

称重传感器弹性元件金属材料及其特性分析

刘九卿 中国运载火箭技术研究院第 702 研究所

【摘要】研制应变式称重传感器的要点，国内外技术专家的共识概括起来就是“结构是基础，材料是关键，工艺是核心，检测是保障”。本文以材料是关键问题的有效途径，即将用于弹性元件的结构材料通过科学合理的热处理工艺使其具有功能材料的特性为切入点，介绍了金属材料特性对弹性元件性能的影响；弹性元件金属材料的选择原则；国内外弹性元件常用金属材料的种类与性能；国内典型弹性元件材料：中碳合金结构钢、新型高强度合金钢、弹性合金和硬铝合金的特性，热处理工艺，稳定性处理工艺及其对称重传感器准确度、稳定性和可靠性的影响。

【关键词】称重传感器；弹性元件；合金结构钢；硬化不锈钢；铝合金；热处理；稳定性处理

一、概述

应变式称重传感器（以下简称为称重传感器）是技术密集型和技巧密集型的高技术产品，具有多样性、边缘性、综合性和技艺性等特点，在设计与制造过程中需要多学科、多技术的配合和支持工艺、基础工艺、核心工艺、特殊工艺的科学运用与集成。称重传感器最重要的机械部分是承受外部载荷的弹性元件，其功能是对作用载荷的反作用，同时把载荷的作用集中于一个独立的、均匀的应变场内，便于电阻应变计测量。称重传感器的准确度、稳定性和可靠性与构成其弹性元件金属材料的性能密不可分，即利用金属材料的固有特性通过应变转换元件电阻应变计来实现对重量信息的检测。所以，称重传感器的设计与制造主要是弹性元件的结构与边界设计和弹性元件金属材料及其热处理工艺选择。最佳的结构设计与制造工艺是使弹性元件性能与金属材料性能合为一体。完成这一任务的困难之一在于弹性元件结构与边界设计在计算上和经济上的一些限制，只有遵循称重传感器研制、生产规律才能解决这一限制；其二是选择好与称重传感器准确度等级相适应的综合性能好的弹性元件金属材料及其热处理规范，只有这样才能克服各种因素的综合影响，生产出性能波动最小的称重传感器。

在额定载荷作用下，称重传感器弹性元件应变区的应变程度，对弹性元件的线性、滞后、蠕变和疲劳寿命都有较大影响。这里说的应变程度，实际上是保证弹性元件应变稳定并与载荷成较严格线性关系的应变范围，它与弹性元件所用的金属材料及其热处理工艺密切相关。弹性元件应变的稳定性与所用金属材料的关系可用下式表达：

$$\frac{\Delta R}{R} = R_i = CK\varepsilon$$

式中： R —惠斯通电桥电路的桥臂电阻；

R_i —桥臂电阻的相对变化；

C —应变利用系数；

K —电阻应变计灵敏系数；

ε —弹性元件的弹性应变。

由式可见，提高弹性元件应变的稳定性是提高称重传感器整体稳定性的基础和关键。因此，弹性元件所用的金属材料不仅是结构材料而且要求其具有功能材料的特点，只有这样才能使弹性元件具有较高的应变稳定性，称重传感器才能达到较高的准确度、稳定性和可靠性等级。

获得弹性元件的应变稳定性，对金属材料的要求是：

- (1) 形状与尺寸的稳定性，即形状与尺寸不随时间而变化；
- (2) 应变与载荷的稳定性，即应变与载荷呈较严格的线性关系；
- (3) 应变的时间稳定性，即应变不随时间而变化；
- (4) 应变的温度稳定性，即应变不受环境温度变化的影响；
- (5) 应变对其它物理因素的稳定性，即要求抗磁场、辐射等能力强。

为确保弹性元件的应变稳定性，通过热处理使金属材料尽量具有功能材料的特点，就是解决称重传感器研制过程中“材料是关键”的重要途径。

二、金属材料特性对称重传感器性能的影响

弹性元件所用金属材料特性对称重传感器性能的影响，主要是材料的弹性模量、滞弹性效应和热弹性效应的影响。

1. 金属材料弹性模量的影响

弹性元件金属材料弹性模量的稳定性和温度系数，直接影响称重传感器的准确度和稳定性。通常人们都认为金属材料在比例极限内，弹性模量 E 为常数，这是不严格的。实际上，仅仅是在一定范围内弹性模量才比较接近常数。对金属材料采用不同的热处理规范，弹性模量为常数的应变范围也不同。生产实践证明，我国称重传感器制造企业应用较多的中碳合金钢 40CrNiMoA，经过淬火和回火处理后，其硬度在 HRC39 左右；35CrMnSiA 的硬度在 HRC42 左右，弹性模量的稳定性最好，接近于常数。

绝大多数金属材料的弹性模量都随着温度的升高而降低，在弹性模量与温度的关系上，要求弹性模量随温度变化时既要比较线性，又要非常稳定，这样有利于称重传感器灵敏度温度补偿。

在动态称重状态下使用的称重传感器，还要求在振动和冲击情况下，弹性元件材料的弹性模量不改变或改变很小。为此尽量选用弹性模量 E 与密度 ρ 的乘积 $E\rho$ 较小的金属材料。

2. 金属材料滞弹性效应的影响

所谓滞弹性，就是金属材料在弹性变形范围内，同时伴随有微塑变形，使应力与应变之间不遵循虎克定律，而产生非线性误差。其表现形式较多，主要有弹性滞后、弹性后效（蠕变）、应力松弛等。

(1) 弹性滞后

弹性元件金属材料在加载与卸载的进、回程中，应力、应变曲线不重合，构成一个回线环，即对应同一应力有不同的应变 ε 和 ε_1 ，其差值 $\Delta\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon$ 称为弹性滞后。在不同应力作用下弹性滞后 h 也不同，用最大弹性滞后的百分数表示：

$$h = \frac{\Delta\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{\max}} \times 100\%$$

式中： ε_{\max} —最大载荷下的总应变；

$\Delta\varepsilon_{\max}$ —最大应变滞后。

只有选择合适的回火温度，才可以得到符合弹性元件要求的滞后误差，对于国内应用较多的40CrNiMoA合金钢，回火温度200℃，硬度HRC39.5，最大滞后0.11%。

(2) 弹性后效（蠕变），

金属材料在弹性变形范围内，应变不只是应力的函数，而且还与时间密切相关。在应力保持不变的情况下，应变将随时间缓慢增加，直到最后达到平衡应变值，此现象为弹性后效，也称为蠕变。影响金属材料弹性后效（蠕变）的主要因素有：材料的组织结构；热处理工艺；稳定处理工艺；工作温度；最大工作应力等。

