

# 基于正交试验对不同螺栓预紧力 算法的规律分析研究

姜峰, 吴晨辉, 黄鑫

(兰州理工大学 石油化工学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 本文采用正交试验设计方法对标准长颈对焊法兰进行分析, 研究法兰公称直径的  $D_n$ 、设计压力  $p$ 、设计温度  $t$  和密封类型等因素对螺栓预紧力的影响。采用标准平焊法兰 a、标准平焊法兰 b 和标准长颈对焊法兰, 用编制的法兰设计和螺栓预紧力计算软件分别应用 EN1591-1 法和华脱尔斯法(WATERS 法) 计算螺栓预紧力, 分析比较两种方法螺栓预紧力计算结果的差异。本研究旨在研究法兰公称直径  $D_n$ 、设计压力  $p$ 、设计温度  $t$  和密封类型等因素对螺栓预紧力大小的影响, 为实际安装工作中的法兰螺栓提供了一定的理论参考。

**关键词:** 螺栓预紧力; 正交试验; 影响因素; 标准甲型平焊法兰、标准乙型平焊法兰与标准长颈对焊法兰

**中图分类号:** U213.5+2

螺栓法兰连接是一种可拆卸的静态连接结构, 广泛用于压力容器、石油化工设备和管路中。法兰螺栓装配系统的主要缺陷形式是泄漏, 螺栓紧固是确保装配曲面不泄漏的重要环节之一。在螺栓联接中, 螺栓装配时必须拧紧, 也就是说, 螺栓在装配承受工作载荷之前必须承受一个力, 这种预添加的力称为紧固力, 其目的是提高联接器的可靠性和强度, 以避免联接器之间出现裂纹或相对滑动<sup>[1]</sup>。就目前常用的两类螺栓预紧力计算方法分别是: 一类是传统的基于 Taylor-Forge 法的, 以 ASME VIII-1 法兰设计规范中华脱尔斯法(Waters 法) 计算方法为代表<sup>[2-3]</sup>; 另一类是有别于 Taylor 法的欧盟法兰设计方法, 以 EN13445 附录 G—法兰设计另一方法中螺栓预紧力计算方法为代表<sup>[4-5]</sup>。本文利用正交试验<sup>[6]</sup> 来研究并比较两种螺栓预紧力计算方法的差异, 它还研究了法兰公称直径、设计压力、设计温度和垫片类型等因素对螺栓预紧力的影响。

## 1 正交测试设计及其结论

使用正交试验设计方法分析标称压力为 4MPa 的标准长颈对接焊缝法兰, 以研究公称直径、设计温度、设计压力和垫片类型等因素对螺栓预紧力的影响。法兰材料为 16MnII, 螺栓材料为 35CrMoA, 所有垫片均为扁平垫片。试验表选取  $L_9(3^4)$  即公称直径、设计温度、设计压力、垫片种类四个因素, 同时公称直径选取 400mm、1200mm、2000mm 三个水平; 设计温度选取 20℃、150℃、300℃三个水平; 设计压

力选取 2.6MPa、3.0MPa、3.4MPa 三个水平; 垫片类型包括: 非金属垫—无金属内嵌膨胀石墨; 金属垫层—石墨外包和嵌入的软钢; 柔性和卷筒垫层—带支承环的石墨内部涂层。

4 因素水平正交试验 3 采用  $L_9(3^4)$  正交表, 研究各因素对螺栓拧紧力的影响。正交设计试验见表 1。

通过正交试验分析各因素对 EN1591-1 方法螺栓预紧力的影响, 由上表可以看出各因素的重要性依次为:  $D_n > P > T > \text{垫片种类}$ 。进一步可得法兰公称直径对 EN1591-1 方法螺栓预紧力影响最大, 实际上, 随着公称法兰直径的增加, 螺栓数会增加, 螺栓的总预紧力等级也会增加得更快。设计压力对于螺栓预紧力的影响水平与法兰公称直径相差无几, 因而在生产实际中法兰接头螺栓的紧固安装时需要着重考虑其设计压力。

