

# 提高小型陀螺罗经弹性扭丝回零精度工艺措施的试验研究

陆贤睦 杨 婷 钱苗根 卢 钢

(上海交通大学)

## 摘 要

本文对小型陀螺罗经中提出的具有特殊要求的铍青铜弹性扭丝提高回零精度的工艺措施进行了试验研究。采用这种工艺制造的扭丝，其回零精度可小于5角秒。本研究成果已应用于生产实践。

## 一、概 述

铍青铜弹性扭丝是小型陀螺罗经的敏感元件，其作用是：

1. 定中心：如图1所示， $a$ 、 $b$ 分别为水平扭丝与垂直扭丝。通过 $a$ 、 $b$ 把陀螺球 $c$ 在贮液缸中的位置确定。

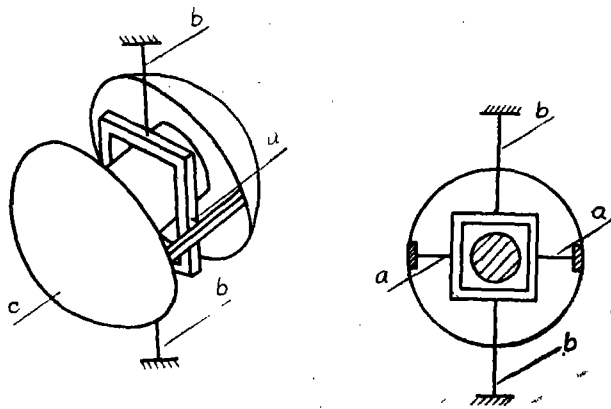


图1

2. 导电：通过扭丝把400周36伏交流电输入陀螺马达。

3. 产生进动力矩：当陀螺罗经不指北时，电磁摆敏感的倾斜信号输到伺服系统，使贮液缸转动，扭丝因而产生扭矩，从而产生进动力矩，使陀螺修正到指北位置。

扭丝产生的进动力矩应与转角成正比，即  $M = W\psi$  ( $W$ 为力矩常数) 这就要求一对扭丝的力学性能要匹配，使其性能差值在技术允许范围内。因此对扭丝提出了相应的技术要求：

(1) 力矩常数 $W$ ：

水平扭丝 $W_H = 5.84 \times 10^{-2} \text{g} \cdot \text{cm} (')$

垂直扭丝 $W_V = 0.18 \times 10^{-2} \text{g} \cdot \text{cm} (')$

(2) 回零精度: 根据陀螺罗经在方位仪工作状态的漂移速度应控制在  $\pm 0.25^\circ/h$  的范围内和垂直轴的干扰力矩应尽量小的要求, 扭丝的回零精度应为  $5''$ , 而且长期保持性能稳定。

为了减少应力集中及安装后的弹性后效和弹性迟后与残余变形, 扭丝采用了两头大(夹持焊接部分)中间细(工作部分)的结构形状和尺寸。(图2)

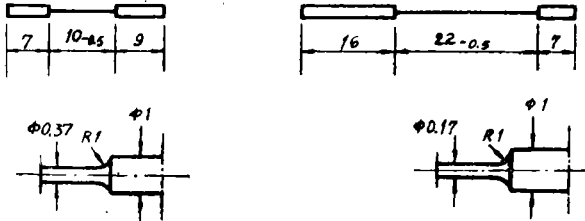


图 2

根据扭丝的尺寸精度及力学性能要求, 这些扭丝具有下列特点:

- (1) 扭丝的直径很细, 垂直扭丝工作部分直径只有  $\phi 0.17 \text{ mm}$ 。
- (2) 这些扭丝均属细长轴, 其长径比特别大, 水平扭丝为 27, 垂直扭丝高达 130。
- (3) 扭丝的结构形状为两头大, 中间细, 机械加工时, 必须注意这个特点。
- (4) 扭丝的技术条件, 除了尺寸、光洁度及相互位置精度要求外, 还规定了一对扭丝的力矩系数和回零精度要求, 即工作时一对扭丝要配对使用, 其回零精度应不大于  $5''$ 。