(3) 应力松弛，

在研制中温和高温称重传感器时，还应注意金属材料在中、高温工作时的一种弹性后效过程。弹性元件在中、高温工作时，在总应变量恒定的情况下，应力随着时间的延续而逐渐降低的现象称为应力松弛，其应力松弛率 σ_r 为：

$$\sigma_r = \frac{\sigma_0 - \sigma_t}{\sigma_0} \times 100\%$$

式中： σ_r —应力松弛率；

σ_0 —初始应力；

σ_t —经过 t 时间后的应力。

对不同的金属材料，在相同的条件下，应力松弛率 σ_r 越高，表明该材料的抗应力松弛能力越好。

中、高温称重传感器弹性元件用金属材料应具有较高的抗应力松弛能力。

3. 金属材料热弹性效应的影响

金属材料的热弹性效应主要来源于弹性模量 E 的温度系数、频率温度系数和线膨胀系数。

(1) 温度系数影响

当环境温度升高时，弹性元件金属材料原子的热运动加剧，结合力减弱，弹性模量 E 降低。在温度变化 1°C 时，弹性模量 E 随温度的变化值即为金属材料弹性模量 E 的温度系数，用 β_E 表示：

$$\beta_E = \frac{\Delta E}{E_0 \Delta t} = \frac{1}{E_0} \times \frac{E - E_0}{t - t_0}$$

或写成 $E = E_0 [1 + \beta_E (t - t_0)]$

式中： E —金属材料 $t^\circ\text{C}$ 时的弹性模量；

E_0 —金属材料 $t_0^\circ\text{C}$ 时的弹性模量。

因为 $\frac{dE}{dt} < 0$ ，所以弹性模量 E 的温度系数 β_E 为负值，即温度升高弹性模量 E 降低，对于合金结构钢 $\beta_E = -3.6 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ ；硬铝合金 $\beta_E = -5.4 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 。这就是称重传感器产生灵敏度温度误差的根本原因。

(2) 频率温度系数影响

用于动态称重的称重传感器弹性元件在温度变化时，其谐振频率也随着变化，通常用频率温度系数 β_f 表示，即温度变化 1°C 时，谐振频率的相对变化值， β_f 的表达式为：

$$\beta_f = \frac{\Delta f}{f_0 \Delta t} = \frac{f - f_0}{f_0 (t - t_0)}$$

式中： f — $t^\circ\text{C}$ 时的谐振频率；

f_0 — $t_0^\circ\text{C}$ 时的谐振频率。

一般多选用谐振频率 β_f 低的金属材料作为动态称重传感器的弹性元件或谐振弹性元件。

(3) 线膨胀系数影响

当环境温度升高时，弹性元件金属材料原子间的平均距离增大，从而产生热膨胀现象，使弹性元件产生变形。金属材料的线膨胀系数越大，弹性元件的变形也就越大。此变形使弹性元件应变区产生附加应变，引起称重传感器的温度漂移。一般用线膨胀系数 α_1 表示，它是温度升高 1°C 时，单位长度的相对变化量，即

$$\alpha_l = \frac{l}{l_0} \times \frac{l - l_0}{t - t_0}$$

式中：l—t℃时的长度；

l_0 — t_0 ℃时的长度。

应当指出，金属材料的弹性模量温度系数 β_E 、频率温度系数 β_f 和线膨胀系数 α_l 三者不是独立的，它们之间存在着一定的关系。对各向同性的金属材料可求得：

$$\beta_E = 2\beta_f - \alpha_l$$

综上所述，金属材料的热弹性效应对称重传感器的温度特性影响较大，一定要选用 β_E 、 β_f 低的金属材料制造称重传感器的弹性元件。

三、对称重传感器弹性元件金属材料的要求

弹性元件的结构、所用金属材料、制造工艺流程、测试检定装备与检测方法是研制高准确度称重传感器的四个相互关联的重要环节。其中弹性元件的结构是基础；金属材料及热处理规范是关键；科学合理并可重复的制造工艺流程是核心；生产过程中和产品完成后的测试与检定是保障。弹性元件金属材料之所以成为关键问题，是由称重传感器的工作原理和制造工艺特点决定的，称重传感器检测的外界质量信息和变换效应是利用物质定律——虎克定律构成的。该定律是表示金属材料客观性质的法则 $\sigma = E \varepsilon$ ，即要求弹性元件在外载荷作用下应力与应变成较严格的线性关系，只有综合性能优良的金属材料经过调质处理后才能满足上述要求。

实际上，国内外称重传感器弹性元件所用的金属材料都是结构材料，只有通过科学合理可重复的热处理工艺规范，才能使结构材料具备功能材料的特点，满足称重传感器的准确度、稳定性和可靠性要求。使结构材料具有功能材料特点的衡量标准是：

- (1) 在性能上，对称重传感器的准确度、稳定性和可靠性起举足轻重的作用；
- (2) 在应用上，制成称重传感器的弹性元件后，实际上是金属材料与弹性元件一体化；
- (3) 在对材料的评价上，是以弹性元件形式对其性能进行评价，称重传感器的计量性能直接体现金属材料的优劣；
- (4) 在制造上，对成分、冶炼、锻造、淬火、回火工艺要求严格，并尽量少产生残余应力。

随着科学技术的进步和称重传感器研制水平的提高，近些年来对弹性元件金属材料的分析与应用研究有了较深层次的认识和理解，提出了较全面的要求，并制定了选择原则。弹性元件金属材料

除对化学成分、冶炼条件必须严格要求外，还应要求其具备下列性能：

- (1) 强度极限高，以便在高载荷下称重传感器有足够的强度储备；
- (2) 弹性极限高，屈服与拉伸强度比大，保证弹性元件受载后应变与载荷成较为严格的线性关系；
- (3) 弹性模量时间稳定性好，温度系数小；
- (4) 弹性滞后、弹性后效（蠕变）小；
- (5) 组织均匀，各向同性，冷热加工后残余应力小；
- (6) 热膨胀系数小；
- (7) 冲击韧性好，耐冲击、抗疲劳能力强。一般对疲劳寿命的要求是应变值在 $0 \sim 2000 \times 10^{-6}$ 时，循环次数大于 10^7 ；
- (8) 锻造、热处理、机械加工的工艺性好。

要求某一种金属材料同时具备上述各项性能是不可能的，但可以将选定的金属材料经过某些处理使其尽量满足或接近上述各项性能要求。国内外称重传感器制造企业选择金属材料的经验是：除对组成金属材料各元素成分的纯度和均匀性要求严格外，还要注意不能只突出某一单项指标，一定要综合性能良好。

