$  为主应力夹角。受限于加载角度问题,钻孔位置距焊缝平均距离为 30 mm。试验使用 GB/T 31310—2014《金属材料 残余应力测定 钻孔应变法》<sup>[17]</sup> 中建议的 16 in(40.64 cm)标准残余应力三相应变花进行测点位置的应变测量,数据由东华测试 DH 3816 型静态数据采集系统进行采集,采集频率为 1 Hz。为方便后续分析,所有应变花的粘贴方向一致,均按照规范建议进行编号。

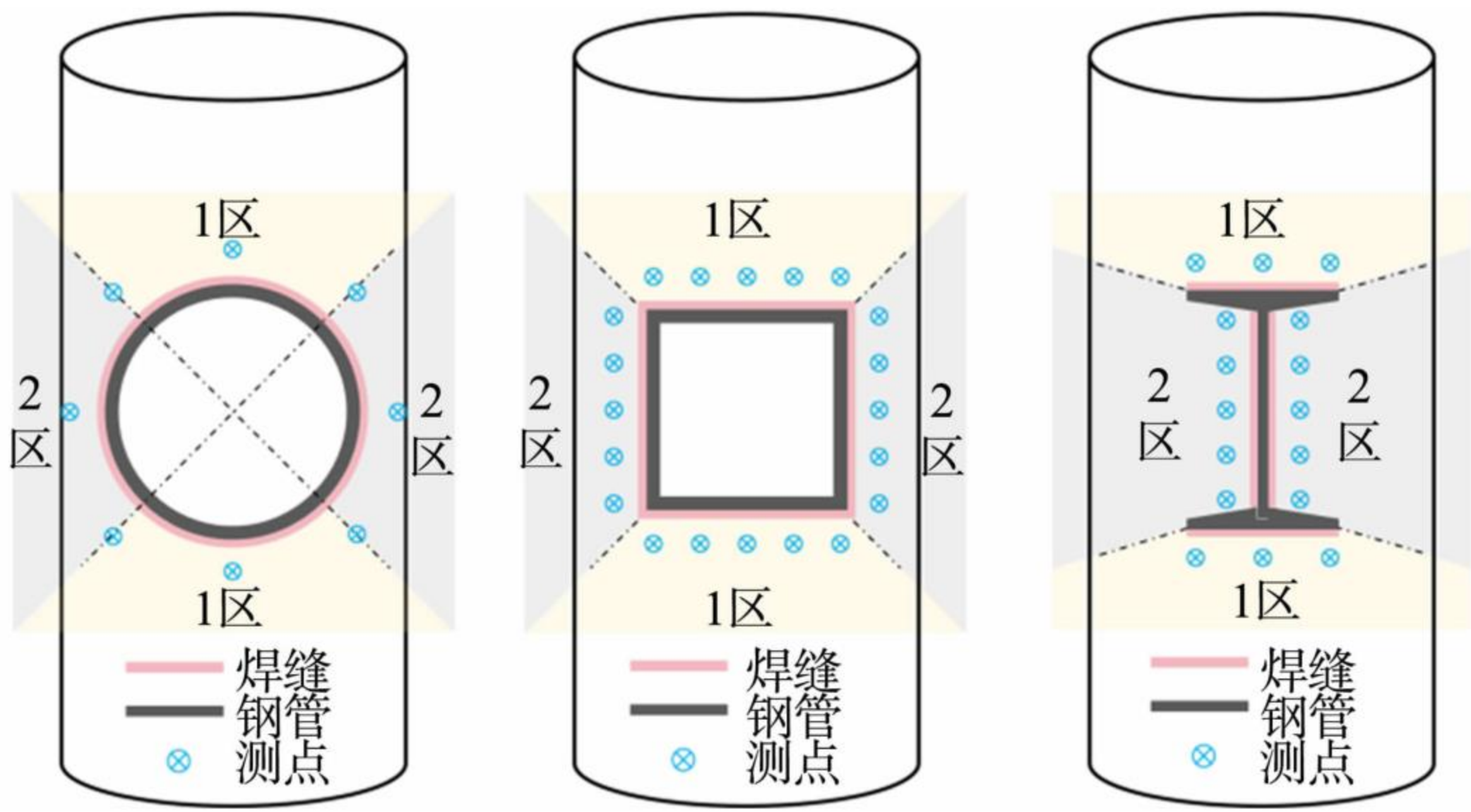


