

# 热处理工艺

## 全书

主编 谢绍自

RECHULIGONGYI  
QUANSHU

表 10-61 Cu56MnNiCr 合金的热物理性能

温度 / °C	25	10	200	300
性能				
热扩散系数 $\alpha / (10^5 (\text{m}^2/\text{s}))$	0.337	0.373	0.426	0.489
热导系数 $\lambda / (\text{cJ}/(\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C}))$	0.117	0.130	0.155	0.180
比热容 $C_p / (\text{cJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C}))$	419.3	439.3	459.4	459.4
温度 / °C	400	500	600	700
性能				
热扩散系数 $\alpha / (10^5 (\text{m}^2/\text{s}))$	0.570	0.646	0.638	0.686
热导系数 $\lambda / (\text{cJ}/(\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C}))$	0.226	—	0.268	0.301
比热容 $C_p / (\text{cJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C}))$	489.1	—	519.2	549.3

Cu56MnNiCr 合金经 750°C、30min、空冷退火后，在工作温度范围（20~200°C）内膨胀系数为  $(17 \sim 20) \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ，基本上不受强化程度的影响。

锻造棒材要经 750°C 空冷退火，成品应经强化处理：冷炉装料，加热至 425°C，保温 2h，空冷。保温时间过长会导致脆化。

合金的成形性能很好，可生产出带材和丝材；切削性能良好。

#### 四、高膨胀合金的热处理

高膨胀合金是指在一定温度范围内具有较高热膨胀系数的合金，其膨胀系数  $\alpha_{20 \sim 400^\circ\text{C}} \geq 12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。主要用作热双金属的主动层和控温敏感元件。

热双金属为由热膨胀系数不同的两层或多层金属全面焊接而成的复合材料。其中高膨胀合金为主动层，被动层为低膨胀合金。有时在主动层和被动层之间还配置一高导热、导电性的中间层。作为热敏感材料，热双金属应该热灵敏度高和使用温度范围广。灵敏度反映温度变化时热双金属弯曲或偏转的大小，用比弯曲  $K$  ( $^\circ\text{C}^{-1}$ ) 表示，主要决定于主动层和被动层间热膨胀系数的差值。通常希望主动层的热膨胀系数大。使用温度范围即为主动层和被动层膨胀系数差保持近似恒定的温度范围，一般要求被动层合金热膨胀系数弯曲点的温度高。

##### (一) 热双金属的组成和性能

热双金属主动层主要采用：①  $w$  (Ni) 18%~27% 的铁镍合金，其中还常补充

加入 Cr、Mn、Mo 或 Cu 等合金元素，线膨胀系数为  $(18 \sim 22) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。② 锰基合金，线膨胀系数为  $(25 \sim 30) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。③ 黄铜，线膨胀系数为  $(18 \sim 20) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，但电阻率低。

被动层合金通常为因瓦合金 Ni36 和线膨胀系数为  $(4.5 \sim 9.5) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  的  $w$  (Ni) 为 42% ~ 50% 的铁镍合金。要求低电阻率的热双金属的中间层为铜或镍。