同时, 螺栓刚性预紧力的正交试验设计见表 1, 表 2。

另一方面, 通过正交试验分析各因素对螺栓上预紧力的影响, 由上表结果可知, 各因素的重要性依次为:  $P > D_n > T > \text{垫片种类}$ 。可以看到, 对法兰接头中每个螺栓的预紧力的影响最大的是设计压力。四个因素的影响因素差异较小, 表明这四个因素对螺栓应力的影响更重要。华脱尔斯法(Waters 法) 螺栓预紧力的影响因素的趋势与上述的四个因素的影响规律类似, 因此不再重新说明。

表 1  $L_9(3^4)$ 螺栓夹紧力正交表

Test number	Nominal diameter DN	设计压力 P	设计温度 T	垫片种类	EN 螺栓预紧力(N)
One	1(400mm)	1(2.6 兆帕)	1(20 摄氏度)	1 (non-metal pad)	505754
Two	One	2(3.0 兆帕)	2(150 摄氏度)	2 (metal pad)	686640
Three	One	3(3.4 兆帕)	3(300 摄氏度)	3 (winding pad)	930959
Four	2(1200mm)	1	2	Three	5022512
Five	Two	2	3	One	5333633
Six	Two	3	1	Two	6130254
Seven	3(2000mm)	1	3	Two	12878980
Eight	Three	2	1	Three	13252052
Nine	Three	Three	two	One	15643475
K1j	2123353	18407246	19888060	20968462	
K2j	16486399	19272325	20838227	19695874	
K3j	49512128	26628346	22972286	23046628	
K1j	849341.2	7362898	7955224	8387385	
K2j	6594560	7708930	8335291	7878350	
K3j	16504043	8876114	7657429	7682209	
Rj	15654702	1513217	677862	705175.6	
Importance of influencing factors	DN>P>垫片类型>T				

表 2  $L_9(3^4)$ 正交表

试验号	公称直径 DN	设计压力 P	设计温度 T	垫片种类	EN 螺栓预紧应力(MPa)
One	1(400mm)	1(2.8 兆帕)	1(20 摄氏度)	1 (non-metal pad)	112.152
Two	1	2(3.2 兆帕)	2(150 摄氏度)	2 (metal pad)	152.256
Three	1	3(3.6 兆帕)	3(300 摄氏度)	3 (winding pad)	206.436
Four	2(1200mm)	1	2	3	173.88
Five	2	2	3	1	184.656
Six	2	3	1	2	212.232
Seven	3(2000mm)	1	3	2	159.552
Eight	3	2	1	3	164.172
Nine	3	3	2	1	187.428
K1j	392.37	445.584	488.556	484.236	
K2j	475.65	501.096	513.576	524.052	
K3j	425.97	606.108	550.644	544.5	
K1j	130.79	148.524	162.852	161.412	
K2j	158.55	167.028	171.192	174.684	
K3j	141.99	202.032	183.552	181.5	
Rj	27.76	53.508	20.7	20.088	
Importance of influencing factors	P>DN>T>垫片类型				

## 2 计算法兰算例

使用螺栓预紧力计算软件分别应用 EN1591-1 法和华脱尔斯法计算预紧力, 该软件是根据《NB-T 47020-47027-2012(合集)压力容器法兰、垫片、紧固件》<sup>[7]</sup>选择标准 a 平法兰、标准 b 平法兰和标准长颈对接焊缝法兰而创建的。为了为工程法兰螺栓的实际安装提供一定的理论参考, 比较两种方法的夹紧力计算

表 3 变量表和工况

Variable	value				
Nominal diameter of flange (mm)	480	600	720	840	960
Design pressure (MPa)	0.72	0.84	0.96	1.08	1.2
Design temperature (°C)	60	90	120	150	180
Gasket type	非金属平板垫片				
Gasket material	橡胶垫层; 膨胀聚四氟乙烯垫层				

