

第12篇 仪表用材料

主编单位

重庆仪表材料研究所 上海机械学院

合稿人

陈显亿 李良葆

编写人

陈显亿 李良葆 陶志诚 张兆供

陈仲达 史大道

特约编辑

黄泽铄

CA/Y/22/2

常用符号表

<p>E——磁感应强度</p> <p>B_r——剩余磁感应强度</p> <p>B_s——饱和磁感应强度</p> <p>B_H——工作磁感应强度</p> <p>B_{10}——磁场强度为100A/m(或10O_e)的磁感应强度值</p> <p>$(BH)_{max}$——最大磁能积</p> <p>B_r/E_s——剩磁比(矩形比)</p> <p>l——宽度</p> <p>c——比热、声速</p> <p>ρ——密度</p> <p>D——平行光管的光栏尺寸</p> <p>D_r——反射修正值</p> <p>E——弹性模量、热电动势</p> <p>E_λ——波长为λ的吸收率</p> <p>E_p——平均吸收率</p> <p>f——频率</p> <p>G——剪切弹性模量</p> <p>H——磁场强度</p> <p>H_{10}——10分钟时的弹性后效</p> <p>H_c——矫顽力</p> <p>H_H——工作磁场强度</p> <p>HB——布氏硬度</p> <p>HM——显微硬度</p> <p>HV——维氏硬度</p> <p>HRA——洛氏A标度硬度值</p> <p>HRE——洛氏E标度硬度值</p> <p>HRC——洛氏C标度硬度值</p> <p>I_c——最小起弧电流</p> <p>K——比弯曲、玻璃光学密度曲线的斜率</p> <p>K_μ——能量系数(凸起系数)</p> <p>L——长度</p> <p>M——弯矩、磁化强度</p> <p>M_s——饱和磁化强度</p> <p>n_D——折射率</p> <p>P——铁损、负载</p> <p>P_r——比磁滞损耗</p> <p>Q——机械品质因素</p> <p>Q^{-1}——内耗</p>	<p>R——半径、电阻</p> <p>S——厚度</p> <p>$T(t)$——温度</p> <p>T_C——居里温度(居里点)、弯曲点</p> <p>T_K——近藤温度</p> <p>T_N——奈尔温度(奈尔点)</p> <p>$\text{tg} \delta / \mu_i$——比损耗系数</p> <p>V_c——最小起弧电压</p> <p>α——线膨胀系数</p> <p>α_B——磁感应温度系数</p> <p>$\alpha_{\mu_i} / \mu_i (TK_{\mu_i} / \mu_i)$——磁导率比温度系数</p> <p>$\beta_E$——弹性模量温度系数</p> <p>$\beta_I$——磁率温度系数</p> <p>$\Delta D$——光密度增量</p> <p>$\delta$——延伸率</p> <p>$\varepsilon$——应变</p> <p>$\varepsilon_e$——弹性极限时的应变</p> <p>$\lambda$——导热系数、波长</p> <p>$\lambda_{1.2}$——规定的光谱透光界限的波长</p> <p>$\lambda_s$——饱和磁致伸缩系数</p> <p>$\mu$——磁导率、泊松比</p> <p>$\mu_0$——真空磁导率</p> <p>$\mu_i$——初始磁导率</p> <p>$\mu_m$——最大磁导率</p> <p>$\mu_T$——感应磁导率</p> <p>$\mu_{rec}$——回复磁导率</p> <p>$\rho$——电阻率</p> <p>$\tau$——剪切应力</p> <p>$\sigma$——应力</p> <p>$\sigma_{-1}$——疲劳极限</p> <p>$\sigma_b$——抗拉强度</p> <p>$\sigma_{be}$——弯曲弹性极限</p> <p>$\sigma_e$——弹性极限</p> <p>$\sigma_{0.2}$——屈服极限(产生0.2%永久变形)</p> <p>σ_s——屈服点</p> <p>$\sigma_{0.2} / \sigma_b$——屈服比</p> <p>ϕ——偏转角、最小鉴别角</p> <p>ϕ_0——平行光管的理论鉴别角</p> <p>ψ——断面延伸率</p>
--	---

第 1 章 弹性合金

1 概述

弹性合金在仪器仪表中应用很广,品种繁多,有通用性弹性合金与具有特殊性能的弹性合金。前者,如广泛用于各类机械产品中的各种弹簧钢;后者如用于仪器仪表中的弹性合金。在工业自动化仪表装置中,作为弹性敏感元件材料的弹性合金,其质量的优劣与使用是否合理,都会影响仪器仪表的精确度、稳定性和使用寿命。

本章对仪器仪表用各类弹性合金的特点、性能、应用及强化方法等作扼要叙述,在表中除列举了目前国内常用的材料外,还包括部分国内外性能优越或研制已较成熟的材料。

1.1 弹性合金的分类

仪表用弹性合金按其性能可分为高弹性合金与恒弹性合金。这两类合金均可按其强化方法再分为弥散强化合金与变形强化合金,同时也可按其应用进行分类。

1.1.1 高弹性合金

此类合金具有较高的机械性能,特别是良好的弹性特性,其中包括弥散强化合金与变形强化合金。弥散强化合金需将固溶处理后的软态合金,或具有一定冷加工变形程度的硬态合金,经时效处理后析出金属间化合物强化相,使合金获得强化;变形强化合金则需经冷加工变形,使合金获得强化,再经低温退火,以改善其性能的均一性。一般,弥散强化弹性合金比变形强化弹性合金具有较高的塑性变形抗力。

高弹性合金广泛用于制作各种弹性敏感元件或精密弹簧,如膜片、膜盒、波纹管、游丝、张丝、簧片、发条及弹簧等。按其特性可分为以下三类:

- 1) 一般高弹性合金 指一般用于常温或较高温度(400~500℃以下),且具有一定耐腐蚀性能的高弹性合金。
- 2) 高温高弹性合金 能在500℃以上保持

良好弹性及其它机械性能的高弹性合金。

- 3) 耐蚀高弹性合金 指能耐各种强酸、强碱及其它强腐蚀性介质的高弹性合金。

1.1.2 恒弹性合金

此类合金主要为艾林瓦型合金,在一定温度范围内(如-60~+60℃、-20~+100℃等),它具有很小的弹性模量温度系数或频率温度系数。恒弹性合金包括铁磁性弹性合金与非铁磁性弹性合金。目前使用的多为铁磁性合金,它广泛用于精密仪器仪表与无线电工业中,如音叉型或磁致伸缩型的频率谐振器、频率稳定器、机械滤波器、金属延迟线以及要求恒弹性特性的各种弹性元件(如膜片、波纹管、游丝、张丝等等)。

- 1) 铁磁性恒弹性合金 这类具有铁磁性的恒弹性合金主要有铁镍基合金与铁钴基合金。我国目前应用的铁镍基合金按强化方法又分为弥散强化型与碳化物强化型两类,其中弥散强化型合金的性能较好,应用也较广。