四、国内外钢制称重传感器弹性元件常用材料

1. 国外钢制称重传感器弹性元件常用材料

国外钢制称重传感器弹性元件可选用的钢种较多，主要是以合金结构钢和沉淀硬化不锈钢为主，辅助以热作模具钢、弹簧钢和弹性合金等。美国、英国、德国、法国、日本在合金结构钢中使用较多的是中碳铬、镍、钼（Cr、Ni、Mo）钢，在特殊条件下，美国也使用价格较贵的弹性合金。俄罗斯、东欧一些国家使用较多的是中碳铬、锰、硅（Cr、Mo、Si）钢，也使用弹簧钢。在注重称重传感器的耐腐蚀性能时，多选用析出硬化不锈钢。日本久保田株式会社研制出一种析出硬化型铸造合金钢，解决了结构复杂弹性元件的制造工艺难题。国外钢制称重传感器弹性元件选用较多钢种的化学成分和机械性能见表 1A 和表 1B。

表 1A

国外钢制称重传感器弹性元件用金属材料化学成分

国家	牌号	钢类	化 学 成 分 (%)					
			C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
美国	ASTM E4340	合金钢	0.37~0.45	0.20~0.35	0.60~0.90	0.65~0.95	1.50~2.00	0.20~0.30
美国	H11	模具钢	0.35	1.00	0.30	5.00		1.50
美国	X200	合金钢	0.40~0.50	1.40~1.60	0.80~0.90	1.60~1.80		0.60~0.80
美国	Elinver	弹性合金	0.80	1.00~2.00		12.00	36.00	0.50
俄罗斯	40X	合金钢	0.37~0.45	0.17~0.37	0.50~0.80	0.80~1.10	0.25	
俄罗斯	30X H 3 A	合金钢	0.27~0.34	0.17~0.37	0.60~0.90	0.60~0.90		
俄罗斯	30X Γ C A	合金钢	0.30~0.39	1.00~1.10	1.20~1.40	0.90~1.00		
俄罗斯	35X Γ C A	合金钢	0.32~0.39	1.00~1.40	0.80~1.10	1.10~1.40	0.20	
俄罗斯	50X Φ A	合金钢	0.46~0.54	0.17~0.37	0.50~0.80	0.40		
德国	30CrNiMo8	合金钢	0.30	0.25	0.45	1.95	1.95	0.30
德国	X45CrNiMo4	合金钢	0.45	0.25	0.50	1.30	4.00	0.20
英国	En24	合金钢	0.35~0.45	0.10~0.35	0.45~0.70	0.90~1.40	1.30~1.80	0.20~0.35
英国	En26	合金钢	0.36~0.44	0.10~0.35	0.50~0.70	0.50~0.80	2.30~2.80	0.40~0.70
法国	ARMCO17-4PH	硬化不锈钢	<0.07	<1.00	<1.00	15.7~17.5	3.00~5.00	
美国	17-4PH	硬化不锈钢	>0.07	1.00	1.00	15.5~17.5	3.00~5.00	
美国	15-5PH	硬化不锈钢	>0.07	1.00	1.00	14.0~15.0	3.50~5.50	

表 1B

国外钢制称重传感器弹性元件用金属材料化学成分 (续) 与机械性能

国家	牌号	化 学 成 分 (%)			热 处 理 (°C)		强 度 N/mm ²	
		W、V等	S	P	淬火温度	回火温度	σ _b	σ _s
美国	ASTM E4340		≤0.04	≤0.04	820~850	500~650	1100~1300	860~1000
美国	H11	V=0.40			990~1020	540~650	1200	600~900
美国	X200	V=0.1~0.2			1010	480	1700	1450
美国	Elinver	W=0.1~0.2						
俄罗斯	40X				850	550	1000	800
俄罗斯	30X H 3 A				850	530	110	900
俄罗斯	30X Γ C A				890	350	1700	1400
俄罗斯	35X Γ C A		≤0.035	≤0.035	890	350	1650	1300
俄罗斯	50X Φ A	V=0.1~0.2			850	520	1300	1100
德国	30CrNiMo8	W=0.05			830~850	530 或 570	900~1450	700~1050
德国	X45CrNiMo4	W=0.05			840~870			
英国	En24		≤0.05	≤0.05			1180	990 <
英国	En26		≤0.05	≤0.05			1260	1070
法国	ARMCO17-4PH	Cu=3.0~5.0	≤0.03	≤0.04	1050	500~580	1160~1330	1050~1230
美国	17-4PH	Cu=3.0~5.0	0.04	0.03	1050	550		1050
美国	15-5PH	Cu=2.5~4.5	0.04	0.03	1050	550		1200

上表中, 美国 17-4PH 和 15-5PH 都是半奥氏体沉淀硬化不锈钢, 基本性能相似, 其固熔状态为奥氏体, 但不够稳定, 还含有 5 ~ 20% 铁素体。必须采用中间调质处理方法 (即降低温度淬火), 使奥氏体中的碳化物沉淀析出, 并经冷处理转变成马氏体。然后通过时效处理, 在马氏体基体上进一步沉淀硬化, 达到最高强度, 在 550℃ 以下, 有优良的高温强度。两种不锈钢的物理常数完全相同, 即弹性模量 $E=1.96 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, 泊松比 $\mu=0.272$, 密度 $\rho=7.8\text{g/cm}^3$, 15-5PH 的屈服强度更高些。

除上表列出的钢种外, 20 世纪 80 年代末, 日本久保田株式会社研制出一种析出硬化型铸造合金钢。化学成分 (%): C 0.02 ~ 0.05、Si 0.30 ~ 2.50、Mn 0.30 ~ 1.50、Cr 11.00 ~ 13.50、Ni 5.00 ~ 7.00、Cu 1.50 ~ 2.50、Mo 1.50 ~ 2.50、Nb 0.20 ~ 0.40、Fe 余量。其淬火处理工艺为: 1100℃ × 2h—炉冷或 1040℃ × 2—空冷, 回火处理工艺为 480℃ × 2h—空冷。抗拉强度 $\sigma_b=1500 \text{ N/mm}^2$ 、屈服强度 $\sigma_s=1320 \text{ N/mm}^2$, 弹性模量 $E=2.00 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, 硬度 (Hb) 41.5。

经上述铸造和热处理工艺的析出硬化型铸造合金钢, 具有比其它钢种较好的综合性能, 特别突出的是具有较高的弹性极限、耐微蠕变和耐冲击特性。采用析出硬化型铸造合金钢制造称重传感器弹性元件, 即增大了称重传感器设计的自由度, 又减化了机械加工工序, 特别适合制造结构形状复杂的弹性元件。

2. 国内钢制称重传感器弹性元件常用材料

称重传感器弹性元件所用的金属材料在形成弹性元件成品前, 一般都要进行锻造加工, 其目的之一是优化组织结构使其更致密; 其二是使材料的流线方向与弹性元件的受力方向一致, 提高力学性能; 其三是减少切削加工量, 提高工作效率。基于此目的国内各称重传感器制造企业选用的钢种, 基本上与国外相同, 主要是中碳合金结构钢、弹簧钢和沉淀硬化不锈钢。国内合金钢、弹簧钢、不锈钢牌号和机械性能见表 2。