## 二、扭丝的制造与测试

根据弹性扭丝的上述特点, 机械加工时, 必须采取特殊的工艺措施, 并要用正确的热处理工艺, 最后对扭丝进行回零精度测试。

### 1. 扭丝的机械加工

加工这种细长轴采用了工件旋转, 刀具进给的方法, 是在经过改装的台式钟表车床上进行的。

刀具材料用高速钢或硬质合金均可, 但由于工件是一刀切成, 刀尖散热条件较差, 用高速钢较易磨损, 用 YG6 硬质合金刀, 耐磨性可大大提高。刀具的前角  $r$  取  $0^\circ$ , 这是因为用 YG6 切削铍青铜时,  $r = 0^\circ$  的车刀已够锋利; 另一方面则可大大缩短对刀时间。装刀时, 刀尖不应高于工件中心线, 否则工件会因刀具后角过小而被折断。

### 2. 扭丝的热处理

对铍青铜的时效用真空炉, 时效温度为  $320^\circ\text{C}$  保温 45 分钟后随炉冷至  $100^\circ\text{C}$  再空冷。

### 3. 弹性扭丝的回零精度与力矩系数的测定

为了最后评定扭丝的技术性能——回零精度, 我们设计制造了“扭丝弹性力学测试仪”。

#### 1) 仪器工作原理分析

扭丝在承受扭矩(或交变扭矩)时将产生扭转角位移,(或扭转振动)回零精度是指在外力矩消失后, 扭丝不能回复到原来位置所滞后的角度。经典弹性理论认为: 材料的变形与应力间呈线性关系。事实上这种关系在实际的金属或合金材料中并不存在, 而是与时间形成复

杂的关系。在外力作用下，变形与应力间存在着相位移，就是说晶格有了滑移。这种现象不仅表现在金属或合金的塑性范围内，也体现在微弱的应力条件下。

扭丝不回复原位，主要在于弹性后效与弹性滞后，而对于铍青铜材料，滞后远小于后效。

为了对扭丝的物理性能进行配对，我们不模拟扭丝装置在液浮陀螺球的工作状态，而采取如图3所示的单臂悬挂，下吊一个夹头，夹头上贴一面小反射镜，用自准直光管对准零位，然后给予扭丝一个扭转角小于工作角的扭矩，当其衰减的扭转振动静止时的读数，即为滞后角 $\theta$ ，以衡量回零精度的大小。

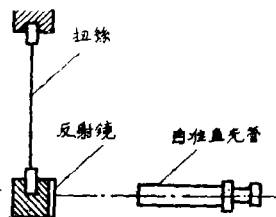


图3

本方法的测试精度主要取决于所选择的自准直光管的精度。力矩系数 $W$ 为扭丝扭转单位角度所产生的反力矩的数值。即：

$$W = M / \varphi \tag{1}$$

圆形截面的吊丝反作用力矩可按下式计算：

$$M = \frac{GJ_p \alpha}{L} = \frac{G\pi d^4}{32L} \alpha \tag{2}$$

式中 $G$ ——剪切弹性系数，对铍青铜来说，

$$G = 5000 \text{ kg/mm}^2;$$

$d$ ——扭丝的直径；

$J_p$ ——极转动惯量；

$\alpha$ ——扭丝的扭转角度。

如果采用公式(1)进行测量，要精确地测出 $M$ 值，把一切摩擦力矩和其他非测试力矩的影响去除，夹具的设计就比较困难和复杂。而按公式(2)进行测量，由于 $G$ 的数值不够准确， $L$ 对于变截面的扭丝较难确定等原因，也不宜采用。因此在工程中往往采用扭转振动法，通过公式

$$T = 2\pi \sqrt{J/W}$$

来间接确定 $W$ 值，即测出扭丝的扭转振动周期 $T$ ，计算出转动惯量 $J$ ，由公式

$$W = \frac{4\pi^2 J}{T^2}$$

求出 $W$ 。

扭转振动法，不受扭转截面形状的限制，周期(频率)测试精度目前又能做得较高，同时扭转振动法又比较接近扭丝工作时动态状况。

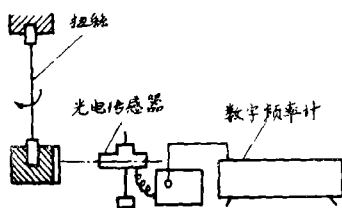


图4

如图4所示，给予悬挂的扭丝一个扭矩，使其产生扭转振动，采用光电传感器和数字频率计读出振动周期，再计算整个扭转体的转动惯量 $J$ ，即可求出 $W$ 。本仪器的转动惯量 $J$ 为 $384 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$ ，而扭丝的周期为 $T_1 = 388$ 毫秒(水平扭丝)， $T_2 = 2200$ 毫秒(垂直扭丝)。扭丝的周期误差由尺寸误差引起。

