

机电技术

X射线应力测定部分



1974

席大毅 1976年4月
校阅

第一机械工业部机械研究院机电研究所

目 录

XYL-73型X射线应力测定仪简介.....	X射线应力仪研制小组(1)
X射线测定残余应力的一些例子.....	二室(7)
残余应力对材料及构件疲劳特性的影响.....	三机部第六二一研究所四室(17)
X射线残余应力测定中试样表面处理.....	二室(27)
X射线应力测定法的实际应用.....	二室(37)
X射线应力测定技术交流会.....	二室(43)

XYL-73型X射线应力测定仪简介

残余应力（宏观内应力）对金属构件使用性能的影响已日益为人们所重视。金属构件的残余应力的大小和分布，对构件的疲劳强度、尺寸稳定性、静强度和应力腐蚀性能都有一定的影响。为了寻求提高构件寿命的途径，保证构件的质量，改进加工工艺，测定构件的残余应力，尤其是无损地测定构件的残余应力是十分必要的。

测定残余应力的方法很多，但以往所用的方法均要破坏被测构件。X射线衍射法测定残余应力可以不破坏被测构件，因此逐渐得到应用和发展。就目前而言，X射线法是无损测定残余应力的较好方法。

一机部机械研究院机电所在几年来应用X射线残余应力测定技术的基础上，遵照毛主席“自力更生，奋发图强”的教导，决心立足于国内，研制出我国自己的X射线应力测定仪，以满足科研和生产所急需。1972年在工人和技术人员的密切配合下，吸取了国外同类型仪器的长处，结合我国实际情况，研制了我国第一台YLY-72型X射线应力仪。1973年又在YLY-72型的基础上作了改进，小批试制了XYL-73型X射线应力仪。图1为XYL-73型X射线应力仪的外形照片。

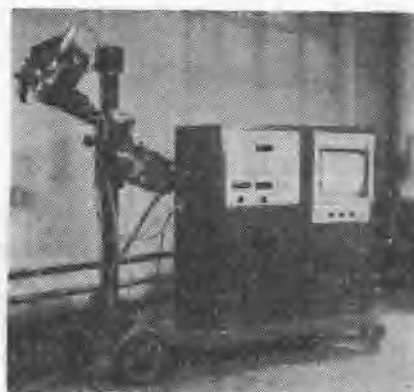


图1 XYL-73型X射线应力仪

一、用 途

XYL-73型X射线应力测定仪适合于车间和试验室使用。它可以无损测定各种金属材料的零部件和大型构件表面的残余应力，并能在较短时间内测出指定点指定方向的应力值。对各种加工工艺（如焊接、铸造、热处理、锻造和冷加工等）在零部件表面所产生的残余应力均可测定。

由于此仪器可在实际构件上进行残余应力的无损测定，因此一般可进行下述几方面的工作：

1. 检查消除残余应力工艺的效果，提供改进工艺的试验依据；
2. 测定焊接构件的残余应力及其分布，研究焊接残余应力对焊接构件性能的影响；
3. 测量承受交变应力的部件的表面残余应力，以作出质量检验，用以研究部件延长寿命的试验；

4. 检验预应力工艺的效果, 如对施用了喷丸强化、液压强化等工艺的部件作残余应力测定;

5. 精密零部件的残余应力测定, 研究防止变形的措施;

6. 其他有关改进加工工艺和设计以及提高产品质量的试验研究工作。

对一些能得到明锐衍射峰的材料, X射线法测定残余应力的精度可以在 ± 2 公斤/毫米²以内, 但对一些衍射峰漫散的材料, 误差就要增大几倍。

二、基本原理

多晶体的金属材料在受到外力作用时就产生应变, 因而晶粒中各晶面间距也随之变化。

当一束波长为 λ 的X射线, 照射到晶面间距为 d 的晶面时, 便能在布喇格角 θ 处产生衍射X射线。 θ 、 λ 和 d 之间满足布喇格方程:

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (1)$$

X射线应力测定就是通过测量衍射角 2θ 的改变而求得晶面间距 d 的变化, 从而换算出金属材料所受的应力。

根据弹性理论, 在金属材料表面的平面应力状态下, 可以推导出表面任一指定方向的应力 σ_ψ 为

$$\sigma_\psi = -\frac{E}{2(1+\nu)} \operatorname{ctg} \theta \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \frac{\partial(2\theta)}{\partial \sin^2 \psi} \quad (2)$$

式中 E 为弹性模量, ν 为泊松比, ψ 为衍射晶面法线与样品表面法线的夹角。由图2可知, $\psi = \psi_0 + \eta$, 此处 ψ_0 是入射线与样品表面法线的夹角, $\eta = 90^\circ - \theta$ 。

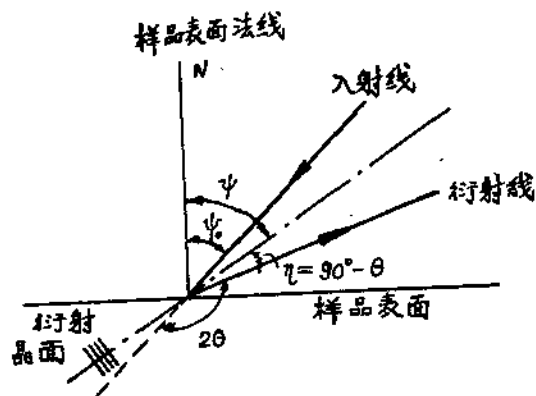


图2 衍射示意图

在实际测量时, 由于选取 ψ_0 角的方法不同而有几种不同的测量方法。

1. $0^\circ - 45^\circ$ 法

这种方法仅选用二个不同入射角 $\psi_0 = 0^\circ$ 和 45° 来测定应力值, 此时公式(2)可以写为:

$$\sigma_\psi = \frac{E}{2(1+\nu)} \cdot \operatorname{ctg} \theta \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \frac{2\theta_1 - 2\theta_2}{\sin^2 \psi_2 - \sin^2 \psi_1} = K \cdot \Delta 2\theta \quad (3)$$