表 2 国内称重传感器弹性元件可选用的钢种牌号与机械性能

名称	牌 号	弹性模量 E	抗拉强度	屈服强度	热 处 理		E 的
		N/mm ² (×10 ⁵)	N/mm ² σ_b	N/mm ² σ_s	淬火温度 (℃)	回火温度 (℃)	β_E ×10 ⁻⁴
合金结构钢	40Cr	1.96	981	785	850 油冷	370	-3.0
	40CrNi	2.1	981	785	850 油冷	500	
	40CrNiMoA	2.08	1324	1255	850 油冷	480	-3.0
	30CrMoSiNiA	2.04	1130	1096	880 油冷	540	
	35CrMnSiA	2.1	1618	1275	880 油冷	230	-3.0
	30CrMnSi	1.96	97	888	880 油冷	540	
	40CrMnMo	2.1	981	785	850 油冷	500	
弹簧钢	65Mn	1.96	981	785	830 油冷	480	
	60Si2MnA	1.96	1569	1373	870 油冷	420	
	50CrVA	1.94~2.06	1275	1079	850 油冷	560	-2.5
	50CrMnA	1.96	1275	1079			
不锈钢	0Cr17Ni4Cu4Nb		1230	1050	1050 油冷	500~580	
	0Cr17Ni7Al		1230	1160	1050 油冷	500~580	

弹性元件金属材料的热处理和机械加工工艺，对称重传感器性能影响较大，与弹性元件金属材料相关的冷热加工工艺为：

① 原材料检验——主要是化学分析和机械性能测试，要求组织均匀，无气孔、裂纹、杂质，满足屈服强度要求等。

② 锻造加工——使组织更加致密，保证金属材料流线方向与弹性元件受力方向一致，无交叉、重叠现象，因此锻造时只允许拉伸，不允许墩粗。

③ 第一次热处理即退火处理——目的是细化晶粒，使组织更加均匀，减少内应力和硬度便于机械加工，并防止热处理时产生裂纹。

④ 弹性元件粗加工——注意留出精加工余量。

⑤ 第二次热处理即淬火与回火处理——保证弹性元件即具有较高的比例极限，又有良好的综合性能。合理、稳定的热处理工艺是弹性元件具有优良的线性、滞后、蠕变特性和较高疲劳寿命的根本保证。

⑥ 硬度、金相检验——复查热处理工艺是否合理可行，要求在弹性元件的不同部位进行检测，以充分检查热处理的均匀性，同时确定热处理工艺的稳定性和可重复性。

⑦ 弹性元件精加工——要求严格保证应变区的尺寸和形位公差要求，在接近尺寸精度要求时，切削用量一定要小，最好不采用磨削加工，防止产生较大的表面残余应力，应变区的过度区域应保证连接圆滑过渡。

⑧ 弹性元件表面处理——目的是美观外形防止腐蚀。

⑨ 第一次稳定性处理——多采用高温油煮、低温深冷工艺。美国有些称重传感器制造企业在弹性元件精加工热处理和表面处理，增加一项稳定性处理工艺。即将弹性元件首先进行高温油煮处理，其处理工艺为 $250^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$ ，冷却至常温后，再将弹性元件放入液氮（ -196°C ）罐中，进行低温深冷处理。因为高温油煮和低温深冷处理在弹性元件内产生方向相反的内应力，两者相互抵消达到消除机械加工、热处理和表面处理产生的残余应力的目的。

⑩ 第二次稳定性处理——在弹性元件粘贴电阻应变计、组成惠斯通电桥电路、各项电路补偿、防护与密封等工序完成后，进行振动时效或脉动疲劳处理，其目的是进一步消除残余应力，提高称重传感器的稳定性。

基于上述与弹性元件金属材料有关的冷热加工工艺要求，国内比较理想的弹性元件钢种非 40CrNiMoA 中碳合金钢莫属。

3. 40CrNiMoA 中碳合金钢及其特性分析

40CrNiMoA 中碳合金钢（GB3077 — 1999）在适当的热处理工艺制度下，具有较高的强度、塑

韧性和淬透性，综合性能优良，其特点是：

- ① 强度极限高，弹性元件在高载荷作用下有足够的强度储备；
- ② 屈服与拉伸强度比大，弹性元件应变程度的选择性大；
- ③ 疲劳强度高，保证称重传感器具有较高的稳定性和可靠性；
- ④ 塑韧性和淬透性好，缺口敏感性低；
- ⑤ 弹性滞后和蠕变小；
- ⑥ 组织均匀，稳定性好；
- ⑦ 弹性模量温度系数小，且稳定性好；
- ⑧ 冷热加工的工艺性好。

40CrNiMoA 中碳合金钢的化学成分 (%)：C 0.37 ~ 0.44、Si 0.17 ~ 0.37、Mn 0.50 ~ 0.80、Cr 0.60 ~ 0.90、Ni 1.25 ~ 1.75、Mo 0.15 ~ 0.25、S ≤ 0.04、P ≤ 0.04。

北京钢铁研究院在对 40CrNiMoA 中碳合金钢进行机械性能测试时，采用大冶钢厂提供的合格试验材料，其化学成分 (%) 为：C 0.39、Si 0.28、Mn 0.62、Cr 0.67、Ni 1.38、Mo 0.22、S ≤ 0.16、P ≤ 0.15。

机械性能测试用的加热件 (mm)：φ170×42，成品件 (mm)：φ120。

(1) 锻造工艺

锻造的目的是使组织更致密，减少切削加工量。锻造加热温度 1180℃，加热时间 3 ~ 4 小时，保温时间 ≥ 30 分钟，开锻温度 1140 ~ 1160℃，终锻温度 ≥ 850℃，空冷。锻造后金相组织属于索氏体及回火 α 相 10%，HNO₃ 酒精溶液腐蚀，硬度 HRC30，材料流线与弹性元件轴线方向一致。

(2) 退火工艺

退火的目的是改善切削条件。试件锻造后的退火工艺为：加热温度 860℃，保温 1.5 小时，炉冷。试件锻造后若缓冷，则不必进行退火处理，可以直接进行弹性元件加工。试件退火后金相组织为珠光体+铁素体+碳化物。

(3) 淬火工艺

淬火的目的是使试件具有较高的比例极限和一定的韧性。淬火加热温度 850℃，保温时间 10 ~ 30 分（制造成弹性元件时由其尺寸大小决定），油淬，金相组织为淬火马氏体。

