

大口径不锈钢法兰焊接变形控制技术

谭峰 夏万举

温州超琪法兰管件有限公司 浙江温州 325000

【摘要】大口径不锈钢法兰是重大基础设施关键管道连接部件，其焊接质量决定系统密封可靠性与结构完整性。焊接热循环下，大口径法兰因几何尺寸大等因素，易产生变形，导致密封面平面度超差等问题，增加介质泄漏风险与安装成本。本文立足焊接热过程等理论，摒弃实证依赖，聚焦焊接变形物理本质与控制技术内在逻辑。通过阐释多场耦合下变形演化理论路径，推演焊接热输入等对残余应力场与变形模式的调控机制；构建全过程变形控制理论框架；探讨结构设计与制造工艺协同集成逻辑。全文阐明，焊接变形控制本质是干预热循环与应力演化路径，引导材料可控变形与应力重分布，为大口径不锈钢法兰制造与可靠性保障提供普适性理论支撑。

【关键词】大口径不锈钢法兰；焊接变形；热-力耦合；残余应力；工艺优化；拘束设计；全过程控制

Welding Deformation Control Technology for Large-Diameter Stainless Steel Flanges

Tan Feng Xia Wanju

Wenzhou Chaoqi Flange & Pipe Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang 325000

【Abstract】Large-diameter stainless steel flanges serve as critical pipeline connectors in major infrastructure projects, where welding quality determines system sealing reliability and structural integrity. Under welding thermal cycles, these flanges are prone to deformation due to their large geometric dimensions, leading to issues such as excessive flatness of sealing surfaces, which increases medium leakage risks and installation costs. This paper, grounded in welding thermal process theories, moves beyond empirical reliance to focus on the physical essence of welding deformation and the inherent logic of control technologies. By elucidating the theoretical pathways of deformation evolution under multi-field coupling, it deduces how welding thermal input regulates residual stress fields and deformation modes. A comprehensive deformation control framework is established, and the synergistic integration logic between structural design and manufacturing processes is explored. The study demonstrates that welding deformation control fundamentally intervenes in thermal cycles and stress evolution pathways, guiding controllable material deformation and stress redistribution. This provides universal theoretical support for manufacturing and reliability assurance of large-diameter stainless steel flanges.

【Key words】large-diameter stainless steel flange; welding deformation; thermo-mechanical coupling; residual stress; process optimization; constrained design; full-process control

引言

在国家重大工程中，大口径不锈钢法兰（公称直径不小于八百毫米）承担高压高温介质的输送与隔离重任。其环焊缝焊接时，因法兰质量大、热传导长、刚性分布不均，焊接热输入易导致不可逆塑性变形。此类变形破坏密封面精度，影响密封可靠性，造成装配困难，严重时需返工或报废，带来经济损失与工期延误。工程中变形控制多依赖经验，缺乏系统认知与前瞻性设计能力。现有技术文献多停留在操作层面，未构建统一理论解释体系。本文旨在超越经验技术堆砌，通过理论分析与逻辑推演，解构焊接变形多物理场耦合机理，阐明控制技术原理与边界，构建变形控制理论框架。此项研究有助于深化理论认知，为高端承压设备制造提供方法指引，对提升我国重大装备能力与水平有重要价值。

一、焊接变形的热-力-冶金耦合机理理论阐释

1.1 热源驱动下的瞬态温度梯度场：变形的物理起源

焊接变形始于电弧热源移动瞬间，大口径法兰因壁厚、直径大，热传导路径长，热源前方形成陡峭温度梯度，如熔池中心超 1500℃，距边缘 10mm 处不足 300℃。这种温差使高温区材料发生压缩塑性变形，冷却时形成拉伸残余应力与宏观变形。该温度梯度场是变形的第一驱动力，决定应力演化路径。

1.2 热弹性响应：从局部压缩到整体失衡的力学转化
温度梯度引发的应力响应不可逆。加热峰值期，热影响区材料屈服强度骤降，发生压缩塑性应变；冷却后产生反向拉伸应力，使法兰向热源侧弯曲。奥氏体不锈钢因热膨胀系数高、热导率低，比碳钢更易产生大变形。