式中 $K = \frac{E}{2(1+\nu)} \cdot \operatorname{ctg} \theta \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \frac{1}{\sin^2 \psi_2 - \sin^2 \psi_1}$ 为应力因数, $\Delta 2\theta = 2\theta_1 - 2\theta_2$, 若 $\Delta 2\theta$

为正则表示拉应力，为负则表示压应力。

2. $\sin^2\psi$ 法

这种方法是选择几个不同的入射角 ψ 。 $\psi = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ ，对应地求出几个 2θ 数值，作出 $2\theta - \sin^2\psi$ 的关系曲线（理论上它应是直线），并求出其斜率 $\frac{\partial(2\theta)}{\partial \sin^2\psi}$ ，再根据公式（2），即可求出应力值。斜率为正是压应力，为负是拉应力。

（2）和（3）式均是根据弹性理论得出的，因而仅适用于各向同性并满足虎克定律的场合。

三、仪器结构

仪器主要有以下四部分：测角仪、测量位置变动机构、记录系统、X射线发生和控制系统。各部分组装于可移动的小车上，便于测量较大的工件。仪器整机如图1所示。仪器工作原理方框图见图3。

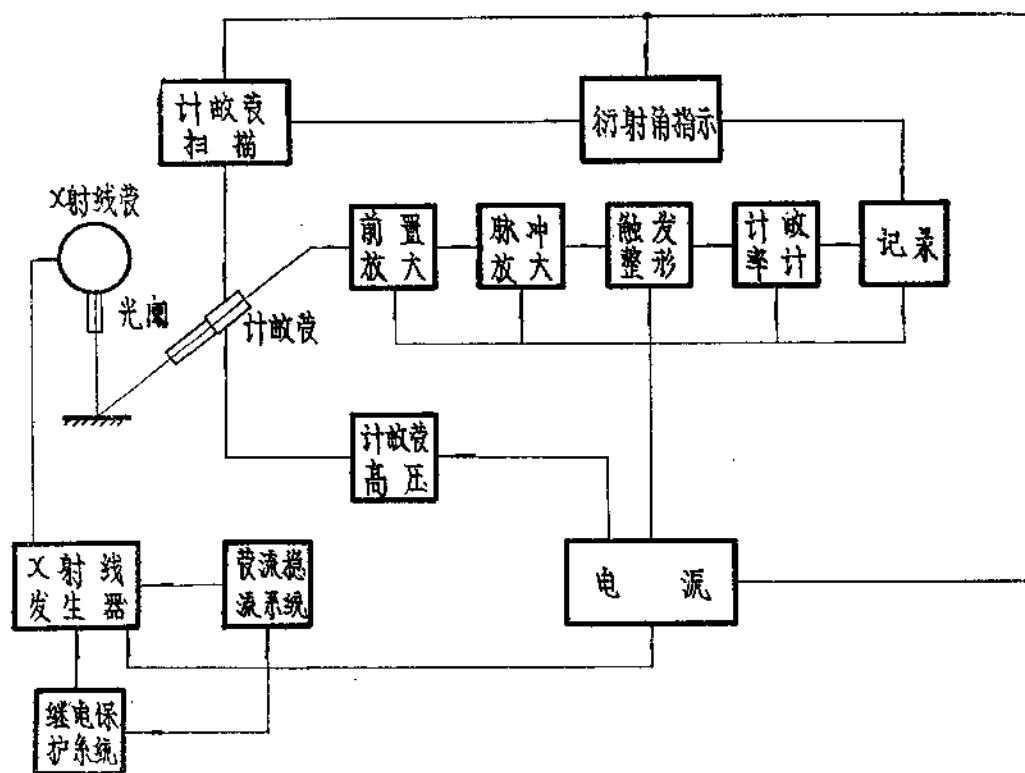


图3 仪器工作原理方框图

1. 测角仪

测角仪包括扫描变速机构、X射线管座、计数管座、光阑和标距杆支座等几部分。

计数管扫描变速机构的电机传动顺序是：扫描电机→减速齿轮→挂轮→离合器接通→正交斜齿轮→蜗杆蜗轮带动计数管和接收光阑在弧形燕尾导轨上运动。计数管和接

收光阑是随蜗轮板沿以测点为圆心的燕尾园弧形导轨运动的,这种结构紧凑、精度较高。

本仪器采用平行光束法。平行光束的优点是测量时对试样的几何位置要求没有聚焦法那么严格,这就便于现场操作。为得到平行光束,在X射线管窗口和计数管接收前均加一平行光阑。光阑隔片用0.05毫米坡莫合金,其二面镀0.001毫米金层,垫片根据不同发散角分别采用0.2、0.35、0.5毫米的黄铜条,对应的发散角分别是 0.29° 、 0.43° 、 0.72° 三种。

计数管的扫描速度的变更是通过变换挂轮达到的,共有五种扫描速度(度/分): $\frac{1}{4}$ 、 $\frac{1}{2}$ 、1、2、4。

2. 测量位置变动机构

此部分的作用是使测角仪可以绕立柱旋转和上下移动,使测角仪倾斜和改变X射线入射角 ψ_0 。它包括横臂滑筒、立柱和升降减速器等。横臂滑筒的作用是安装测角仪,立柱的作用是支持横臂和测角仪。