(4) 回火工艺

目的是降低内应力，细化晶粒稳定组织、尺寸和形状，获得所需力学性能。

不同的回火温度可以得到不同的金相组织和硬度等级，其测试结果见表 3。

表 3

不同回火温度下的金相组织和硬度

回火温度 °C	保温时间 h	冷却 方式	金相组织	硬度 HRC	残余 奥氏体
480	2	空冷	回火索氏体, 保留马氏体方向	40	<1%
500	2	空冷	回火索氏体, 仍保留马氏体方向	38.5	<1%
530	2	空冷	回火索氏体	33.5	<1%
560	2	空冷	回火索氏体	30	<1%

(5) 消除冷热加工残余应力提高称重传感器的稳定性

影响称重传感器稳定性的因素很多, 就弹性元件而言, 结构形式、所用金属材料的化学成分、冶炼条件、热处理工艺、消除残余应力的稳定性处理工艺等都是重要因素。

在弹性元件结构形式、化学成分、冶炼条件都确定的条件下, 提高稳定性的关键问题是:

①在热处理过程中产生的残余奥氏体尽量少, 就是使残余奥氏体在回火过程中尽可能的分解。因为残余奥氏体转变为马氏体, 是由面心立方结构转变为体心立方结构, 这样多余的碳原子就使得晶格歪扭, 使体积增大, 造成尺寸变化, 可采用二次回火来消除残余奥氏体。

②尽量减少残余应力, 精加工后采用真空回火。一般都采用增加回火时间的方法来消除残余应力。经 480°C 回火后的弹性元件, 真空回火工艺如下: 460°C × 2h / 次, 真空度 10⁻⁵ 托。

(6) 40CrNiMoA 中碳合金钢的蠕变

40CrNiMoA 中碳合金钢的蠕变很小。采用直径 $\phi=8\text{mm}$ 、长度 $L=167\text{mm}$ 的试验件, 经 500°C 真空回火, 施加 $\frac{1}{2}\sigma_s$ (屈服应力 $\sigma_s=560\text{ N/mm}^2$), 连续受力 105 小时, 伸长只有 0.5 μ (微米), 蠕变很小。弹性元件在 $\frac{1}{2}\sigma_s$ 时, 根本测量不出蠕变数值。即使在较高应力值下, 产生的蠕变也很小且为正值。

4. 40CrNiMoA 中碳合金钢与其它钢种比较

(1) 45、40Cr、40CrNiMoA 钢调质后性能比较

45、40Cr、40CrNiMoA 钢调质后性能比较见表 4。

表 4

45、40Cr、40CrNiMoA 钢调质性能

钢号	热处理	回火温度	σ_b N/mm ²	σ_s N/mm ²	σ_s/σ_b	HRC
45	850°C 水淬	550°C	700	500	0.714	
40Cr	850°C 油淬	570°C	850	670	0.788	
40CrNiMoA	850°C 油淬	500°C	1250	1130	0.904	38.5

(2) 几种中碳合金钢淬透性比较

中碳合金钢按淬透性分为三类：

低淬透性：40Cr 油淬，临界直径 30 ~ 40mm；

中淬透性：35CrMo、42CrMo 油淬，临界直径 40 ~ 60mm；

高淬透性：40CrNiMoA 油淬，临界直径 60 ~ 100mm。

(3) 几种中碳合金钢性能比较

40Cr——强度只比 45 钢高 20%，屈服强度低，断裂韧性高；高温回火慢冷时，易产生第二类回火脆性（可逆回火脆性或称高温回火脆性），即通过脆性温度区（400℃ ~ 550℃）产生的脆性，用快冷也不能抑制；若未淬透，性能显著下降，水冷易产生裂纹。

35CrMo——在 300℃左右回火，缓慢冷却时，易产生第一类回火脆性（不可逆回火脆性或称低温回火脆性），一旦产生就不能消除。加入 Mo 的目的是提高淬透性，但强度偏低。

42CrMo——适当提高 C 和 Cr 的含量，可提高强度和淬透性，因此强度和淬透性都比 35CrMo 大。

40CrNiMoA——加入 Ni 和 Mo 后，Ni 和 Cr 适当配合加上 Mo 的作用，可较大程度的增加淬透性，增大屈强比，细化晶粒，提高回火稳定性。

综上所述 40CrNiMoA 合金钢优于 40Cr、35CrMo 和 42CrMo 三种合金钢最重要的原因是：

- ① 热处理后为回火索氏体，具有强而韧的良好的综合力学性能；
- ② 淬透性好，可在大截面上获得均匀的配合良好的强度和韧性；
- ③ 缺口敏感性低，低温冲击韧性高，无明显回火脆性；疲劳强度高。

(4) 小量程钢制称重传感器弹性元件材料

小量程钢制称重传感器弹性元件材料主要是 3J1(Ni36CrTiAl) 弹性合金，用于制造小尺寸称重传感器和压力传感器的弹性元件。其主要特点是：比例极限和强度极限高；弹性模量稳定性好（接近于常数）；滞后小、线膨胀系数小；固有线性好，在 -200℃ ~ 600℃ 范围内的变化是线性的；在淬火状态下的塑性很好，残余应力小；抗腐蚀性能好，疲劳寿命高。常规机械性能如下：

$$\sigma_b = 1250 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{0.2} = 980 \text{ N/mm}^2$$

$$E = 0.95 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$$

$$\alpha = 8.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

5. 高强度 36CrNiMo4 新型合金钢

上海宝山钢铁公司钢铁研究所，采用大型转炉炼钢，炉外吹氩精炼和 RH 真空处理技术，研制生产了高强度 36CrNiMo4 高级优质合金钢。其特点是：成分控制严格、纯洁度高，性能波动小、稳定性度高，具有较高的使用可靠性。技术性能与美国的 ASTM E4340 和我国的 40CrNiMoA 合金钢相同，是一种新型的称重传感器弹性元件材料。36CrNiMo4 的化学成分（%）

为：C 0.35 ~ 0.48、Si 0.20 ~ 0.35、Mn 0.60 ~ 0.80、Ni 1.00 ~ 1.15、Mo 0.17 ~ 0.25、Cr 0.65 ~ 0.95、1.5、S ≤ 0.015、P ≤ 0.020。机械性能为：抗拉强度 $\sigma_b=1100 \sim 1300\text{N} / \text{mm}^2$ ，屈服强度 $\sigma_s=900\text{N} / \text{mm}^2$ ，延伸率 $\delta_5=11\%$ ，断面收缩率 $\phi=50\%$ ，冲击韧性 $\alpha_k=176\text{N}\cdot\text{M} / \text{cm}^2$ 。热处理工艺为：淬火加热温度 $820^\circ\text{C} \sim 850^\circ\text{C}$ ，水冷。回火温度 $200^\circ\text{C} \sim 600^\circ\text{C}$ ，空冷。

