

# 焊接高压气瓶的微裂纹问题是怎么解决的？

大连红旗造船厂焊接高压气瓶微裂纹问题“三结合”攻关小组

在厂党委领导下，我厂工人、干部和技术人员以阶级斗争为纲，坚持党的基本路线，高举**鞍钢宪法**的光辉旗帜，坚持**独立自主、自力更生**的方针，组成了以工人为主体的“三结合”攻关小组来解决焊接结构高压气瓶焊缝近缝区微裂纹的问题。在试验过程中得到了冶金部钢铁研究院、大连工学院等单位的大力协助。在攻关过程中，我们共做了 17 种试验，加工了 650 多个试样，试验次数达 1,200 多次，试验计算数据达 18,000 多个，试验温度从 +80℃ 到 -120℃，经过一年多的时间，终于解决了这个问题。这是无产阶级文化大革命的胜利成果。

1962 年，我厂广大工人、干部和技术人员自行设计和试制成功了焊接结构的高压气瓶。这种气瓶是用低合金中碳钢经卷筒后，采用双面埋弧自动焊接方法制成的。焊接后经正火和调质处理，各种性能均满足了气瓶的技术要求。它的试制成功打破了帝国主义和苏修的封锁，为加强我国经济建设和国防建设做出了应有的贡献。

无产阶级文化大革命以来，气瓶品种从一种增加到九种，生产数量成倍增长，产品质量也一直比较稳定。随着气瓶生产的发展，我们对于气瓶的认识也由浅入深，由片面到更多的方面。由于探伤测试技术的提高，我们发现了过去没有发现的焊接微裂纹。为确定这种微裂纹的存在，对低合金钢做了不同工艺条件下的焊接试验。这种焊接微裂纹非常细小，采用超声波探伤和在金相显微镜下才能观察焊接微裂纹的尺寸大小。通过焊接试验，确定了这种微裂纹是难以消除的，而且是由于母材含硫量过高，在焊接热过程作用下，使其硫化物等低熔点共晶体沿奥氏体晶界重新析出所产生的热裂纹。这就给我们提出了一个新问题：焊接结构多年来的传统验收标准规定是不允许有任何裂纹存在，也不允许使用带有裂纹的焊接结构，使用带有裂纹的工作压力为 200 公斤/厘米<sup>2</sup>的焊接气瓶就更是允许的。已大量生产的带有焊接微裂纹的高压气瓶是否还能应用？焊接微裂纹对气瓶使用寿命的影响如何？这些是我们迫切需要解决的生产实际问题，也是试验研究迫切需要解决的问题。

## 二

在高压气瓶上发现了焊接微裂纹后，从部里领导到我厂党委都非常重视。厂党委决定专门由一名革委会副主任负责解决空气瓶生产的关键问题，并责成技术总支负责组成了以生产气瓶车间的工人为主体的，有领导干部和技术人员参加的“三结合”攻关小组。

在“三结合”攻关小组会上，大家又重温了毛主席“**独立自主、自力更生**”的伟大教导，回顾了我厂广大工人坚持与社会帝国主义做顽强斗争，发愤图强，自行设计制造出争气瓶的两条路线的斗争史。很快提高了阶级斗争和路线斗争觉悟。生产气瓶多年的锅炉车间老工人说：“我们工人阶级能造出争气瓶来，对于气瓶生产中的微裂纹问题，我们也一定有能力强解决好。修正主义卡脖子的苦头我们已经吃够了。困难再大，问题再多，我们工人阶级也要急国家之所急，

造出气瓶,满足国家建设的急需。”工人师傅敢闯敢干的豪迈革命精神,给到会的同志们很大的教育。一场攻气瓶焊接微裂纹关键问题的战斗打响了。

在第一阶段试验中,我们做了常规的焊接试验,对微裂纹存在的情况进行了调查研究。我们分析了焊缝近缝区微裂纹的特征和机理,做了焊接接头的拉伸疲劳试验,用光弹性法测定了焊缝边缘应力集中,从常规试验方法对有焊接微裂纹存在的气瓶安全寿命进行了一定的分析和估价,认为气瓶可以继续生产和发出,但对气瓶的安全使用寿命没有得到定量的回答。