图 3 3 种腹杆试件测点示意图  
Fig. 3 Schematic diagrams of 3 types of web members

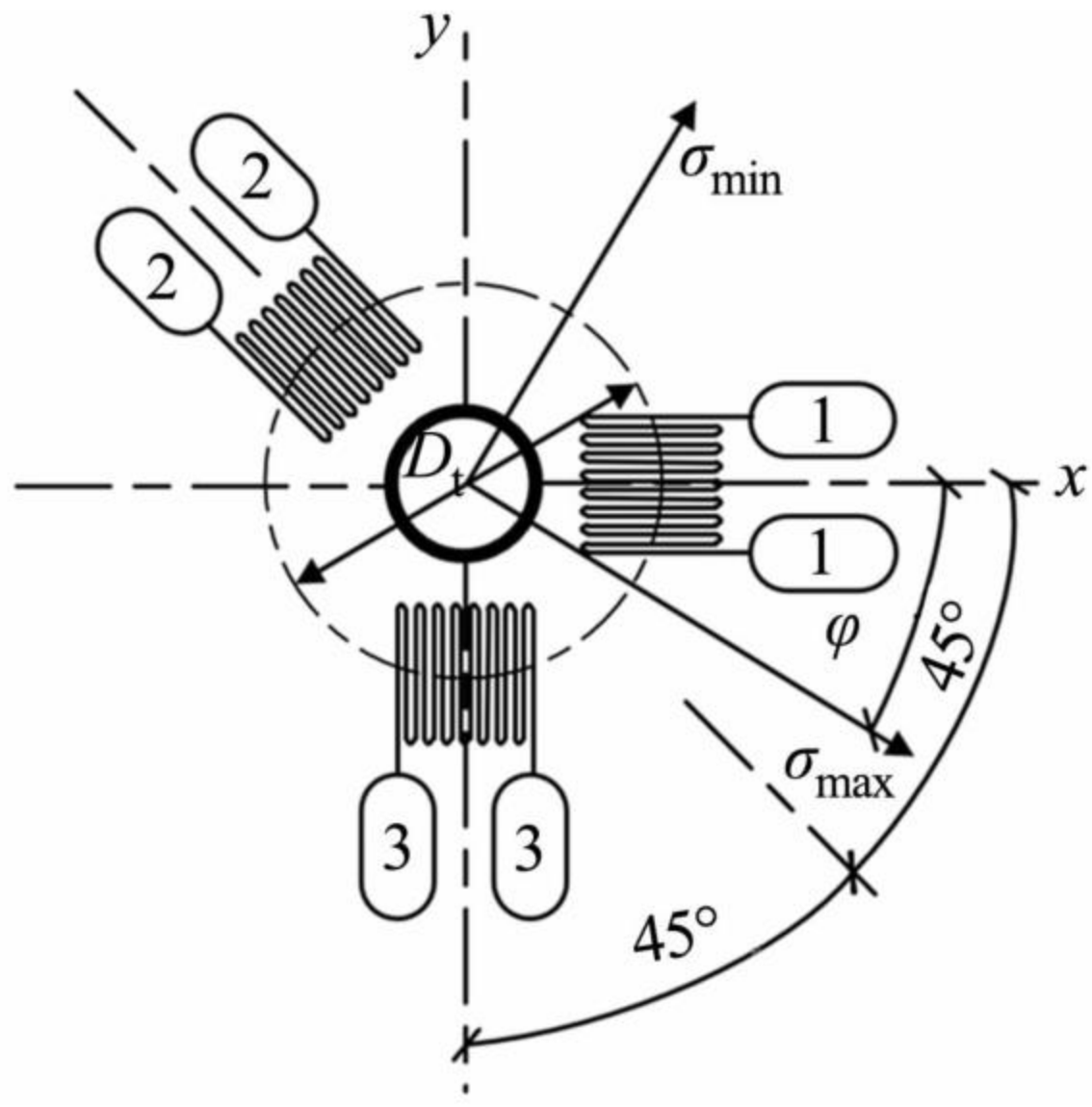


图 4 应变花坐标系示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of strain rosette coordinate system