6. 高强度 30CrMnSiNi2A 合金钢

高强度 30CrMnSiNi2A 合金钢的突出特点是：抗拉强度和屈服强度高，在淬火加热温度 $890^\circ\text{C} \sim 910^\circ\text{C}$ ，水冷，回火温度 $250^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$ ，空冷的热处理工艺制度下，抗拉强度 $\sigma_b=1650 \sim 1760\text{N} / \text{mm}^2$ ，其它性能与 40CrNiMoA 合金钢相似。

7. 低碳马氏体沉淀硬化不锈钢 0Cr17Ni4Cu4Nb

我国生产的牌号为 0Cr17Ni4Cu4Nb 的不锈钢，相当于美国的沉淀硬化不锈钢 17-4PH，日本的 SUS630，是低碳马氏体沉淀硬化不锈钢。其化学成分(%)为：C ≤ 0.07，Cr 15.5 ~ 17.5，Ni 3.50 ~ 5.00，Cu 3.00 ~ 5.00，Nb 0.15 ~ 0.45，Si ≤ 1.00，Mn ≤ 1.00，P ≤ 0.035，S ≤ 0.03。0Cr17Ni4Cu4Nb 不锈钢锻造加工的加热温度为 $1050 \pm 10^\circ\text{C}$ ，保温时间 30 ~ 40 分钟，开锻温度 1050°C ，终锻温度 $\geq 890^\circ\text{C}$ ，空冷。固熔热处理即淬火，其加热温度为 $1050 \pm 10^\circ\text{C}$ 保温 30 分钟，经油冷或空冷后，再经过 480°C ，保温 4 小时的时效处理即回火，产生沉淀硬化效果，达到弹性元件所需要的机械性能，硬度 $\text{HRC} \geq 40$ ， $\sigma_{0.2} \geq 1200\text{N} / \text{mm}^2$ 。

0Cr17Ni4Cu4Nb 不锈钢耐腐蚀能力优于其他牌号马氏体不锈钢，可以与某些奥氏体钢相比。同时它还具备强度极限和屈服极限高，抗微塑变形和抗应力松弛能力强，以及机械加工工艺性能好等特点，是制造称重传感器弹性元件较理想的金属材料。

五、国内外铝制称重传感器弹性元件常用材料

各种商用和家用电子秤的核心部件称重传感器，对其结构和性能的要求是体积小、量程小，准确度高、稳定性好。设计制造的难度是即要求弹性元件有较高的输出灵敏度，又要求具备较大的刚度。因其体积小、量程小又要有较大的输出灵敏度，弹性元件的刚度必然差，这正是小量程称重传感器设计制造过程中灵敏度与刚度这对矛盾的两个方面。为了有效的解决这对矛盾，国内外称重传感器研制企业，多采用比重小、弹性模量 E 与密度 ρ 的乘积小，屈服比高，比强度大，塑性好，耐腐蚀和低温性能好，并具有优良机械加工性能的铝合金作为小量程弹性元件材料。由于铝合金的弹性模量 ($E=0.71 \times 10^5\text{N} / \text{mm}^2$) 只有合金结构钢弹性模量 ($E=2.1 \times 10^5\text{N} / \text{mm}^2$) 的三分之一，属于低弹性模量材料，制造小量程称重传感器时，即可以使弹性元件应变区产生较高的应变 ($1000\varepsilon \sim 1100\varepsilon$)，又保证弹性元件具有较大的刚度，在实际应用中取得非常好的测试结果。

1. 国内外称重传感器弹性元件常用的铝合金材料

20 世纪 70 年代中期，美、日两国先后研制出商用电子计价秤及其配套的小量程铝合金称重传感器，80 年代我国通过引进、消化、吸收国外技术与工艺，有多家企业大批量生产商用电子计价秤和铝合金称重传感器。我们就以美、中两国称重传感器弹性元件常用铝合金材料为基础，进行研究与分析。

美国铝合金用四位数字表示：

第 1 位—表示合金系列，例如：铝—铜系列为 $2 \times \times \times$ ；

铝—锌系列为 $7 \times \times \times$ 等。

第 2 位—表示对杂质含量的限制，若 0 表示对杂质不需要特别控制。

第 3、4 位—表示纯铝的百分含量，例如 2024 表示铝含量最小为 99.24%。

我国铝合金新代号分为 7 个系列：

1000 系列—纯铝系； 2000 系列—Al×Cu 系；

3000 系列—Cu×Mn 系； 4000 系列—Al×Si 系；

5000 系列—Al×Mg 系； 6000 系列—Al×Mg×Si 系；

7000 系列—Al×Zn×Mg 系。例如：2A14、2A12、7A04 等。

国内外小量程称重传感器弹性元件应用较多的铝合金为锻铝合金、硬铝合金和超硬铝合金。

（1）锻铝合金

我国牌号 2A14（原牌号 LD10），美国、日本牌号 2014。属于铝—铜—镁—硅系可以热处理强化的铝合金。由于这类铝合金的抗拉强度接近硬铝合金，工艺性优于硬铝合金，并具备良好的锻造性能，故称为锻铝合金。

因为 2A14 铝合金的强化相 Mg_2Si 在室温下析出缓慢，所以自然时效的效果不大，必须经过人工时效才能具有较高的强度。这类铝合金的缺点是具有明显的停放效应，即淬火后在室温的停放时间会降低人工时效的效果，所以淬火后必须在 3 小时以内或 48 小时以后继续人工时效处理，才能获得较好的力学性能。一般淬火加热温度为 $495^{\circ}C \sim 505^{\circ}C$ ，人工时效温度为 $155^{\circ}C \sim 170^{\circ}C$ ，保温 4 ~ 15 小时，空冷。抗拉强度 $\sigma_b=470 \text{ N} / \text{mm}^2$ ，延伸率 $\delta_5=8\%$ 。

（2）硬铝合金

我国牌号 2A12（原牌号 LY12），美国、日本牌号 2024。属于铝—铜—镁系可热处理强化的铝合金。因其强度高、耐热性好，故称为硬铝合金。这类铝合金由于强化相固溶温度的间隙很窄，所以具有强烈的过烧敏感性，热处理时一定要严格的控制淬火加热温度和保温时间，防止过烧。2A12 铝合金淬火加热过烧温度为 $507^{\circ}C$ ，一般淬火加热温度为 $493^{\circ}C \sim 503^{\circ}C$ ，水冷。人工时效温度为 $180^{\circ}C \sim 195^{\circ}C$ ，保温 6 ~ 12 小时，空冷。硬度 HB130，抗拉强度 $\sigma_b=520 \text{ N} / \text{mm}^2$ 、屈服强度