2) 测量仪器的设计要点：

(1) 本仪器对于扭丝采用机械夹紧，而不采用低熔点焊接或可拆胶接，这是由于焊点与粘结剂的弹性变形情况不明，在仪器中应尽量避免引入夹持部分变形的影响。

(2) 扭丝的长径比极大，因而弯曲刚度远差于扭转刚度，仪器必须使测量过程中传递给扭丝的是一个纯扭矩。这一点主要由零件加工时的几何精度保证。例如，拨叉的同轴度与对称度要求，(图5) 使力的作用点 A、B 严格对称于中心 O，而上夹头夹持中心与下拨叉旋转中心最后精度(同轴度)要求在 0.01mm 之内。(见图6)

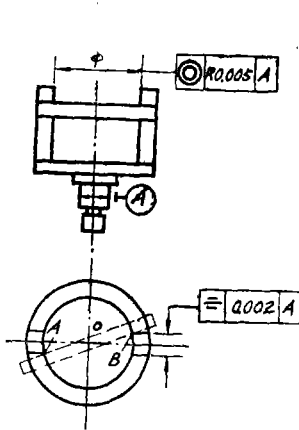


图5

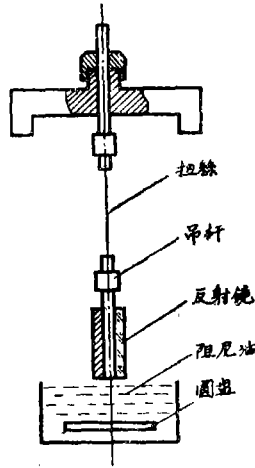


图6

(3) 由于扭丝处于悬挂状态，上夹头夹持中心应与仪器机座平板垂直，测量时，平板要校正水平，对于吊杆其重心和夹持中心要重合，所以，吊杆需进行静平衡。

(4) 为使自准直光管反射回来的标记边缘清晰，提高对线精度，对于吊杆上的镜面应给予平面度和平行度的要求。

(5) 扭丝在液浮陀螺球上，为防止微小弯曲和改善回零精度，装配时具有一定的轴向拉力。因此，测量时吊杆的重量最好保持相同数值的轴向拉力，以便更接近于工作状态。本扭丝拉力为 93gf。

(6) 当测量回零精度时，外加力矩释放后，扭丝振动衰减很慢，而且外界的干扰振

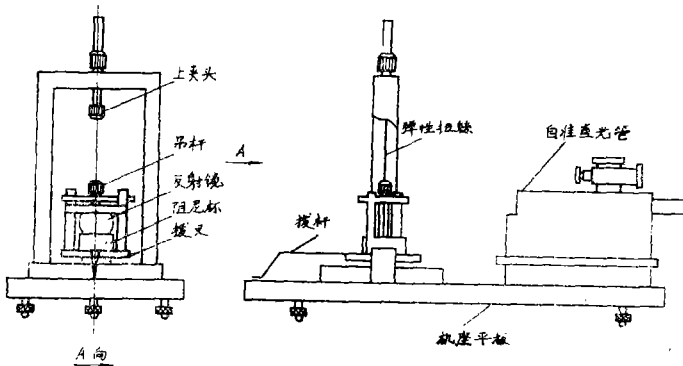


图7 扭丝弹性力学测试仪简图

动，使自准直光管内的标记很难静止，妨碍读数。为此，仪器的吊杆需要有阻尼装置。我们采用粘度很小的油液，如图 6 所示，圆盘是实现对弯曲干扰振动的阻尼。鉴于扭丝弯曲刚度很差，仪器必须具有防震装置。测量时，最好在防震台或大体积的生铁平台上进行。

扭丝弹性力学测试仪的结构示意图见图 7。

### 三、提高回零精度的措施

在小型陀螺罗经中，扭丝应工作在纯扭转状态，故其主要性能指标应是力矩系数和回零精度的大小及稳定性。决定力矩系数大小的是扭丝的结构尺寸及尺寸精度；决定回零精度的则是扭丝形状的相互位置精度及材料热处理后的晶粒组织状态，因此要提高扭丝的回零精度，除了设计、材料之外，还应从提高扭丝的尺寸精度及改善热处理工艺着手。