2 试验结果与分析

2.1 加载过程及试验现象

盲孔实验的加载过程分为以下 5 部分:1) 清理试件测点周围焊渣、灰尘等影响试验的杂物;2) 使用 502 强力瞬干胶在测点位置粘贴标准应变花;3) 连接 DH 3816 型静态数据采集系统并进行数据采集;4) 使用手电钻在测点位置应变片中心匀速钻孔;5) 达到钻孔深度后,缓慢退刀,等待数据稳定后,停止数据采集。盲孔法加载装置,如图 5 所示。

由于盲孔实验加载时间较短、加载范围较小,故试件在加载后无明显破坏。在加载过程中,由于金属分为内外两层,外层不锈钢的硬度比内层碳素钢大,所以在加载过程中可以明显观察到,在相同转速情况下,不锈钢层的进深速度明显小于碳素钢层,且双层金属间存在冶金结合的部分硬度更高,钻孔难

度更大。该现象为双层金属的共性,研究发现,较高硬度是界面处的金属结晶强化和动态再结晶所导致的<sup>[22]</sup>。除此之外,不同测点的加载过程略有区别,部分测点钻孔过程较困难,钢管硬度较高,加载时间相较于其他测点略长。该现象可能是钢板卷制成钢管时,压痕工序对钢管金属组织产生一定影响所致,当测点刚好位于压痕上时,钢管金属表现出明显的材性变化。后续可通过显微硬度测试进一步量化不同区域的硬度分布。

2.2 应变释放规律

共采集测点数据 150 余组,仅展示其中的 9 组数据。各试件典型测点应变与加载时间关系曲线,如图 6 所示。图 6 中: $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_3$  为试验采集的 3 组应变数据; $t_L$  为加载时间。