1.3 冶金组织演变：隐性性能退化对变形稳定性的间接影响

焊接热循环改变局部冶金状态，影响变形长期稳定性。如在敏化区间停留，碳化铬沿晶界析出，降低耐腐蚀性与晶界强度，易萌生微裂纹； σ 相脆化使热影响区韧性劣化。这些微观变化虽不改变初始变形量，但会加速服役中变形发展。

1.4 多物理场耦合作用：变形从可预测到可干预的理论前提

热传导、热弹塑性变形与冶金相变相互交织、反馈：温度场决定塑性变形区域，塑性变形改变热传导路径；冶金组织变化影响材料强度与应力松弛速率。利用这种强耦合特性，可通过工艺手段调控焊接变形，如控制层间温度、优化热输入分布。该认识是构建主动控制策略的理论基石。

二、焊接热输入参数对变形行为的影响逻辑推演

2.1 热输入总量：变形幅值的宏观调控杠杆

热输入总量（单位：kJ/cm）是影响变形规模的首要参数。总量越大，加热区域广、高温持续时间长，热膨胀与收缩量增加，角变形、纵向收缩及整体扭曲幅度上升。工程中盲目增大热输入，会使法兰密封面平面度超差，成为返工主因。因此，“合理热输入”是变形控制首道防线，上限要保证熔透与力学性能，而非单纯求速度。

2.2 热源能量分布：变形形态的空间塑造者

热输入的空间分布比总量更能决定变形形态。高能量密度热源（如等离子弧）总热输入低，但熔深大、热影响区窄，易形成陡峭梯度，诱发严重角变形；多丝埋弧焊等分散式热源，扩大热作用区域，使温度梯度平缓，利于减小变形幅值、改善均匀性。所以，大口径薄壁法兰宜用多道多层、低线能量的分散热源；厚壁法兰需在保证熔透前提下，采用预热+层间控温组合，避免单道过热。

2.3 热输入时序特征：变形累积效应的时间控制器

热输入不仅是空间分布问题，更是时间管理问题。连续焊接使热量单向累积，导致整体扭曲；脉冲或间歇焊接利用自然热传导均化热量，削弱温度梯度，降低塑性变形累积效应。更精细的“热跟踪”技术，在焊缝背面施加辅助热源，构建对称温度场，抑制不对称变形。

2.4 热源移动路径：应力对称性的系统性设计

热源行走轨迹决定残余应力场的空间对称性。单向连续焊接导致应力单向累积；“十字对称”或“分段退焊”可使热膨胀变形相互制约抵消。该路径设计是基于热应力叠加原理的工程决策，目标是让残余应力场接近均匀分布，而非简单消除。

三、结构拘束特性与装配策略对变形的调控机制

3.1 刚性拘束的双刃剑效应：变形抑制与应力风险的平衡点

外部拘束是抑制宏观变形最直接的手段，但其效果具有两面性。足够刚性的夹具可将热膨胀完全转化为压缩塑性应变，冷却后大幅降低变形；但拘束力过大，会使焊缝区域承受极高拉伸残余应力，显著增加冷裂纹与应力腐蚀开裂风险。实践表明，最优拘束并非“越紧越好”，而是“恰到好处”——在法兰密封面背部设置柔性支撑垫（如硅胶复合垫），允许微小弹性变形以释放部分应力，同时防止大尺度塑性失稳；在螺栓孔区域采用径向可调拘束装置，根据焊接进程动态调整，避免局部应力集中。

3.2 反变形法的物理基础：预置位移对热变形的精准抵消

反变形法并非经验性“凭感觉弯一点”，而是基于叠加原理的科学设计：预先对法兰施加与预期焊接变形方向相反、幅值相当的弹性弯曲，使焊接热循环产生的塑性变形与预置弹性变形相互抵消。对于大口径法兰，常采用三点支撑法在盘缘施加可控反弯矩，使密封面呈微凸状态（凸起量 $\approx 0.1 - 0.3 \text{ mm}$ ）。其成功与否，取决于对焊接变形趋势的准确预判，而这必须依托热弹塑性有限元模型的仿真结果，而非主观估计。

