

# 压力容器设计中焊接接头系数与无损检测要求的科学确定

王晓

上海齐达重型装备有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i8.17136

**[摘要]** 焊接接头系数与无损检测要求是压力容器设计中的核心安全与经济参数,二者相互耦合,共同决定了容器的结构完整性与全生命周期成本。本文基于TSG 21-2016《固定式压力容器安全技术监察规程》与GB/T 150-2024《压力容器》系列标准,从理论基础、标准规范与工程实践三个层面,系统论述了焊接接头系数与无损检测要求的科学确定方法。文章深入剖析了焊接接头系数的物理本质及其对容器壁厚与材料成本的量化影响,梳理了射线检测、超声检测等方法的适用性与局限性。在此基础上,提出了以“法规底线为纲、风险分析为领、成本优化为本、技术适配为用”的协同确定策略,并结合典型工程案例进行了验证分析。本文旨在为压力容器设计人员提供一套系统化、科学化的决策框架,对提升我国压力容器本质安全水平与设计优化能力具有重要的理论与实践意义。

**[关键词]** 压力容器; 焊接接头系数; 无损检测; 风险分析; 成本优化; 标准符合性; 设计方法论  
**中图分类号:** TQ053.2 **文献标识码:** A

## Scientific Determination of Weld Joint Coefficient and Nondestructive Testing Requirements in Pressure Vessel Design

Xiao Wang

Shanghai Qida Heavy Equipment Co., Ltd.

**[Abstract]** Weld joint coefficient and nondestructive testing requirements are core safety and economic parameters in pressure vessel design. These two factors are mutually coupled and jointly determine the structural integrity and lifecycle cost of the vessel. Based on TSG 21-2016 "Safety Technical Supervision Regulations for Stationary Pressure Vessels" and the GB/T 150-2024 "Pressure Vessels" series of standards, this paper systematically discusses the scientific determination methods for weld joint coefficient and nondestructive testing requirements from three perspectives: theoretical foundation, standard specifications, and engineering practice. The study delves into the physical essence of the weld joint coefficient and its quantitative impact on vessel wall thickness and material costs, while also examining the applicability and limitations of methods such as radiographic testing and ultrasonic testing. On this basis, a collaborative determination strategy centered on "regulatory compliance as the guideline, risk analysis as the lead, cost optimization as the foundation, and technical adaptation as the application" is proposed, and validated through typical engineering case studies. This paper aims to provide a systematic and scientific decision-making framework for pressure vessel designers, offering significant theoretical and practical insights for enhancing the intrinsic safety level and design optimization capabilities of pressure vessels in China.

**[Key words]** Pressure Vessel; Weld Joint Coefficient; Nondestructive Testing; Risk Analysis; Cost Optimization; Standard Compliance; Design Methodology

### 引言

压力容器作为多个领域的关键承压设备,其安全性至关重要。统计显示,约40%的压力容器失效事故源于焊接接头的质量问题。因此,在设计阶段,评估并保障其可靠性是设计工程师的核心职责。

焊接接头系数( $\phi$ )与无损检测要求是连接设计理论与制造实践的桥梁。焊接接头系数是强度计算中的折减参数,决定容器壁厚、材料用量和制造成本;无损检测则是验证系数合理性的手段。我国的技术规范体系包括TSG 21-2016和GB/T 150-2024,对这两者有详细规定。

然而,实践中一些设计人员对这两者的理解不足,可能导致安全隐患或成本过高。因此,本文从设计工程师的角度,构建一个系统性的确定方法,结合最新标准、风险工程学和全生命周期成本分析,形成一个逻辑严密、可操作性强的设计决策体系,以提升压力容器设计的安全性与经济性。

### 1 焊接接头系数的深度解析与标准溯源

1.1 焊接接头系数的物理本质与力学内涵。焊接接头系数  $\phi$ , 其值恒小于或等于1.0, 其物理本质是设计者对“焊缝强度未能达到母材强度”这一客观不确定性的工程量化补偿。这种不确定性主要源于三个方面:

几何不连续性: 焊缝余高、咬边等造成的应力集中。

冶金不均匀性: 焊接热循环导致的热影响区组织性能劣化、晶粒粗化。

缺陷不可避免性: 如气孔、夹渣、未熔合、微裂纹等制造缺陷的客观存在。

因此,  $\phi$  并非一个简单的强度比值, 而是一个基于概率与统计的“置信系数”。它反映了在给定的制造工艺和质量控制水平下, 焊缝区域能够达到与母材同等承载能力的置信水平。 $\phi=1.0$  意味着通过极其严格的制造与检验手段, 将上述不确定性的影响降至最低, 从而可以“信任”该焊缝与母材等强。

1.2 GB/T 150-2024标准规定的演进与精细化。GB/T 150-2024在焊接接头系数的规定上, 体现了更强的科学性与精细化。其核心逻辑如表1所示:

表1 GB/T 150-2024中典型焊接接头系数( $\phi$ )取值依据

接头型式	无损检测比例与方法	接头系数 ( $\phi$ )	适用条件与说明
双面焊对接接头	100% RT 或 100% UT	1.00	体现了最别的质量置信度
	局部 RT 或 UT ( $\geq 20\%$ )	0.85	基于抽样统计, 置信水平适度降低
	仅外观检查+ PT/MT	0.70	仅适用于低压( $P \leq 1.6\text{MPa}$ )、非低温的非危害介质容器
单面焊对接接头 (带垫板)	100% RT 或 100% UT	0.90	因根部可达性差, 本质可靠性低于双面焊
	局部 RT 或 UT ( $\geq 20\%$ )	0.80	
所有接头型式	强制性 100% 检测工况	1.00 (通常)	适用于低温容器、高危害介质容器、Cr-Mn 钢容器等

GB/T 150-2024的一个显著变化是, 强化了对“特定工况”的强制性要求。对于盛装极度或高度危害介质、设计温度低于 $-40^\circ\text{C}$ 的低温容器、采用高强钢( $R_m \geq 540\text{MPa}$ )等高风险场景, 标准实质上通过强制要求100%无损检测, 间接规定了 $\phi$ 必须取1.00。这体现了标准从“可选性”向“底线约束”的转变。

1.3 TSG 21-2016的安全监察逻辑。TSG 21-2016作为技术法规, 其作用在于划定安全红线<sup>[1]</sup>。它虽不直接规定 $\phi$ 值, 但其第3.2.10条等条款, 通过强制规定最低无损检测比例, 从源头上锁定了 $\phi$ 的可选范围。例如, 对于第III类压力容器、高危害介质容器等, TSG 21强制要求进行100%射线或超声检测, 这使得设计者在此类设备的设计中,  $\phi$ 值的选择空间被压缩至1.00(对于双面焊)。这种“检测比例决定接头系数”的逻辑链, 是设计者必须首先遵从的强制性设计输入。

### 2 无损检测要求的系统化确定与技术进步

2.1 无损检测方法的能力矩阵与选择逻辑。不同的无损检测方法对其特定类型的缺陷具有不同的灵敏度, 构成一个“能力矩阵”。科学选择检测方法, 需基于缺陷谱系与方法能力的匹配。

现代压力容器设计, 尤其是对于厚壁、高风险设备, 越来越倾向于采用UT技术, 特别是PAUT与TOFD。GB/T 150-2024正式纳入这些先进UT技术, 正是因其在缺陷定量、检出率和数字化记录方面的巨大优势, 为实现 $\phi=1.0$ 提供了更可靠的技术保障<sup>[2]</sup>。

2.2 检测比例确定的多元决策模型。确定无损检测比例, 是一个多因素权衡的决策过程, 远超越“满足最低标准”。工程师应建立如图1所示的系统化决策模型:

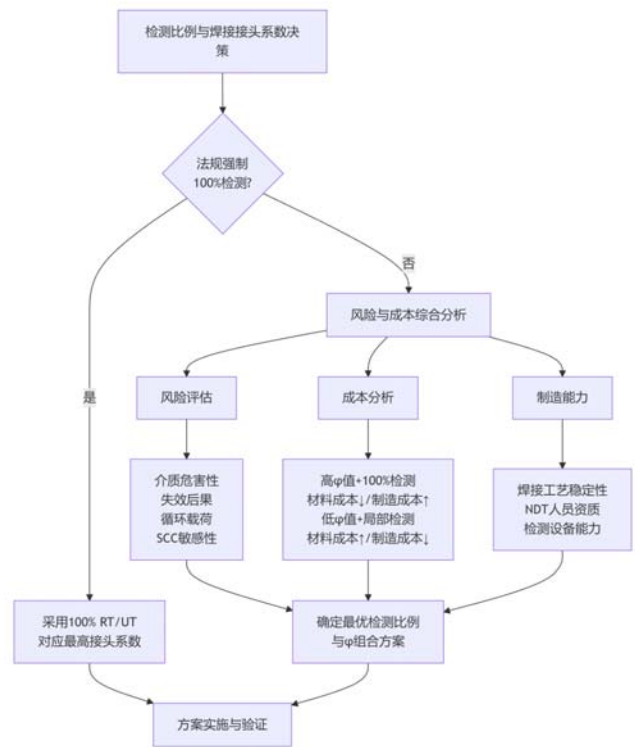


图1 无损检测比例与焊接接头系数协同确定决策模型

该模型明确指出, 在满足法规底线后, 设计决策应依次通过风险过滤器与成本优化器, 并最终与制造能力进行匹配。

### 3 焊接接头系数与无损检测的协同决策策略

3.1 基于风险工程的导向策略。风险( $R$ )=失效可能性( $F$ ) $\times$ 失效后果( $C$ )。对于压力容器, 失效后果主要由介质的毒性、爆炸性和环境污染性决定。基于此, 可建立风险分级响应策略:

高风险工况(极度/高度危害介质、低温、疲劳容器): 失效后果灾难性。必须采用最保守策略:  $\phi=1.0+100\%$  RT/UT(优选PAUT/TOFD)+表面检测(MT/PT)。此策略将控制措施集中于降低失效可能性( $F$ )。

中风险工况(中度危害介质、中压容器): 可采用平衡策略:  $\phi=0.85+局部RT/UT(\geq 20\%, 且覆盖所有高风险部位)$ 。此策略在安全与经济间取得平衡。

低风险工况(低压、常温、非危害介质): 可采用经济性策略:  $\phi=0.70+$ 表面检测, 但必须严格核查其是否满足GB/T 150的所有适用限制条件。

3.2全生命周期成本(LCC)优化分析。设计工程师必须具备成本全局观。焊接接头系数的选择, 直接触发的是“材料成本”与“制造成本(含检测)”之间的权衡。

方案A(高 $\phi$ 值+高检测):  $\phi=1.00$ →壁厚减小→材料成本下降。但需要100%NDT→制造成本上升。

方案B(低 $\phi$ 值+低检测):  $\phi=0.85$ →壁厚增加→材料成本上升。但仅需局部检测→制造成本下降。

优化决策点在于寻求材料成本与制造成本之和的最小值。通过定量计算可知, 对于大型、厚壁容器, 壁厚小幅减少带来的材料节省非常显著, 通常使得方案A的总成本更低。而对于小型、薄壁容器, 材料节省有限, 方案B可能更经济。此外, 方案A带来的重量减轻, 还对运输、安装和基础成本产生积极影响, 这些都应纳入LCC考量。

3.3设计-制造一体化协同。再完美的设计也需在车间实现。设计决策必须与制造单位的“质量保证能力”相匹配。若设计规定了 $\phi=1.0$ 和100% PAUT, 但制造单位不具备相应的焊接工艺评定实力或缺乏有资质的PAUT人员, 则该设计将成为“纸上谈兵”。因此, 在项目初期, 设计方与制造方就接头系数目标、检测方法和能力进行沟通, 是确保设计方案可行、可靠的关键环节。

#### 4 工程案例实证: 加氢反应器出口分离罐

4.1项目背景与设计输入。某炼化企业加氢装置中的出口分离罐, 关键设计参数如下:

设计压力: 8.5MPa

设计温度: 250°C

介质: 油气(含H<sub>2</sub>S, 浓度>1000ppm, 属高度危害介质)

材质: Q345R

内径:  $\Phi 2000$ mm

容积: 25m<sup>3</sup>

4.2标准符合性与风险分析。TSG 21符合性: 根据压力容积划类, 该容器为第III类压力容器。同时, 介质为高度危害。标准强制要求: A/B类对接接头必须进行100%无损检测。

风险分析: 介质中的H<sub>2</sub>S的存在, 使设备面临应力腐蚀开裂(SSC)风险。任何未检出的表面或内部微小裂纹, 在SSC环境下都可能发生扩展, 导致灾难性失效。故风险等级为高。

4.3方案论证与决策。基于上述分析,  $\phi$ 取值0.85或以下的方案被排除。决策聚焦于如何执行100%检测。

方案一: 100%射线检测(RT)

优点: 技术成熟, 结果直观, 易于存档。

缺点: 现场检测效率低, 辐射防护区域大, 影响其他作业; 对面积型缺陷(如裂纹)的检出灵敏度不如UT。

方案二: 100% 超声检测(采用相控阵PAUT)

优点: 检测效率高, 无需辐射隔离; 对危害性最大的面积型缺陷(裂纹、未熔合)灵敏度极高; 可进行精确的缺陷定量和成像。

缺点: 对操作人员技术水平要求高; 设备投资大。

4.4最终决策与经济性评估。最终采纳方案二: 100%PAUT, 对应焊接接头系数 $\phi=1.00$ 。

安全性: 采用最灵敏的检测技术应对SSC风险, 实现了本质安全。

经济性: 计算壁厚为42mm。若采用 $\phi=0.85$ , 计算壁厚将增至约47mm, 壁厚增加约12%。经核算, 因壁厚增加导致材料成本、内件修改、吊装运输等费用增加, 远超采用PAUT所增加的检测成本。本方案实现了全生命周期成本的最优。

附加要求: 所有焊接接头表面进行100%磁粉检测(MT), 以排除表面开裂缺陷。

此案例充分证明了, 在高端、高风险压力容器设计中, 采用基于风险分析和技术进步的协同策略, 能够同时实现安全性与经济性的最大化。

#### 5 结论与展望

本文系统性地论述了压力容器设计中焊接接头系数与无损检测要求的科学确定方法, 得出以下结论:

标准是底线, 理解是核心。设计者必须深刻理解焊接接头系数的物理本质是“置信水平”, 其与无损检测要求在GB/T 150和TSG 21中构成一个相互锁定的强制性体系。工程师的价值在于精准理解和执行标准背后的安全逻辑。

决策需系统, 风险为导向。科学确定二者关系, 需建立一个集法规符合性、风险分析、成本优化和技术适配于一体的系统化决策模型。摒弃“经验主义”和“盲目保守”, 转向基于数据和逻辑的精细化设计。

技术是引擎, 经济是目标。GB/T 150-2024对PAUT、TOFD等先进无损检测技术的吸纳, 为设计者提供了更强大的技术工具。善用这些工具, 可以在更高置信水平上实现 $\phi=1.0$ , 从而在保障安全的同时, 驱动轻量化和降本增效。

设计非终点, 协同创价值。优秀的设计必须考虑制造可行性。推动设计-制造一体化协同, 将制造能力和检测资源作为设计输入, 是确保设计方案成功落地的关键。

展望未来, 随着基于风险的检验(RBI)、数字孪生和人工智能在无损检测数据分析中的应用, 压力容器的设计与安全保障将更加精准、智能与前瞻。作为工程师, 应持续追踪技术前沿, 将新理念、新技术融入设计实践, 不断提升我国压力容器行业的整体技术水平和国际竞争力。

#### [参考文献]

[1]国家市场监督管理总局.TSG 21-2016固定式压力容器安全技术监察规程[S].北京:中国标准出版社,2016.

[2]全国锅炉压力容器标准化技术委员会.GB/T 150.1~150.4-2024压力容器[S].北京:中国标准出版社,2024.