使用以下控制变量方法研究不同的公称直径、设计压力、设计温度和接头类型对预紧力的影响:

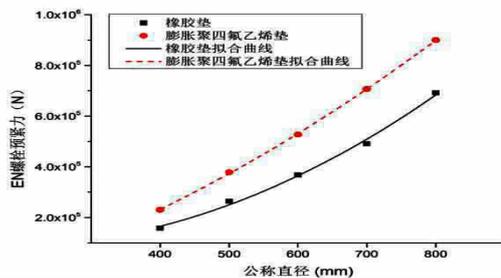
将设计温度调整为 75°C, 设计压力调整为 1.0 MPa, 使用 EN1591-1 方法和华脱尔斯方法计算不同

结果之间的差异, 并分析公称直径、法兰压力和温度以及密封连接类型等因素对螺栓预紧力的影响规律。

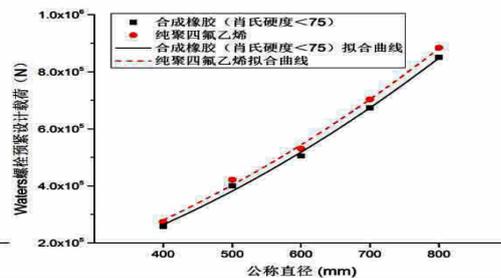
### 2.1 平板焊接法兰甲型

采用不同公称直径(NBT47021—2012)的端对端焊接法兰, 公称压力为 1MPa, 组装不同材料的密封接头, 计算不同工作状态下螺栓的夹紧力, 工作状态和变化值见表 3。法兰和连接材料为 Q345R, 螺栓材料为 #35 钢。

直径标准 a 型平焊法兰装配不同材料垫片连接时螺栓预紧力的结果如图 1 所示, 带有二次多项式拟合  $y=A+Bx+Cx^2$ 。



(a)EN 法螺栓预紧力



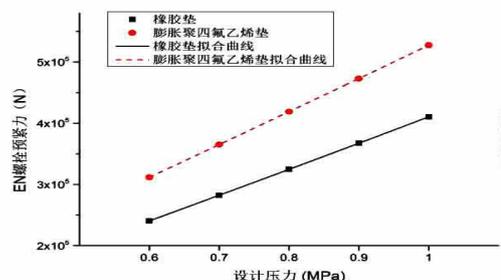
(b)Waters 法螺栓预紧力

图 1 预紧力计算结果

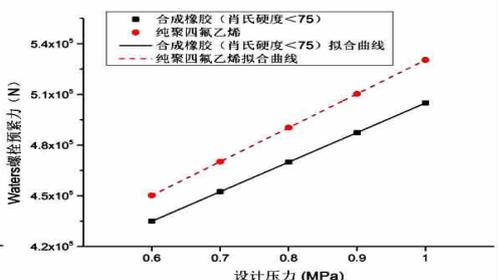
随着法兰公称直径的增大, EN1591-1 方法和华脱尔斯法螺栓预载量不断增加。采用不同的的乙烯垫片时, EN1591-1 方法和华脱尔斯法计算结果相近似; 使用不同的橡胶垫时, 华脱尔斯法预紧结果大于 EN1591-1 方法的预紧结果。由上图可以明显的看出, 垫片类型不同时, EN1591-1 方法计算的值差异比较大, 而对于华脱尔斯法而言, 垫片的类

型对计算结果的影响较小。这是因为对于垫片参数而言, EN1591-1 计算方法比华脱尔斯计算方法要求更加严格, 而且材料的差异可能会产生不同的结果。

将法兰公称直径设置为 600mm, 设计温度为 75°C, 使用 EN1591-1 法和华脱尔斯方法计算在所有设计压力下用不同的材料垫圈装配标准法兰时螺栓预紧力结果, 如图 2 所示。