- 2) 非铁磁性恒弹性合金 这类恒弹性合金制成的元件不会受磁场的影响,它包括以下三类:

- (1) 弱磁性恒弹性合金 对铁镍基恒弹性合金的成分进行适当调整,降低其居里点至室温附近,使合金在工作温度范围内处于顺磁性状态。

- (2) 顺磁性恒弹性合金 具有很低的磁化率和很小 β_E 值的恒弹性合金。有的品种还可用于高温。

- (3) 反铁磁性恒弹性合金 在反铁磁转变温度附近出现热弹性反常变化的恒弹性合金。但国内尚无定型产品。

1.1.3 主要弹性合金的类别、型别、牌号、特性及用途(见表12.1-1)

1.2 弹性合金的特性

1.2.1 弹性合金的基本特性

- 1) 良好的弹性性能、机械性能和工艺性能
- (1) 高的弹性极限 金属材料能保持弹性

表 12.1-1 主要弹性合金的类别、型别、牌号、特性及用途

类别	型别	合金牌号	特性	用途	
一般高弹性合金	半奥氏体沉淀硬化不锈钢	1Cr17Ni7Al, 1Cr15Ni7M ₂ Al, 0Cr14Ni18M ₂ O ₂ Al, 1Cr12Mn5Ni4Mo3Al	具有一定耐腐蚀性和耐热性。合金必须通过中间处理使奥氏体转变为马氏体以获得强化	用于制作精确度要求不高而具有400°C以下不同耐热性能的弹簧薄片或结构元件等	
	马氏体时效不锈钢	Cr12Ni10Co ₂ TiNb, Cr12Ni ₄ Co ₁₅ Mo ₄ Ti, Cr15Co ₂₀ Mo ₃ , Ni18Co ₉ Mo ₅ Ti	具有优越的综合性能, 高的弹性储能量和弹性敏感性, 高的微塑变抗力和高的常温耐松弛性能	适于制造耐蠕变或松弛的膜片、膜盒等弹性敏感元件	
	铁镍钴钛基弥散硬化高弹性合金	3J1, 3J2, 3J3	合金淬火后塑性良好, 回火后析出金属间相而使合金强化; 它具有较好的弹性性能和耐腐蚀性, 弹性后效小	用于具有一定的耐热性(200~350°C)和耐腐蚀性且要求精确度高和成形复杂的弹性元件, 如膜盒、波纹管等	
	钴镍铬钨基高弹性合金	3J21, 3J22, 3J24, YG-11	合金需加工变形后时效强化。无磁性具有高的弹性、良好的耐腐蚀性和耐磨性。其中含Ti、Al的合金软态时效强化也有效	用于仪器仪表的轴尖、张丝、游丝、发条、弹簧、平膜片及要求耐腐蚀、耐磨的弹性元件	
	镍基高弹性合金	3J31, 3J32, NiBe ₂ Co ₃ W ₆ NiBe ₂ Co ₃ W ₈ , 蒙乃尔-K	具有良好的耐热性、耐腐蚀性、抗疲劳性和弹性性能。因镍含量高, 限于必要时使用	用作航空仪表中的导电弹性元件和微电开关中的接触簧片, 以及要求一定耐热、耐腐蚀的特殊弹簧等	
	铜基高弹性合金	时效强化型	QBe ₂ , QBe _{1.9} , QBe _{1.7} , QTis.5, QTis-1	铜基弹性合金具有良好的导电性和加工成型性, 在小的负荷下有较大的变形量。其中时效强化型的合金较适于制造精确度较高的弹性元件	用于制造弹性后效小的膜片、膜盒、波纹管、簧片及耐磨抗蚀元件等
		变形强化型	QSn _{6.5} -0.1, QSn _{6.5} -0.4, QSn ₄ -3, QSi ₃ -1, BZn _{1.5} -20, BA16-1.5		用于制造弹簧管、波纹管、膜片、簧片、游丝、张丝及耐磨零件、抗磁元件等
	高温弹性合金	铁基高温弹性合金	OCr15Ni26MoVTi ₂ AlB, OOCr18Ni38Co ₂₀ Mo ₃ TiAl, iCr16Ni ₂₅ Mo ₆ , Cr15Ni ₂₆ Ti ₂ Mo	属于热强钢, 在使用温度下具有较好的热强性和热稳定性。合金奥氏体类钢, 在同火后析出强化相以获得强化	用于制作工作温度在500°C以上的高温结构件与弹性元件

高弹性合金

高温弹性合金		镍基高温弹性合金		时效强化型		NiCr15Nb9Mo3Al, NiCr15Nb9Mo3W2Al NiCr15Ti3AlNb, NiCr10Co13Mo 4WbTiAlNb NiCr19W10Co6TiAl CoCr20Ni20Mo4W4Nb4 CoCr25Ni20Mo4Nb2 CoCr20Ni10		主要特点同上		用于550°C以下工作的精密仪表弹性元件	
镍基高温弹性合金	时效强化型	时效强化型	变形强化型	时效弥散强化型	碳化物强化型	3J53, 3J58, 3J59, YC-12, Ni42Cr6Ti, Ni41CrTi, Ni42CrTiAlMoCu, Ni43CrTiMoCu, Ni43CrZrGe, Ni43CrWTiNi40Cr5Mo2, 改型3J58	具有优越的高强度和高弹性, 还具有较好的耐腐蚀性与磨性	属于铁镍铬系耐腐蚀奥氏体合金, 时效后可获得高强度和高弹性, 具有高的耐腐蚀性	主要用于制造在600°C以上工作的弹性元件	用于550°C以下工作的精密仪表弹性元件	
	非铁磁性恒弹性合金	非铁磁性恒弹性合金	非铁磁性恒弹性合金	非铁磁性恒弹性合金	非铁磁性恒弹性合金	Ni39Mo8Ti, Ni39Cr75MoTi Ni38Cr3TiMo NbTi3Mo10, NbTi39Al5	属于无磁性的镍基合金, 具有较好的耐腐蚀性和耐热性, 弹性模量低	属于铁镍铬基合金中增加W、Mo等元素, 且含碳量较高, 由于形成复杂的碳化物而使合金强化, 其加工性、抗磁性差	适用于制造音叉、手表游丝及温度补偿器等弹性元件	用作电式电表张丝及钟表游丝等	
铁基铁磁性恒弹性合金	铁基铁磁性恒弹性合金	铁基铁磁性恒弹性合金	铁基铁磁性恒弹性合金	铁基铁磁性恒弹性合金	铁基铁磁性恒弹性合金	1Cr18Ni9Ti, 2Cr19Ni9Mo, Cr18Ni12Mo2Ti, OOCr18Ni10, OOCr17Ni13Mo OOCr17Ni17Mo7Cu2, ONi65 Mo 28 Fe6V, OOCr16Ni75Mo2Ti OOCr18Ni60Mo17, OOCr18Ni60Mo17W4, OOCr26Ni35Mo3Cu4Ti, NiCr16Mo16W4, NiCu28-2.5-1.5	主要为铁镍铬与镍基奥氏体合金, 必须通过冷加工变形来获得强化, 并经过低温退火以提高其性能, 制成的弹性元件精确度比时效强化合金所制作的元件要低	系在铁镍铬基合金的基础上添加M ₁ 类合金元素(如Mo、W等)和M ₂ 类合金元素(如Ti、Al、Cu、Be等)所组成的合金, 时效处理后, 由于沉淀析出金属间化合物而获得强化	适于制造机械滤波器中的振子, 频率振荡器中的音叉等频率元件以及膜片、膜盒等弹性敏感元件	适用于制造音叉、手表游丝及温度补偿器等弹性元件	
恒弹性合金	铁基铁磁性恒弹性合金	铁基铁磁性恒弹性合金	铁基铁磁性恒弹性合金	铁基铁磁性恒弹性合金	铁基铁磁性恒弹性合金	3J51, 3J56, 3J51	此类合金居里点低于室温, 因而在室温以上是无磁的	属于无磁性的镍基合金, 具有较好的耐腐蚀性和耐热性, 弹性模量低	用于制造无磁恒弹性张丝, 高温下工作的弹性敏感元件及灵敏度高的仪表游丝		

