法兰密封装配技术分析  
Sealing Assembly Technique Analysis for Flanged Joint

张铁钢

**（**中国石化工程建设有限公司，北京 100101）

摘 要：法兰接头的正确装配是保证法兰接头密封质量的重要措施之一。本文结合《承压范围螺栓法兰接头的装配导则》（ASME PCC-1-2013）标准，就如何保证法兰装配质量从法兰接头安装人员的培训和资质认证、法兰接头安装前准备、螺栓编号、接头紧固、预紧力计算、预紧力控制技术选择、开工再紧和密封检查等多方面提供指导，并建议加快制定我国法兰装配质量控制指导标准以正确规范法兰接头的装配。

关键词：法兰接头 密封 预紧力矩 紧固方法

长期以来石化装置的跑冒滴漏现象长期存在并难以避免，这极大地威胁着人民群众的生命财产安全并带来严重的环境污染。如何实现法兰接头的有效密封以达到保护环境、减少化工装置损耗、维护操作人员和装置安全的目的一直是设计单位和各石化企业管理人员极为重视但又非常头疼的课题。

就法兰密封设计规范而言，目前世界上绝大多数国家的容器标准仍然采用ASME规范。ASME规范中关于法兰密封设计体系分为2部分内容，如图1所示：

|  |  |
| --- | --- |
| ASME规范中法兰密封设计体系 | 第1部分：计算方法 |
| Waters法 （ASME Ⅷ D1 [1]强制性附录2和非强制性附录Y）+法兰刚度校核（ASME Ⅷ D1 强制性附录2 第2-14条）非强制性附录S：对螺栓法兰连接件设计的考虑事项属于法兰强度设计要求 |
| 第2部分：法兰装配质量管理指导性文件 |
| ASME PCC-1《承压范围螺栓法兰接头的装配导则》[2]（纳入ASME Ⅷ D1 强制性附录2 第2-15条管辖范围）注：2000年颁布，并于2010年和2013年两次升版 |

图1 ASME法兰密封设计体系

笔者在《改善法兰接头密封性的对策》[3]文中对ASME法兰密封计算方法及相关改进计算方法进行了介绍。ASME Ⅷ-1附录2所采用的Waters法属于以简单理论分析并带有经验性质的设计方法，为了弥补因法兰刚度不足造成法兰面偏转而导致法兰泄漏的缺陷，ASME对Waters法补充了刚度校核。鉴于法兰装配过程中的人为因素是导致法兰接头泄漏的主要原因之一，ASME配套制定了ASME PCC-1《承压范围螺栓法兰接头的装配导则》来规范法兰紧固程序。整个法兰设计体系各部分相互配合，能够满足法兰接头工程设计的泄漏要求，所以该体系仍为许多国家的压力容器标准所采用或借鉴[4]。目前，在法兰设计方法上，我国GB 150.3-2011《压力容器 第3部分：设计》标准[5]第7章借鉴了ASME规范中法兰强度计算方法，但在与之配套的法兰装配质量管理标准方面仍然存在空白。