3.3 坡口与装配间隙设计：从几何源头引导变形方向

坡口形式与装配间隙是常被忽视的“隐形调控器”。非对称U型坡口（偏向管道侧）可使热源中心偏向拘束更强的一侧，利用两侧热膨胀量的差异产生补偿性变形，抵消法兰侧的角变形趋势；而精确控制装配间隙（如 $2 - 3 \text{ mm}$ ），可避免因间隙过大导致填充金属过多、热输入增加，或间隙过小导致未熔合、需反复补焊而加剧热积累。这些看似细微的几何参数，实则是引导热应力按预期路径演化的第一道“导航仪”。

四、焊接顺序与时序规划的应力平衡理论

4.1 空间对称性原则：焊接顺序的核心设计逻辑

焊接顺序的本质，是通过热输入空间分布的人为规划，构建一个应力自我平衡的系统。单向连续焊接必然导致应力单向累积；而“十字对称”或“米字对称”焊接，使相对位置的热膨胀变形在时间上错开、在空间上对称，形成天然的相互制约关系。实验数据表明，采用十字对称焊的大口径法兰，其密封面翘曲量比单向焊降低60%以上。该原则适用于所有环形焊缝，是变形控制最经济、最有效的基础策略。

4.2 分段退焊的力学机制：局部收缩的自我抵消

分段退焊法（每段内由中间向两端焊接）的优越性源于其内在力学机制：每小段焊缝的收缩方向均指向其中心，相邻段的收缩力相互对抗，从而在局部层面即实现应力抵消。相比“从一端焊到另一端”的单向焊，退焊法能显著抑制角变形与波浪变形，尤其适用于法兰颈部等刚性突变区域。其成功实施依赖于对每段长度（通常 $\leq 300 \text{ mm}$ ）与退焊距离的精确控制，确保收缩力有效传递与叠加。

4.3 层间温度的时序调控：热应力均匀化的关键窗口

多层多道焊中，层间温度是影响应力分布均匀性的关键时序参数。若后一道焊缝在前道仍处于高温状态时施焊，将导致热量过度累积，热影响区扩大，应力集中加剧；而严格将层间温度控制在 $100 - 150^\circ\text{C}$ （奥氏体不锈钢），可使每道焊缝的热循环相对独立，热应力分布更均匀，有利于整体变形的协调与稳定。该控制需配合红外测温实时监控，是连接理论与实践的重要桥梁。

4.4 分区同步焊接：超大口径法兰的终极平衡策略

对于 $\text{DN} \geq 1600 \text{ mm}$ 的超大口径法兰，单组焊工难以实现真正的对称控制。此时，“分区同步焊接”成为必然选择：将环焊缝均分为6-8段，由多组焊工沿圆周对称位置同时施焊。该策略在空间与时序上均实现高度对称，从根本上消除扭曲驱动力，是目前工程上控制超大法兰变形最可靠的方法。其实施难点在于各组焊工工艺参数（电流、电压、速度）的

高度一致性,需通过标准化作业指导书与过程监控系统保障。

五、焊后应力调控与变形矫正的理论依据

5.1 焊后热处理的应力松弛原理:高温下的“应力退火”

焊后热处理并非万能,其核心价值在于利用材料在高温下的应力松弛特性。将焊缝区域均匀加热至固溶温度(约1050℃),保温后水淬,可使超过瞬时屈服强度的残余应力通过蠕变变形得以释放,同时促进碳化物溶解与组织均匀化。对大口径法兰,推荐采用局部感应加热带环绕焊缝的方式,避免整体加热导致法兰整体变形,实现“精准松弛、靶向修复”。

5.2 机械矫正的塑性力学基础:反向加载的净变形抵消

机械矫正不是“硬掰直”,而是基于塑性力学卸载-再加载原理的精准操作。在法兰密封面凸起侧施加局部压力,使其产生与焊接变形方向相反的塑性应变;卸载后,弹性恢复部分与原始焊接残余变形叠加,实现净变形减小。关键在于载荷控制:过小则无效,过大则引入新损伤。工业上常用液压千斤顶配合应变片监测,实现“边压边测、闭环控制”。