### 三

毛主席教导我们：“在生产斗争和科学实验范围内,人类总是不断发展的,自然界也总是不断发展的,永远不会停止在一个水平上。因此,人类总得不断地总结经验,有所发现,有所发明,有所创造,有所前进。”我们在试验中不断总结经验,向有关单位学习,开展厂内外三结合,进一步明确了只有通过断裂力学试验,才能给出气瓶安全使用寿命的接近定量的科学的回答。

但是,我们“三结合”攻关小组的同志都不是搞力学的,对于断裂力学的理论问题感到陌生,产生了畏难情绪。这时我们又重温了毛主席的伟大教导：“任何新生事物的成长都是要经过艰难曲折的。”我们分析了国内断裂力学发展的有利形势,破除迷信,群策群力,在既无设备又缺少资料的情况下,下定决心,排除万难,开始了断裂力学试验工作。没有设备,就自己动手制作定标仪器;利用应变仪,在一般拉力试验机上做 $P-V$ 曲线;没有资料,我们就虚心向有关单位学习,通过写信等方式来解决疑难问题。

在试验进行中,由于这种低合金钢属于中强高韧性钢,常温下的 $K_{Ic}$ 可达450公斤·毫米 $^{-3/2}$ ,若按E399-72规范要求,试样厚度尺寸难以满足。“唯物辩证法认为外因是变化的条件,内因是变化的根据,外因通过内因而起作用。”我们根据材料塑性随温度而改变的特点,通过动态撕裂(DT)试验,确定了材料在靠近NDT某一温度范围内试件断面总是为平面应变状态,做了低温 $-40^{\circ}\text{C}$ 下的断裂试验。试验装置是自己设计制作的。试验结果,焊缝 $K_{Ic}$ 降至166公斤·毫米 $^{-3/2}$ 。这时17毫米厚的试样尺寸满足了规范要求。常温下 $K_{Ic}$ 的测定是用 $J$ 积分法,采用三点弯曲试样;方法和数据处理是按有关单样品测 $J_{Ic}$ 方法进行的。常温下的 $K_{Ic}$ 的测定,裂纹扩展速度 $da/dN$ 的测定和寿命估计部分是我们同钢铁研究院断裂韧性组协作搞的。

对低合金钢的母材及焊缝在常温和 $-40^{\circ}\text{C}$ 下的断裂韧度和裂纹扩展速度的测定指出,在常温下气瓶符合“断裂前渗漏”的高安全设计要求(即临界裂纹尺寸大于壁厚);在 $-40^{\circ}\text{C}$ 下的临界裂纹尺寸 $a_c = 3.8$ 毫米。给出了含缺陷气瓶的寿命曲线。根据曲线可以得出,0.25毫米深,2毫米长的焊接微裂纹在使用次数不超过20,000次左右时不影响高压气瓶的安全使用。

### 四

“通过实践而发现真理,又通过实践而证实真理和发展真理。”实践是检验真理的标准。实验室进行的焊接接头拉伸疲劳试验,在反映容器真实性方面尚有一定距离。疲劳寿命的计算结果是否与实际情况相符呢?必须通过模拟工作条件下的实物疲劳试验来加以验证。但是,我们没有气瓶实物疲劳试验机。工人师傅坚持自力更生的方针,发扬敢想敢干的革命精神,土法上马。在资料、图纸、设备等条件缺少的情况下,利用废旧材料,因陋就简,利用现有水压机做能源,在最短时间内自行设计制造出采用先进射流技术自动控制的高压气瓶疲劳试验机。制造高压气瓶疲劳试验机的事实生动地说明了群众才是真正的英雄,工人阶级的聪明才智是无