**1 ASME PCC-1标准的构架**

ASME PCC-1-2013《承压范围螺栓法兰接头的装配导则》包括16个章节和16个附录。

**1.1 16个章节**

16个章节如下：

1、范围；

2、引言；

3、螺栓法兰接头安装人员的培训和资质认证；

4、法兰和紧固件接触面的清理和检查；

5、法兰接头的找正；

6、垫片的安装；

7、“工作”面的润滑；

8、螺栓的安装；

9、螺栓的编号；

10、螺栓的紧固；

11、紧固顺序；

12、预紧扭矩目标值的计算；

13、接头的耐压试验和泄漏试验；

14、记录；

15、接头的拆卸；

16、参考文献。

**1.2 16个附录**

16个附录包括：

A、法兰接头安装人员的培训和资质认证；

B、常用术语描述；

C、针对不同垫片型式的法兰接触密封面推荐的加工粗糙度；

D、与垫片接触的法兰密封面的允许平面度和缺陷深度准则；

E、法兰接头的找正准则；

F、非传统的紧固顺序/布局；

G、使用专业的螺栓安装服务承包商；

H、螺栓根部和承受拉伸应力的面积；

I、紧固螺栓时组件间相互配合；

J、预紧扭矩目标值的计算；

K、扭矩系数计算；

L、ASME B16.5法兰紧固信息；

M、垫片的使用准则和整体硬化垫片的采购要求；

N、重复使用螺栓的定义、注释和使用准则；

O、螺栓安装应力的确定；

P、法兰接头泄漏的故障检查和排除。

**1.3 ASME PCC-1标准的应用范围**

所描述的螺栓法兰接头的装配导则一般用于带环形垫片的承压法兰接头，接头的环形垫片位于螺栓孔以内，和螺栓分布圆无接触。其他结构的连接接头也可有选择地应用。

**2 安装人员的培训和资质认证**

ASME规范认为法兰接头紧固技师的技能要求和焊工技师的技能要求同等重要，并且必须在质量管理体系中加以规范。我国对特种设备焊接操作人员和无损检测人员均制定了考核细则[6,7]，但对于法兰接头紧固技师的培训和资格考核重视不够，这导致法兰接头紧固操作人员技能参差不齐，严重影响了法兰接头的安装质量，成为导致法兰接头泄漏的主要原因之一。ASME PCC-1附录A要求对法兰接头紧固操作人员进行统一的培训和资质认证，规定了理论知识和实践训练的培训内容以及评定程序，并要求有专职机构承担发证工作。

**3 法兰接头安装前准备**

首先，根据法兰接头的实际工况（比如：操作压力、操作温度、有无动载荷或温度波动、介质对密封性的要求和腐蚀状况等）合理选择法兰、螺栓、螺母及垫片型式及材质，并确认各个组件间的匹配关系。在完成法兰强度设计的基础上再进行法兰接头安装的准备工作。

安装前应对法兰和紧固件接触面进行清理和检查；按ASME PCC-1附录C和附录D提供的原则和要求检查法兰密封面的表面粗糙度、平面度和表面缺陷（法兰密封面划痕、裂纹、擦伤和毛刺），尤其关注径向缺陷。

当处理存在问题或有严格密封要求的设备法兰时，建议检查与垫片接触的两个匹配法兰密封面径向和环向的平面度。

检查螺栓和螺母的螺纹及垫片表面，确保无锈蚀和毛刺；在螺栓和螺母润滑前，用手应能非常容易地将螺母拧到上紧前螺母在螺栓上的正确停留位置，且无卡涩现象。

使用整体加强的平垫有助于保持法兰与螺母或垫片相接触的承压表面光滑平整。

按附录E找正法兰接头（检查两片对应法兰盘的同轴度、平行度、转角错位度和间隙是否符合相应规范要求），不得强力装配；法兰接头装配中所有组件的正确找正是保证法兰装配质量的基本条件。

法兰接头的找正可以保证提供最大的密封面接触面、接头最大的完整性和垫片均匀承载水平，降低螺母和法兰间的摩擦力。在法兰密封面的正确位置上安装新的垫片；确认垫片的尺寸（外径、内径和厚度）及材料符合规定。

垫片应与法兰内径同心，并采取措施保证垫片安装支撑到位，垫片的任何部位不得阻碍流道。不要使用捆扎带径向横跨固定垫片。不要在垫片或法兰密封面上涂抹任何化合物。

对螺栓和螺母间以及螺母和法兰间相互滑动的分界面进行润滑；充分润滑螺母的接触面和上紧螺母所需的螺纹长度范围内的螺栓两端螺纹。

应在螺栓插入法兰螺栓孔后再进行润滑工作以避免固体颗粒沾染造成扭矩损失。应确保润滑剂的化学成分与螺栓/螺母/垫片的材料及工艺流体兼容。确保润滑剂的化学成分不会造成应力腐蚀，电化学腐蚀及有氧自燃。确保润滑剂满足法兰接头所有的温度条件及使用条件要求。避免将润滑剂或未获批准的化合物涂抹到垫片或与垫片相接触的法兰密封面上。