变形的最大应力称为弹性极限 σ_e 。实际应用时规定以产生某一微量残余应变值时的应力来表示,如 $\sigma_{0.001}$ 、 $\sigma_{0.002}$ 、 $\sigma_{0.005}$ 等;弯曲负荷则规定用产生0.00375%残余应变值的弯曲弹性极限 $\sigma_{0.005}$ 来表示。 σ_e 越高,越有利于提高弹性元件的工作应力或使之小型化。

(2) 高的或适当的弹性模量 在金属材料的比例极限内,应力 σ 与应变 ϵ 的比值称为弹性模量 E ,或称杨氏模量。它表示材料在单向拉伸或压缩应力状态下对应变的抗力。 E 值大则有利于元件的小型化, E 值小则有利于提高材料的弹性储能比 σ_e^2/E 与仪表的灵敏度。对于扭转应力,材料的切变弹性模量 G 为切应力(τ)与切应变(γ)的比值,它表示材料对切应变的抗力。 E 与 G 均系材料弹性的基本量,其物理意义均表示原子间的结合力。其相互间的关系式为: $G=E/2(1+\mu)$, μ 为泊松比。

(3) 高的弹性和弹性储能量 弹性指材料在产生变形的应力解除后恢复其原来形状的性质,即在开始塑性变形前的最大应变值。在拉伸时,以弹性极限时的相对伸长 ϵ_e 表示,即 $\epsilon_e = \frac{\sigma_e}{E}$ 。弹性储能量表示材料在应力作用下吸收弹性变形功而不发生永久变形的最大能量,其值为 $\frac{1}{2}\sigma_e \epsilon_e = \frac{1}{2} \cdot$

$\frac{\sigma_e^2}{E}$,此值越大,弹性元件的敏感性越大。

(4) 高的屈服极限,材料在拉伸时出现0.2%永久变形时的应力称为条件屈服极限,用 $\sigma_{0.2}$ 或 σ_s 表示。 $\sigma_{0.2}$ 与 σ_s 均表示材料的塑性变形抗力,其值对材料的组织很敏感,可用冷变形、热处理或其它强化措施加以调整。

(5) 高的疲劳极限 材料在重复或交变应力作用下,经受规定周次 N 的应力循环而仍不发生断裂时所能承受的最大应力,称为疲劳极限,用 σ_{-1} 表示。

(6) 良好的加工成型性与工艺性能 弹性合金应具有良好的冷加工性能,以便于成型形状复杂且尺寸精密的弹性元件。此外,还应具有良好的其它工艺性能,如微小的热处理变形和良好的焊接性等等。

2) 小的滞弹性 弹性合金系多晶金属材料,

其弹性变形不完全符合虎克定律,因而不是完全弹性的。在弹性变形范围内存在着应力与应变之间的非线性关系的滞弹性。为提高仪表的精确度,滞弹性宜越小越好。

(1) 弹性后效 指合金在弹性变形范围内,当应力不变时,应变随时间继续缓慢增加的现象。通常把应力作用10分钟后缓慢增加的那一部分残余应变值与符合虎克定律的弹性应变值之比值 H_1 ,称为弹性后效。

(2) 弹性滞后 滞弹性的时间效应的另一现象。即在交变应力下弹性元件应力-应变关系不相对应的现象。

(3) 应力松弛 滞弹性表现于能量效应的现象。即在恒定的弹性应变下,弹性元件的应力逐渐减小的现象,又称为弹性蠕变或应力弛豫。

1.2.2 弹性合金的其他特性

1) 恒弹性特性

(1) 恒定的弹性模量和振动频率 在某些场合,要求材料具有恒定的或趋近于零值的弹性模量温度系数 β_E 或振动频率温度系数 β_f 。 β_E 与 β_f 的关系式为 $\beta_E = 2\beta_f - \alpha$ (α 系材料的热膨胀系数)。一般金属材料的 E 值随温度 T 升高而下降, β_E 为负值;恒弹性合金的 β_E 值则随 T 升高而增大,其 β_E 为正值或变化甚微。此特性系由于铁磁性材料的热弹性反常效应所引起的弹性模量反常变化所致。

(2) 高的或适当的机械品质因素 品质因数与内耗均系材料的滞弹性表现于能量效应的参数。滞弹性的时间效应越大,其能量效应也越大。内耗系材料在动态应用中每振动一周期的内部能量消耗,用 Q^{-1} 表示,它是传递弹性波特性的一个重要参数。其倒数 Q 则表示材料的机械品质因数。弹性元件的频率选择能力取决于材料的 Q 值, Q 值越大,频率选择性越好,效率也越高。

2) 良好的高温机械性能及其它性能

(1) 高的蠕变极限 蠕变极限是金属材料在一定温度和恒定拉力负荷下,在规定时间内间隔内的蠕变变形或蠕变速度不超过某一规定值的最大应力。高温下长期工作的弹性元件,应具有高的蠕变极限。