测角仪上下运动是通过电机带动钢丝绳反吊丝杠螺母的机构来达到的。其优点是:既有长距离行程又便于微调,稳定性较好,但结构较复杂。

3. X射线发生和控制系统

这一部分的主要任务是产生X射线,作为测试能源。它由X射线管、高压连接电缆、高压变压器、X射线管电流调整及稳定装置、继电保护装置等几部分组成。

X射线控制部分原理图见图4。

4. 记录系统

记录系统主要分为探测器、前置放大器、脉冲计数率计、终端记录装置和计数管高压电源等,它的任务是将测试信号记录成曲线,并根据曲线计算应力值。

探测器采用南京华东电子管厂试制的1677型盖革计数管,终端记录装置采用上海自动化仪表二厂生产的XWC—100A型长图自动平衡记录仪。计数率计线路见图5。

四、主要技术特性

仪器各部分的主要技术特性如下:

1. 测角仪

I) 计数管扫描范围(2 θ 角)	$140^\circ \sim 166^\circ$
读数精度	0.01°
扫描速度	$\frac{1}{4}$ 、 $\frac{1}{2}$ 、1、2、4(度/分)并可往返手动
II) 角度指示	每 0.5° 有一标记
III) 光阑发散角	0.29° 、 0.43° 、 0.72° 三套

2. 测量位置变动机构

I) 测角仪上下移动范围	800毫米(87.5毫米/分, 电动)
测角仪仰角	水平位置往上 75°
测角仪俯角	水平位置往下 75°
测角仪旋转	360°
II) 立柱能绕轴旋转	
III) 横臂伸缩可调量	30毫米

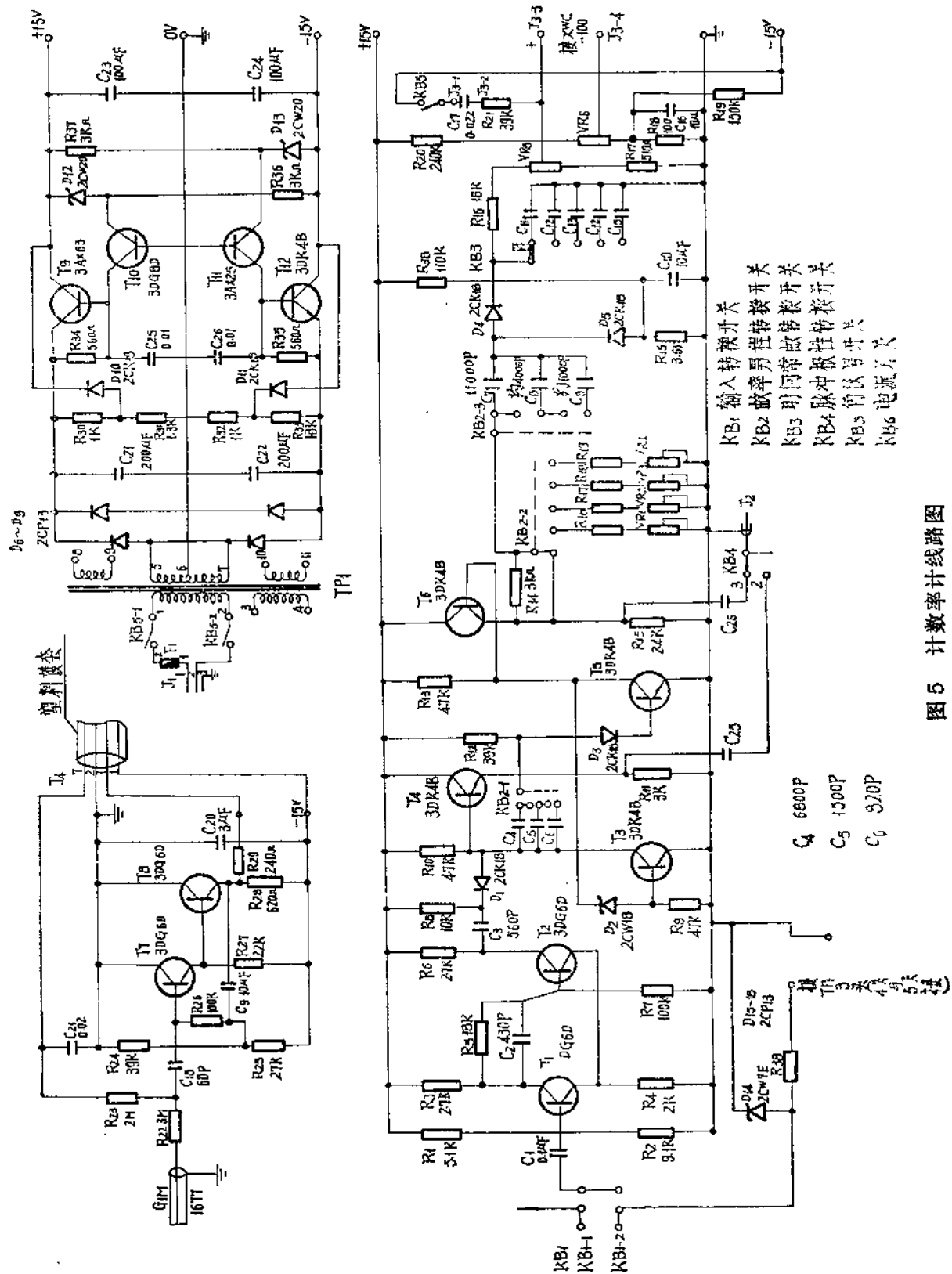


图 5 计数率计线路图

3. X射线发生器

- | | |
|-----------|------------|
| I) 高压 | 0—45仟伏连续可调 |
| II) 电流 | 0—15毫安连续可调 |
| III) 整流方式 | 高压硅堆全波整流 |

