

物细无声”的育人效果。

一是案例教学法。选取机械行业典型案例，如重大装备研发、企业创新发展历程等，融入思政元素，引导学生感悟内涵，强化情感共鸣；鼓励学生分享身边先进事迹，增强教学针对性与代入感。

二是情境教学法。创设生产一线、工程设计等真实情境，模拟企业工作状态，强化规范操作、团队协作等素养培养；借助VR、数字孪生技术，让学生沉浸式感受机械行业发展成就与工匠精神，提升学习体验。

三是项目驱动教学法。以小型机械装备设计与制造等实际项目为载体，将思政教育融入项目调研、设计、加工、调试全过程，引导学生团队协作、攻坚克难，结合绿色发展理念优化方案，实现专业技能与思政素养同步提升。

四是线上线下融合教学法。线上平台上传大国工匠访谈、行业发展纪录片等资源，开展互动讨论；线下课堂重点讲解思政与专业知识结合点，实现协同育人，借助数字化工具引导学生价值反思，强化育人实效。

### 4.3 加强师资队伍建设，提升思政教学能力

打造兼具专业素养与思政素养的师资队伍，为融合工作提供人才保障。

一是开展系统思政培训。制定培训计划，组织教师参加思政理论培训、专题研讨会，深入研读《高等学校课程思政建设指导纲要》；邀请专家讲座、组织参观优秀企业与红色教育基地，丰富思政素材储备；鼓励教师参与思政类课题研究，提升理论与实践能力<sup>[1]</sup>。

二是加强师资协同协作。建立专业教师与思政课教师常态化沟通机制，成立教学团队，共同挖掘思政元素、设计教学环节，实现优势互补；借鉴专业教师授业、思政教师传道、行业工匠铸魂的三元协同模式，提升协同育人水平。

三是完善教师激励机制。将思政教学成效纳入教师评价、职称评定、评优评先指标，对表现突出的教师给予表彰奖励，加大资源支持，激发教师参与课程思政建设的积极性。

### 4.4 完善评价体系，强化思政教育的导向作用

构建“专业技能+思政素养”综合评价体系，推动融合工作常态化、规范化。

一是建立学生综合评价体系。将思政素养纳入学业与综合素质评价，制定科学标准，采用过程性与终结性评价相结合的方式，课程考核中思政内容占比合理设置，结合学生自评、互评、教师评价、企业评价，确保评价客观公正。

二是完善教师评价体系。优化评价指标，增加思政教学权重，将思政元素挖掘、教学改革、课题研究等纳入教学业绩与科研评价，对思政教学成效显著的教师予以倾斜，发挥评价导向作用。

三是建立课程思政评价机制。定期评价课程思政建设情况，成立评价小组，采用听课评课、问卷调查等方式全面评估，建立反馈机制，持续优化融合路径，避免重技术、轻素养的倾向<sup>[4]</sup>。

### 4.5 搭建实践平台，实现思政教育与实践教学深度融合

以实践为载体，实现“知行合一”，推动思政素养与专业技能同步提升。

一是强化校内实践思政融入。完善实验室、实训中心建设，在实践中强调规范操作、爱护仪器、安全生产；在校内搭建思政实践基地，开展行业精神、大国工匠事迹宣传，营造沉浸式育人氛围。

二是拓展校外实践平台。加强与机械企业、科研院所合作，建立校外实践基地，组织学生进企业实习，邀请企业骨干进校园讲座，利用企业红色工业文化与职业文化资源，培养学生家国情怀与职业素养。

三是开展多样化思政实践活动。举办“大国工匠进校园”、机械行业发展论坛，组织志愿服务、创新创业大赛、红色教育基地参观等活动，让学生在实践中感悟思政内涵，将职业理想与国家需求相结合。

## 5 结语

思政教育融入机械专业教学，是落实立德树人根本任务、提升人才培养质量、推动制造业高质量发展的重要路径。当前仍面临融合意识不足、元素挖掘不深、方法单一、师资薄弱、评价滞后等困境，需高校、教师、企业多方协同发力。

本文结合相关政策要求与行业实践案例，从内容挖掘、方法创新、师资建设、评价完善、平台搭建五个维度探索融合路径，旨在打破“两张皮”现象，实现知识传授、能力培养与价值引领的有机统一。实际教学中，应立足机械专业特点与学生认知规律，持续优化融合方式，强化师资保障，完善评价导向，丰富实践载体，不断提升育人实效。

### 参考文献

- [1] 教育部. 高等学校课程思政建设指导纲要 [EB/OL]. [http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/202006/t20200603\\_462437.html](http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/202006/t20200603_462437.html), 2020-05-28.
- [2] 上海电机学院机械学院. 车间里的“大思政课”：校企协同三元育人，共铸卓越现场工程师 [EB/OL]. <https://jixie.sdju.edu.cn/2026/0324/c2537a148873/page.htm>, 2026-03-24.
- [3] 刘威, 蒋全胜, 朱淑梅, 等. 机械专业课程思政体系与方法探索 [J]. 创新教育研究, 2023, 11 (6): 1295-1299.
- [4] 数字化转型下新工科课程思政的生成逻辑与重构路径 [J]. 中国教育新闻网, 2026-02-09.