(2) 高的持久强度和高温疲劳强度 持久强度又称持久极限,是金属材料在给定温度下经过

一定时间引起断裂时所能承受的恒定应力。高温疲劳强度系金属材料在高温及重复应力作用下,循环一定周次 N 后断裂时所能承受的最大应力。

(3) 高温应力松弛 指材料在高温下的弹性蠕变现象。高温下工作的材料,应具有良好的高温松弛稳定性。

(4) 良好的耐腐蚀性 用于各种强腐蚀介质中的弹性合金,应具有良好的相应的抗腐蚀性。

(5) 良好的导电性、导磁性、弱磁性或无磁性。

1.3 弹性合金的应用技术

1.3.1 合理选材与材料的合理使用

弹性合金质量的好坏与处理及使用是否得当,对仪表的精确度与稳定性影响很大。

1) 合理选材 按弹性元件的主要性能要求选用合适的弹性材料。如仪器仪表中的膜片、膜盒、波纹管、游丝等弹性敏感元件,主要要求高的弹性极限与疲劳强度、小的弹性后效、良好的加工成型性和焊接性等。用作发条、簧片、螺旋弹簧等弹力元件,主要要求高的弹性极限和疲劳极限、适当的弹性模量以及均匀的材质和尺寸等。用于钟表的游丝、发条则要求高的弹性极限、尽可能小的弹性模量温度系数与热膨胀系数、热处理变形小以及抗蚀、无磁等。对于机械滤波器振子、延迟线、音叉等动态应用元件,主要要求很小或一定值的弹性模量温度系数与频率温度系数以及高的机械品质因数等。对于形状复杂、尺寸精密、性能要求高的弹性元件,宜采用时效强化型合金,因这类合金具有较高的微塑性变形抗力、弹性极限和较小的弹性滞后。如用于较简单的元件,可采用加工成型性较差的变形强化合金。

2) 材料的合理使用 正确的加工和使用可以使材料的性能得到充分发挥。

变形量的选择 弹性合金尤其是变形加工硬化型合金,需选取适当的冷加工变形量来提高其弹性性能。如制作简单的簧片类弹力元件,则可直接采用已有适当变形量的硬态材料;制作须经较大变形量加工成型的波纹膜片等元件,则需考虑选取适当的总变形量,即成型前材料的冷变形量与成型时冷变形量的总和。同一材料用于不同用途的零件时,

应采取不同的冷变形量。如3J21合金的冷变形量,一般为30~35%,当它用作片状弹簧时,其冷变形量多采用70%,而用作轴尖,则需85%或更高。

弹性各向异性 有些弹性合金由于择优取向作用而具有明显的弹性各向异性性能。如3J21合金与轧制方向成 90° 方向上具有最小的 E 、 σ_e 、 $\frac{\sigma_e^2}{E}$

等值(在与轧制方向平行方向上,以上各值均最大)。故应弄清材料方向性,以利于使用。此外,在片、带材宽度方向上,由于厚度的差异,往往导致其边缘和两端部位的机械性能,特别是弹性特性低于中间部位的结果。丝材材质的均匀性一般优于片材。

1.3.2 材料的热处理

1) 热处理对弹性合金及其元件的影响 不论哪种方法强化的合金,最后均需通过热处理使合金强化,提高弹性性能,消除淬火与加工过程中所产生的内应力,并提高材料的均匀性。

2) 弹性合金热处理要点

(1) 适当的淬火温度 对某些合金如3J1、3J53、铍青铜等,应避免过高的淬火温度,以免晶粒长大而导致合金时效后屈服极限降低。对常温下工作的合金可用较低的淬火温度,以利于获得较小的晶粒与较高的晶界强度;对高温用合金,则可适当提高淬火温度,使合金具有较大的晶粒和较高的晶内强度。

(2) 适当的回火温度 弹性合金宜采用最佳的回火温度。如:对于时效强化合金,淬火后经冷加工的硬态合金的回火温度应低于淬态合金的回火温度;对于加工强化的合金,变形量大的应采用低于变形量小的回火温度。

适当的回火温度有利于使3J1、3J3等合金具有较低的弹性后效值。

(3) 避免氧化 弹性合金及其元件易受热处理过程中某些因素的影响。如表面的轻微氧化会导致合金弹性后效的增大。含Ti、Al等易氧化元素的合金更应防止氧化,可采用高真空度的热处理炉进行热处理。此外,炉内气氛加热与装料的方式、炉温的均匀性以及酸洗方法与酸洗质量等等,均会影响合金的性能。

1.3.3 提高弹性合金性能的其它方法

1) 新的热处理强化方法

(1) 二次形变热处理 对某些时效强化弹性合金如3J1型合金, 在经过固溶处理及冷加工变形后, 再进行第二次快速淬火(约5~10秒, 温度与固溶处理相同), 然后进行元件的加工成型及时效处理, 这样可显著提高合金的时效强化效果, 使塑性、耐热性、疲劳强度与持久强度均得到提高。

(2) 动态时效处理 将淬火并时效后的某些合金, 在受 $0.8 \sim 0.9\sigma_{0.002}$ 的载荷下再次进行补充时效, 可显著提高其弹性极限。例如3J3合金经动态时效(1050℃淬火+750℃时效+100kgf/mm²应力下450℃补充时效1小时)后, $\sigma_{0.002}$ 可达130kgf/mm², 且提高了抗腐蚀性。而常用的经750℃2小时普通时效的合金, 其弹性极限为80kgf/mm²。

(3) 松弛稳定化处理 对已制成的弹性元件加以略大于工作应力的预载荷, 使产生一定的预变形, 并把它固定下来, 再在略高于工作温度下保温(10小时或更长)。经这样处理的合金, 由于提高了晶间松弛稳定系数和晶内的滑移阻力, 可避免长期使用后由于应力松弛所引起的变形, 从而提高了元件的精确度与寿命。对高温下工作的元件, 这种处理更为有利。

2) 表面处理 如对3J1合金进行适当表面处理(如电抛光)以除去适量(10~15μm)的表面层之后, 由于清除了表面的微裂缝及夹杂等缺陷, 可提高其弹性极限、硬度和疲劳强度。

2 高弹性合金

2.1 高弹性奥氏体-马氏体不锈钢

2.1.1 高弹性奥氏体-马氏体不锈钢热处理的特点

这类不锈钢的成分介于奥氏体不锈钢与马氏体不锈钢之间, 故称为过渡型奥氏体-马氏体时效强化不锈钢或半奥氏体沉淀硬化不锈钢。其热处理特点如下:

1) 固溶处理 这类钢的含Cr量较低, 固溶处理后的奥氏体组织虽不如变形强化奥氏体不锈钢那样稳定, 但速冷后奥氏体仍可保留下来, 且延展性良好, 便于成型各种弹性元件。

2) 中间处理 因这类钢的马氏体转变温度(M_s 点)在室温以下, 必须经中间处理才能转变为马氏体组织以获得强化, 故又称为“双处理”不锈钢, 以区别于“单处理”的马氏体不锈钢。

3) 时效处理 时效后, 由于马氏体中金属间化合物和碳化物的析出, 使合金进一步强化, 并提高了弹性性能。

2.1.2 中间处理的几种方法

这类钢需经固溶处理(以A表示)、中间处理及时效处理(以H表示), 以获得充分的强化。中间处理有以下三种方法:

1) 高温调节处理(以 A_h 表示) 在950℃保温90分钟后空冷。由于析出碳分物而使奥氏体稳定性降低, 马氏体转变温度(M_s)提高。随后在-73℃以下的干冰酒精中进行冷处理(以R表示)8小时, 以促使奥氏体转变为马氏体。

2) 中温调节处理(以T表示) 一般在760℃保温90分钟后空冷。此时的组织主要是马氏体。由于奥氏体中析出碳化物及其它化合物, 减少了奥氏体中的碳、铬含量, 导致 M_s 点升高, 奥氏体稳定性降低。当冷却至室温时, 即可实现马氏体转变。