4. 记录系统

- | | |
|--------------|-------------------------------|
| I) 计数范围 | 100、200、400、800、1600 (次/秒) 五挡 |
| II) 时间常数 | (1、2、4、8、16) × 2秒五挡 |
| III) 计数管电源电压 | 1050~1500 (伏) 分十挡 |
| IV) 终端记录装置 | 测量范围 10毫伏 |
| | 精确度 ±0.5% |
| | 记录点线 单线 |
| | 全行程时间 2.5秒 |
| | 不灵敏度范围 0.2% |

5. 电源

- 单相交流50周220伏
功率约2瓩

6. 安全保护

- 带连锁装置, 并有过电压、过电流和水流量等安全保护

结 束 语

XYL-73型应力仪也还存在着不少不足的地方, 有待进一步改进和提高。为了进一步满足国内无损测定构件残余应力的需要, 使X射线测定残余应力技术在更多的方面得到应用和推广, 我所将继续研制性能更好的X射线应力测定仪, 我们希望和兄弟单位一起, 为发展这项测试技术而共同作出新的努力。

X射线测定残余应力的一些例子

X射线法测定残余应力是一项新的无损测定技术，我们遵照伟大领袖毛主席“尽量采用先进技术”的教导，从1967年开始，几年来，经过实验研究试制成功了X射线应力测定仪，并对生产和科研中的一些产品和部件进行了残余应力测定，从而使X射线残余应力测定成为提高产品质量和改进工艺研究的一种实用的检测手段。

残余应力系指零部件在加工工艺过程（锻压、铸造、热处理、焊接、冷加工等）后，在没有外力作用的条件下仍然存在于工件中的应力。事实上，任何一个零部件总有残余应力存在，只是由于加工工艺的不同，残余应力的大小和分布有所不同而已。不同的残余应力对零部件的寿命和质量会带来不同的影响。残余应力对零部件性能的影响大致可以分为四种^[1]：1）疲劳强度；2）抗腐蚀性能；3）尺寸稳定性；4）静强度。下面是我们根据一些单位的要求，实际测定了的一些零部件和结构件残余应力的例子。

一、压力容器焊接残余应力测定

在石油、化工、炼钢等工程中都要使用压力容器，摸清压力容器的焊接残余应力的大小和分布规律以及它对使用的影响，是十分重要的。我们先后测定了液氮贮罐、氧气球、氮气球和液化石油气贮气球等压力容器外壁的焊接残余应力。

1. 液氮贮罐

液氮贮罐长12米，直径2.6米，材质为16MnCu，板厚22毫米。它是供某化肥厂中使用的圆筒形压力容器，承受工作压力为20公斤/厘米²。实际测量时测定了封头的环焊缝和纵焊缝及筒体环焊缝和T型接头处各一个部位的焊接应力，同时还测定了筒体纵焊缝的一个部位在水压试验前和打压5、10、20、30公斤/厘米²及水压试验后卸压至0公斤/厘米²时的应力。测定工作是同北京金属结构厂共同进行的。

测量条件为：CrK α 、30千伏、6毫安；测量（211）面，计数管扫描速度为 $\frac{1}{4}$ 度/分；记录纸速度为300毫米/小时；时间常数8秒；计数范围800次/秒。