主动层和被动层合金以及中间层金属的成分和性能见表 10-62。

由主动层和被动层合金组成的常用热双金属及其性能见表 10-63。

表 10-62 热双金属的组合层合金的成分和性能

合金牌号	化学成分(质量分数)(%)						物理性能			
	Ni	Cr	Fe	Cu	Mn	其他元素	膨胀系数 $\alpha(20 \sim 200^{\circ}\text{C})$ ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	电阻率 $\rho$ ( $20^{\circ}\text{C}$ ) ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ )	热导率 $\lambda$ ( $20 \sim 200^{\circ}\text{C}$ ) [ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ]	弹性模量 $E(20^{\circ}\text{C})$ /GPa
主动层										
Ni19Cr11(4J19) <sup>①</sup>	18~20	10~12	余量	—	0.3~0.6	—	17	0.80	4.391	195
Ni20Mn6(4J20) <sup>①</sup>	19~21	—	余量	—	5.5~6.5	—	19	0.78	4.510	175
3Ni24cr2(4J24) <sup>①</sup>	22~25	2~3	余量	—	0.3~0.6	—	18.5	0.83	4.154	190
Ni29Cr8Ti2A(28HXTi) <sup>②</sup>	28~30	8~9	余量	—	0.3~0.6	2.2~2.6Ti 0.4~0.8Al	16	0.93	3.916	195
Cu62Zn38(H62) <sup>①</sup>	—	—	<0.15	60.5~63.5	—	余量 Zn	20.5	0.07	30.86	110
Cu90Zn10(H90) <sup>①</sup>	—	—	<0.10	88.0~91.0	—	余量 Zn	18.5	0.04	47.47	105
Mn75Ni15Cu10(4J15) <sup>①</sup>	14~16	—	<0.8	9.5~11.0	余量	—	29	1.72	24.92	125
Mn70Ni25Cr5(70rHX) <sup>②</sup>	24.3~25.7	4.5~5.2	<0.8	—	余量	—	25	1.60	—	135
中间层										
Cu	—	—	<0.005	≥99.9	—	≤0.005Zn	17.5	0.0178	109.42	115
Ni	≥99.3	—	<0.15	<0.15	—	—	13.5	0.085	16.85	210
被动层										
Ni34	33.5~35.0	—	余量	—	<0.6	—	2.6	0.86	4.629	—
Ni36(4J36) <sup>①</sup>	35~37	—	余量	—	<0.6	—	1.0	0.79	4.629	150
Ni42(4J42) <sup>①</sup>	41~43	—	余量	—	<0.6	—	4.8	0.60	4.747	155
Ni50(4J50) <sup>①</sup>	49~50.5	—	余量	—	<0.6	—	9.8	0.43	5.815	163
Ni46(46H) <sup>②</sup>	45~47	—	余量	—	0.3~0.6	—	7.5	0.46	5.222	160
Ni45Cu6(45HX) <sup>②</sup>	44~46	5.0~6.5	余量	—	0.3~0.6	—	8	0.90	4.272	175
Ni45Ti2Al(45HTi) <sup>②</sup>	44.4~46.5	—	余量	—	0.3~0.6	2.2~2.6Ti 0.4~0.8Al	5.2	0.93	4.510	165
Ni30Co17(30HK) <sup>②</sup>	29~30	—	余量	—	<0.4	16.5~17.5Co	5.5	0.50	4.747	150

① 括号内为我国牌号。② 括号内为原苏联牌号

表 10-63 我国主要热双金属和其主要性能

牌号	组合层合金			比弯曲 $K$ (室温 ~ 150°C) /(10 <sup>-6</sup> /°C)	电阻率 $\rho$ (20 ± 5°C) /( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ )	弹性模量 $E/\text{GPa}$ 不小于	线性温度范围 /°C	允许使用温度范围/°C
	主动层	被动层	中间层					
5J11	Mn75Ni15Cu10	Ni36	—	18.0 ~ 22.0	1.08 ~ 1.18	130	-20 ~ 200	-70 ~ 250
5J14	Mn75Ni15Cu10	Ni45Cr6	—	14.0 ~ 16.5	1.19 ~ 1.30	140	-20 ~ 200	-70 ~ 250
5J16	Ni20Mn6	Ni36	—	13.8 ~ 16.0	0.77 ~ 0.82	160	-20 ~ 180	-70 ~ 450
5J17	Cu62Zn38	Ni36	—	13.4 ~ 15.2	0.14 ~ 0.19	110	-20 ~ 180	-70 ~ 250
5J18	3Ni24Cr2	Ni36	—	13.2 ~ 15.5	0.77 ~ 0.84	160	-20 ~ 180	-70 ~ 450
5J19	Ni20Mn7	Ni34	—	13.0 ~ 15.0	0.76 ~ 0.84	160	-50 ~ 100	-80 ~ 450
5J20	Cu90Zn10	Ni36	—	12.0 ~ 15.0	0.09 ~ 0.14	120	-20 ~ 180	-70 ~ 180
5J23	Ni19Cr11	Ni42	—	9.5 ~ 11.7	0.67 ~ 0.73	170	0 ~ 300	-70 ~ 450
5J24	Ni	Ni36	—	8.5 ~ 11.0	0.14 ~ 0.19	170	-20 ~ 180	-70 ~ 430
5J25	3Ni24Cr2	Ni50	—	6.6 ~ 8.4	0.54 ~ 0.59	170	0 ~ 400	-70 ~ 450
5J101	3Ni24Cr2	Ni36	Cu	12.0 ~ 15.0	0.14 ~ 0.18	160	-20 ~ 180	-70 ~ 250