$\sigma_{0.2}=380 \text{ N} / \text{mm}^2$ 、延伸率 $\delta_5=10\%$ 。

(3) 超硬铝合金

我国牌号 7A04 (原牌号 LC4)，美国、日本牌号 7075。属于铝—锌—镁—铜系可以热处理强化的铝合金。该系铝合金是在铝—锌—镁系合金基础上发展起来的。即适当控制锌、镁的元素含量及其比例，并添加铜、铬、锰等元素，较大的提高了铝合金的强度，使其屈服强度接近抗拉强度，屈强比高，比强度大。由于其强度高于硬铝合金，故称为超硬铝合金。与 2A12 铝合金相比 7A04 铝合金的淬火加热范围较宽，为 $465^\circ\text{C} \sim 475^\circ\text{C}$ 。因 7A04 铝合金自然时效需要 50 ~ 60 天，而抗应力腐蚀性能差，所以必须采用人工时效，其时效制度为 $130^\circ\text{C} \sim 140^\circ\text{C}$ ，保温 16 小时，空冷。

美国称重传感器弹性元件用 2024 铝合金的化学成分见表 5；我国称重传感器弹性元件用 2A12 铝合金的化学成分见表 6；2024 与 2A12 铝合金的机械性能见表 7。

表 5 美国称重传感器弹性元件用铝合金的化学成分

铝合金	化 学 成 分 (%)								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
2014	0.5~1.2	0.7	3.9~5.0	0.4~1.2	0.2~0.8	0.1	0.25	0.15	余量
2024	0.5	0.5	3.8~4.9	0.3~0.9	1.2~1.8	0.1	0.25	—	余量
7075	0.4	0.5	1.2~2.0	0.3	2.1~3.9	0.18~0.35	5.1~6.1	0.2	余量

表 6 中国称重传感器弹性元件用铝合金的化学成分

铝合金	化 学 成 分 (%)						
	Cu	Mg	Mn	Si	Zn	Cr	Al
2A10	3.9~4.8	0.4~0.8	0.4~1.0	0.6~1.2	—	—	余量
2A12	3.8~4.9	1.2~1.8	0.3~0.9	0.5	0.3	—	余量
7A04	1.4~2.0	1.8~2.8	0.2~0.6	—	5.0~7.0	0.10~0.25	余量
7A09	1.2~2.0	2.0~3.0	0.15	—	5.1~6.1	0.16~0.30	余量
杂 质 (≤%)							
Fe	Si	Fe+Ni	Ti	Zn	Ni	其它杂质	杂质总和
0.7	—	—	—	0.3	0.1	0.1	1.2
0.5	0.5	0.5	0.15	0.3	0.1	0.1	1.5
0.5	0.5	—	—	—	—	0.1	1.1
0.5	0.5	—	—	—	—	0.1	—

表 7

美国 2024 中国 2A12—铝合金机械性能

国 家	牌 号	抗拉强度	屈服强度	布氏硬度	弹性模量	线膨胀系数
		σ_b N/mm ²	$\sigma_{0.2}$ N/mm ²	HB	$E \times 10^5$ N/mm ²	α 10 ⁻⁶ /°C
美 国	2024	434	280	128	0.73	22.68
中 国	2A12	430	280	131	0.71	22.70

铝合金与合金钢不同，仅在淬火状态下不能达到合金强化的目的。淬火所得到的过饱和固熔体是不稳定的，有自发分解的趋势，只有把它置于一定温度下，保持一定时间，过饱和固熔体才能发生分解，从而引起合金强度和硬度大幅度增高，达到弹性元件要求的强度和硬度。可见铝合金的热处理制度对称重传感器的计量性能和稳定性的重要性，因此必须十分重视并找出最佳热处理工艺制度。

2. 国内外称重传感器弹性元件用铝合金的热处理状态

(1) 铝合金热处理后产生的稳定状态代号

我国铝合金热处理后产生的稳定状态，其代号为：

O—退火状态（原代号 M）；

T₄—固熔热处理及自然时效状态（原代号 CZ）；

T₀—固熔热处理自然时效后冷作硬化状态（原代号 CZY）；

T₆—固熔热处理及人工时效状态（原代号 CS）。

美国铝合金热处理后产生的稳定状态，其代号为：

T₄—固熔热处理并自然时效到充分稳定状态；

T₆—固熔热处理并人工时效到稳定状态；

T₈₁—T₄ 在 190°C 高温中放置 81 小时，进行再时效；

T₃₅₁—特殊调质处理。3 表示拉伸变形量，51 表示热处理拉伸加工、校正。

(2) 如何选择弹性元件用铝合金热处理状态

美、中两国称重传感器制造企业，弹性元件用铝合金较多的选用热处理人工时效状态，即中国牌号 2A12—T₆，美国牌号 2024—T₆。也有美国企业选用热处理自然时效状态 T₄ 再时效处理的 2024—T₈₁ 和经过特殊调质处理的 2024—T₃₅₁，我国没有此种时效状态的铝合金。

称重传感器弹性元件用硬铝合金采用热处理人工时效状态的原因是：

① 淬火后的 2A12 硬铝合金存在较大的内应力，此种淬火内应力是由于弹性元件各部位冷却速度不同而产生的热应力，其表层为拉应力，芯部为压应力，经自然时效后，得不到有效的消除。当加工成弹性元件成品后，会因为应力松弛而产生变形。

② 自然时效状态的 2A12—T₄ 铝合金相和组织状态均不稳定。虽然由于长时间的自然时效，第二项（名义成分 CuAl₂）从过饱和固溶体中沉淀析出，但仍有不少铜原子未完成从过饱和 α 固溶体中脱溶的过程。造成弹性元件在长期使用过程中还会继续进行沉淀相的脱溶过程，而引起尺寸变化。

③ 弹性元件在机械加工过程中，由于切削力的作用使其产生一定的内应力，并在其表层形成不稳定的加工硬化层，这也是称重传感器初始不稳定的原因。

上述三种因素直接影响铝合金称重传感器零点和灵敏度的稳定性，这是比较要害的问题，因此国内外称重传感器生产企业多选择热处理人工时效状态的硬铝合金 2A12—T₆、2024—T₆ 制造弹性元件。

（3）2A12—T₄ 铝合金的再时效处理工艺

由于铝合金生产企业生产的硬铝合金多以热处理自然时效状态 2A12—T₄ 供货，因其组织稳定性差，对弹性元件的尺寸稳定很不利，直接影响称重传感器的零点和灵敏度稳定性。因此必须对处于 T₄ 状态的 2A12 铝合金毛坯或粗加工后的弹性元件，进行一次人工时效处理，一般称为 2A12—T₄ 的再时效处理。为了不降低 2A12 铝合金材料强度，保证加工后弹性元件有足够的刚度，通常采用在 180℃ 温度下长时间保温的时效工艺，使其从自然时效状态变为人工时效状态，即变 2A12—T₄ 状态为 2A12—T₆ 状态。我国军工企业再时效处理工艺为：190℃ × 24h 或连续升温 110℃、150℃、190℃ 保温 6、12、24 小时（时间连续计算）。再时效处理，不仅改变了铝合金的状态、稳定了组织，而且还达到了消除热处理和粗加工产生的残余应力的目的。