穷无尽的,任何人间奇迹都可以创造出来。实践使我们体会到,技术人员只有在改造客观世界的同时,改造主观世界,解决为什么人的问题,并在“三结合”中紧紧依靠工人阶级,才能更好地发挥作用。

试验所用的两只气瓶是从实际产品中选出来的,除有近缝区微裂纹外,还有不同的折痕、麻点等属于钢板表面的疵病。试验采用乳化液作为介质。试验中,升压、降压和恒压,循环计数等均由射流自动装置控制和记录。

由于第一次做这种试验,没有经验也没有具体的试验要求,我们就根据设计、使用和制造的具体要求,一边试验,一边讨论,一边总结经验,理论与实践相结合,定出具体的试验方案。在试验中除做疲劳试验外,还相应测定了气瓶的不同部位的应力应变情况,采用超声波探伤检查了裂纹随疲劳循环次数增加后的裂纹扩展情况。

试验中的模拟条件主要有载荷形式和循环形式两项。载荷形式,按工作压力换算成设计工作压力以及相应水压试验压力,确定设计压力为 240 公斤/厘米<sup>2</sup>,水压试验压力为 360 公斤/厘米<sup>2</sup>。循环形式分两种,第一只气瓶取工作压力 220 公斤/厘米<sup>2</sup>,连续循环 7,500 次,升压至 410 公斤/厘米<sup>2</sup>,共计循环 8,583 次,气瓶焊边破裂。第二只气瓶按工作压力 240 公斤/厘米<sup>2</sup>循环 3,500 次,再升压至 360 公斤/厘米<sup>2</sup>循环 5 次,这样作为一个检修周期。如此循环共 37,682 次,焊边渗漏。然后对第一只气瓶按 ASME 压力容器规范换算,相当于工作压力承受循环次数约 29,000 次。与第二只气瓶试验结果基本一致,并按断裂力学有关公式计算,使其结果得到了解释。根据第二只气瓶计算结果,寿命可得约 28,000 次,而实际气瓶的寿命  $N$  为 37,660 次,其中包括裂纹由无到有的循环次数  $N_0$ 。可以推测裂纹生成大约需要 10,000 次应力循环,与试验中超声波探伤结果基本一致。从实物疲劳试验结果可以看到与断裂力学试验数据基本相符,焊缝边缘应力集中的作用是降低容器疲劳寿命的主要因素。

在整个实物疲劳试验中,我们“三结合”攻关小组发扬勇敢战斗,不怕牺牲,不怕疲劳和连续作战的作风,经过半个多月的日夜奋战,完成了试验任务。在试验的各个阶段,厂党委副书记,技术总支书记等领导深入现场,亲自主持召开“三结合”攻关小组会议,领导我们顺利进行了实物疲劳试验。

## 五

任何承载结构所具有的优良性能,都必须建立在安全的基础上,若不安全,则材料的任何强度、塑性都将在灾难性的事故中化为乌有。对焊接结构,低应力脆性破坏事故,无例外地都起源于裂纹的快速扩展,因此人们已习惯把裂纹看成是焊接结构最不安全的因素。而实际上,限于现代材料和工艺的水平,特别是大型结构和焊接结构,缺陷和裂纹总是难免的。对于这样的对立矛盾如何统一呢?应用断裂力学试验恰恰解决了这样一个多年来没有解决的问题。这正符合了毛主席的伟大教导:“不破不立。破,就是批判,就是革命。破,就要讲道理,讲道理就是立,破字当头,立也就在其中了。”

应用断裂力学试验方法解决焊接气瓶的裂纹问题的意义在于:

1. 焊接气瓶的裂纹问题是我厂生产上的关键问题之一。由于解决了这样的关键问题,保证了国家建设的急需,为巩固无产阶级专政,与帝修反抢时间、争速度做出了应有的贡献。
2. 多年来焊接结构的脆断问题一直没有得到解决,因此给人们造成了一个对焊接结构不