由图 6 可知:在钻孔过程中,测点处的应力能够呈一定规律

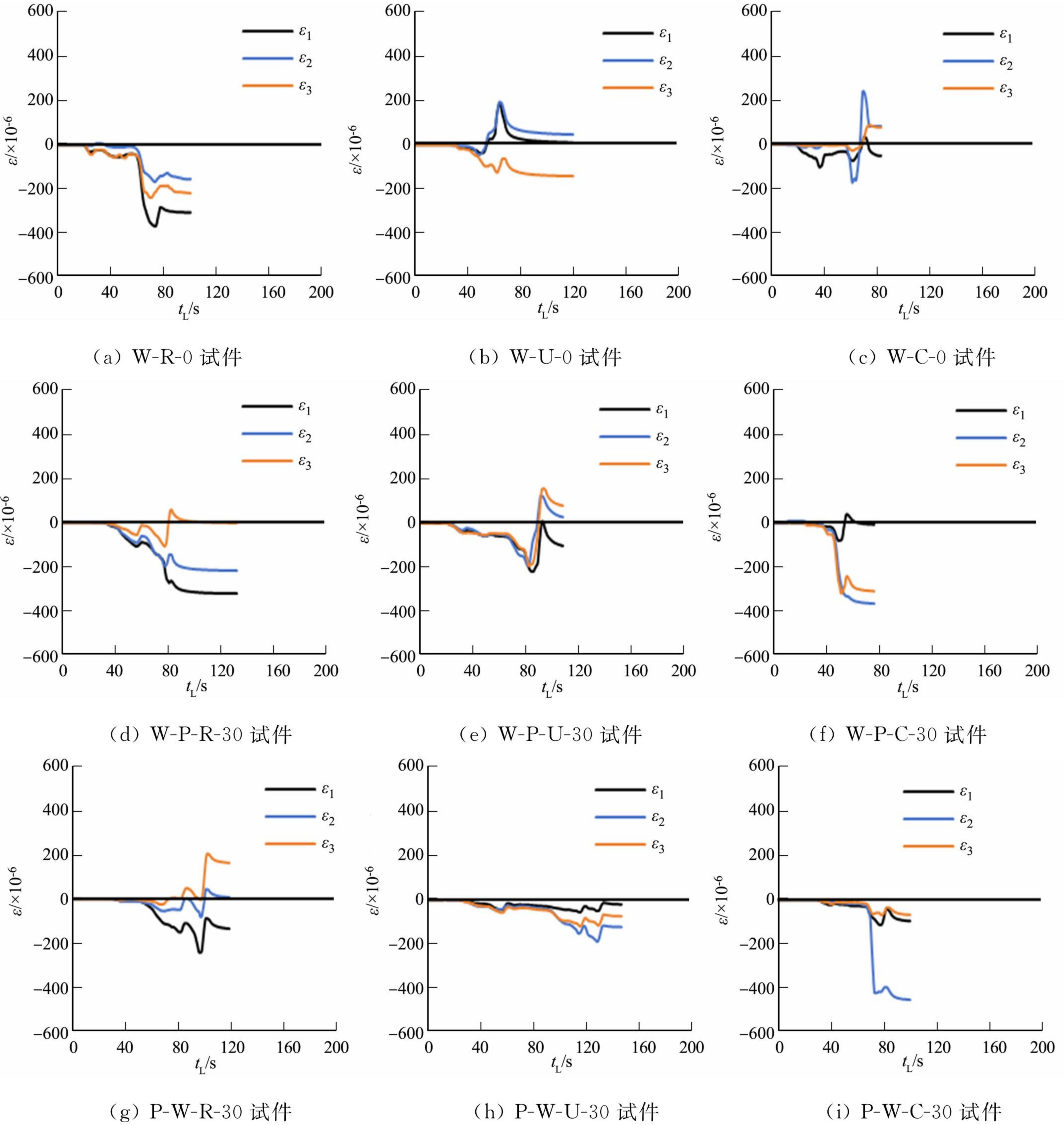


图 6 各试件典型测点应变与加载时间关系曲线

Fig. 6 Curves between strain and loading time of typical measuring points of each specimen

释放,试验所用应变片可有效采集由残余应力释放引起的测点应变;测点处的应变在钻孔初期 40 s 内释放较少,这是由于不锈钢与碳素钢的冶金结合面较为坚硬,40 s 后应变释放出现陡升,40~100 s 内应