#### 1. 在机械加工方面

由于该扭丝的形状和尺寸特殊，机械加工时，不能沿用一般细长轴的加工方法，必须采取特殊工艺措施，才能达到足够的精度。因此，在机床改装时，必须考虑下列几个因素：

(1) 由于工件是两头大、中间细的细长轴，中间部分不足以支持头部的重量，不能采用顶尖支承或反顶尖支承方式，而只能采用头部用弹簧夹头夹紧，尾部用套筒支承方式。

(2) 工件尾部的套筒支承不能静止不转，因为加工时，切削力通过工件作用在尾架套筒上的分力，使工件在套筒中旋转时所产生的摩擦力矩可能引起工件的附加转动，这个附加转动，可能将工件扭断。因此，尾架套筒还应作与工件同步同向旋转，这样可使工件与套筒处于相对静止状态。如不同步，则由转速差引起的摩擦力矩仍可能将工件扭断。在套筒孔内装一个 1mm 的滚珠轴承，以减少工件与尾架套筒间的摩擦。

(3) 由于工件是中间细、两头粗，只能采用圆孔跟刀架支承毛坯外径。跟刀架孔  $\phi 1\text{mm}$  必须直接利用车床主轴打出，以保证同心度。并采用一次走刀（且只能用一次走刀）切削成形，这样才能保证工件不变形。

采取上述工艺措施后，加工出来的扭丝，经测量表明，表面光洁度可达  $\nabla_6 - \nabla_{11}$ ，相邻同心度为  $2 \sim 11\mu\text{m}$ ，符合零件的技术要求。

#### 2. 在热处理工艺方面

为使铍青铜弹性扭丝具有优异的物理—机械性能——回零精度，除了在加工时要保证足够的尺寸精度、光洁度和相互位置精度外，还必须进行正确的热处理。

我们选用直径为  $\phi 1\text{mm}$  的 QBe2 线材做试验，在盐浴炉中进行加热，（温度为  $780^\circ\text{C}$ ）然后水淬，水温不超过  $20^\circ\text{C}$ ，得到  $\alpha$ —固溶体 + 少量  $\beta$ —相粒子的显微组织。

接着在马弗炉中进行  $260^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ，15 分钟的半时效。这样，不仅能提高切削性能，而且还能改善最终时效后的脱溶组织，提高其回零精度。对于淬火——时效后的扭丝的金相分析，主要是控制淬火晶粒度与时效组织。

根据不同试验规范，取样在“扭丝弹性力学测试仪”上测定扭丝的回零性能。

试验时，先把淬火加热温度固定为  $780^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ，保温时间分别选为 3、5、7、9 和 11 分钟。保温后立即淬入水中。在金相显微镜下用比较法测得各试样晶粒度如表 1 所表。可见，合金的晶粒度随保温时间的增加而逐渐长大，但保温 3 ~ 9 分钟，则保温时间对晶粒大小的影响不大。

然后把不同保温时间的试样分为两组，分别在  $320^\circ\text{C}$  下进行 45 分和 150 分钟的时效处理。

表1: 不同保温时间对 $\phi 1\text{mm QBe2}$ 丝材晶粒度的影响 (加热温度 $780 \pm 5^\circ\text{C}$ , 水淬)

保温时间	(min)	3	5	7	9	11
晶粒大小	( $\mu\text{m}$ )	9	10	13	15	22

经150分钟时效的试样, 在试验过程中已发现弹性甚差, 故不在进行回零精度测试。经45分钟时效的试样, 进行了回零精度测试, 测得的结果如表2所列。

表2: 第一批试样的回零精度 (扭转 $5^\circ$ , 停留20秒再释放)

