电厂高压阀门紧固螺栓早期断裂分析及预紧应力的控制

朱美华　张卫兵　张登均　张祖光

（攀枝花钢铁研究院）

本文介绍了河门口发电厂高压机组主汽管道阀门螺栓预紧应力及机组起动升温过程螺栓应力的测定结果，分析了紧固螺栓早期断裂的主要原因是预紧力过大，提出用电子测力板手可较准确地控制螺栓预紧力，防止早期断裂。

河门口发电厂高压机组主汽管道阀门紧固螺栓（M36×4）是用25Cr_2Mo_1V钢经二次常化和高温回火处理后制成的。工作时蒸汽温度540℃，压力为100atm。该机组自投运至1979年(共计约43000h)，其螺栓断裂达19根。在国内，该钢种螺栓于高温下长期使用(40000h以上)产生断裂的现象是普遍的[1]，主要是由于磷在晶界富集而产生沿晶断裂。而河门口电厂螺栓断裂大多运行未达规定工作时间(20000 h)，有的甚至只工作了1000 h左右，它严重危及电厂的安全运行。

该厂使用的高压阀门紧固螺栓的成分、组织及常规力学性能均符合原设计要求[2]。表1列出该螺栓的常规力学性能值。

螺栓的常规力学性能　　表1

温度	设计要求力学性能				实测力学性能			
	$\sigma_{0.2}$ kgf/mm²	σ_b kgf/mm²	δ %	HB	$\sigma_{0.2}$ kgf/mm²	σ_b kgf/mm²	δ %	HB
室温	68～78	79～89	≥16	242～272	69.5～74.5	79.8～87.0	15～16	255～270
540℃					50.0～50.4	54.0～58.0	9～10	

为查找螺栓早期断裂的原因，探讨合理的螺栓紧固工艺，对该机组隔离阀紧固螺栓的预紧应力和机组起动过程螺栓的应力进行了实测。

一、原有紧固工艺下螺栓的预紧应力及机组起动过程螺栓应力的测定结果

1.螺栓预紧应力的测定

原有紧固工艺没有明确规定螺栓的预紧应力，也无法确定和控制螺栓的预紧应力。操作工人习惯于用18—24磅大锤敲击扳手以拧紧螺母，认为打得越紧越好，以保证阀门的气密。

在习惯紧固工艺操作下，对隔离阀的12个紧固螺栓的预紧应力进行了测定。在螺栓腰部靠种入端圆周上均匀布置4片3×5箔式应变片(轴向)，用电阻应变仪(静态及动态)测定螺母各转角时螺栓的轴向应变(ε_1，ε_2，ε_3，ε_4)。测定结果经整理后列于表2(表中$\sigma_{max}=\sigma_P+\sigma_u$)。

螺栓预紧应力测定数据　　表2

螺栓号	螺母各转角时螺栓应力 σ_{max}, kgf/mm²						
	手紧	60°	全部60°	120°	全部120°	打紧	全部打紧
A	0.27	0.18	14.24	28.23	32.00	30.01	46.43
K	3.03	20.46	20.51	58.69	58.69	61.25	屈服
G	0	18.93	16.67	65.46	48.53	屈服	屈服
M	0	17.54	11.65	57.75	40.78	屈服	屈服
F	1.98	37.65	37.63	59.69	53.84	屈服	屈服
E	4.60	22.01	17.31	63.11	54.62	屈服	屈服
B	5.26	25.74	22.47	屈服	屈服	屈服	屈服
J		13.69	16.32	50.00	46.23	57.37	52.22
I		11.63	29.84	屈服	屈服	屈服	屈服
N	13.18	19.10	19.40	41.99	41.97	54.33	48.01
D	1.89	15.93	20.68	48.29	43.90	64.96	屈服
H	未测出	未测出	未测出	未测出	未测出	未测	未测出

σ_p为纯拉伸应力，

$$\sigma_p=\frac{E}{4}(\varepsilon_1+\varepsilon_2+\varepsilon_3+\varepsilon_4)$$

σ_u为弯曲应力，

$$\sigma_u=\frac{E}{2}\sqrt{(\varepsilon_1-\varepsilon_3)^2+(\varepsilon_2-\varepsilon_4)^2}$$

E为弹性模量，对$25Cr_2Mo_1V$钢，$E=2.21\times10^4 kgf/mm^2$。

紧固时，螺栓应变达3000με以后，如继续拧紧螺母，螺栓应变便迅速增加，有的测点应变值猛增到8000με，见图1。这表明螺栓已经发生屈服。在材料试验机上作实物螺栓的弹塑性拉伸曲线，见图2。当拉伸变形达3200με时，螺栓便发生屈服，对应的屈服应力为66.7kgf/mm²。这与螺栓紧固时屈服的应变值是相符的。螺栓一旦发生屈服，就出现现场工人反映的“螺栓越打越松”的现象。