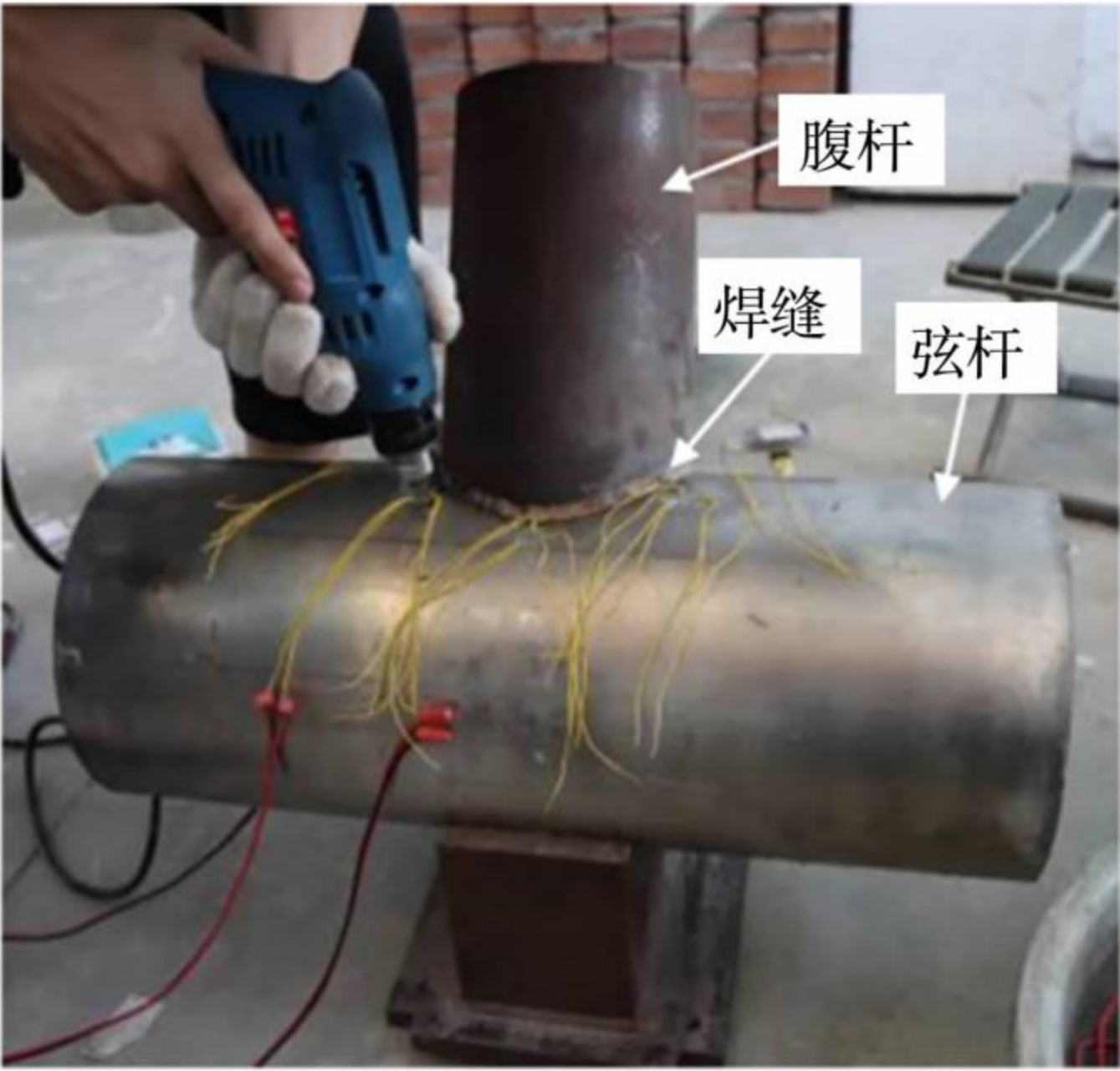


图 5 盲孔法加载装置

Fig. 5 Loading device of blind hole method

变增量达  $100 \times 10^{-6}$ , 到达应变释放的第一个峰值, 随后进入缓慢衰减阶段, 峰值应变降低约 30%, 反映出高焊接残余应力集中特征; 在轻微衰减后, 应变释放曲线呈现出典型的阶梯式上升特征, 并在 80 与 140 s 附近出现两次显著突变。

这一现象一方面是基层碳素钢与复层不锈钢的屈服强度和热膨胀系数不同, 焊接冷却过程中形成的界面约束导致应力沿壁厚呈非线性分布, 钻孔穿透界面时触发了应力场的二次重分布; 另一方面是由于焊接热循环使不锈钢侧热影响区发生碳化物析出或相变, 形成局部软化/硬化微区, 钻孔过程中钻头依次穿越不同力学性能的微区时, 应力释放呈现不连续的阶梯状响应。这种时序化的应变响应差异, 为识别双金属焊接接头的残余应力分布模式提供了试验依据。

2.3 残余应力计算与分布

根据 GB/T 31310—2014《金属材料 残余应力测定 钻孔应变法》<sup>[17]</sup>, 测点的残余主应力  $\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$  和主应力夹角  $\varphi$  的计算式分别为

$$\sigma_{\max} = P + \sqrt{Q^2 + T^2},$$

(1)

$$\sigma_{\min} = P - \sqrt{Q^2 + T^2},$$

(2)

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{-T}{-Q}\right).$$

(3)

式(1)~(3)中:  $P$ 、 $Q$ 、 $T$  为组合应力, 分别为

$$P = \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} = -\frac{Ep}{\bar{a}(1+\nu)},$$