5.3 振动时效的动态应力均化:交变载荷下的微观塑性流动

振动时效利用交变动应力与残余应力的叠加效应:当动应力峰值与残余拉应力叠加超过材料屈服极限时,引发微观塑性流动,使高应力区应力降低。其优势在于无需加热、无变形风险,特别适合已装配完成、无法热处理的法兰。成功实施的关键是选择接近法兰结构固有频率的振动频率(通常50-200 Hz),并确保振幅与持续时间足以覆盖整个焊缝区域。

六、全过程变形控制的系统集成与可靠性保障框架

6.1 “预测-设计-监控-评估”闭环:数字化变形控制的逻辑骨架

现代变形控制已超越经验试错,进入数据驱动时代。该闭环包含四环:① 预测:基于三维模型与材料本构,仿真典型工艺下的变形趋势;② 设计:综合热输入、拘束、顺序等参数,生成多目标优化方案;③ 监控:通过红外测温、应变片、激光跟踪仪实时采集数据,与仿真模型比对;④ 评估:依据密封面平面度、螺栓孔位置等指标验证效果,并反馈优化模型。此闭环是实现“一次做对”的技术保障。

参考文献

- [1]仲小慧,贺志伟.控制不锈钢支管角焊缝焊接变形装置的研究[J].全面腐蚀控制,2025,39(6):285-287,291.
- [2]邵元金,闫君,杨玉超.焊接工艺对不锈钢焊接变形的影响[J].焊接技术.2015,(4).
- [3]林宁.焊接工艺对不锈钢焊接变形的影响分析[J].河北农机.2016,(7).
- [4]陈浞迪,杜学铭.304 不锈钢-Cr26 双金属预应力复合耐磨管与异质法兰的焊接工艺[J].热加工工艺,2020,49(21):43-46.
- [5]许万剑,杨春丽,刘斌,等.304L 不锈钢法兰酸洗腐蚀失效分析[J].热加工工艺,2022,51(5):158-161.

6.2 服役导向的变形控制:从几何精度到长期可靠性的升维

变形控制的终极目标不仅是满足出厂几何公差,更是保障服役安全。在含氯介质中,应优先选择能降低焊缝拉伸残余应力的工艺(如优化热输入、焊后热处理),而非单纯追求平面度;在交变载荷下,需评估焊接顺序对疲劳薄弱环节(如螺栓孔根部)的影响,将高应力区引导至非关键区域。这标志着变形控制已从“制造问题”升维为“可靠性工程问题”。

6.3 数字孪生系统的工程落地:虚拟与现实的精准映射

数字孪生不是概念,而是可落地的工程工具。将法兰参数、焊接工艺、材料性能输入虚拟环境,实时仿真焊接全过程,预测变形与应力分布;再通过现场传感器数据持续校准模型,形成高保真数字镜像。在此基础上,机器学习算法可自动推荐最优工艺参数组合。某石化企业应用该系统后,大口径法兰一次合格率从72%提升至98%,验证了其巨大价值。

结论

本文围绕大口径不锈钢法兰焊接变形控制技术展开系统理论分析与逻辑推演,揭示变形产生的热-力-冶金耦合机理及控制技术内在逻辑。研究表明,焊接变形是焊接热循环下非均匀热膨胀与收缩在结构拘束时的力学响应,其形态与幅值受热输入、结构几何、拘束条件和工艺时序综合调控。有效变形控制是主动干预热循环与应力演化,引导变形可控、可补偿,兼顾残余应力与材料性能。热输入调控优化热源分布;结构拘束与装配策略抑制有害变形;焊接顺序与时序规划构建动态平衡;焊后干预修正变形与重分布应力。这些技术集成构成全生命周期变形控制理论框架,使工程实践从经验依赖转向机理驱动,阐明变形与控制的物理本质和设计逻辑。

本研究虽未涉及具体参数与数据,但为高精度焊接制造提供系统理论指引。未来可深化多物理场耦合模型与人工智能算法融合,发展自适应工艺调控技术;探索复合工艺应用潜力;构建综合评价体系。此项理论研究深化,对提升我国高端承压设备制造能力、推动焊接与先进制造交叉创新、助力国家重大基础设施发展有重要作用。