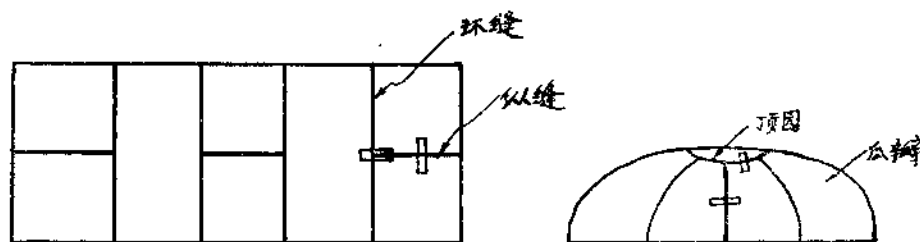


图1 液氮贮罐测量位置示意图

图1是测量位置示意图。图2和图3是封头环焊缝和纵焊缝的应力分布曲线。图4是筒体T型接头环焊缝周向应力和水压试验后同一位置的应力分布曲线。

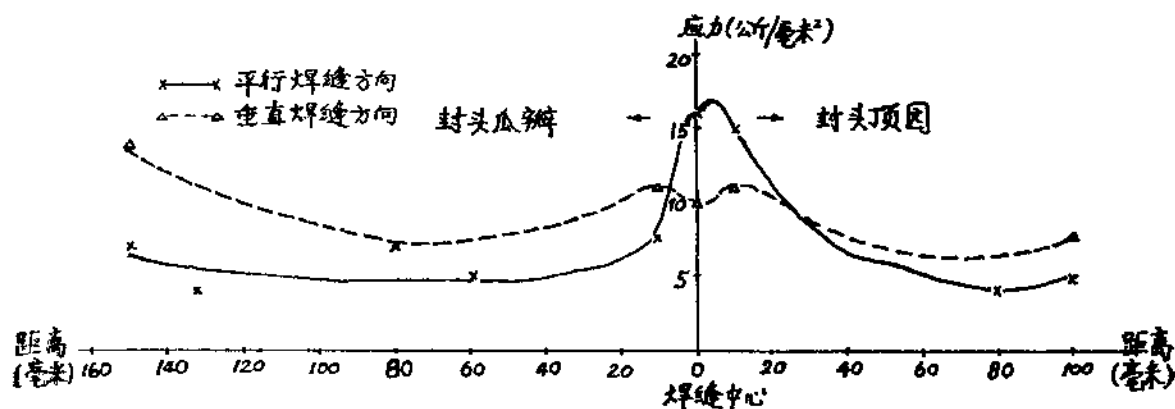


图2 液氮贮罐封头环焊缝应力分布

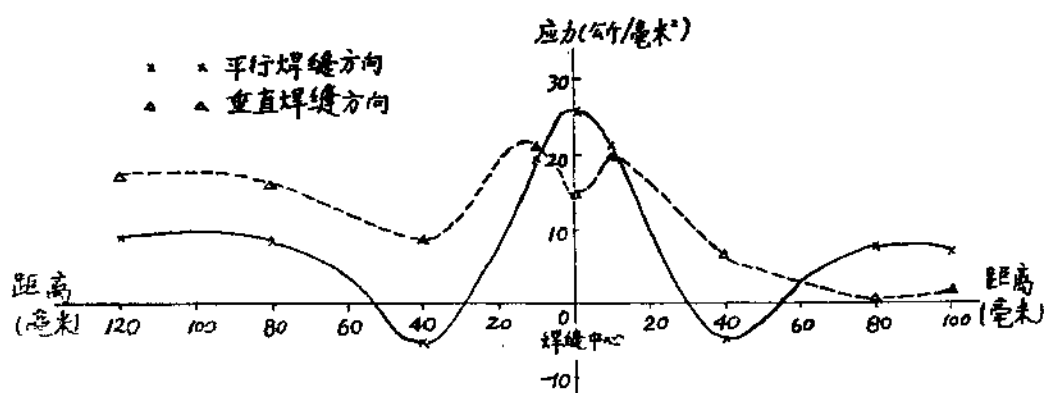


图3 液氮贮罐封头纵焊缝应力分布

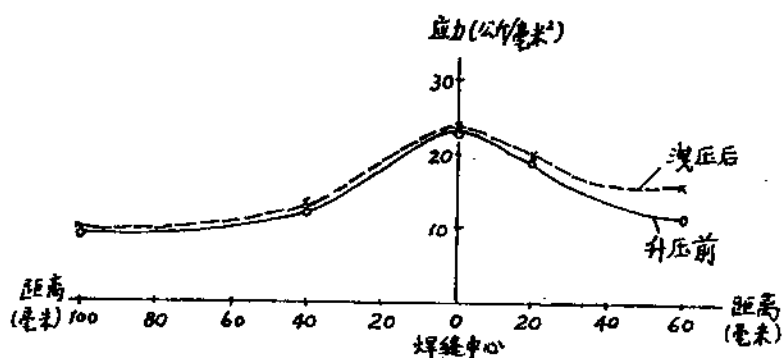


图4 液氮贮罐筒体T型接头处环焊缝水压试验前后周向应力分布

2. 氧气球

用于太原钢铁公司氧气站的氧气球，直径9米，容积380立方米，材质是15MnV，壁厚38毫米，工作压力为30公斤/厘米²。其外形如图5所示。为了给容器安全使用提供参考数

据，我们与十三冶结构厂一起，测定了球形容器下部环焊缝、纵焊缝和T型接头处各一个部位的焊接残余应力，同时测定了纵焊缝的一个部位在水压试验压力为0、20、30公斤/厘米²时的应力及卸压后的应力。测量部位示于图6。



图5 氧气球外形

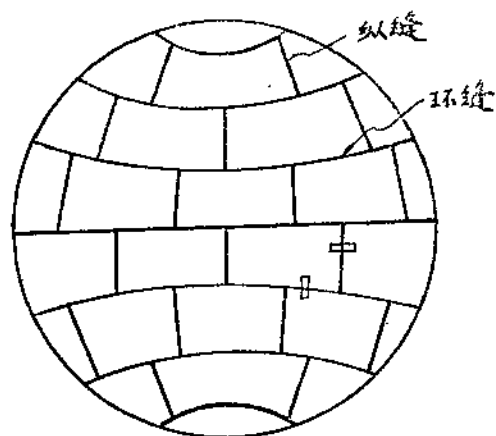


图6 测量部位图

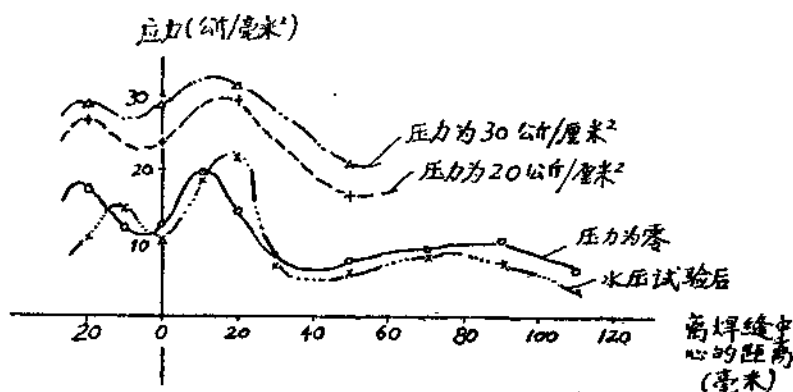
测量条件是：CrK α 、30千伏、6毫安；测量(211)面，计数管扫描速度为 $\frac{1}{4}$ 度/分，记录纸速度为300毫米/小时；时间常数8秒；计数范围800次/秒。

图7是氧气球纵焊缝部位的平行焊缝方向的应力分布曲线及在水压试验时压力为20和30公斤/厘米²的应力分布曲线。此测量部位的焊缝，内侧为手工焊接，外侧为自动焊接。

3. 液化石油气球罐

液化石油气球罐系2348工程贮存液化石油气用，工作压力为16公斤/厘米²，直径为12.3米，壁厚34毫米，容积1000立方米，材质为15MnVR，焊缝用结552-钼焊条手工焊成。实