## (二) 热双金属的种类

按照性能特点，热双金属分为五类。

1. 高灵敏度热双金属 特点是比弯曲值高，电阻率高或较高。主动层皆由锰合金 (Mn75Ni15Cu10 和 Mn70Ni25Cr5) 构成。此种合金的线膨胀系数高，弹性模量低，耐蚀性低。此类热双金属主要用于热补偿器、测温器的敏感元件、温度调节器及电网保护自动装置等。

2. 较高热敏感热双金属 特点是比弯曲值较高，电阻率较高，弹性模量高。主动层由含  $w$  (Ni) 18% ~ 27% 的多元铁镍合金 (Ni20Mn6、3Ni24Cr2、Ni19Cr11、Ni27Mo6) 构成。被动层为 Ni36 合金。这类热双金属广泛用于制造温度和电流继电器、自动开关的热敏感元件。

3. 中等和较低热敏感度热双金属 特点是比弯曲值中等或较低，电阻率中等，弹性模量高，耐蚀性中等。主动层由  $w$  (Ni) 为 18% ~ 27% 的多元铁镍合金构成，被动层  $w$  (Ni) 为 42% ~ 50% 的铁镍合金。这类热双金属可用于电流继电器、电网自动保护装置及工作温度为 400 ~ 450°C 的温度调节器。

4. 低电阻率热双金属 主动层由低电阻的黄铜 (H62、H90) 或铁镍合金 (3Ni24Cr2) 构成。为了保证低电阻率，还要加镍或中间层。被动层则皆为因瓦合

金 Ni36。这类热双金属可制作电器保护装置的敏感元件。

5. 高电阻率热双金属 主动层由较厚的高电阻猛合金 (Mn75Ni15Cu10) 构成, 被动层为 Ni36。这类热双金属的热敏感度较第一类低 (约低 20% ~ 30%), 但弹性模量降低不明显, 可制造小电流热敏感元件。

### (三) 热双金属的热处理

热双金属以冷轧带材的形式供应, 冷轧变形量一般为 30% ~ 60%。由带材制成热敏感元件, 然后进行装配。在生产过程中, 元件中要产生内应力, 为了保证和稳定元件的热敏感度和尺寸, 热双金属元件 (热敏感元件) 一定要进行低温 (280 ~ 450℃) 稳定化热处理, 使内应力松弛, 发生回复过程, 并使组织稳定化。

稳定化处理的温度一般规定在使用温度以上 50 ~ 100℃。弥散硬化型合金的热处理温度约为 630℃, 升温速度不宜太快, 保温时间为 1 ~ 3h。冷却速度不规定, 但最好是在静止空气中冷却。加热均在真空或保护气氛中进行, 元件间应保留足够的间隙, 以免受热弯曲时相碰。进行多次 (3 次以上) 的循环处理, 可以得到较佳的稳定化效果。常用热双金属元件稳定化处理的推荐规范见表 10-64。应注意以下问题。

表 10-64 热双金属成品常用稳定化热处理规范

牌号	试样热处理规范		
	加热温度/℃	保温时间/h	冷却方式
5J11	260 ~ 280	1 ~ 2	空冷
5J14	260 ~ 280	1 ~ 2	空冷
5J16	300 ~ 350	1 ~ 2	空冷
5J17	150 ~ 200	1 ~ 2	空冷
5J18	300 ~ 350	1 ~ 2	空冷
5J19	300 ~ 350	1 ~ 2	空冷
5J20	150 ~ 200	1 ~ 2	空冷
5J23	380 ~ 400	1 ~ 2	空冷
5J24	300 ~ 350	1 ~ 2	空冷
5J25	400 ~ 420	1 ~ 2	空冷
5J101	230 ~ 250	1 ~ 2	空冷

(1) 具体稳定化热处理温度, 应根据热双金属的组合层合金成分、元件的热敏感度和使用特点, 由试验确定。元件工作的最高温度低于表中推荐温度时, 采用推荐温度; 如高于推荐温度, 则处理温度应略高于最高工件温度。