实测结果表明，11个螺栓有8个螺栓产生屈服，占总数73%。其余3个螺栓应力水平也较高(46.43～52.22kgf/mm²)。这说明在习惯紧固工艺下，在预紧状态时，

大部分螺栓已不在纯弹性状态下工作。

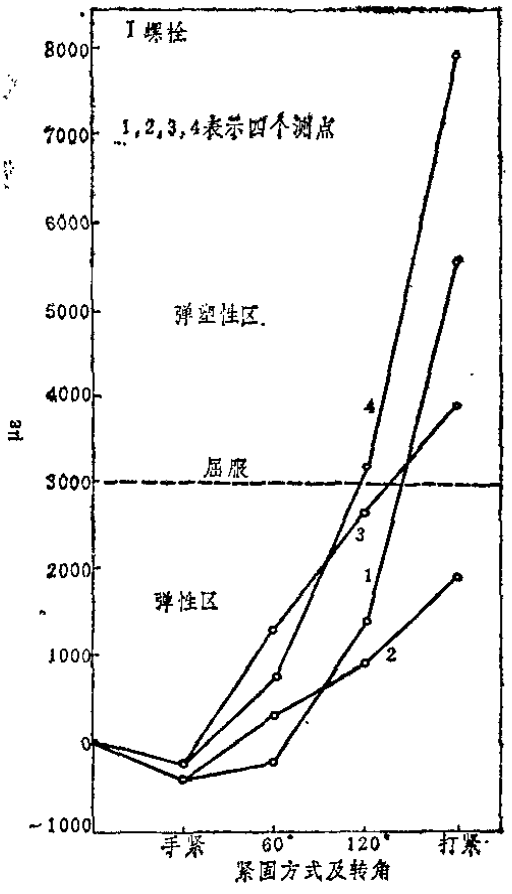


图1 预紧过程螺栓应变的变化

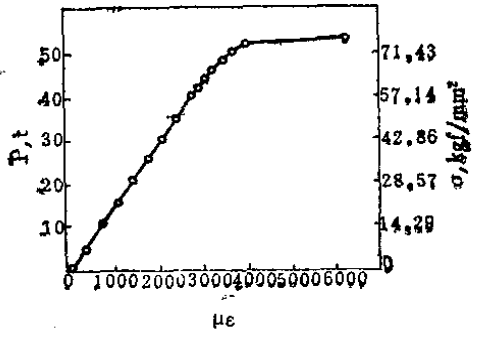


图2 实物螺栓拉伸曲线

2.机组起动过程螺栓的应力测定

机组起动过程中，主汽管道压力逐渐提高到90—100atm，螺栓要承受约5.44 kgf/mm²的工作应力；同时由于主汽温度高达540℃，螺栓阀体、阀盖都会受热膨胀。为了研究螺栓应力的变化以及对断裂的影响，对机组起动过程螺栓应力进行了实测。

测定选用GHP高温应变片（最高使用温度为550℃）。将高温应变片和热电偶焊接到螺栓的腰部，见图3。对整体螺栓在各温度下的系统热输出进行了标定。测定了预紧时和机组起动过程各温度下螺栓的应变，经计算扣除系统热输出，便可得起动过程的螺栓应力，测定结果见图4和表3。

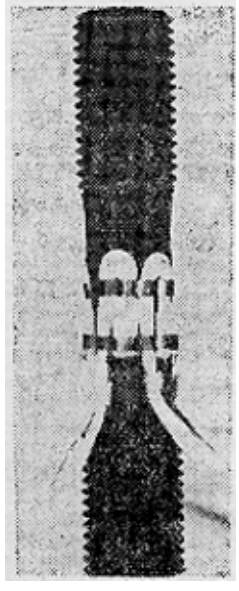


图3 高温应变片在螺栓上的安装

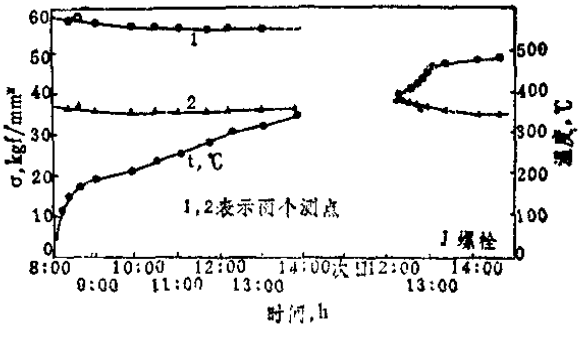


图4 机组起动过程螺栓温度和应力变化

测定时考虑到高温应变片标称应变值为2000με（必要时可使用到3000με），故所测螺栓的预紧力控制在2000με左右，比

预紧时和高温时螺栓的应力　　表3

螺栓号	测点	预紧应力，kgf/mm²	高温时螺栓应力，kgf/mm²（540℃ 92atm）
H	1	42.17	36.25
	2	37.39	28.10
E	2	38.30	33.82
J	1	58.48	屈服
	2	37.17	35.14
G	2	48.40	屈服
D	2	35.03	33.00