# Controlled Installation and Long-Term Leakage Prevention Technology for Flange Fastening Torque in Chemical Equipment Under Extreme Conditions

Panpan Zeng

Zhejiang Industrial Equipment Installation Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310002, China

## Abstract

Flange connections are the most common and sensitive sealing components in the pressure boundary systems of chemical plants, with their installation quality directly impacting equipment safety, zero leakage control, and long-term stable production. Under extreme operating conditions such as high temperature and pressure, severe corrosion, thermal cycling, vibration and impact, as well as frequent start-stop cycles, flange connections are prone to leakage due to preload relaxation, gasket stress relaxation, uneven bolt load distribution, and microscopic damage to sealing surfaces. The study demonstrates that relying solely on empirical tightening cannot meet the sealing requirements for high-risk media applications. Only through integrated design of flange type, gasket performance, bolt material, torque control accuracy, and in-service condition monitoring can the residual sealing capability and lifecycle safety of flange connections be significantly enhanced. This research provides valuable references for the installation, maintenance, and integrity management of chemical plant equipment.

## Keywords

chemical equipment; flange connection; constant torque control; pre tightening force; installation technology

# 极端环境下化工设备法兰定力矩受控安装及长效防泄漏技术

曾盼盼

浙江省工业设备安装集团有限公司, 中国·浙江 杭州 310002

## 摘要

法兰连接是化工装置压力边界体系中最常见且最敏感的密封单元, 其安装质量直接关系设备安全运行、介质零泄漏控制与装置长周期稳定生产。在高温高压、强腐蚀、冷热交变、振动冲击及频繁启停等极端工况下, 法兰连接容易因预紧力衰减、垫片应力松弛、螺栓载荷分布不均和密封面微观损伤而诱发渗漏。文章研究表明, 单纯依赖经验紧固难以满足高风险介质工况的密封要求, 只有将法兰型式、垫片性能、螺栓材料、力矩控制精度和服役期状态监测进行一体化设计, 才能显著提升法兰连接的剩余密封能力与全寿命周期安全水平。相关研究可为化工装置设备安装、检维修及完整性管理提供参考。

## 关键词

化工设备; 法兰连接; 定力矩控制; 预紧力; 安装技术

## 1 引言

在化工生产系统中, 塔器、换热器、反应釜、管道及附属压力容器普遍采用法兰连接实现可拆卸密封。与焊接接头相比, 法兰连接具有便于检修、适应设备拆装和满足工艺切换要求等优势, 但其密封完整性高度依赖螺栓预紧力的形成与保持, 属于典型的受安装工艺和服役环境双重耦合作用影响的薄弱环节。尤其在含硫、含氯、含氢、含酸碱蒸汽等腐蚀性介质环境中, 法兰一旦发生微量泄漏, 不仅会造成物

料损失和环境污染, 还可能引发中毒、燃爆、火灾等次生事故, 因此法兰防泄漏已成为化工企业设备完整性管理的重要内容。

## 2 极端环境下化工设备法兰泄漏形成机理

### 2.1 极端工况对法兰密封系统的耦合作用机制

极端环境下法兰密封失效的本质, 在于密封副可维持的有效比压不断衰减并最终低于介质密封所需的临界接触应力。高温工况会引起螺栓、法兰和垫片热膨胀系数差异放大, 导致原有预紧状态重新分配; 若垫片材料耐温性不足, 则易出现蠕变压缩和回弹性下降, 从而使密封面接触压力持续减弱 [1]。低温工况则会增加材料脆性, 部分非金属垫片出现硬化收缩, 法兰密封面在热冲击中易形成细微间隙。

【作者简介】曾盼盼 (1992-), 男, 中国浙江衢州人, 本科, 工程师, 从事法兰防泄漏技术、化工设备、安装技术、项目工程研究。

对于腐蚀性介质环境，螺栓表面腐蚀、点蚀和应力腐蚀开裂会降低螺纹副承载能力，密封面若遭受介质冲刷和化学侵蚀，其表面粗糙度与平面度亦会恶化。与此同时，压缩机、泵、搅拌设备及管系脉动带来的周期振动，又会促使螺纹副松弛和附加载荷变化，使法兰连接在初始安装合格的情况下仍可能在运行中逐步失稳。因此，极端环境并不是单一强度问题，而是热、力、腐蚀和动态载荷共同作用下的密封保持能力衰减问题。