(2) 形状简单的、厚的板形元件，保温时间要长些，循环处理的次数不能多。螺旋形等易变形的薄小件，以及动作频繁、精度高的元件，处理温度不宜太高，保温时间不宜太长，循环次数多些可获得较好的效果。

(3) 稳定性要求高的元件，应在恰当的热处理温度下保持足够的时间并增加循环处理的次数。除了元件热处理外，元件装配后还应进行部件整体热处理。处理温度与使用温度相同。元件直接或间接加热，并循环多次。

(4) 经常在低温下（零度以下）工作的元件，应增加冷处理工序，提高其在低温下工作的稳定性。

(5) 在潮湿条件下工作的元件，应采用表面防护措施，包括涂层（温度低时）、电镀（温度高时）或化学热处理（效果较好）。

### 第三节 弹性合金的热处理

弹性是金属受载、卸载时形状发生完全可逆变化的一种最初的基本力学行为。金属弹性的大小用其受力时开始塑性变形前的最大变形量表达。一般，金属的弹性性能主要包括：弹性极限  $\sigma$ 。（包括条件弹性极限，对组织结构十分敏感）、弹性模量  $E$  和  $G$ （对组织结构不敏感）、弹性模量温度系数  $\beta_E$  和  $\beta_G$ 、频率温度系数  $\beta_f$  和弹性储能  $\sigma^2/E$  等。由于实际金属的弹性不完整性，金属的弹性性能还必须考虑弹性后效、弹性滞后、内耗和应力松弛等。

按照弹性性能的特点，弹性合金主要分为高弹性和恒弹性合金两大类。形状记忆合金是一种性质独特的超弹性合金。

#### 一、高弹性合金的热处理

高弹性合金的特点是具有较高的弹性模量和弹性极限、较高的疲劳强度、较低的弹性后效及较低的线膨胀系数，一般还希望有较好的非磁性和耐蚀性等。广泛应用于制造航空和热工仪表中的膜片、膜盒、波纹管，继电装置中的接点弹簧片，钟表和仪表中的游丝、张丝等。

影响弹性的主要因素包括三方面：

(1) 原子结构和晶体结构 各种元素的弹性模量随其在周期表中的位置呈周期

性变化,如图 10-84 所示。过渡金属 V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni 等都显示出较高的弹性模量,其原子的  $\alpha$  层电子数较多,原子间的结合力较大。晶体结构的类型对弹性模量亦有影响。面心立方金属的弹性模量常比体心立方金属高。弹性模量呈现明显的晶体学方向性。

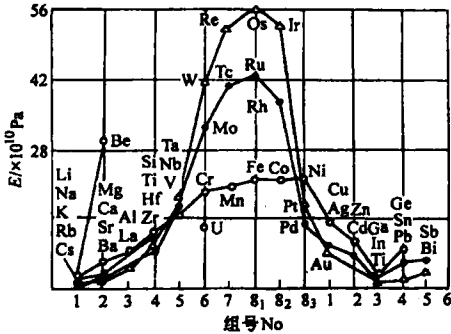


图 10-84 金属弹性模量的周期性变化

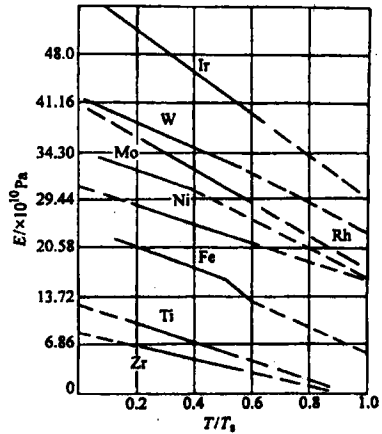


图 10-85 弹性模量与温度的关系

(2) 温度 温度升高时,原子平衡间距增大。原子间结合力降低,弹性模量减小,如图 10-85 所示。

(3) 成分和组织 一般认为,弹性模量对组织状态不敏感,但合金元素作为溶质溶于固溶体中时,因影响原子间的结合力而提高或降低弹性模量;形成第二相时,若此相的弹性模量较高,则可提高合金的弹性模量。