正确安装螺栓/螺柱；检查确认螺栓长度。需要特别指出：长期以来国内安装和设计单位对螺栓长度存在错误认识，认为螺栓应该伸出螺母至少30mm以上，好像这样紧固接头才安全。

ASME规范仅要求螺母的螺纹在全长上应能与螺栓相啮合就可以了。螺栓丝扣伸出长度过长会因腐蚀、涂漆或受损而阻碍接头的拆卸。

为便于接头拆卸，在接头一侧螺栓要拧入螺母全长内（这时螺栓不要伸出螺母），以使所有多出的螺栓丝扣在另一侧伸出螺母。伸出螺母的螺栓丝扣要尽可能短（比如1个或2个丝扣）。如果使用螺栓拉伸器，在对接头使用螺栓拉伸器的螺母侧，螺栓丝扣伸出螺母的长度至少应等于一个螺栓直径。

法兰接头的螺栓长度和立式设备的地脚螺栓的伸出高度完全不同。立式设备的地脚螺栓伸出高度=螺栓座高+垫板厚+螺母厚×2+20~30（mm），因为立式容器基础在进行找平时，使用垫铁来调整立容裙座基础环的水平度然后灌浆，调整过程中垫铁的厚度会抵消一部分地脚螺栓的伸出高度。

**4 法兰接头的紧固**

上紧前先对螺栓进行编号；使用单个上紧头的工具上紧螺栓时，标准中列出两种螺栓编号方法，即：传统编号法和替代编号法。

**4.1 螺栓编号**

传统编号法对每一个螺栓的位置由1开始在法兰上按顺时针方向按顺序编号到N（N为接头上螺栓个数的总数），然后对照表格上紧（比如以12个螺栓为例，按传统交叉紧固顺序上紧：1-7-4-10→2-8-5-11→3-9-6-12，见图2 A）。

替代编号法按参考表格标记每一个螺栓位置，然后按标记序号次序依次上紧螺栓（比如同样以12个螺栓为例，参考表格中螺栓顺时针标记为：1、9、5、3、11、7、2、10、6、4、12、8，上紧顺序为1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12，见图2 B）。