### 2.2 法兰连接预紧力失控与载荷不均失效机理

法兰密封的核心在于通过螺栓预紧力将垫片压缩到合理范围，使其既能填充密封面微观不平整，又能在服役期间维持足够回弹。若预紧力过低，垫片接触比压不足，介质容易沿法兰面微通道渗透；若预紧力过高，则会造成垫片压溃、法兰翻边变形甚至螺栓进入屈服区，反而降低长期密封能力[2]。更为常见的问题是螺栓法兰连接中各螺栓轴力分布不均，即使总预紧量达到要求，局部区域仍可能形成低压区而成为泄漏起点。实际安装中，螺纹摩擦系数、垫片压缩阻力、法兰端面不平行、螺栓长度偏差和施力顺序不合理，都会使力矩输入与轴力输出之间产生较大离散。法兰连接中常用的力矩—预紧力近似关系可表示为：

$$T=KFd$$

式中， $T$ 为施加力矩， $K$ 为综合力矩系数， $F$ 为螺栓预紧力， $d$ 为螺栓公称直径。该式表明，在公称直径一定时，预紧力不仅与施加力矩有关，更受摩擦状态与接触条件影响。当螺纹润滑状态变化、螺母与垫圈接触面粗糙度不一致时，同一力矩对应的实际轴力会发生明显波动，这也是极端环境法兰更应实施受控安装而不能沿用经验作业的重要原因。

## 3 法兰定力矩受控安装关键技术

### 3.1 安装前状态识别与条件预控技术

定力矩受控安装并不是从上扳手开始，而是从安装前的缺陷识别与边界条件确认开始。首先应对法兰密封面进行全面检查，重点核验平面度、同轴度、表面粗糙度、环槽尺寸及是否存在径向划伤、点蚀坑、压痕和冲击损伤。对于存

在明显机械损伤的密封面，必须先行修复或更换，不能试图依靠增大紧固力矩进行补偿[3]。其次，应检查螺栓、螺母、垫圈规格是否匹配，丝扣完整性是否良好，材料牌号和强度等级是否满足介质与温度要求，同时清理螺纹表面杂质并按工艺要求进行润滑处理，以降低摩擦系数波动。再次，应核对垫片型号、尺寸、材质和压力温度等级，禁止以低等级垫片替代设计要求件。对于长期运行后的再安装法兰，还应重点评估法兰端面残余变形和旧螺栓疲劳损伤，必要时实施报废更换。只有在安装边界条件被控制在合理范围内时，定力矩控制才具备实际意义，否则即便力矩值达标，也难以形成可重复的密封效果。

### 3.2 分级对称紧固与预紧力均布控制技术

法兰螺栓紧固应采用对角交叉、分级加载和循环复核相结合的方式，使垫片压缩过程平稳、均匀并可控。通常可将目标力矩划分为30%、60%、100%三个阶段依次紧固，在达到目标值后再进行环向复检，以消除前期相互影响引起的局部松动[4]。对大直径、高压级和危险介质法兰，宜增加20%~25%的预压阶段和不少于两轮终拧复核，以进一步控制轴力离散。实践表明，若一次性将单个螺栓直接拧至目标值，容易使相邻区域垫片先期受压，导致后续螺栓“达值不达力”，最终形成受力不均[5]。受控安装的关键并不在于是否使用扭矩扳手，而在于是否形成“定值、定序、定轮次、定记录”的标准化过程。为提高预紧力形成质量，可采用垫片比压校核方法对目标轴力进行反推。其基本关系可写为：

$$q = \frac{\sum F_i}{A_g}$$

式中， $q$ 为垫片平均接触比压， $\sum F_i$ 为全部螺栓有效预紧力之和， $A_g$ 为垫片受压有效面积。通过将垫片推荐工作比压与螺栓允许载荷结合，可确定合理的目标力矩区间，避免出现“过紧求稳”或“欠紧防损”的两种极端。对于高参数法兰，还可采用液压拉伸器、智能扭矩扳手或超声轴力检测手段，对关键连接点实施更高精度的载荷控制，以提升安装一致性。

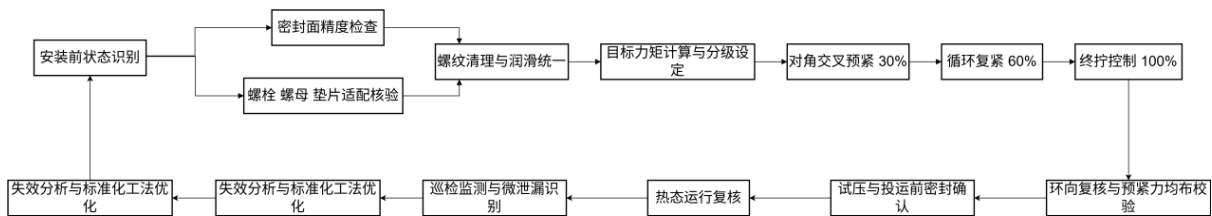


图1 极端环境下化工设备法兰定力矩受控安装与长效防泄漏闭环技术路径

图1表明，极端环境下法兰防泄漏控制并非孤立的安装操作，而是一个贯穿安装准备、力矩施加、运行验证、状态监测和反馈优化的连续过程。其中，目标力矩计算、分级对称紧固及预紧力均布校核是决定初始密封质量的关键环

节，而热态复核、巡检监测和失效反馈则决定法兰连接能否在长周期服役中维持稳定密封性能。通过构建上述闭环路径，可有效降低因预紧力衰减、介质腐蚀和动态载荷扰动导致的法兰迟发性泄漏风险。