高弹性合金主要有铁基、镍基、钴类、铜基合金,以及其他具有特殊性能的合金等,它们的热处理基本上是固溶和时效处理。

### (一) 铁基高弹性合金

1. 合金的特性 弹簧钢是制作弹簧等应用最广的铁基弹性合金,但其耐蚀性较差,性能不稳定。加入大量镍、铬的铁基合金或铁镍铬合金,具有良好的弹性、较小的弹性后效,同时也有较好的耐蚀性、弹磁性和良好的热稳定性。焊接性能也较好。使用温度一般为 150~200℃,有的可达 400~450℃。我国使用的铁基高弹性合金主要是 3J1、3J2、3J3。其主要成分和基本性能见表 10-65。用于制作仪表中的波纹膜盒、波纹管、螺旋弹簧等。

表 10-65 铁镍铬高弹性合金的成分、性能和用途

合金 <sup>①</sup>	主要化学成分(质量分数)(%) <sup>②</sup>					最高工作温度 /°C	线膨胀系数 $\alpha$ / $(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	密度 $d$ / $(\text{g}/\text{cm}^3)$	电阻率 $\rho$ / $(\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m})$	性能特点和用途
	Ni	Cr	Ti	Al	Mo					
Ni36CrTiAl (3J1)	34.5~36.5	11.5~13.5	2.8~3.2	0.9~1.2	—	200	12~14	7.9	0.9~1.0	热处理后弹性良好,耐蚀性和工艺性能较好,用于膜片(盒)波纹管、弹簧管、螺旋弹簧以及压力传感器的传送杆,转子发动机刮片弹簧等
Ni36CrTiAlMo5 (3J2)	34.5~36.5	11.5~13.5	2.8~3.2	0.9~1.2	5.4~6.5	300	12~14	8.0	1.0~1.1	耐热性较好,从室温到300°C,强度下降不超过4%,其他同3J1
Ni36CrTiAlMo8 (3J3)	34.5~36.5	11.5~13.5	2.8~3.2	0.9~1.2	7.5~8.5	350	12~14	8.3	1.0~1.1	耐热性更好,从室温到500°C,强度下降不超过11%,其他同3J1

① 括号内为我国牌号。

② 其余成分为 Fe。

合金在真空感应炉中冶炼,或进行电渣重熔。热加工的锻轧温度一般控制在 1150~1180°C,停锻温度不低于 900°C。冷变形前轧坯要进行固溶处理,各道冷变形之间须进行中间软化处理。变形量以 50%~70%为宜。软化处理的温度为 950~1250°C,成品元件在 650~800°C 进行时效强化处理。

合金中镍的作用在于保证冷却至 -196°C 时仍为  $\gamma$  相组织,以保持良好的塑性和韧性。铬的作用是为了提高强度和弹性模量,提高耐蚀性,保证无磁性(降低居里点)。钛、铝的作用是形成强化相,提高弹性和强度。钼可提高合金的弹性和热稳定性,使使用温度达到 400~450°C。碳是不利元素,其含量应控制在  $w_c 0.05\%$  左右。

## 2. 合金的热处理

(1) 淬火、回火处理 铁镍铬合金的淬火和回火,特别是薄件的热处理,都在真空或保护气氛中进行。

3J1 (Ni36CrTiAl) 等合金在室温下的平衡组织为  $\gamma$  相基体和少量  $\text{Ni}_3$  (Ti, Al)、 $\text{Ni}_3\text{Ti}$  及  $\text{TiC}$ 、 $\text{TiN}$  等第二相。为了提高塑性便于冷变形,或适于时效后获得较高的力学性能,将合金加热到 900°C 以上,保温后水冷,得到单相  $\gamma$  固溶体。

图 10-86 表示淬火加热温度对性能及晶粒度的影响。在 900~950°C 之间淬火,可完成再结晶,其晶粒细小,强度和硬度缓慢降低,而塑性、晶格常数和电阻率继续显著增大。温度超过 1000°C 后,晶粒过分长大,塑性加工性能降低。



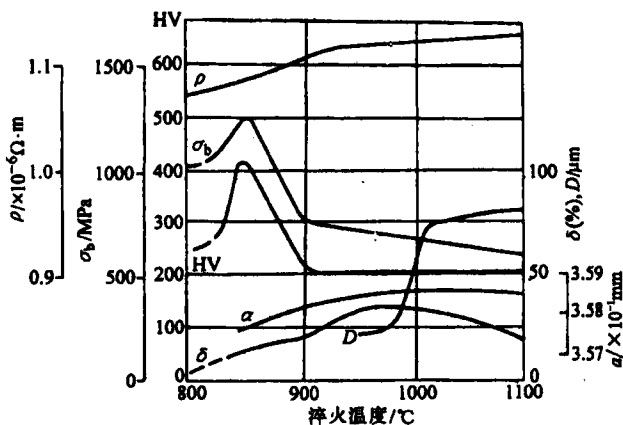


图 10-86 3J1 合金淬火加热温度对性能的影响 (保温 2min, 水冷)