(4)

$$Q = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} = -\frac{Eq}{\bar{b}},$$

(5)

$$T = \tau_{xy} = -\frac{Et}{\bar{b}}.$$

(6)

式(4)~(6)中:  $E$  为钢管的弹性模量;  $\bar{a}$ 、 $\bar{b}$  为标定常数,  $\bar{a} = 0.192$ ,  $\bar{b} = 0.482$ <sup>[17]</sup>;  $p$ 、 $q$ 、 $t$  分别为测点的组合应变,  $p = \frac{\epsilon_3 + \epsilon_1}{2}$ ,  $q = \frac{\epsilon_3 - \epsilon_1}{2}$ ,  $t = \frac{\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2}{2}$ 。

各试件测点位置残余应力示意图, 如图 7 所示。图 7 中:  $\sigma$  为残余应力; 灰色部分代表腹杆截面; 红色部分代表焊缝, 盲孔分布于焊缝周围, 该视角下弦杆竖直放置; 数据点与焊缝间的距离表示残余应力大小, 数据点在焊缝上的投影位置表示盲孔位置。

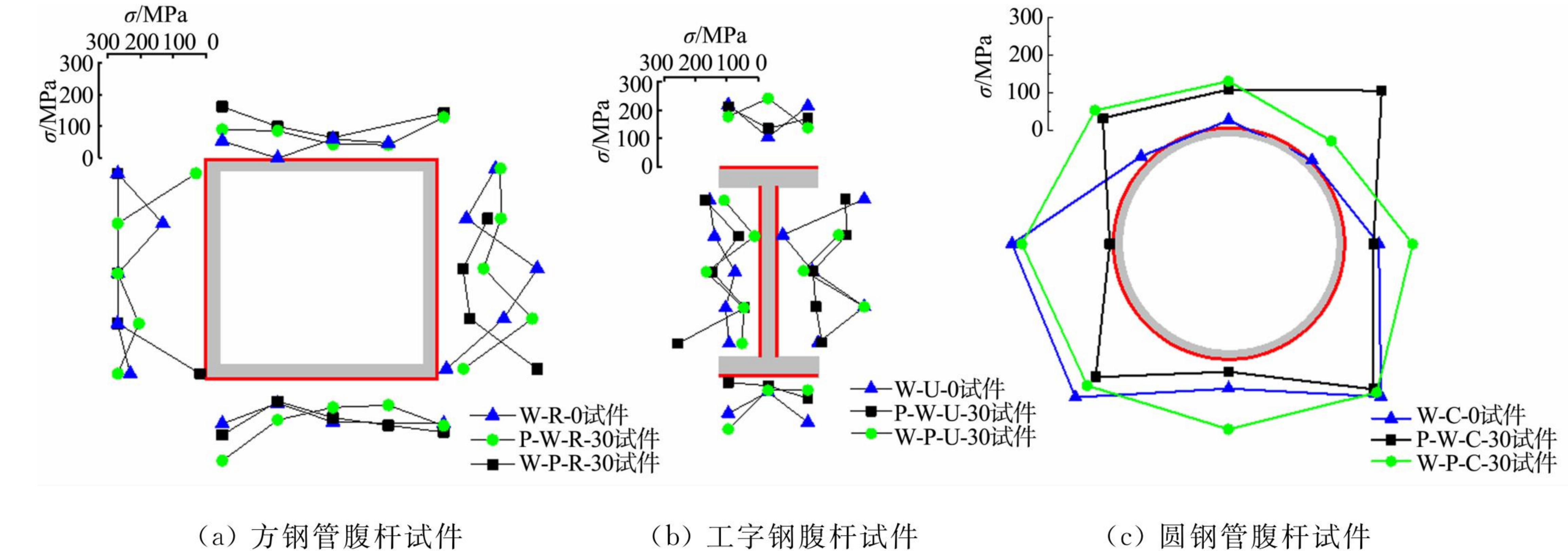


图 7 各试件测点位置残余应力示意图

Fig. 7 Schematic diagrams of residual stress at measuring points of each specimen