3) 冷加工变形(以C表示) 在室温下进行冷塑性变形, 也可促使奥氏体向马氏体转变。经冷变形处理的材料, 一般 $\sigma_{0.2}$ 要比 σ_s 提高得多些。

中间处理方法的选择 一般用高温调节处理的材料经时效处理后, 强度与弹性均较高, 且具有较好的综合性能和尺寸稳定性。中温调节处理的材料经时效后强度较低, 但其工艺比较简单。冷加工变形的材料经时效后, 强度最高而韧性最低, 仅用于形状较简单的元件。

这类合金热处理时体积变化较显著, 且具有磁性, 不适用于精确度要求高的弹性元件。

2.1.3 高弹性奥氏体-马氏体不锈钢主要品种成分、性能与用途(见表12.1-2)

2.2 高弹性马氏体时效不锈钢

2.2.1 高弹性马氏体时效不锈钢的特性

1) 具有优越的综合性能 同其它高合金不

表 12.1-2 高强度奥氏体-马氏体不锈钢主要品种、成分、性能与用途

合金	主要成分 %	合金状态及热处理	机械性能					主要性能	用途			
			σ_b kgf/mm ²	$\sigma_{0.2}$ kgf/mm ²	δ %	Hv	E kgf/mm ²					
1Cr17Ni7Al	C ≤ 0.09 Cr 17, Ni 7Al, Fe 余量	A 1030~1050°C 空冷	91	28	35	165	对氧化性强腐蚀介质的 耐蚀性良好, 焊接性好	用于 400 °C 以下使用 的弹簧及结 构件				
		A _b 同上+950~980°C	93	29	19	165						
		R 同上+(-73°C)8小时	123	80	9	348						
		RH 同上+400~500°C 4小时	162	152	7	470						
		T 750~760°C 90分	102	70	9	295						
		TH 同上+550~570°C 90分	141	136	6	460						
		C 50%冷变形	151	130	5	430						
		CH 同上+480°C 20~30分	178	169	2	528			20650			
		1Cr15Ni7Mo2Al	C ≤ 0.09 Cr 15, Ni 7, Mo 2, Al Fe 余量	A 1030~1050°C 空冷	91	38			30	183	淬火后塑性良好, 易加 工成型较复杂的元件, 具 有良好的弹性和高的 抗蠕变性能, 在 425°C 时 的抗蠕变强度为 1Cr17Ni 7Al 的三倍, 冷处理后时 效变形很小, 耐发烟硝酸 的腐蚀	用于制造 弹簧、膜片 等弹性元 件, 工作温 度可达 425°C
				A _b 同上+950~980°C	105	28			12	165		
R 同上+(-73°C)8小时	128			88	7	392						
RH 同上+450~500°C 4小时	169			151	6	510						
T 750~760°C 90分	101			67	7	270						
TH 同上+550~575°C 90分	147			140	7	460						
C 50%冷变形	154			133	5	460						
CH 同上+480°C 20~30分	186			183	2	540	20400					
0Cr14Ni18Mo2Al	C ≤ 0.05, Cr 14Ni 18, Mo 2Al, Fe 余量			A 975~1000°C 空冷	88	39	25	178	含碳量较低, 抗晶界腐 蚀能力和韧性均较高, 缺 口敏感性较低, 焊接性好	同 上		
				A _b 同上+950~980°C								
		R 同上+(-78°C)8小时										
		RH 同上+500°C 1小时	165	151	5	528						
1Cr12Mn5Ni4Mo3Al	C ≤ 0.08, Cr 12Mn 5, Ni 4Mo 3, Al, Fe 余量	A 1040~1060°C 空冷	116		20	185	与 1Cr15Ni7Mo2Al 比 较 Cr 含量低而 Ni 含量高 其 Ms 点温度提高, 不必 通过中间调节, 可直接进 行冷处理并时效, 或冷加 工再时效以获得良好的综 合性能	用于制作 弹簧、簧片 等				
		R 同上+(-78°C)	143	105	16	440						
		RH 同上+520°C ± 10 1~2小时	164	144	16	516						
		CH 冷变形+520°C ± 10 1~2小时	165~240									

表 12.1-3 高弹性马氏体时效不锈钢主要品种牌号、成分、性能与用途

合金牌号	主要成分 %	合金状态及热处理	机械性能					主要性能	用途
			σ_s kgf/mm ²	$\sigma_{0.2}$ kgf/mm ²	$\sigma_{0.002}$ kgf/mm ²	δ %	Hv		
Cr ₁₂ Ni ₁₀ Cu ₂ TiNb	Cr ₁₂ , Ni _{10.5} Cu _{1.75} , Ti _{0.4} Nb _{0.1} , C<0.03 Fe余量	890°C淬火, -70°C冷处理 +460°C, 6小时 时效	180	170	125	10	460	0.56	具有良好的弹性性能 和综合性能,且耐腐蚀性良好,可在海水 与酸性氧化剂中使用,具有高的 $\sigma_{0.2}/\sigma_s$ 比值和高的弹性储能 量 用于制作弹性敏感 元件,抗蠕变及抗松 弛性能良好,制成的 元件可工作到350°C
Ni ₁₈ Co ₉ Mo ₅ Ti	Ni ₁₈ , Co ₉ , Mo ₅ Ti _{0.70} , C< 0.03(加B,Zr)Fe 余量	830°C淬火, -70°C冷处理 +450°C, 4小时 时效			135			0.88	具有良好的弹性性能 和综合性能,高的弹性储能量,高的 $\sigma_{0.2}/\sigma_s$ 比值和高的弹性敏感性,但不耐 腐蚀 可用于制作膜片、 膜盒等弹性敏感元件
Cr ₁₂ Ni ₄ Co ₁₅ Mo ₄ Ti	Cr ₁₂ , Ni ₄ , Co ₁₅ Mo ₄ , Fe余 量	950°C淬火, -70°C冷处理 +550°C, 6小时 时效	170	156	125	10	460		具有良好的弹性性能 和综合性能,性能与 Cr ₁₂ Ni ₁₀ Cu ₂ TiNb 基本相同,而工作温 度可达400°C,且在 -196°C时仍有足够 的塑性 可用于制作膜片、 膜盒等
Cr ₁₅ Co ₂₀ Mo ₃	Cr ₁₅ , Co ₂₀ Mo ₃ , Fe余量	950°C淬火, -70°C冷处理 +520°C, 4小时 时效	180	115		8			性能基本上,使 用温度可达450°C 同上

锈钢比较,这类不锈钢虽含有较少的合金元素,却具有优越的弹性性能和小的非弹性效应。如高的微塑变抗力($\sigma_{0.002}=120\sim 130\text{kg/mm}^2$),高的 $\sigma_{0.2}/\sigma_b$ 值(可达0.9以上),高的弹性储能量和弹性敏感性、高的常温松弛性能,良好的加工工艺性和热稳定性,且能调节弹性模量温度系数等等。其中,含铬的材料,还具有良好的耐腐蚀性。