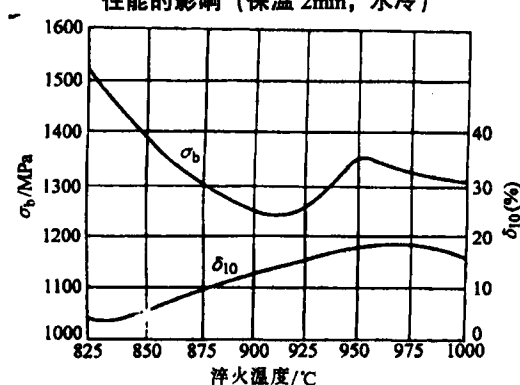


图 10-87 3J1 合金淬火回火处理时淬火加热温度对力学性能的影响

(回火规范为: 700°C, 保温 4h)

合金淬火和回火处理时, 淬火加热温度对力学性能的影响如图 10-87 所示。在 700°C、4h 回火时, 淬火加热温度约 950°C 时强度最高; 而在 950~975°C 时塑性最好。

淬火后的组织为过饱和  $\gamma$  固溶体。回火的目的是使过剩相弥散析出, 提高合金的强度和弹性。回火处理决定合金的最终性能。图 10-88 显示 3J1 合金经不同温度淬火后力学性能与回火温度的关系。合金于不同温度淬火后, 回火温度超过 550°C 后硬度即迅速提高, 塑性显著下降。在 650°C 左右达到或接近极限值。700°C 以后, 强度开始快速降低。一般最佳回火温度为 600~700°C, 这时析出相的尺寸和分布情况最佳。

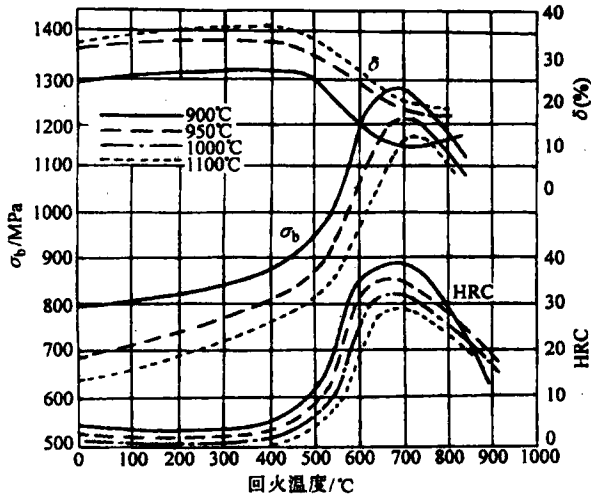


图 10-88 3J1 合金经不同温度淬火后力学性能与回火温度的关系

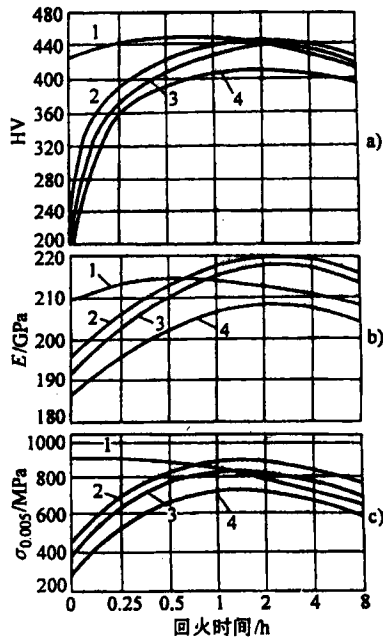


图 10-89 3J1 合金经不同温度淬火后在 700°C 时的回火曲线

淬火温度：1—850°C 2—900°C 3—950°C 4—1100°C

3J1 合金经不同温度淬火后在 700°C 回火时，回火时间对力学性能的影响如图 10-89 所示。强度和弹性的变化符合一般的时效规律，并有一个时效硬化峰值的

最佳时间范围。超过此范围时，强化相聚集粗化，合金强度降低。这个时间范围大约为 2~3h。

图 10-88 和图 10-89 还表明，3J1 合金进行淬火和回火处理时，在 900℃ 以上，淬火温度的变化不改变合金在随后回火时按时效过程发表的规律。但随淬火温度的提高，合金的强度和硬度降低。