从法兰接头的装配作用上看，两种编号方法是等效的。



a）传统编号法 b）替代编号法

图2 螺栓编号方法图例

**4.2 紧固螺栓**

使用单头工具采用传统交叉紧固方式按编制好的螺栓紧固顺序和确定预紧力，逐步递增力矩上紧螺栓的方法是最常用的传统上紧方法，紧固步骤和加载载荷控制见图3及其说明。

标准附录F也同时提供了3种采用单头工具上紧的替代方法，这些替代方法简化了上紧程序，提高了紧固效率，也能够达到同样的密封效果。

但传统上紧方法仍旧是使用范围最广泛并被实践证明的最有效方法之一。

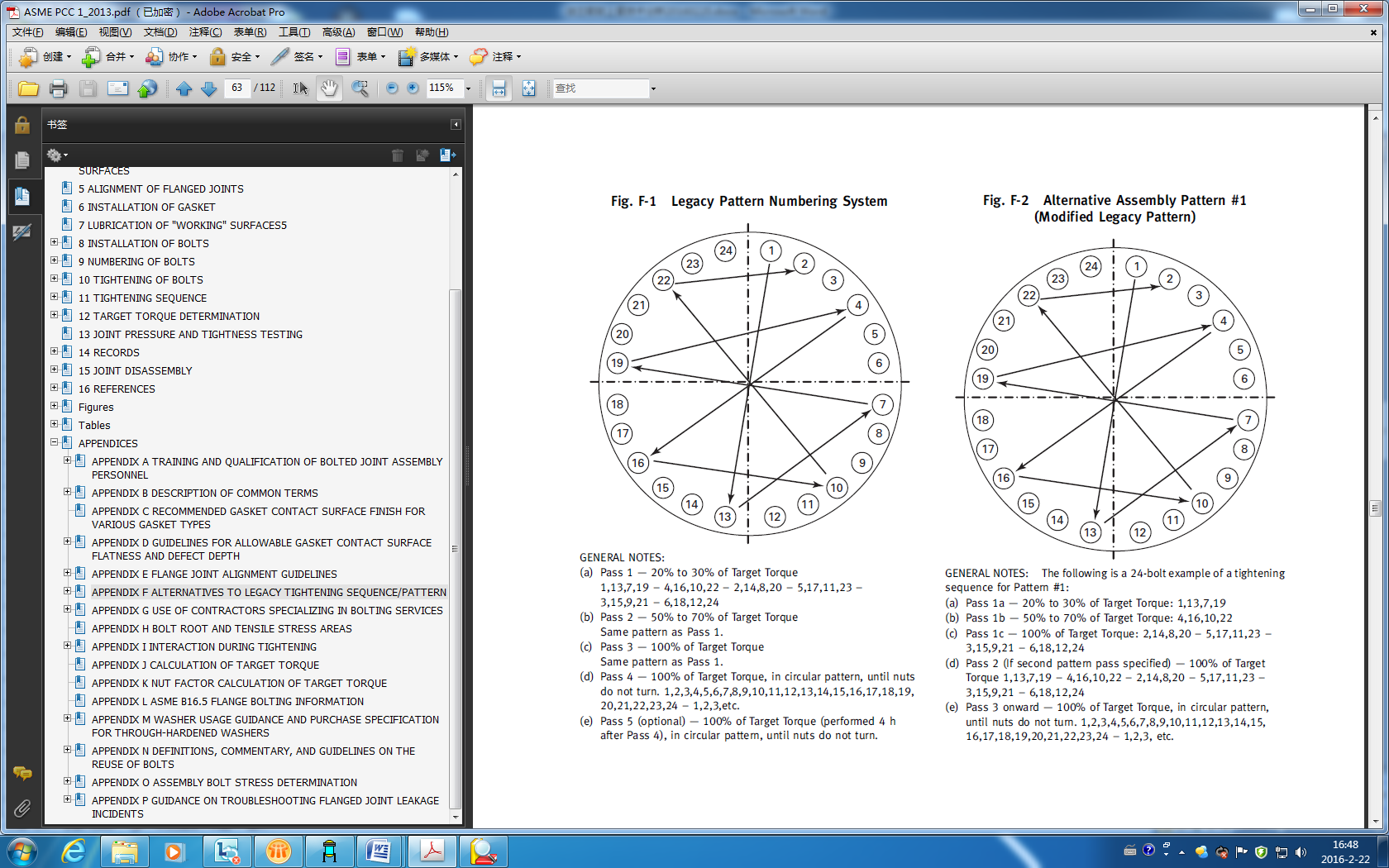


图3 传统螺栓紧固方法(24个螺栓为例)

步骤1—以20%到30%预紧扭矩上紧，螺栓紧固顺序为：1,13,7,19 → 4,16,10,22 → 2,14,8,20 → 5,17,11,23 → 3,15,9,21 → 6,18,12,24；

步骤2—以50%到70%预紧扭矩上紧，螺栓紧固顺序同步骤1；

步骤3—以100%预紧扭矩上紧，螺栓紧固顺序同步骤1；

步骤4—以100%预紧扭矩沿环向圆周上紧（即： 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24—1,2,3,等），直到所有螺母不动为止；