习惯预紧力低。

测定结果表明，各螺栓在升温升压过程中应力变化规律是一致的。预紧应力较低的螺栓从室温到高温高压工作状态，其应力下降约2～8 kgf/mm²。应力变化过程与升温升压过程有关。预紧应力较高的螺栓（>48kgf/mm²）在升温升压过程中至某一温度后，测出的应变值很快增加，这表明螺栓发生屈服。这是因为螺栓的屈服极限随温度升高而下降。室温时螺栓$\sigma_{0.2}$=69.5～74.5kgf/mm²，而在540 ℃时$\sigma_{0.2}$=50.0～50.5kgf/mm²。在室温下预紧力较高，未发生屈服的螺栓，在机组起动过程就有可能发生屈服。

二、螺栓早期断裂的分析

在习惯紧固工艺下，大部分螺栓在预紧时已发生屈服，其余螺栓的应力也较高，在机组起动升温过程中这些螺栓也可能发生屈服。就是说大部分螺栓实际上并不工作在纯弹性状态下。螺栓的早期断裂与其塑性变形有直接关系。

塑性变形的金属晶格产生缺陷，形成裂纹源和微裂纹。加上25Cr_2Mo_1V钢对缺口的敏感性较大[3]，在裂纹尖端会产生较大的应力集中，在运行过程中，温度、压力的变化必然造成螺栓应力波动，裂纹源和微裂纹就可能发展成为宏观裂纹，导致螺栓的早期断裂。在拆卸过程中敲击断裂的螺栓的宏观断口上，可清楚看到表面上已有严重锈斑的月牙形旧断口和有金属光泽的新断口，这说明螺栓在最终断裂前已有裂纹存在，并存在着一个形成裂纹和裂纹扩展的过程。

造成螺栓早期断裂的主要原因是预紧力过大。对螺栓预紧应力不加控制，打得越紧越好的紧固工艺是不合理的。

河门口电厂用在螺栓上贴应变片测应力的方法控制其预紧应力。将预紧应力控制在25kgf/mm²水平，经过13400h的运行，未发现泄漏及螺栓断裂现象。可以认为高压机组阀门紧固螺栓的预紧应力控制在25kgf/mm²是可行的。

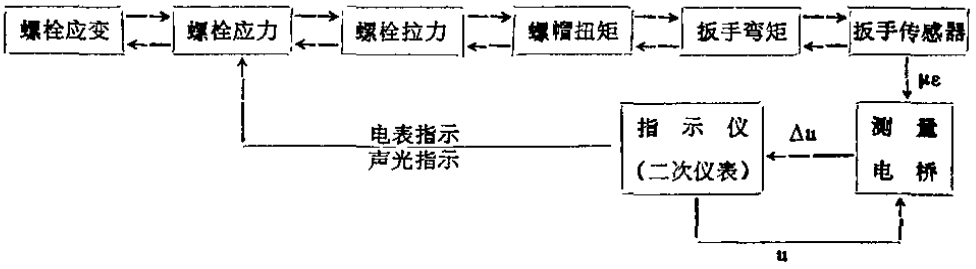
三、螺栓预紧力的控制

将螺栓的预紧力控制在合适的应力水

平可以防止螺栓早期断裂及阀门泄漏，保证机组安全运行。用在螺栓上贴应变片测应力的方法来控制预紧应力，虽然精度高，但操作复杂，不宜在现场使用。有必要研制一种操作简便的专用紧固工具。

大量的实测数据表明，单个螺栓的应力σ与紧固螺栓时扳手某些部位的变形ε有着良好的线性关系。尽管阀体螺栓—扳手系统比较复杂，阀体上12个螺栓情况又不完全一致，互相间还存在着影响，但通过大量数理统计分析，仍可得出扳手应变ε与阀体各螺栓应力间的线性关系表达式 $\varepsilon = a + b\sigma$。因此有可能用扳手的变形来测量螺栓的应力。在此基础上，研制出电子测力扳手，见图5。