由图 7(a)可知: 靠近腹杆截面角部的测点残余应力较大, 靠近腹杆截面边中部的测点残余应力较小, 这是由于角部测点靠近多条焊缝, 受力更复杂, 而中部仅靠近单条焊缝, 角部测点较边中部高出 30%~50%; 在当前视角下, 腹杆上、下部焊缝的残余应力小于腹杆左右焊缝的残余应力, 这可能是上、下焊缝为直角焊接, 左、右焊缝为钝角焊接导致的。

由图 7(b)可知: 测点同样出现角部残余应力略大的规律, 但工字钢腹杆的腹板中部残余应力略有

波动,这可能是由于工字钢腹板较薄,双面焊接使得测点位置受力较复杂。

由图 7(c)可知:与图 7(a)类似,测点也出现上、下部残余应力小于左、右部残余应力的现象,但 W-C-0 试件中 1 区上部 3 个测点出现的残余应力异常小的现象,经分析确认,该处为试件焊接时的起弧区,存在热输入不稳定的问题,从而导致测点数据偏小。

总体来说,所有试件 1 区残余应力略小于 2 区,除上述分析的焊缝形状原因外,弦杆的制作方式也可能导致该现象。采用的弦杆为双金属板卷制,包括压弯、滚圆等工序,在这个过程中会对钢管纵向和环向产生一部分应力差。对于未浇筑(W-系试件)、先浇筑后焊接(P-W-系试件)和先焊接后浇筑(W-P-系试件)这 3 类加工方式,残余应力大小没有较大差别,表明焊接热过程(热输入、冷却速率等)是残余应力形成的主导因素,其作用掩盖了混凝土填充带来的约束差异;但在部分测点处,未浇筑混凝土的试件残余应力略小于另外两种试件,这说明管内混凝土的刚性约束对焊接应力发展存在一定调控作用,但影响程度有限。

### 3 结 论

通过盲孔法获得了双金属复合管 T 形焊接节点残余应力分布的基础数据,初步揭示了关键参数的影响规律,为后续节点静动力性能研究和承载力计算方法的建立提供了试验依据。

1) 在双金属复合管 T 形节点中,残余应力呈现显著的局部积聚特征。多条焊缝交汇区域(相贯线角部)的残余应力水平远高于单一焊缝区域,角部测点主应力较边中部高 30%~50%,是该类节点的薄弱部位。

2) 节点残余主应力集中分布于 140~240 MPa。由于外层不锈钢及冶金结合区硬度显著高于内层碳素钢,形成了沿壁厚方向的梯度应力场,这是双金属材料焊接区别于均质材料的典型特征。

3) 混凝土浇筑顺序对残余应力幅值的影响不显著,表明焊接热过程是残余应力形成的主导因素。但空管试件局部测点应力略低的现象提示,管内混凝土的刚性约束对焊接应力发展具有一定调控作用。

4) 盲孔法应变释放过程呈现“陡升-衰减-阶梯上升”的时序特征,反映出双金属材料焊接残余应力释放的复杂性,为后续研究提供了试验依据。

#### 参 考 文 献:

[1] 王元清,袁焕鑫,石永久,等. 不锈钢结构构件稳定性的研究进展[J]. 工业建筑,2012,42(5):1-11. DOI:10.13204/j.gyjz2012.05.011.

[2] Li Zhou,Zhao Jingwei,Jia Fanghui,*et al.* Analysis of bending characteristics of bimetal steel composite[J]. International Journal of Mechanical Sciences,2018,148:272-283. DOI:10.1016/j.ijmecsci.2018.08.032.

[3] Ban Huiyong,Zhu Juncheng,Shi Gang,*et al.* Tests and modelling on cyclic behaviour of stainless-clad bimetallic steel[J]. Journal of Constructional Steel Research,2020,166:105944. DOI:10.1016/j.jcsr.2020.105944.

[4] Mei Yixiao,Ban Huiyong. High strain rate behaviour of stainless-clad bimetallic steel[J]. Engineering Structures,2020,207:110219. DOI:10.1016/j.engstruct.2020.110219.