步骤5（可选）—步骤4完成4小时后，以100%预紧扭矩沿环向圆周紧固上紧直到所有螺母不动为止；

对于使用带多个上紧头的工具同时上紧螺栓，标准提供了2种上紧方案。

一是4头工具同时上紧方案，见图4。

二是2头工具同时上紧方案，见图5。

**【在这里插入图片4，并将下方的紫色文本作为注释放在第二行图片的右侧】**

**螺栓组按标记两两相对同时上紧，然后4个上紧头同时转45度再上紧，每次上紧50%，确保法兰面对正并逐步合拢。和传统上紧方式相比，4头工具同时上紧最大程度减少了垫片压缩不均匀现象。**

图4 4个上紧头工具同时上紧方案

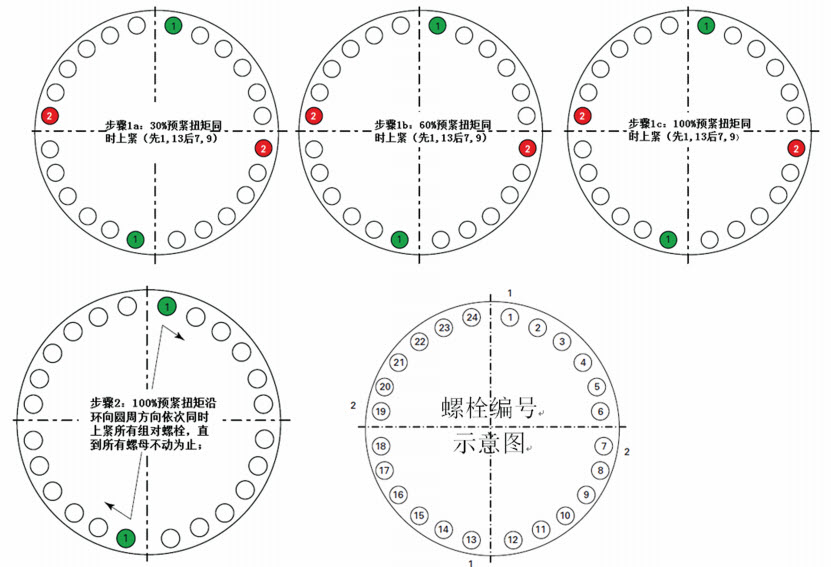


图5 2个上紧头工具同时上紧方案

**4.3 螺栓预紧扭矩值的计算**

如何确定法兰接头的预紧力矩一直是大家关心的问题。

**4.3.1 理论计算公式**

PCC-1附录J和GB/T16823.2[8]均给出了类似的理论计算公式：

【**在此插入一个公式**】 （1）

工程上可简化为：

（2）

注：0.16p——上紧螺栓的扭矩；

——克服螺纹摩擦的扭矩；

——克服支撑面摩擦的扭矩；

附录K进一步简化为：

；(公制单位：N·mm) （3）

其中：

De——螺母支撑面等效直径，mm，（d0+di）/2；

D——螺栓公称直径，mm；

d2——螺纹中径，mm，对公制螺纹d2=d-0.6495p，mm；

di——螺母支撑面内径，mm；

do——螺母支撑面外径，mm；

F——螺栓预紧力（N，lb）； ；

P——螺距，mm；

T——预紧扭矩，N·mm；

β——螺纹牙侧角，度；

μn——支撑面摩擦系数；

μt——螺纹摩擦系数；

As——螺纹公称应力截面积，mm2；

σy——螺栓材料最小屈服强度，N/mm2；

P%——材料屈服强度折算系数（工程上多默认为0.5或50%）；

K——扭矩系数；

K是一个与摩擦系数相关并经试验测定的无量纲常数。常温条件下，对于工业应用的压力容器和管道而言，SA-193低合金螺栓的扭矩系数通常介于0.16到0.23之间。扭矩系数取决于螺栓材料、螺栓直径和装配温度等因素。

由公式的注可以看出螺母既承受法兰支承面带来的摩擦又承受螺栓螺纹的滑动摩擦，紧固扭矩的90%左右被螺纹和支承面摩擦扭矩所消耗。由于无法准确预测法兰接头组件间的表面摩擦系数，加上垫片密封应力难以确定，在广泛范围内综合考虑各种因素来确定扭矩和预紧载荷值而不是简简单单的给定一个预紧载荷值对保证一个接头的密封性能是非常重要的。

**4.3.2 简单法和接头组件法**

附录O基于弹塑性力学确定的公式和法兰组件应力限制条件在保证接头完整性的基础上给出了适宜的螺栓应力的2种确定方法——简单法和接头组件法。2种方法的前提条件是接头的状况（法兰密封面的粗糙度、螺栓间距、法兰刚度、螺栓状况等等）满足限制条件的要求并假定在最初操作阶段垫片可以承受适当的松弛量（>15%）。同时方法没有考虑到疲劳、蠕变、环境引起的法兰或螺栓的机械损伤。