电子测力扳手的工作原理如下：



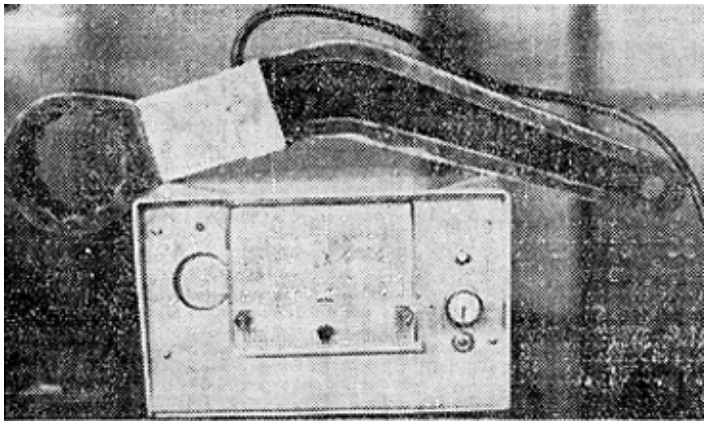


图5 电子测力扳手外观

电子测力扳手由三部分构成：

第一部分是扳手机械部分，它既作为螺栓紧固工具又作为反映螺栓应力的传感器。外形与普通扳手相似，在扳手颈部贴有电阻应变片构成传感器。传感器将能表示螺栓应力的扳手变形变为电信号，通过导线送进指示仪。

第二部分是指示仪，用来指示螺栓应力大小，并在应力达到设定值时发出声光指示。

第三部分是作为省力的专用套筒。

该测力扳手具有以下特点：重量轻，操作方便；扳手分辨率高(<0.25kgf/mm²)；预紧力设定值可在18～32kgf/mm²范围内调整；当设定值在25kgf/mm²时，螺栓应力偏差低于±2.5kgf/mm²。

该扳手经过现场多次使用，效果良好，可较准确控制螺栓预紧应力，以保证机组的安全运行[4,5]。

(下转第34页)

—抗坏血酸溶液15ml，用水稀释到标线摇匀。在721型分光光度计上于波长680nm处测吸光度。

参比溶液：溶样同时带试剂空白，其它同试样。

（三）磷工作曲线的绘制

移取0，1.00，2.00，3.00，4.00，5.00ml磷标液(B)分别置于100ml烧杯中，加入（1＋3）高氯酸5 ml，于低温电热板上加热蒸发直至冒白烟、溶液浓缩至2—3 ml左右取下冷却。用洗瓶洗杯壁，加热溶解盐类，冷却，转入50ml容量瓶中后加硝酸铋5 ml，加水到25ml左右；加钼酸铵5 ml、乙醇—抗坏血酸15ml，用水稀到标线，摇匀。比色的条件完全同试样。磷工作曲线如图7所示。

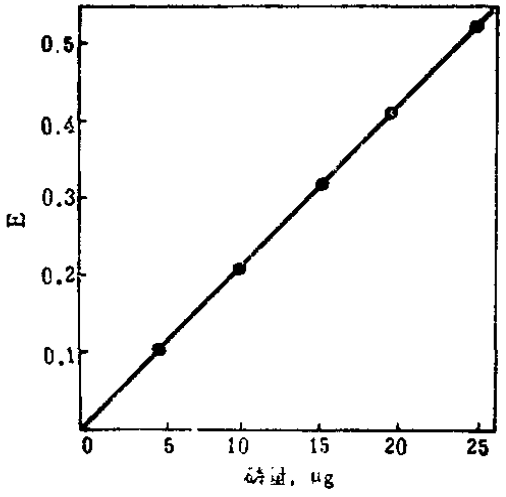


图7　P工作曲线

（四）计算

磷量按下式计算：

$$P\ (\%) = \frac{m_1}{m \times V/100} \times 100$$

式中，m_1——从工作曲线上查得的磷量，g

m——试样重量，g

V——分取试液的毫升数

（五）允许差

磷　量，%	允许差，%
0.0100～0.0300	0.003
0.0300～0.0600	0.004

（上接第29页）

四、结论

1.河门口电厂高压机组阀门紧固螺栓早期断裂的主要原因是预紧力过大，使螺栓发生屈服而造成早期断裂。

2.高压机组阀门紧固螺栓的预紧应力控制在25kgf/mm²是合理的。

3.使用电子测力扳手可将紧固螺栓的预紧应力控制在需要的应力水平。

参考文献

〔1〕曲哲、郭可信，金属学报，4(1980)

〔2〕顾汉新等，25Cr₂Mo₁V钢螺栓断裂分析，1982

〔3〕汽轮机、锅炉、发电机金属材料手册

〔4〕张登均，测力扳手研制报告（内部资料），1984年2月

〔5〕张卫兵，电子测力扳手指示仪研制报告（内部资料），1984年4月