[5] Ye Yong,Han Linhai,Sheehan T,*et al.* Concrete-filled bimetallic tubes under axial compression: Experimental investigation[J]. Thin-Walled Structures,2016,108:321-332. DOI:10.1016/j.tws.2016.09.004.

[6] Ye Yong,Han Linhai,Guo Zixiong. Concrete-filled bimetallic tubes (CFBT) under axial compression: Analytical behaviour[J]. Thin-Walled Structures,2017,119:839-850. DOI:10.1016/j.tws.2017.08.007.

[7] Ye Yong,Zhang Shijiang,Han Linhai,*et al.* Square concrete-filled stainless steel/carbon steel bimetallic tubular stub columns under axial compression[J]. Journal of Constructional Steel Research,2018,146:49-62. DOI:10.1016/j.jcsr.2018.03.015.

[8] Xie Wenchao,Ye Yong,Jiang Hang,*et al.* Numerical investigation and calculation method of concrete-filled bimetallic tubes subjected to concentric tension[J]. Structures,2023,56:104910. DOI:10.1016/J.ISTRUC.2023.104910.

[9] 叶勇,苗伟,张世江,等. 双金属复合管混凝土构件受弯滞回性能研究[J]. 建筑结构学报,2023,44(8):110-119. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2022.0231.

[10] Jiang Hang,Ye Yong,Miao Wei,*et al.* Hysteretic behavior of concrete-filled bimetallic tube (CFBT) columns under

combined loads[J]. Structures,2023,47:1396-1407. DOI:10. 1016/J. ISTRUC. 2022. 11. 139.

[11] Zhang Shijiang,Guo Zixiong,Ma Danyang,*et al.* Performance of concrete-filled bimetallic tube short columns under eccentric compression: Experimental investigation[J]. Journal of Constructional Steel Research,2021,181:106626. DOI:10. 1016/J. JCSR. 2021. 106626.

[12] Dhib Z,Guermazi N,Gasperini M,*et al.* Cladding of low-carbon steel to austenitic stainless steel by hot-roll bonding: Microstructure and mechanical properties before and after welding[J]. Materials Science & Engineering A, 2016,656:130-141. DOI:10. 1016/j. msea. 2015. 12. 088.

[13] Wei Jiatian,Ban Huiyong,Wang Yuanqing,*et al.* Residual stress tests on stainless-clad bimetallic steel cold-formed square hollow sections[J]. Journal of Constructional Steel Research,2026,236:110023. DOI:10. 1016/J. JCSR. 2025. 110023.

[14] 赵平宇,班慧勇,石永久,等. 不锈钢复合钢材焊接圆管截面残余应力试验研究[J]. 建筑结构学报,2022,43:345-352. DOI:10. 14006/j. jzjgxb. 2022. S1. 0037.

[15] Zhao Pingyu,Ban Huiyong,Hu Yifei,*et al.* Residual stress within stainless-clad bimetallic steel welded box sections [J]. Thin-Walled Structures,2022,177:109395. DOI:10. 1016/J. TWS. 2022. 109395.

[16] ASTM International. Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain gage method: ASTM E837-20[S]. West Conshohocken:American Society for Testing Materials,2020.

[17] GB/T 31310—2014 金属材料 残余应力测定 钻孔应变法[S].

[18] Yan Xifeng,Yang Chao. Experimental research and analysis on residual stress distribution of circular steel tubes with different processing techniques[J]. Thin-Walled Structures,2019(144):1-12. DOI:10. 1016/j. tws. 2019. 106268.

[19] GB/T 2975—2018 钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备[S].

[20] GB/T 228.1—2021 金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法[S].

[21] GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S].

[22] Sun Yufei,Yu Sirong,Wang Bingying,*et al.* Interface microstructure and mechanical properties of nickel/steel bi-metal composite pipe fabricated by explosive welding [J]. Metals,2024,14(11):1253. DOI:10. 3390/MET 14111253.

(责任编辑: 陈志贤      英文审校: 方德平)