简单法： (4)

(公制) (5)

由公式可知，简单法通过垫片安装应力乘以垫片接触面积再除以螺栓个数得到每一根螺栓的安装应力。它没有考虑到法兰接头各组件的极限承载应力，所以有可能造成法兰接头组件的损坏。

接头组件法在简单法的基础上进一步综合考虑到法兰接头各组件的极限承载能力，给出了螺栓安装预应力的确定办法和算例，确定步骤如下：

第1步： (O-1)

第2步： (O-4)

第3步： -(O-5)

第4步： (O-6)

检查：

第5步： (O-7)

第6步： (O-8)

第7步： (O-9)

第8步： (O-10)

其中：

Ab——螺纹根径截面积，mm2；

Ag——垫片接触面积，[=π/4×(GO.D2- GI.D2)]，mm2；

GO.D——垫片内径，mm；

GI.D——垫片外径，mm；

K——扭矩系数；

nb——螺栓个数；

Pmax——最大设计压力，MPa；

Sya——装配时法兰屈服应力（常温），MPa；

Syo——操作时法兰屈服应力（操作温度），MPa；

Sbmax——螺栓最大承载应力，MPa；通常取常温下螺栓屈服应力的40%～70%；

Sbmin——螺栓最小承载应力，MPa；通常取常温下螺栓屈服应力的20%～40%；

Sbsel——螺栓安装预应力，MPa；

Sfmax——法兰承载许可的最大螺栓应力，MPa；

SgT——垫片装配预应力目标值，MPa；

Sgmax——垫片最大承载应力，MPa；

Sgmin-o——操作时垫片最小承载应力，MPa；

Sgmin-s——安装时垫片最小承载应力，MPa；

Tb——螺栓预紧扭矩，N·mm；

φb——螺栓直径mm；

θfmax——在法兰承载许可的最大螺栓应力（Sfmax）作用下法兰盘偏转角，度；

θgmax——操作温度下垫片最大承载应力作用下法兰盘偏转角，度；

——垫片松弛系数；

针对ASME B16.5/B16.47 A系列法兰，附录O提供了螺栓预紧应力表，见表1。按表中提供的螺栓预紧应力上紧法兰接头，就不用担心因为螺栓、垫片和法兰应力超限而导致法兰接头泄漏的问题。对于其他标准和非标准法兰的螺栓装配载荷，可按附录O提供的计算方法进行计算。

表1 螺栓预紧应力表  
（ASME B16.5/B16.47 A系列标准法兰）  
（法兰材料:SA-105；螺栓:SA-193 B7；垫片:缠绕垫片）

【**在此链接Excel表格**】

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 受螺栓最小承载应力限制 |  | 受螺栓最大承载应力限制 |
|  | 受垫片最小承载应力限制 |  | 受法兰最大承载应力限制 |

**5 预紧控制技术及选择**

用户和法兰接头安装人员应考虑到接头的设计条件（压力、温度等）、机械条件（螺栓直径、法兰直径、垫片类型等）、接头有无泄漏记录及接头密封的介质类别来确定接头的密封应用要求，并充分考虑接头在其应用的环境中的泄漏风险（安全、环境和经济因素）来选择接头的紧固方法和载荷控制技术。选择方法参见表2

**表2 紧固方法和载荷控制技术选择**

密封应用要求,一般密封要求, 中等密封要求,严格密封要求

上紧工具,手工扳手, 电动扳手或液压扳手,拉伸应力测量工具

上紧方法,感觉法,力矩法或拉伸法,拉伸法

载荷控制技术,凭借操作者的感觉及工程实践经验,可测量的扭矩或螺栓拉伸伸长,测量螺栓拉伸伸长/拉伸应力控制技术

载荷控制误差,较大,力矩扳手：约±40%

液压拉伸器：约±25%,±1～10%

介质要求参照ASME B13.3[9],D类介质(非易燃、无毒无害、低压介质),一般介质（除D类和M类介质的其他介质）,M类介质(极度、高度危害危害介质)