2)合金的强化 这是将马氏体相变、应变时效和沉淀强化结合起来以获得综合强化的一类高弹性不锈钢。由于碳、氮等含量很低,且含有适当的镍、铬、钴等,故固溶处理后易产生马氏体转变。但这种马氏体具有较高的塑性和很低的强化系数,故能承受很大的塑性变形。时效后,从马氏体基体中弥散析出强化相,使合金获得充分强化,微塑变抗力的提高更为显著。

2.2.2 合金的热处理

1)马氏体转变 合金完成由马氏体向奥氏体转变的临界温度 A_c ,约为 $730\sim 760^\circ\text{C}$,适当提高到 $820\sim 870^\circ\text{C}$ 或更高温度可加快扩散速度。淬火和冷处理规范均取决于成分,经两次固溶处理可明显提高其强度和韧性。淬火后成型的弹性元件必须进行冷处理以完成马氏体转变并提高回火后的微塑变抗力和抗松弛性。

2)时效强化 按其弹性极限的变化,这类钢的时效处理可划分为三个阶段。最初是强度,特别是弹性极限的急剧升高;随后是强化的减缓直至达到其最大的微塑变抗力;最后,由于聚集过程及反马氏体相变的扩展,又使弹性极限下降。故需严格控制时效规范。适当降低回火温度并延长保温时间,对弹性极限的提高是有利的。

2.2.3 高弹性马氏体时效不锈钢的主要品种与性能(见表12.1-3)

2.3 铁镍铬钛基沉淀硬化高弹性合金

2.3.1 铁镍铬钛基沉淀硬化高弹性合金的特性

1)合金的强化与热处理 这类合金主要指 $\text{Ni}_{36}\text{CrTiAl}$ 型。在淬火后为单相奥氏体,塑性良好,便于成型复杂元件。淬火后时效处理,从固溶体中沉淀析出 $\gamma'[(\text{Fe},\text{Ni})_3(\text{Ti},\text{Al})]$ 强化相,使

合金强化,从而获得高弹性、低弹性后效($H_{10}<0.2\%$)和良好的综合性能。时效强化合金的屈服比(σ_s/σ_b)随淬火温度升高而下降;要获得较小的 H_{10} ,应采用稍低的温度进行时效处理。

2)合金耐热性 在合金中添加5%或8%的钼,可提高合金的热稳定性和弹性性能,且具有更小的弹性后效值。含钼合金的淬火和时效温度均应稍高于不含钼合金。

3)合金耐腐蚀性和磁性能 这类合金为弱磁性,耐蚀性能良好,可在 20°C 的57%硝酸和15%磷酸、 80°C 的8%氢氧化钠中使用,也能用于含硫石油、燃料油和润滑油中。

2.3.2 铁镍铬钛基沉淀硬化高弹性合金的主要品种牌号、成分、性能与用途(见表12.1-4)

2.4 钴镍铬钼基高弹性合金

2.4.1 钴镍铬钼基高弹性合金的特性

1)合金的强化

(1)不含Ti、Al的合金 主要为 $\text{Co}_{40}\text{NiCrMo}$ 型合金。淬火后必须通过大的冷加工变形量,然后进行时效处理。由于钼、钨、铬和碳原子的偏聚,形成“K状态”,使合金获得补充强化。碳含量与合金的强化有关,碳份高则时效强化的效果显著。但超过0.15%时,合金会变脆。

(2)含Ti、Al的合金 添加Ti、Al等强化元素后,除赋予合金以时效强化效果之外,还提高了其变形性能,冷变形量可达90%以上。淬火后直接回火,也能实现时效强化,其析出相为 $(\text{Co},\text{Ni},\text{Fe})_3(\text{Ti},\text{Al})$ 。含Ti、Al的合金中含碳量不宜超过0.05%。

2)明显的弹性各向异性 $\text{Co}_{40}\text{NiCrMo}$ 型合金具有显著的各向异性弹性性能。在平行于轧制方向上具有最大的 E 、 σ_s 和 σ_s^2/E 等值(在 90° 方向上则具有其最小值),故应标明材料的轧制方向,以便于取材与使用。

2.4.2 钴镍铬钼基系高弹性合金的品种与性能(见表12.1-5)

表 12.1-4 铁镍铬钛基弥散强化高弹性合金牌号、成分、性能及用途

合金牌号	主要成分 %	合金状态及热处理	机械性能					主要性能	用途	
			σ_b kgf/mm ²	$\sigma_{0.2}$ kgf/mm ²	σ_s kgf/mm ²	δ %	Hv			E kgf/mm ²
3J1 (Ni36CrTiAl)	Ni34.5~38.5 Cr11.5~13.0 Ti12.7~3.2 Al1.0~1.35 C≤0.05 Fe余量	带材: 软化, 920~980°C水淬 软时效, 650~720°C 2~4小时 硬时效, 600~650°C 2~4小时 丝材, 冷拉+600~ 650°C 2~4小时	75~80	25~40		35~40	150~180	为弥散强化奥氏体合金。淬火后, 塑性良好, 能成型复杂的元件。时效后, 析出(Fe,Ni) ₃ (Ti,Al)强化相, 从而使合金具有良好的弹性性能和综合性能, 使用温度达250°C	适于制作仪表中膜片、膜盒、波纹管等较复杂的弹性元件	
			>120	85~110	①	>8	340~360			17500~21500
			>140	130	①	>5	360			18000~22000
3J2 (Ni36CrTiAlMo8)	3J1成分+ Mo5.4~6.5	软化, 980~1100°C水淬 软时效, 750°C, 4小时	85~95			30~50	200~215	由于组的作用与3J1合金比较, 机械性能有所提高, 使用温度可达300°C		
3J3 (Ni36CrTiAlMo8)	3J1成分+ Mo7.5~8.5	软化, 980~1100°C水淬 软时效, 750°C, 4小时	140~150	110		8~10	400~420	19000		
			90~95	60~65		20~26	215~230		性能基本与3J2相同, 工作温度更高可达350°C	
			145~148	110~115	95~100	6~7	400~450	21000		