序号	热处理规范	晶粒大小 ( $\mu\text{m}$ )	记录数据 (括号内为正反的回零精度, ")
1	780 $^\circ\text{C}$ 3分水淬 320 $^\circ\text{C}$ 45分时效	9	1.7(0), 17(8), 25(3), 22(2), 24 39(1), 40(10), 50(1), 49(3), 52
2	780 $^\circ\text{C}$ 5分水淬 320 $^\circ\text{C}$ 45分时效	10	6(3), 9(1), 10(0), 10(5), 15
3	780 $^\circ\text{C}$ 7分水淬 320 $^\circ\text{C}$ 45分时效	13	27(1), 28(2), 26(1), 27(1), 26, 44(2), 46(1), 45(3), 48(3), 45,
4	780 $^\circ\text{C}$ 9分水淬 320 $^\circ\text{C}$ 45分时效	15	24(4), 28(2), 26(3), 29(2), 27, 36(2), 38(0), 38(2), 40(2), 38
5	780 $^\circ\text{C}$ 11分水淬 320 $^\circ\text{C}$ 45分时效	22	53(7), 60(4), 56(3), 59, 19(5), 24(5), 19(4), 23(2), 21,

由表2可知:

(1) 淬火加热保温时间为5、7、9分钟的三组元件性能良好, 回零精度均小于5角秒, 符合设计要求。

(2) 淬火加热保温时间为3分钟的一组元件, 因固溶不足, 回零精度波动较大, 有些数据已不合设计要求。

(3) 淬火加热保温时间为11分钟的一组元件, 由于晶粒较大, 在用320 $^\circ\text{C}$  45分钟的时效处理, 回零精度开始变差。

表3: 第二批试样的回零精度 (扭转 $5^\circ$ , 停留20s, 再释放)

序号	热处理规范		记录数据 (括号内为正反回零精度, ")
	淬 火	时 效	
1	780 $^\circ\text{C}$ 5分水淬	320 $^\circ\text{C}$ 45分	7(2), 9(3), 6, 58(3), 61(1), 59, 24(4), 28(4), 24,
2	780 $^\circ\text{C}$ 7分水淬	320 $^\circ\text{C}$ 45分	47(4), 51(3), 48, 10(2), 12(2), 10, 32(3), 35(3), 32,
3	780 $^\circ\text{C}$ 9分水淬	320 $^\circ\text{C}$ 45分	14(3), 17(2), 15, 26(3), 29(2), 27, 11(1), 12(2), 10,
4	780 $^\circ\text{C}$ 5分水淬	320 $^\circ\text{C}$ 60分	40(3), 43(3), 40, 43(4), 47(5), 42, 29(3), 32(3), 29,
5	780 $^\circ\text{C}$ 7分水淬	320 $^\circ\text{C}$ 60分	32(3), 35, 35, 3(3), 6(4), 2, 38(2), 40(3), 37,
6	780 $^\circ\text{C}$ 9分水淬	320 $^\circ\text{C}$ 60分	22(0), 22(4), 18, 38(1), 39, 39, 14(5), 19(5), 14,
7	780 $^\circ\text{C}$ 5分水淬	320 $^\circ\text{C}$ 75分	3(3), 6(3), 3, 0(3), 3(5), -2, 45(4), 49(4), 45,
8	780 $^\circ\text{C}$ 7分水淬	320 $^\circ\text{C}$ 75分	18(4), 22(3), 19, 53(3), 56(4), 52, 39(2), 41(8), 33(4),
9	780 $^\circ\text{C}$ 9分水淬	320 $^\circ\text{C}$ 75分	10(3), 13, 13, 0(4), 4(3), 1, 31(5), 36(2), 34,

根据第一批试验结果，我们再选取保温时间为 5、7、9 分钟的三组元件，在 320℃ 下分别时效 45、60 和 75 分钟，测得的回零性能如表 3 所列。

由表 3 可以看出，从统计来说，时效 45 分钟的元件回零精度良好，每个元件都符合设计要求；而用 60 和 75 分钟的时效处理，元件的回零精度开始下降，有些数据已不符合设计要求。

第二批时效 45 分钟的元件所测得的回零精度，与第一批时效 45 分钟的元件所测得的回零精度重复性较好。

为从显微组织上分析上述规律，我们取扭丝夹持部分制成金相试样，进行显微组织观察，发现时效 45 分钟的扭丝时效析出较好，(见图 8[a]) 而经时效 60 分钟的元件已开始过时效，在晶界处出现明显的不连续脱溶产物。(见图 8[b]) 扭丝夹持部分的尺寸比工作部分的尺寸要大，由外表面对内扩散的影响规律可以推测，时效 60 分钟后工作部分的显微组织，已经具有明显的过时效特征。