压力管道应用参照GB/T20801[10],GC3级,GC2级,GC1级

成本要求,低,中等,高

无论采用何种上紧方法如不校核螺栓的伸长或载荷，螺栓的上紧载荷都会偏差很大。使用液压螺栓拉伸器可以准确控制螺栓的初始轴向加载载荷，但在螺母上紧并撤除液压螺栓拉伸器时会产生上紧载荷转换损失。因此，在严格密封要求的工况下，要使螺栓的上紧载荷达到目标值，接头紧固人员在按推荐紧固程序和紧固工具上紧接头时应通过螺栓拉伸工具附加测量螺栓的拉伸伸长或对螺栓贴应变片方法合理控制螺栓应力，例如：利用超声波伸长测试仪等进行螺栓载荷管理。

**6 螺栓的开工再紧和密封检查**

对于有严格密封要求的法兰接头，在装配完成投用开工后，当接头金属温度达到150 ℃和230 ℃之间或装置开工后24小时后如果法兰接头的温度仍低于150 ℃，可以继续按圆形图案依次顺序拧紧各个螺栓。选择这个温度范围和时间窗口来再紧接头是为了防止垫片松弛，同时避免螺柱上的润滑油蒸发造成润滑损失，从而大大降低按预紧扭矩上紧的准确性。由于接头再紧温度变化改变扭矩系数，有时需要调整施加的上紧扭矩值。

接头的开工再紧应建立在工程风险分析并有安全技术措施的基础上，紧固操作才可以安全进行。装置开工阶段接头的再紧不应视为现场上紧或热紧。现场上紧或热紧是因为装置在操作过程中接头发生泄漏或因维护需要更换接头螺栓所采取的接头重新上紧的后续装配行为，其涵盖在《压力容器和管道修复》（ASME PCC-2-2011）标准[11]的管理范围内。需要指出：现场上紧和热紧按规范要求一定在法兰接头卸压并采取必要的安全防护措施后才能进行。

螺栓连接的接头装配后应进行液压试验测试以确保密封性。对于介质毒性程度为极度、高度危害或者设计上不允许有微量泄漏的法兰接头，还应进行必要泄漏试验。

**6 其他问题**

裸露在外的高温法兰接头不但应该定期检查螺栓的紧固情况，还应配备防雨罩或防护罩，其目的主要是为了防止法兰接头各组件间的温度梯度过大，减小法兰接头组件的温差应力，有助于法兰保持有效密封，同时还可以提供必要的劳动保护，防止操作人员烫伤。

**7 结 语**

对于法兰接头系统而言，泄漏是最主要的失效形式。保证法兰接头的密封性和完整性是法兰各元件（法兰、垫片、螺栓和螺母等）及安装人员的操作等诸多因素共同作用的结果。法兰装配过程质量控制指导性文件对保证法兰接头的装配质量起着极为重要的作用，对保障人民群众生命财产安全具有重要意义，笔者建议加快制定我国法兰装配过程质量控制指导性文件。

**参考文献：**

[1] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, SectionⅧ, Divisional 1[S].

[2] ASME PCC-1—2013 Guideline for Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly[S].

[3] 张铁钢. 改善法兰接头密封性对策[J]. 石油化工设备技术，2014，35(4)：1-6.

[4] 丁伯民，编著. ASME Ⅷ压力容器规范分析[M]. 北京：化学工业出版社，2014.

[5] GB150.3—2011 压力容器 第3部分：设计[S].

[6] TSG Z6002—2010 特种设备焊接操作人员考核细则[S].

[7] TSG Z8001—2013 特种设备无损检测人员考核细则[S].

[8] GB/T 16823.2—1997 螺纹紧固件紧固通则[S].

[9] ASME B31.3—2012 Process Piping [S].

[10] GB/T 20801.1—2006 压力管道规范 工业管道[S].

[11] ASME PCC-2—2011 Repair of Pressure Equipment and Piping[S].