①弯曲弹性极限

表 12.1-5 钴镍铬钼基高弹性合金牌号、成分、性能及用途

合金牌号	主要成分 %	合金状态及热处理	机械性能						主要性能	用途
			σ_b kgf/mm ²	$\sigma_{0.2}$ kgf/mm ²	σ_s kgf/mm ²	δ %	Hv	E kgf/mm ²		
3J21 (Co40NiCrMo)	Ni14~16 Cr19~21 Co39~41 Mo6.5~7.5 Fe余量	带材, 软化, 1150~1180°C水淬 硬时效, 500~550°C 4小时	70~80 250~270	230~250	140~160	40~50 3~5	180~200 600~700	20000	系通用高弹性合金 中综合性能最好的一 类合金,具有高弹性, 无磁、耐蚀、耐磨、耐 疲劳等性能外,还具 有高的弹性储能量及 低的弹性后效	适于制作仪 器、仪表的轴 尖、张丝、游 丝、钟表发条、 弹簧、平膜片 及其它弹性敏 感元件与弹性 元件等
3J22 (Co40NiCrMoW)	Ni15~17 Cr19~20 Co39~41 Mo3~4 W4~6 Fe余量	软化, 1150~1180°C水淬 85%冷变形 + 硬时效, 500~550°C 4小时	70~75 300~320	230~280	165~170	40~50 4~6	180~200 ≥750	≥21000	与3J1比较性能有 所改善,具有良好的 冷加工性能和较高 的变形时效强化效果	同上
3J24 (Co40CrNiMoTiAl)	Co39~41 Ni18~20 Cr11.5~13.0 Mo3~4, Ti2 Al1.0 C<0.12 Fe余量	软化, 1150~1180°C水淬 85%冷变形 + 硬时效, 500~550°C, 4小时	70~80 200~220	35~40 180~200	>120	55~60 4~6	140~160 550~600	22000	具有很高的冷变形 能力,由于时效后有 [(Co,Ni,Fe) ₃ (Ti Al)]强化相,故状态 时效也有一定强化效 果	适于制作形 状较复杂的弹 性元件
YC-11	Cr17, Co42 W10, Mo4 Mn2, Ti<1.5 Al<0.5, C<0.08 Fe余量	软化, 1100~1160°C水淬 90%冷变形 硬时效, 550~600°C 4小时	95~110		≥40 ≥110	≥40	≥280 ≥560 ≥804	≥18000 ≥23000	高硬度、耐磨、耐 蚀、无磁抗冲击。丝 材淬火后经92%冷变 形,塑性优于3J22等折 90°不断,便于校直下 料,时效温度范围宽	适于制作航 空与电测仪表 轴尖及其它弹 性元件

2.5 镍基高弹性合金

2.5.1 镍基高弹性合金的特性

镍基高弹性合金具有较好的耐热性和耐蚀性, 150℃以上的抗应力松弛性比铜基弹性合金好, 且均系时效强化型合金, 强化元素有铍、钛、铝等。主要有Ni-Be系合金。这类合金的镍含量特别高, 应严格控制, 合理使用。

2.5.2 镍铍合金

1) 性能 合金具有高的电导率(但低于铜铍合金)、高弹性、高的疲劳强度和抗弯强度、良好的抗氧化性、耐磨性和回火时效强化性, 并具有磁性。其中添加钴、钨的合金有较高的强度和工作温度以及较小的电阻温度系数。

2) 合金的强化 合金淬火后呈单相固溶体, 时效时由于Be原子的聚集而产生富Be的“G、P区”, 并由于G、P区的增厚而生成β相(NiBe), 使之强化。

镍铍合金3J31回火温度在480℃以上时, 电阻率开始急剧下降。如果要求最小的电阻率、时效温度以520~530℃为宜。如果要求高的弹性性能, 可取较低的时效温度, 以480~500℃为好。

2.5.3 镍基高弹性合金的主要品种与性能(见表12.1-6)

2.6 铜基高弹性合金

2.6.1 铜基高弹性合金的特性

铜基高弹性合金具有良好的导电性、加工成型性和一定的耐腐蚀性, 在小的负荷下有较大的弹性变形, 制成的弹性元件有较高的灵敏度。其缺点是强度较低, 工作温度范围小, 多数合金的弹性后效大, 不宜用于负荷过大或温度较高的场合。

2.6.2 时效强化铜基高弹性合金

1) 铜铍合金 又称铍青铜, 系具有最好综合性能的高导电铜基弹性合金, 如高的导电性和导热性, 高的强度和弹性(高的 σ_s 和 σ_s^2/E), 低的弹性后效, 良好的耐磨性, 高的抗疲劳性, 耐蚀性和低温韧性, 且撞击时不发生火花等。

合金淬火后塑性良好, 可加工成型复杂的弹性元件, 时效后由于强化相的弥散析出而获强化。铜铍合金易发生过时效现象而使强度下降, 加入Co、Ni、Ti元素和限制冷变形量可得以改善。

2) 铜钛合金 一种时效强化铜基弹性合金。其机械性能、弹性性能和可焊性均接近于铍铜。但导电性、耐腐蚀性与对复杂元件的成型性较差。由于其生产成本低, 所以它是一种有发展前途的铜基弹性合金。

2.6.3 变形强化铜基高弹性合金

这类铜基弹性合金通过冷变形加工以获得强化, 再通过低温退火以提高弹性极限、改善性能的均一性并降低弹性后效。其后效值一般均大于铜铍合金的后效值。目前锡磷青铜中以QSn6.5~0.1合金使用最广。

2.6.4 铜基弹性合金的主要品种与性能(见表12.1-7与表12.1-8)

3 高温弹性合金

3.1 铁基高温弹性合金

3.1.1 铁基高温弹性合金的特性

这类合金属于耐热钢或热强钢范畴, 主要有镍、铬、钴含量较高的Fe-Ni-Cr系和Fe-Ni-Cr-Co系合金。这些基本组成元素是形成稳定奥氏体组织并赋予合金以热稳定性与热强性的基础, 还借助于其它合金元素的作用使之强化。如铬、钴、钨、钨等元素能强化固溶体, 提高基体强度; 钛、铝、铌等是强化因子, 使合金时效后析出强化相; 硼、铈、锆等则能强化晶界。合金的强化主要还在于时效后强化相的弥散析出, 从而使合金在高温下具有较高的抗塑性变形性能与热强性。热处理对这类合金的性能影响很大, 而热处理规范的选择又与其合金化的程度及弹性元件的工作条件等有关。

3.1.2 铁基高温弹性合金的品种及性能(见表12.1-9)

表12.1-6 镍基高弹性合金主要牌号、成分、性能与用途

合金牌号	主要成分 %	合金状态及热处理	机械性能					主要性能	用途	
			σ_b kgf/mm ²	$\sigma_{0.2}$ kgf/mm ²	σ_s kgf/mm ²	δ %	Hv			E kgf/mm ²
3J31 (NiBeZ)	Be 2 Ni 余量	软化: 1020~1050°C水淬 时效: 500~520°C 2~3小时 70%冷变形+时效; 480~500°C ^① 2~3小时	<85	<45		>2.5	<250	20000	具有较好的耐热性和耐腐蚀性系沉淀硬化性弹性合金, 电导率高, 室温及高温下的弹性均优于3J1, 工作温度可达250°C	用于航空仪表中导电的弹性元件、内燃机各种阀门弹簧及微动开关
			170~183	140~150		3.5~7.5	500	20000		
			>170	>145	>120	>3	>470	21000		
3J32 (NiBeZTi)	Be 2 Ti 0.5 Ni 余量	软化: 1020~1050°C水淬 时效: 500°C, 2~3小时	160	140	85		225	20000	在3J31中添加Ti后, 具有较高的抗疲劳性与抗腐蚀性, 工作温度可达250°C	
							500			
NiBe2Co3W6	Be 1.7 Co 3 W 6 Ni 余量	软化: 1060°C水淬 时效: 600°C45分钟	175	170	164		165~185	20000 ~210000	在3J31中增加Co, W后, 具有较好的热强性和较小的电阻温度系数, 工作温度可提高至400°C	
							430~560			
NiBe2Co3W8	Be 1.7 Co 3 W 8 Ni 余量	软化: 1060°C水淬 时效: 600°C45分钟	175	172	165		190~220	20000 ~21000	性能接近NiBe2-Co3W6, 由于W含量增加耐热性更高, 工作温度可达450°C	
							540~590			
蒙乃尔-K	Ni63~70 Fe2 Al2~4 Ti0.25~1.0 Cu余量	冷变形+时效	<147	<133			HRC36	18200	合金无磁性, 能抗海水、稀硫酸、有机酸及强碱的腐蚀, 工作温度可达270°C	