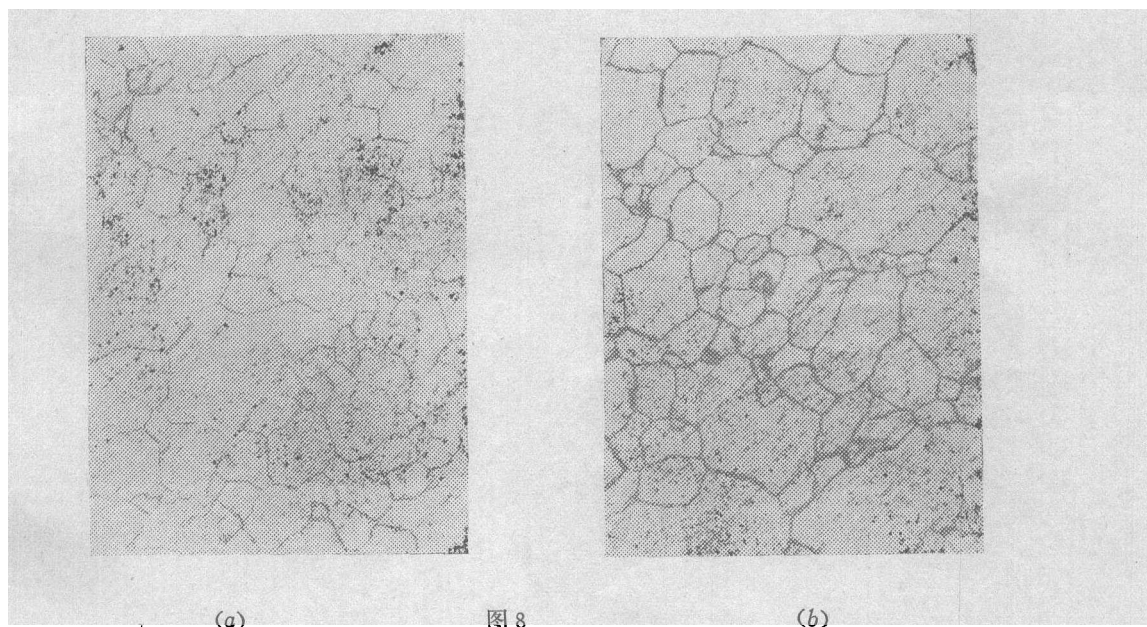


图 8: 两种时效处理后的显微组织 (500×, 8% 硫酸铜 + 氨水溶液化学浸蚀)

(a) 320℃ 45 分钟时效; (b) 320℃ 60 分钟时效。

根据试验结果分析，对于 QBe2 弹性扭丝热处理应采取下列措施：

- (1) 采用双重时效，即在最终时效之前，先进行 260℃ 15 分钟的半时效处理。
- (2) 正确实施淬火工艺，控制淬火晶粒度。我们采用固溶 780℃ 7 (或 9) 分钟水淬，淬火晶粒尺寸为 10~15μm。
- (3) 严格控制最终时效温度和时间，以保证得到良好的时效组织。我们采用真空时效 320℃ 45 分钟。它与目前一般镀青铜弹性元件热处理规范不同点是时效时间较短，(一般采用 320℃ 2~2.5 小时) 应严格控制。

综上所述，对于 QBe2 弹性扭丝的加工工艺规程应是：落料→校直→固溶 780℃ 7 (或 9) 分钟水淬→半时效 260℃ 15 分钟空冷→车削成形→真空时效 320℃ 45 分钟，保温后随炉冷至 100℃ 空冷→回零精度和力矩系数测试→配对。

#### 四、结 束 语

这种形状特殊、性能要求严格的铍青铜弹性扭丝，在国内尚属首次使用，其加工、热处理及测试方法，也是初次尝试。经用上述方法和措施研制的弹性扭丝，已实际装上小型陀螺罗经使用，并经过航海试验，罗经的指北精度达到 $0.5^{\circ}/h$ ，完全符合小型陀螺罗经的设计要求。后又经过多台罗经装船考验，证明效果良好。因此，这项研究成果已在实际生产中得到推广应用。

九江仪表厂为我们提供许多热处理试验数据，在此谨致谢意。