(a)EN 预紧力



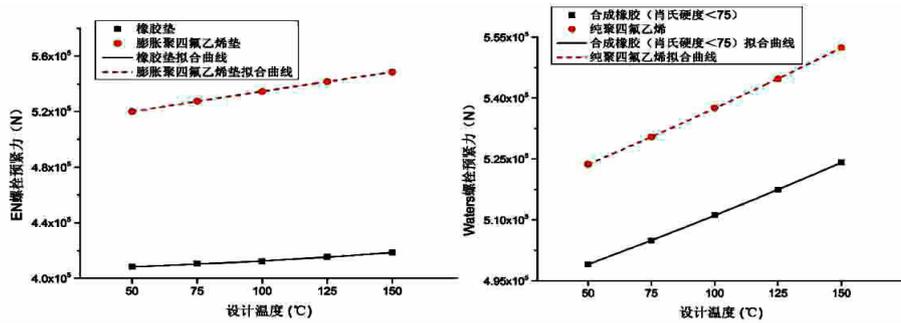
(b)Waters 预紧力

图 2 螺栓预紧力计算结果

随着设计压力的增加,EN1591-1 法和华脱尔  
斯法的螺栓预压力增加,设计压力对这两种方法螺  
栓预压的影响可以完全符合线性公式  $y=a+bx$ 。也就  
是说,则以两种方式计算的螺栓预载与设计压力成  
比例,但必须符合相同的参数,例如工作条件和材  
料。华脱尔斯法预紧力在不同设计压力下的计算结

果均高于 EN1591-1 法计算值。

将法兰公称直径设置为 600mm,设计压力设置  
为 1.0MPa,使用 EN1591-1 方法和华脱尔斯方法计  
算在每种设计温度下使用不同的材料垫圈装配标  
准平板焊接法兰 a 时螺栓预紧力的结果,如图 3 所  
示。



(a)EN 预紧力 (b)Waters 预紧力

图 3 预紧力计算结果

EN1591-1 法与华脱尔斯法螺栓预紧力均随设  
计温度的增加而线性增加,也就是说,两种方法计  
算的螺栓预紧力与处于相同工作状态、材料等下的  
设计温度成正比。并且华脱尔斯方法的计算值略高  
于 EN1591-1 法计算值。

选择标称直径 2.5MPa(NBT47022—2012)以外  
的标准软 b 法兰组装不同类型的密封联接,计算不  
同工作状态下螺栓的预紧力,工作状态和变数值见  
表 4。法兰材料为 16MnII,连接气缸材料为  
16MnR,螺栓材料为 40MnB,密封接头均为平密封  
接头。

2.2 平板焊接法兰乙型

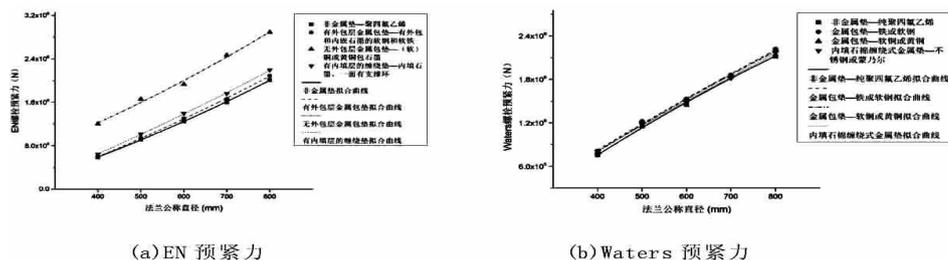
表 4 变量表和工作状况

Variable	Numerical					
Nominal diameter of flange (mm)	400 / 500	600 / 900	700 / 1300	800 / 1600	900 / 2000	
Design pressure (MPa)	1.8 / 2.7	2.0 / 2.9	2.2 / 3.2	2.5 / 3.4	2.7 / 3.6	
Design temperature (°C)	30 / 30	60 / 110	120 / 180	160 / 250	220 / 320	
Gasket type	非金属垫、外包层金属包垫、外包层金属袋垫,无缠绕垫带内填					
Gasket material	聚四氟乙烯:不含金属、软钢和软铁的膨胀石墨,含石墨的外包和嵌入,镀铜(软)或黄铜 石墨具有支承环					