在铁镍铬合金中加入钼，可提高弹性和热稳定性。3J1、3J2、3J3 合金淬火后回火温度对强度的影响如图 10-90 所示。含钼的合金的强度普遍较高，回火时的强度峰值温度往高温方向移动，同时屈强化 ( $\sigma_s/\sigma_b$ ) 也较高 (见图 10-91)。钼还提高合金在较高温度下的强度与松弛抗力，如图 10-92 和图 10-93 所示。

几种不同钼含量的铁镍铬合金的热处理和力学性能见表 10-66。

(2) 形变热处理 淬火后进行冷变形，能促进随后回火过程中强化相高度弥散析出，提高合金的强度和弹性。三种合金经不同程度冷变形后的硬度与回火温度的关系如图 10-94a, b, c 所示。随变形度的增大，合金回火后的硬度提高；硬度曲线的峰值向低温方向移动。但变形度超过 70% 时，硬度不再提高，而塑性有所下降。较合适的变形度为 50%~60%。

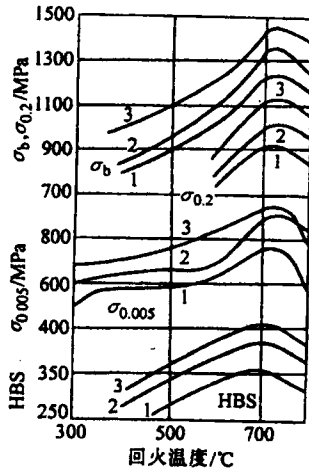


图 10-90 铁镍铬合金淬火后力学性能与回火温度 (保温 4h) 的关系

1—Ni36CrTiAl (3J1) 2—Ni36CrTiAlMo5 (3J2) 3—Ni36CrTiAlMo8 (3J3)

冷变形的强化作用，对含钼的合金的影响更为强烈。表 10-67 中给出了冷变形合金回火后的力学性能。铁镍铬合金经冷变形后，较佳的回火制度见表 10-68。

淬火和冷变形后，再进行一次快速淬火而后回火时，由于快速淬火的加热能使

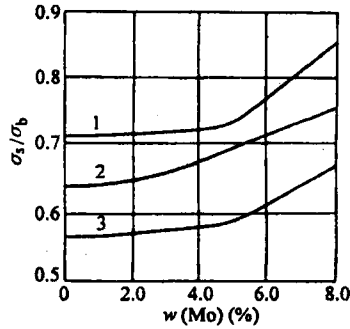


图 10-91 钼含量对铁镍铬合金在不同温度淬火和 700℃回火后的屈强比 ( $\sigma_s/\sigma_b$ ) 的影响

1—900℃水淬+回火 2—950℃水淬+回火 3—1100℃水淬+回火

冷变形造成的缺陷重新均匀分布(不是消失),其微塑性变形抗力和松弛性能可以得到提高。表 10-69 中的结果说明,这种两次淬火形变热处理,具有与一次淬火形变热处理相近的弹性极限,但使伸长率成倍提高。在两次淬火形变热处理中,快速淬火的加热时间对合金的性能影响极大,也最敏感。加热时间增长时,强度降低而塑性提高。

合金的表面状态对性能的影响很大。用电抛光除去有缺陷的表层,可提高表面强度和耐热性,并可降低其弹性滞后。所以,合金形变热处理后配合以电抛光,能明显地提高弹性极限,如图 10-95 所示。