(下转第 105 页)

体会这项工作也是模型级研究中的一项重要内容。

1975年风机专业九名应届工农兵学员参加了这次试验研究,做了大量的工作,对坚持开门办学,实行教学、生产、科研三结合和工人、工农兵学员、教师三结合,提供了很好的经验。

#### 附录 术语和公式

$b_2$ ——叶轮出口处的叶片宽度,毫米

$C$ ——绝对速度,米/秒

$D_2$ ——叶轮外径,毫米

$h_e$ ——级有效能量头,公斤·米

$$h_e = \frac{m}{m-1} R(T_c - T_i)$$

$h_e^*$ ——叶轮有效滞止能量头,公斤·米

$$h_e^* = \frac{m}{m-1} R(T_c^* - T_i^*)$$

$h_{tot}$ ——级总能量头,公斤·米

$$h_{tot} = \frac{\kappa}{\kappa-1} R(T_c^* - T_i^*)$$

$i$ ——冲角,度,  $i = \beta_{1A} - \beta_1$

$\kappa$ ——气体绝热指数

$m$ ——气体多变指数

$p$ ——压力,公斤/厘米<sup>2</sup>

$T$ ——绝对温度,°K

$Q$ ——容积流量,米<sup>3</sup>/秒

$u$ ——圆周速度,米/秒

$w$ ——相对速度,米/秒

$\beta$ ——相对流动角,度

$r$ ——叶轮进口处预旋角,度

$\eta_h$ ——水力效率(流动效率)

$\eta_{pol}$ ——级多变效率

$$\eta_{pol} = \frac{\lg p_c/p_1}{\frac{\kappa}{\kappa-1} \lg \frac{T_c}{T_1}}$$

$\eta_{pol}^*(imp)$ ——叶轮多变滞止效率

$$\eta_{pol}^*(imp) = \frac{\lg p_c^*/p_1^*}{\frac{\kappa}{\kappa-1} \lg \frac{T_c^*}{T_1^*}}$$

$\varphi_0$ ——流量系数

$$\varphi_0 = \frac{4Q_0}{\pi D_2^2 u_2}$$

$\varphi_{r1}$ —— $\frac{C_{r1}}{u_1}$ ,无量纲流量系数

$\varphi_{r2}$ —— $\frac{C_{r2}}{u_2}$ ,无量纲流量系数

$\varphi_{u1}$ ——进口周速系数

$$\varphi_{u1} = \frac{C_{u1}}{u_1}$$

$\varphi_{u2}$ ——周速系数

$$\varphi_{u2} = \frac{C_{u2}}{u_2} = \frac{i_{tot}}{(1 + \beta_1 + \beta_{d1})} \pm \left(\frac{D_1}{D_2}\right) \frac{C_{u1}}{u_1}$$

$\psi$ ——级能量头系数

$$\psi = h_e / \frac{u_2^2}{g}$$

$\psi_{imp}^*$ ——叶轮能量头系数(以滞止参数计算)

$$\psi_{imp}^* = h_e^* / \frac{u_2^2}{g}$$

上标

0——无预旋

+

——正预旋

-

——负预旋

\*

——滞止参数

下注脚

0——进口截面

1——叶轮叶片进口

2——叶轮出口

$c$ ——级出口

$r$ ——径向分量

$u$ ——圆周方向分量

(上接第 87 页) 可轻易相信的印象。当然随着焊接工艺技术的发展,对焊接结构的认识也逐渐改变,但对焊接结构的要求仍旧很严格。应用断裂力学理论就打破了“焊接结构不允许存在裂纹”的传统旧观念,这也是焊接技术上的一次大进步。

3. 由于应用断裂力学理论来解决生产实际问题,特别对焊接气瓶,可以根据试验结果和产品的要求,既减少不必要的报废,又保证气瓶的安全使用,可以材尽其用,降低成本,加快了气瓶生产的发展,是符合多快好省的原则的。