(注:“/”左边为乙型平焊法兰工况及变量数据,“/”右边为长颈对焊法兰工况及变量数据。)

使用控制变量方法研究各种公称直径、设计压  
力、设计温度和垫片类型对预压的影响。设定设计  
温度 200°C,设计压力 2.5MPa,并使用 EN1591-1 方

法和华脱尔斯方法计算直径不同的标准 b 型平焊  
法兰的螺栓预载尺寸,如图 4 所示。



(a)EN 预紧力

(b)Waters 预紧力

图 4 不同 DN 预紧力

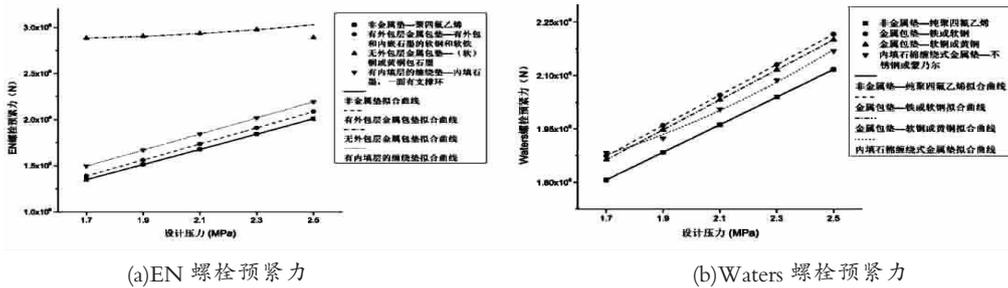
如图所示,随着法兰公称直径的增加,两种方  
法的螺栓预紧力趋于增大,若应用 EN1591-1 方法  
计算螺栓预紧力,无外包层金属包垫相对于其他类

型的垫片而言,计算结果差异较大;密封接头类型  
的差异对于华脱尔斯法螺栓的预紧力影响不大。

将法兰公称直径 800mm、设计温度 200°C,使用

EN1591-1 法和华脱尔斯方法计算螺栓预紧力大小, 当设计法兰乙型装配不同类型的密封联接时,

结果如图 5 所示。



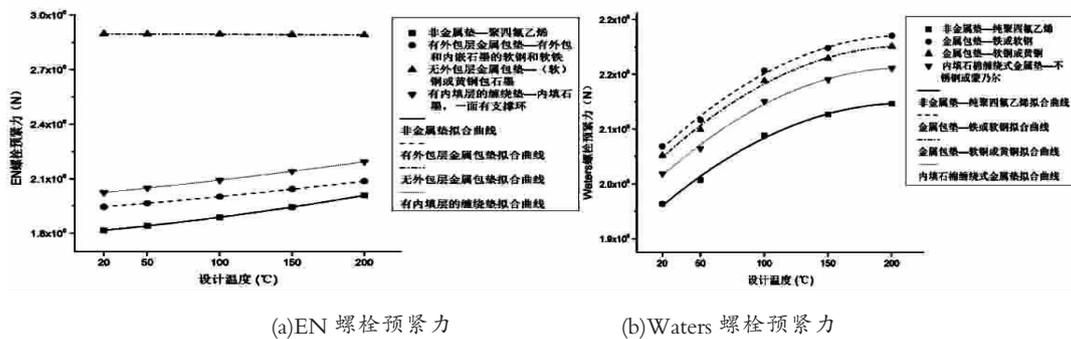
(a)EN 螺栓预紧力 (b)Waters 螺栓预紧力

图 5 不同设计压力螺栓预紧力

由图可知,随着设计压力的增加,用 EN1591-1 方法计算的螺栓预紧力和采用华脱尔斯方法计算的螺栓预紧力也随之增加。对于无外包层金属包垫-(软)铜或黄铜色石墨垫,当采用 EN1591-1 方法计算螺栓的预紧力时,不同的设计压力对预紧力计算值的影响不大,甚至在设计压力为 2.5MPa 时预紧力计算值会发生突变。对于其他的垫片,比如非