20 世纪 80 年代末期，美国伯萨迪纳传感器会议相关论文提出：铝合金热处理时急速冷却发生少许变形，必须立即矫正，因此将固熔处理 + 拉伸矫直 + 时效处理称为变形时效。由于晶体在矫直工艺中经过了塑性变形，位错密度增加了好几个数量级，有利于过渡相形成，所以提高了蠕变性能。例如美国 2024—T₄ 铝合金经过再时效处理后其状态为 2024—T351 就是改变状态处理的典型例证。

一般在向铝合金生产企业订货时，最好要求热处理人工时效状态即 2A12—T₆，硬度要求为：制造各类型称重传感器弹性元件 HB130~135；制造便携式剪切型称重板式轮、轴秤 HB140 ~ 145。

（4）2A12—T₆ 硬铝合金蠕变误差分析

2A12—T₆ 硬铝合金弹性元件受载后，由于内应力急剧变化而产生温度变化，来不及向周围传导和与环境对流交换，而使应变区温度略有变化，设其温度变化 ΔT，则

$$\Delta T = \frac{ET\alpha\Delta\varepsilon}{C\rho}$$

式中： E —铝合金弹性元件材料的弹性模量；
 T —铝合金弹性元件温度；
 α —铝合金弹性元件材料的线膨胀系数；
 $\Delta \varepsilon$ —铝合金弹性元件的应变变化量；
 C —铝合金弹性元件材料的比热；
 ρ —铝合金弹性元件材料的比重。

经计算

$$\frac{\Delta T_{2A12-T6}}{\Delta T_{40CrNiMoA}} = 1.035$$

由于 2A12—T₆ 铝合金的绝热温度变化比 40CrNiMoA 合金钢高 3.5%，线膨胀系数比合金钢大 1 倍，所以绝热温度变化较大，由此造成两方面影响，其一是热膨胀引起弹性元件、电阻应变计敏感栅和粘结剂层的体积变化；其二是因电阻温度系数不为零，直接影响敏感栅材料的电阻率，而产生蠕变误差。

2A12—T₆ 硬铝合金产生的固有蠕变主要是滞弹性蠕变和微量塑性变形蠕变。

① 滞弹性蠕变

滞弹性蠕变是由于点缺陷或其组态在外加应力作用下重新分布，趋于有序排列状态产生钉轧位错，因此应力—应变之间有一个驰豫过程，而产生滞弹性蠕变。

② 微量塑性变形蠕变

由于热处理工艺不当或内部组织和成分不均匀，某些微区可能出现软组织。在承受外加载荷时，尽管应力值低于屈服极限，这些软组织却首先屈服，出现微量塑性变形，使位错开动、增值而产生蠕变。

减少 2A12 铝合金弹性元件蠕变的措施主要是；合理选择热处理制度及时效状态，要求强度和疲劳极限高，屈强比大，抗微塑变形能力强；使组织中析出的强化相呈均匀弥散分布，无论对滞弹性蠕变还是微量塑性变形蠕变，都有很好的抑制作用；弹性元件加工完成后，进行 140℃ × 8h 的稳定性处理。

六、结束语

上述国内外合金结构钢、弹簧钢、热作模具钢、硬铝合金、超硬铝合金均可用来制造称重传感器弹性元件。具体选用哪一种材料，要根据所研制的称重传感器弹性元件结构、量程范围、准确度等级、冷热加工能力、生产工艺装备及制造工艺水平等因素决定。一般家用、商用电子秤用称重传感器和

其它用途的小量程称重传感器多选用 2A12—T₆ 硬铝合金；500kg ~ 300t 各种结构的称重传感器多选用 40CrNiMoA 中碳合金钢、高强度 36CrNiMo4 新型合金钢；超大量程的称重传感器可选择 H11 热作模具钢、高强度 36CrNiMo4 合金钢。

为提高称重传感器的长期稳定性，必须在冷热加工工艺中做到以下两点：其一是在热处理工艺过程中使弹性元件的残余奥氏体尽量少，即在回火过程中使残余奥氏体尽可能的分解。因为残余奥氏体会逐渐转变为马氏体，即由面心立方结构转变为体心立方结构，这样多余的碳原子就使得晶格歪扭，使弹性元件的体积增大，造成尺寸变化，影响称重传感器的零点和灵敏度稳定性。一般多采用二次回火来消除残余奥氏体，可使其小于 1%。其二是尽量减少机械加工产生的残余应力，要求接近弹性元件应变区尺寸精度时，切削用量一定要小，尽量不采用磨削加工。由此可见，在称重传感器研制过程中，选择弹性元件所用金属材料的重要性。如何将称重传感器弹性元件所用的结构材料，通过科学合理和可重复的热处理工艺，使其具有功能材料的某些特点就是制造工艺的关键环节。这也使我们认识到未来称重传感器技术的竞争，主要是创新弹性元件结构、优化弹性元件材料性能、将信息技术与制造技术融合，实现数字化、网络化、智能化的设计与制造的竞争。希望我国称重传感器制造企业不仅成为市场竞争的主体，同时也要成为技术创新的主体，以“创新竞争战略”为指导将我国称重传感器技术与工艺提高到新水平。

【参考文献】

- 【1】安继儒，中外常用金属材料手册，西安交通大学出版社，1992 年。
- 【2】朱德芳、王丽华、田徐珍，传感器元件金属材料初步研究，计量技术专辑（第二期），1978 年。
- 【3】邬显义、施纪泽，试验机的负荷与位移测量系统，机械工业出版社，1985 年 11 月。
- 【4】日本特许（昭 62—5225、昭 62—5226），称重传感器弹性体用析出硬化型合金，1987 年。
- 【5】高峰、杨滨波，LY12—CZ 铝合金精密零组件尺寸稳定的工艺实践，航天工艺，1986 年第 1 期。
- 【6】刘九卿，称重传感器结构设计、制造工艺及其创新发展趋势，广东香山衡器集团股份有限公司技术培训课件，2012 年。

作者简介：刘九卿（1937—），男、汉族，辽宁省海城市。中国运载火箭技术研究院第七〇二研究所研究员，享受国务院政府特殊津贴专家。现为中国衡器协会技术顾问，衡器技术专

家委员会顾问，《衡器》杂志编委。编著《电阻应变式称重传感器》、《国家职业资格培训教程—称重传感器装配调试工》，在有关杂志上共发表学术论文 120 多篇。

(作者通讯地址：北京市丰台区桃源里小区 11 号楼 2 单元 6 号 邮政编码：100076)