① 以高导电性为主要指标时, 时效温度提高至530°C。

表 12.1-7 钨基时效强化高弹性合金主要牌号、成分、性能与用途

合金牌号	主要成分 %	合金状态及热处理	机械性能				主要性能	用途	
			σ_b kgf/mm ²	σ_s kgf/mm ²	δ %	Hv			
QBe2	Be2 Ni0.4 Cu余量	软化: 780~800°C 水淬(氮气保护) 硬态 时效: 310~330°C, 2小时 硬态 时效: 310~330°C, 2小时	40~60		>30	<130	11700	具有高的机械性能、弹性性能和良好的物理、化学性能, 高的疲劳极限、淬透性和抗蠕变性能; 合金淬火后塑性良好, 时效后可大大提高其弹性性能和机械性能, 同时还具有高的导电性、耐寒性和冲击时无火花等特点	用于制造重要的弹簧和弹性敏感元件, 如膜片、膜盒、波纹管、游丝和张丝等
			>65		>2.5	>170	12100		
			>115	75 ^①	>2	>320	13300		
			>120	82 ^①	>1.5	>360	13500		
QBe1.9	Be1.9 Ni0.3 Ti0.2 Cu余量	软化: 780~800°C 水淬(氮气保护) 硬态 时效: 310~330°C, 2~2.5小时 硬态 时效: 310~330°C, 2~2.5小时	40~60		>30	<120	11000	与QBe2合金比较, 具有高的疲劳极限, 性能对热处理的敏感性小, 弹性滞后也较小	用于制造精密仪表的弹性元件、敏感元件以及受高变向载荷的弹性元件
			>65		>2.5	>160	3150		
			>115	78 ^①	>2	>350			
			>120	87 ^①	>1.5	>370	13400		
QBe1.7	Be1.7 Ni0.3 Ti0.2 Cu余量	软化: 780~800°C 水淬(氮气保护) 硬态 时效: 310~330°C, 2小时	44		50	<120	10700	具有与QBe1.9相近的性能, 但机械性能稍低	
			>60		>2.5	>150	13000		
			>110		>2	>340			
QTi3.5	Ti3.5~4.0 Cu余量	软化: 850~900°C 水淬 硬态 时效: 400°C 2小时	<50		>30	120~130	12200	机械性能与QBe2合金接近, 但抗氧化性与耐腐蚀性较差, 弹性滞后较大, 价格低于钨钼合金	用于制造簧片、弹簧, 也可代钨钼制作张丝等
			70~90		2.5~4.5	230~260	12500		
			96~116	80	5~11	310	13900		
QTi6-1	Ti6, Al1 Cu余量	软化: 850~900°C 水淬 硬态 时效: 420°C 2小时	40~60		30	140	12000	机械性能高于QTi3.5, 在10%氟化钠溶液中有较好的耐腐蚀性, 抗疲劳性能好	
			85		2.5	200	12800		
			120	79	1.5	350			

① 弯曲弹性极限。

表 12.1-8 变形强化铜基弹性合金主要牌号、成分、性能与用途

合金牌号	主要成分 %	合金状态及热处理	机械性能				主要性能	用途
			σ_b kgf/mm ²	δ %	Hv	E kgf/mm ²		
QSn6.5-0.1	Sn6.5~7.0 P0.12~0.25 Cu余量	软化: 600~650°C空冷 硬态: 特硬态:	>30 >55 >68	>38 >8 >2	70~90 100~200	9500~11500	具有高的弹性, 良好的耐磨性和抗磁性; 对电火花有较高的抗燃性; 塑性、焊接和钎焊性能良好, 在大气和淡水中抗腐蚀性很好	可用于制作导电性能好的弹簧接触片及精密仪器中的耐磨零件和抗磁元件(如振动片、接触器和齿轮等)
QSn6.5-0.4	Sn6.5~7.0 P0.3~0.4 Cu余量	软化: 600~650°C空冷 硬态: 特硬态:	>30 >55 >68	>38 >8 >2	80 180	1120	具有高的强度、良好的弹性、耐磨性和高的疲劳强度。冲击时无火花, 在大气、海水、淡水中抗腐蚀性良好, 易于焊接和钎焊	适用于制造弹簧带及其它弹性元件与耐磨零件等
QSn4-3	Sn3.5~4.5 Zn2.7~3.3 Cu余量	软化: 600°C空冷 硬态: 特硬态:	>30 >55 >68	>38 >8 >2	60 160	1240	具有良好的弹性和耐磨性, 良好的抗磁性和塑性, 易于焊接和钎焊; 在大气、淡水和海水中抗腐蚀性良好	可用于制造弹簧、簧片等弹性元件及耐磨零件和抗磁零件等
QSi3-1	Si2.73~3.5 Mn1~1.5 Cu余量	软化: 700~750°C空冷 硬态: 特硬态:	>38 >65 >75	>45 >5 >2	80 220	12000	具有高的强度和弹性, 耐腐蚀性好; 塑性高, 低温下仍不降低。冷加工硬化后具有高的屈服极限和弹性极限。与青铜、钢等能很好焊接; 在大气、淡水和海水中抗蚀性好	可用于制造各种弹性元件及蜗轮、蜗杆、齿轮等耐磨零件, 某些情况下可代锡青铜及铍青铜
BZn15-20	Ni+Co13.5~16.5 Zn18~22 Cu余量	软化: 700~750°C空冷 硬态: 特硬态:	>35 >55 >65	>35 >1.5 >1	77 183	12600 14000	具有很高的化学稳定性和强度, 塑性良好, 冷热加工性能均好; 弹性优于锡磷青铜, 但焊接性较差	可用作弹簧、簧片及潮湿条件下和强腐蚀性介质中工作的仪表零件等
BA16-1.5	Ni+Co5.5~6.5 Al1.22~1.8 Cu余量	硬态:	60	5			具有高的强度、耐腐蚀性和抗寒性以及良好的弹性	用于制造重要用途的弹簧