金属垫、有外包层金属包垫和有内填层的缠绕垫,预紧力跟设计压力呈线性关系。无论垫片是何种类型,华脱尔斯法螺栓预紧力与设计压力均成线性关系。

创建法兰公称直径 800mm,设计压力 2.5MPa,根据 EN1591-1 方法和华脱尔斯方法,在装配不同类型的密封连接时计算螺栓的预紧力,设计温度标准不同。结果如图 6 所示。



(a)EN 螺栓预紧力 (b)Waters 螺栓预紧力

图 6 不同设计温度螺栓预紧力

由图可知,组装无外层(软)铜或黄铜外壳石墨的金属密封接头时,螺栓的夹紧力是固定值,不会随设计压力的增加而改变,并且比其他密封接头的预紧力值大得多。法兰在装配其他垫片时,两种方法螺栓预紧力均随着设计压力的增加而增大。

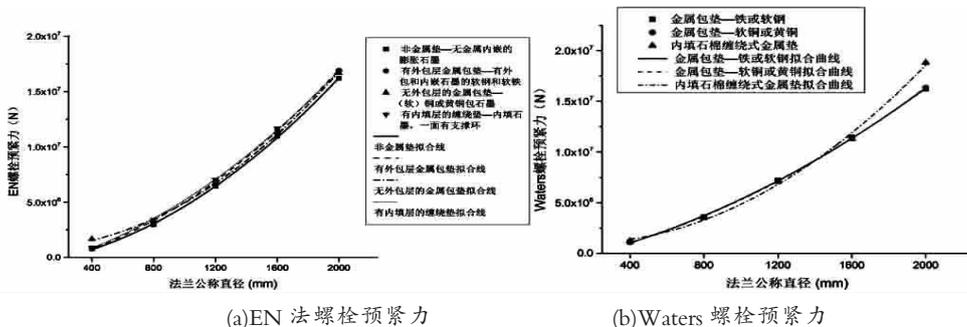
状态和变数值见表 1。法兰材料为 16MnII,连接气缸材料为 16MnR,螺栓材料为 35CrMoA,密封接头均平整。

使用控制变量方法研究各种公称直径、设计压力、设计温度和垫片类型对预压的影响。

2.3 长颈型法兰

设置设计温度为 300°C,设计压力为 3.4MPa 并装配不同类型的垫片时,分别使用 EN1591-1 方法和华脱尔斯方法计算不同公称直径的长颈对焊法兰的预紧力值。结果如图 7 所示。

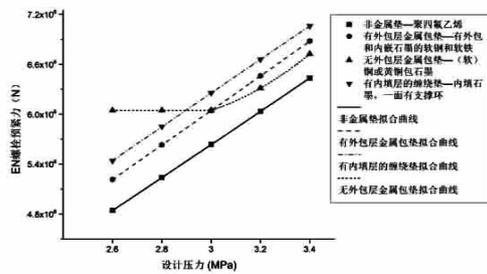
选择标称压力为 4MPa 的标准直径(NBT47023—2012)端对端焊接法兰,组装不同类型的垫圈,计算不同工作状态下螺栓的预紧力,工作



(a)EN 法螺栓预紧力 (b)Waters 螺栓预紧力

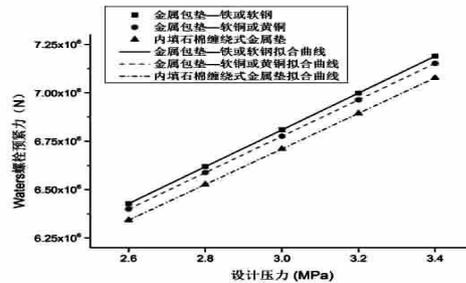
图 7 不同公称直径螺栓预紧力

由图可知,EN1591-1 方法类似于华脱尔斯方法的螺栓预紧变化,随着法兰公称直径的加大而加大。同时可以看出垫片类型对两种方法的螺栓预紧影响不大。EN1591-1 法计算值略低于华脱尔斯预紧力值。