实际测量时，测定了四个典型部位的焊接应力分布。这四个部位是：组装纵焊缝、预制纵焊缝、上组装环焊缝、组装环焊缝与组装纵焊缝的十字接头处，测量部位如图8所示。同时还测定了组装纵焊缝部位在水压试验时压力为5、10和13公斤/厘米²时的应力，测定工作是与3603工厂共同进行的。



板材：15MnV，板厚：38毫米，直径9米

压力：30公斤/厘米²，工作介质：氧

图7 氮气球纵缝平行焊缝方向应力分布曲线

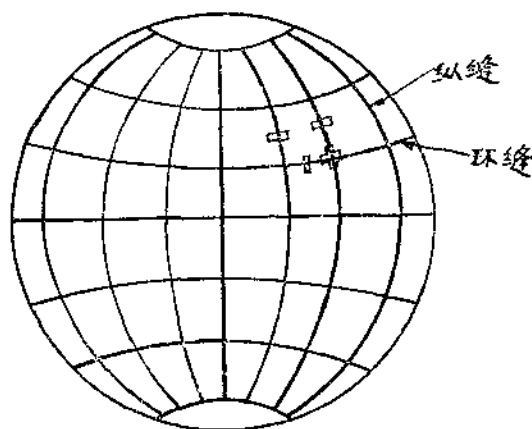


图8 液化石油气球罐测量部位

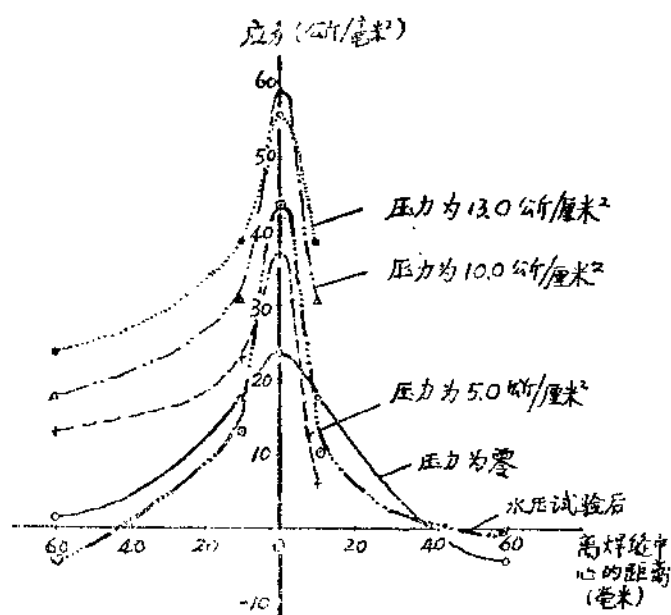
测量条件为：CrK α 、30 仟伏、5 毫安；测量(211)面；计数管扫描速度1°/分，记录纸速度1200毫米/小时；计数范围600次/秒；时间常数8秒。

图9是液化石油气贮罐组装纵缝平行焊缝方向的焊接应力分布曲线和打水压过程中及卸压后的应力分布曲线。

另外，我们还测定了太钢氧气站的氮气贮气球和其他一些压力容器。从这些测定中，我们可以初步看到以下一些情况：

(1) 焊接残余应力的大小和分布规律 从上述测定例子中可以看出，球形容器的纵焊缝平行焊缝方向的焊接应力均比较大，一般在20~30公斤/毫米²范围内，到母材两边则逐渐减少。这种分布规律与典型的焊接应力分布大致相近^[2]。

(2) 容器压力在壁上所产生的应力与残余应力的迭加 水压试验时，压力在容器壁上



板材: 15MnV, 板厚34毫米, 直径12.3米, 压力16公斤/厘米²

图9 液化石油气贮罐组装纵缝平行焊缝方向应力分布曲线

所产生的应力与焊接残余应力呈线性迭加的关系, 可以从图7和图9中看出。圆筒形容器当压力为P公斤/厘米²时, 在容器壁上产生的周向应力为:

$$\sigma = \frac{P \cdot d}{2t} \quad (1)$$

式中d为筒体直径, t为壁厚。球形容器当压力为P时, 在容器壁上产生的应力为:

$$\sigma = \frac{P \cdot d}{4t} \quad (2)$$

式中d为球体直径, t为壁厚。

液氨贮罐筒体T型接头焊缝中心点, 根据(1)式计算出不同压力时的周向应力和用X射线法实测的焊接残余应力及迭加应力均列于表1。

表1 液氨贮罐实测应力

水 压 (公斤/厘米 ²)	0	5	10	20	30
水压时所产生的应力 (公斤/毫米 ²)	0	3.0	6.0	12.0	18.0
X射线法测得的应力 (公斤/毫米 ²)	23.6	26.6	26.6	30.1	37.1

氧气球纵缝焊缝中心处, 根据(2)式计算出的不同压力时的应力和实测的平行焊缝方向的应力列于表2。

液化石油气贮气球组装纵缝离焊缝中心10毫米处, 根据(2)式计算不同压力时应力和

实测的平行焊缝方向的应力列于表3。

从表1-3看出,水压试验时测得的容器壁上的应力大致等于焊接残余应力(即水压为0时X射线法测得的应力)与水压在容器壁上所产生的应力之和。

表2 氧气球实测应力

水 压 (公斤/厘米 ²)	0	20	30
水压时所产生的应力 (公斤/毫米 ²)	0	12.0	18.0
X射线法测得的应力 (公斤/毫米 ²)	12.4	23.3	28.7

表3 液化石油气贮气罐实测应力

水 压 (公斤/厘米 ²)	0	5	10	13
水压时所产生的应力 (公斤/毫米 ²)	0	4.5	9.1	11.7
X射线法实测的应力 (公斤/毫米 ²)	17.8	22.1	30.1	38.7