(a)EN 法螺栓预紧力

建立公称直径为 1200mm 的长颈对焊法兰,设计温度为 300℃,使用 EN1591-1 法和华脱尔斯方法计算在不同设计压力下组装不同类型密封联接时螺栓的预紧力大小,结果如图 8 所示:



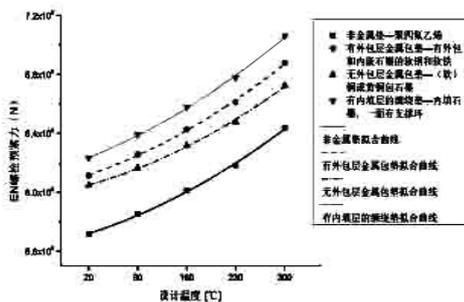
(b)Waters 法螺栓预紧力

图 8 不同设计压力螺栓预紧力

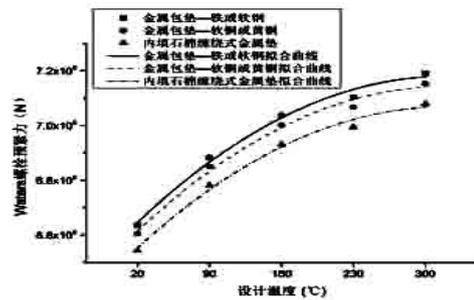
如图所示,随着设计压力的增大,用 EN1591-1 方法计算的螺栓预紧力和用华脱尔斯方法计算的螺栓的预紧力也随之增加。无外包层金属包垫-(软)铜或黄铜包石墨垫片相对于其他的金属或非金属垫以及有内填层的缠绕垫而言,若用 EN1591-1 方法计算的螺栓预紧力时,前者在设计压力小于 3.0MPa 时,设计压力的变化值不会对螺栓预紧力产生影响,当设计压力大于 3.0MPa 时,随着设计压力的增大,螺栓预紧力也在增大。总体而言,不论是

EN1591-1 计算方法还是华脱尔斯计算方法,采用不同的密封垫片,随着设计压力的增大,螺栓的预紧力也呈线性增加,华脱尔斯法计算值要高于 EN1591-1 计算值。

建立公称直径 1200mm 长颈对焊法兰,设计压力 3.4MPa,使用 EN1591-1 方法和华脱尔斯方法计算在不同温度下组装不同类型密封联接时螺栓的预紧力大小。结果如图 9 所示。



(a)EN 法螺栓预紧力



(b) Waters 螺栓预紧力

图 9 不同设计温度螺栓预紧力

由图可知,上面的四垫片螺栓预紧变化趋势与 EN1591-1 方法类似,华脱尔斯方法上面的三垫片螺栓预紧力变化规律基本相同,螺栓预紧载荷随设计温度的升高而增加。华脱尔斯法预紧力值略高于 EN1591-1 法计算值。

力基本上是相对于设计压力线性的。还可以看出,不同类型的密封圈对螺栓预紧力的影响更为明显,对华脱尔斯法螺栓预紧力的影响较小。

### 3 结论

1)法兰公称直径、设计压力、设计温度和垫片类型等元素对螺栓预紧力的影响,可通过正交试验设计方法直观地表示。依据法兰公称直径增加。由于螺栓数的增加,会增加整个螺栓预紧力,因此法兰公称直径对整个螺栓预紧力的影响最大,但设计压力对每个螺栓预紧力的影响高于其他三个因素。

2)比较标准压力贮器法兰 (下转第 5 页)

善。2014 年全县农业水费收入仅为 2300 万元,供水价格只占成本水价的 48%,农业水价改革后,农业水费收入达到 5452 万元,农业供水价格占到成本水价的 76%。通过小型水利工程管理体制改革,将末级渠系工程交给用水者协会管理,落实了管护责任,有效解决了“重建轻管”的问题,提高了小水利工程的管理水平。

## 4 结语

项目试点促进了项目区水价的调整,带动了全县农业供水价格的调整,2015 年县政府以民政发【2015】90 号文件批准,全县农业地表水价格按照一次性核准成本、分步落实到位的原则执行,农业灌溉地表水水价调整为 0.216 元 / m<sup>3</sup>,对不具备计量收费条件的个别村组每亩每年按 60 元计收,基本水费仍按现行标准执行。水价调整后,促进了节约用水,提高了用水户的节水意识,促进了小型农田水利设施的管理,产生了极大的社会意义。但是,也还存在以下问题。

### 4.1 末级渠系配套和计量设施不完善

全县 2520 条 3639km 田间斗渠衬砌了 600 条

.....  
(上接第 49 页)

上的螺栓预紧力计算结果,发现华脱尔斯法螺栓预紧力大于 EN1591-1 法螺栓预紧力值。两种计算方法都可以随着法兰公称直径、设计压力和设计温度的增加而增加螺栓的预紧力。

3)当其他操作条件保持不变时,对于甲型平焊法兰,螺栓预紧力与设计压力和设计温度成正比;对于乙型平焊法兰和长颈对焊法兰,EN1591-1 法螺栓预紧力和华脱尔斯法型螺栓预紧力基本上是相对于设计压力成线性关系。同时,可以看出不同类型的垫片对 EN1591-1 法螺栓预紧力的影响较明显,对华脱尔斯法螺栓预紧力的影响较小。

### 参考文献:

[1] 周坤,刘美红.法兰螺栓连接中螺栓预紧力的计算和控制方法分析[J].新技术新工艺,2010(08):26-28.

1020km,衬砌率 28%,末级渠系防渗衬砌率低,量水、测水设施不健全,精确控制水量还需大量投入,精准分配灌溉水量还需做大量工作。因此配套末级渠系及计量设施还需各级政府加大投入。

### 4.2 农民用水者协会尚需扶持

农民用水者协会还有村干部担任协会领导职务的情况,但分开后一些村干部对农民用水者协会的工作不支持;协会的自我管理能力、服务能力还需要提高;协会干部的报酬还处于隐形状态等问题也有待研究。

### 4.3 分类水价执行难度大

近年来,县委、县政府大力推动农业产业结构调整,鼓励农民种植高附加值经济作物,增加农民收入,但差别水价方案对经济作物实行较高的水价,一定程度上将抑制农民增加收入的渠道,产生消极因素,还需进一步加大粮食作物精准补贴力度,提高种粮积极性。

### 4.4 长期执行精准补贴缺乏资金

按照目前项目区的精准补贴标准在全县实施,每年需补助资金 1000 万元以上。由于我县财政困难,长期实行精准补贴需国家财政支持。

- .....
- [2] ASME Boiler and Pressure Vessel Codes, Section VIII Division I[S].2010.
  - [3] 朱磊,螺栓法兰连接的失效案例分析及有关进展的讨论[J].压力容器,2012,29(2):42-48
  - [4] 王雅.传统与欧盟法兰连接螺栓预紧力计算方法对比研究[D].兰州理工大学,2017.
  - [5] EN 1591-1:2001, Flanges and Their Joint — Design Rules for Gasketed Circular Flange Connections—Part1:Calculation Method[S].
  - [6] 高炳涛,王小三,钟山,等.基于正交设计试验方法的螺栓预紧力矩系数影响因素研究[J].宇航计测技术,2018,38(06):73-77+86.
  - [7] NB-T47020-47027-2012(合集)压力容器法兰、垫片、紧固件.