(3) 水压试验后残余应力分布的变化 图4和图7中水压试验前和水压试验后的焊接残余应力分布基本没有改变,这说明在这个部位水压试验时的应力迭加并未超过材料的屈服极限,水压去除后,回复到水压试验前的状态。而图9中水压试验后的应力分布与水压试验前的分布有所不同,这可能是在此部位水压试验过程中已有部分塑性变形,导致应力分布的改变。

(4) 十字接头与T型接头焊接应力的大小 从所测量的情况来看,焊接构件的十字接头和T型接头处,焊缝中心的焊接应力并不见得比纵焊缝和环焊缝的要大。图4中T型接头焊缝中心的周向应力为23.6公斤/毫米²,与封头纵焊缝的应力相差不多。图10是液化石油气贮罐十字接头处垂直于纵焊缝方向的焊接应力分布曲线,从其应力数值看,比组装纵焊缝平行焊缝方向的应力要小。

这些情况仅是我们测定的初步结果,还不足以说明焊接应力对压力容器使用性能的影响,要弄清这一点,还有待做很多深入细致的研究工作,以便确定容器安全使用的焊接应力极限和消除应力的工艺规范。至于焊接残余应力对低温压力容器使用性能的影响和在脆性破坏中的作用问题,有待今后作更深入的研究。

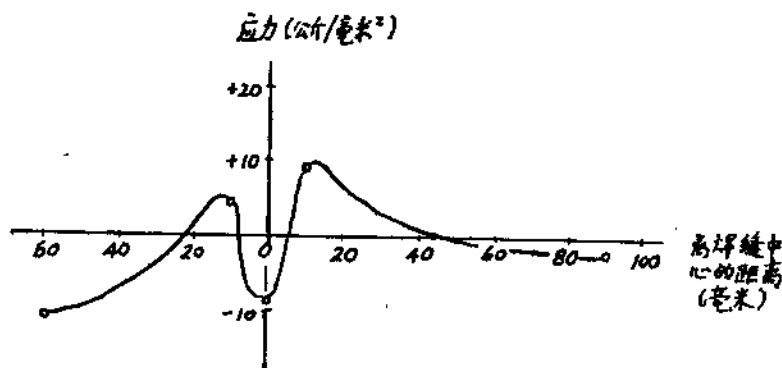


图10 液化石油气贮罐十字接头处垂直于纵焊缝方向的焊接应力分布曲线

二、精密构件和零件残余应力测定

1. 不锈钢封头

某工程所用的不锈钢大型真空容器，上部封头装有精密光学观测系统。封头系用22毫米厚的不锈钢板拼焊而成，直径为7米。由于有较大的焊接残余应力存在，使用过程中焊接应力的释放会导致封头变形，从而影响光学观测系统的精度。为此需确定焊接残余应力的存在，从而确定消除应力的工艺。

测量条件为：CrK β 、30千伏、6毫安；测量(311)面；计数管扫描速度1°/分，记录纸速度1200毫米/小时；时间常数8秒；计数范围600次/秒。

对高温退火和火焰烘烤处的试样测定结果表明，高温退火消除应力的效果较好，火焰烘烤消除应力的效果亦好，但尚不及高温退火。图11是高温退火消除应力的试板平行焊缝方向的焊接应力分布。图12是同样试板火焰烘烤前后平行焊缝方向焊接应力分布曲线。火焰烘烤

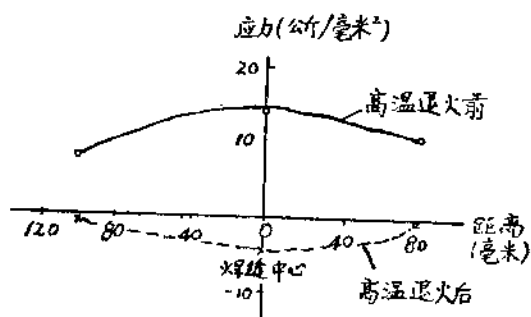


图11 试板焊缝高温退火前后平行焊缝方向应力分布

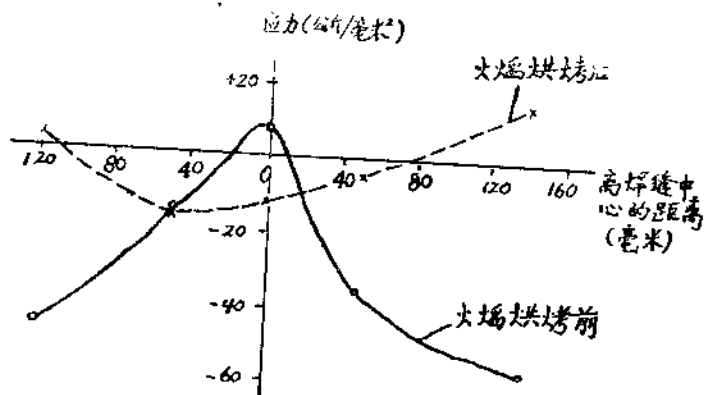


图12 试板焊缝火焰烘烤前后平行焊缝方向应力分布

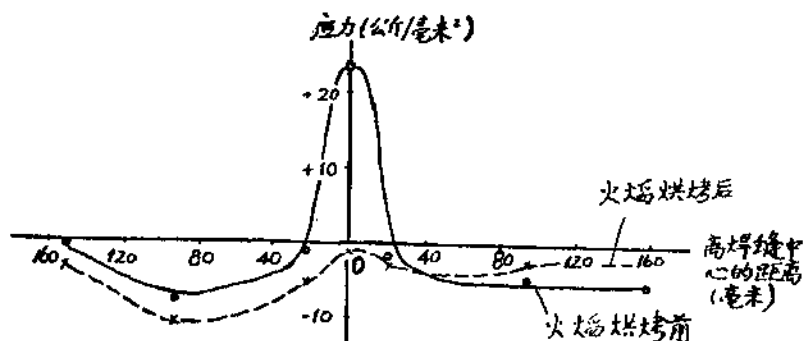


图13 封头纵缝火焰烘烤前后焊接应力分布

是由冶金工业部建筑研究院进行的。火焰烘烤的原理和工艺参数可参见有关资料^[8]。

根据试板测定的结果，对于7米直径的封头，考虑到它的质量安全和本着节约的原则，采用火焰烘烤来消除封头焊接残余应力。实际测量了封头几个部位在火焰烘烤前后的焊接残余应力，测量结果表明，火焰烘烤在消除封头焊接残余应力上也取得了较满意的结果，一般来说，消除应力大致在50%左右。图13是封头纵缝一个部位的焊接残余应力分布曲线和火焰烘烤后的应力分布曲线。所测应力的方向为平行焊缝方向。

2. 航海仪

航海仪上的部件马达盖和马达壳，材料为50 σ 钢。按工厂原来生产的工艺，航海仪在使用过程中精度下降，不能达到要求。而同类型的国外产品，在使用过程中精度并不下降。经探讨，估计不良效果系由残余应力释放而引起，在后来的实践中，在原有工艺上加一道650 $^{\circ}$ C高温回火的工艺，结果大大减小了残余应力，从而保证其使用精度。

表4和表5是马达盖和马达壳不同工艺残余应力大小的比较。

表4 三种工艺的马达盖残余应力

	径向应力 (公斤/毫米 ²)	切向应力 (公斤/毫米 ²)
国外制品	-0.9	-2.8
老工艺后650 $^{\circ}$ C回火	-5.5	-3.2
老工艺后	-48.0	-3.6

表5 两种工艺的马达壳残余应力

	径向应力 (公斤/毫米 ²)	切向应力 (公斤/毫米 ²)
老工艺后650 $^{\circ}$ C回火	-0.9	-3.7
老工艺	-31.8, -33.6	-35.1, -33.6

三、柴油机零件残余应力测定

提高柴油机中的曲轴、连杆和活塞肖等受力零件的寿命，是一个很重要的课题，是对农业机械化有很大意义。近年来，我们测定了一些活塞肖和曲轴的残余应力，对改进热处理工艺提供了有参考价值的数据。

1. 4115柴油机活塞肖

4115柴油机活塞肖的外形尺寸如图14所示，材料为40Cr钢。我们测定了四种不同处理

规范的活塞肖内表面的残余应力，见表6。从表6中可以看出，中频960°-970℃加热后水淬，180°-200℃回火的肖子内表面轴向有较大的拉应力存在，这对于承受交变应力的活塞肖抗疲劳性能是极其不利的。从这些活塞肖的使用寿命也说明，960℃-970℃中频加热后水淬的活塞肖，往往不到预期的寿命即突然断裂，而这些断裂又大多是疲劳断裂，且多是从内表面开始产生裂纹而延伸。因此，活塞肖内表面的轴向和切向残余应力对活塞肖的疲劳寿命是有一定影响的。有些单位保留活塞肖内表面的渗碳层，从而内表面轴向和切向残余应力为压应力，这对提高活塞肖的寿命是有一定作用的。

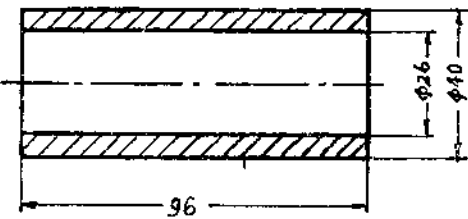


图14 4115柴油机活塞肖外形尺寸

表6 不同规范处理的肖子内表面轴向残余应力

肖子序号	处 理 规 范	残余应力 (公斤/毫米 ²)
1	中频960°-970℃加热，水淬 180°-200℃回火	+18.9, +25.4, +23.1, +29.0
	盐炉860°-870℃加热，油淬 180°-200℃回火	-4.6, -6.5
	中频900°-910℃加热，水淬 210°-240℃回火	-4.6, -4.6, -3.2, +1.4
	盐炉860°-870℃加热，油淬 210°-240℃回火	-3.2, -1.4
2	中频960°-970℃加热，水淬 180°-200℃回火	+12.4, +12.9
	盐炉860°-870℃加热，油淬 180°-200℃回火	-1.8, -3.7
	中频900°-910℃加热，水淬 210°-240℃回火	
	盐炉860°-870℃加热，油淬 210°-240℃回火	

2. 曲轴

在测定4115柴油机曲轴和4146柴油机曲轴中，发现曲轴拐颈圆角处的残余应力分布对曲轴的疲劳破坏有较大影响。图15是4146曲轴测点位置示意图。4146曲轴是球墨铸铁铸成的，然后经正火处理，轴颈高频淬火，再经磨削加工。图16是淬火和淬火后磨削加工的曲轴1拐和4拐圆根至拐颈的应力分布。图17是正火和正火后磨削加工的曲轴1拐和4拐圆根至拐颈的应力分布。由此可以看出，4146曲轴在轴颈高频淬火经磨削加工后拐颈圆根处有一拉应力，且由圆根至拐颈应力变化很陡，这对曲轴

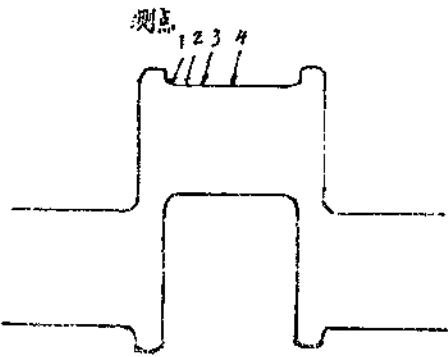


图15 4146曲轴测点位置示意图