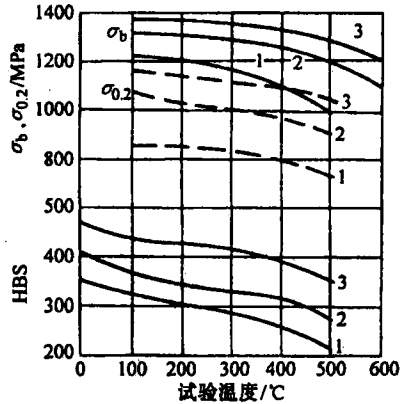


图 10-92 铁镍铬合金在不同试验温度下的强度和硬度

1—Ni36CrTiAl 2—Ni36CrTiAlMo5 3—Ni36CrTiAlMo8

表 10-66 铁镍铬高弹性合金的热处理和力学性能

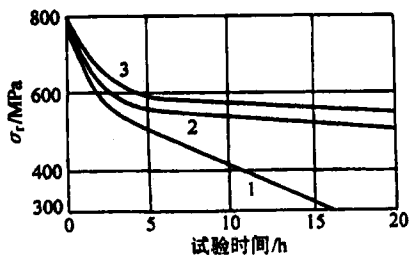


图 10-93 铁镍铬合金在 500°C 下的松弛抗力

1—Ni36CrTiAl 2—Ni36CrTiAlMo5 3—Ni36CrTiAlMo8

合金	推荐的热处理制度	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	伸长率 $\delta$ (%)	屈服极限 $\sigma_{0.2}$ /MPa	弹性极限 $\sigma_e$ /MPa	弹性模量 $E$ /GPa	弹性模量 温度系数 $\beta/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	硬度 HV
Ni36CrTiAl (3J1)	淬火: 920 ~ 980°C, 水冷 软回火: 650 ~ 720°C, 2 ~ 4h 硬回火: 600 ~ 650°C, 2 ~ 4h	750 ~ 800 > 1200 > 1400	35 ~ 40 > 8 > 5	250 ~ 400 850 ~ 1100 1300	800 <sup>①</sup> 900 <sup>①</sup>	175 ~ 215 180 ~ 220	100	150 ~ 180 340 ~ 360 360
Ni36CrTiAl Mo5 (3J2)	淬火: 980 ~ 1000°C, 水冷 软回火: 750°C, 2 ~ 4h 硬回火: 700°C, 2 ~ 4h	850 ~ 900 1250 ~ 1400 1400	30 ~ 35 8 ~ 10 5	500 ~ 600 900 ~ 1100 1300	850	190	100	200 ~ 215 420 ~ 450 450
Ni36CrTiAl Mo8 (3J3)	淬火: 980 ~ 1050°C, 水冷 软回火: 750°C, 2 ~ 4h 硬回火: 700°C, 2 ~ 4h	900 ~ 950 1400 ~ 1450 1400	20 ~ 25 6 ~ 7 5	600 ~ 650 1100 ~ 1150 1300	950	210	100	200 ~ 230 485 ~ 495 495

① 为弯曲弹性极限。

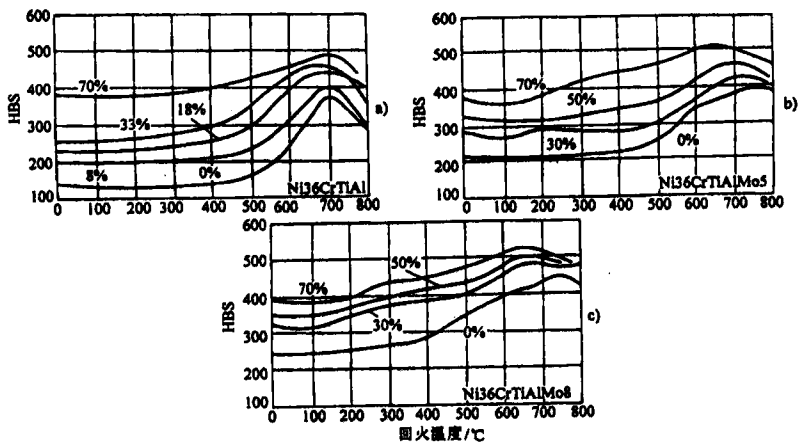


图 10-94 铁镍铬高弹性合金经不同量冷变形后的硬度与回火温度的关系

## 第十章 功能合金的热处理

表 10-67 冷变形铁镍铬合金回火后的力学性能

合 金	热 处 理 规 范	σ <sub>b</sub> /MPa	σ <sub>s</sub> /MPa	σ <sub>0.005</sub> /MPa	δ(%)	HBS
Ni36CrTiAl (3J1)	950℃,水淬 >50%冷变形 700℃,2h回火	1400~1650	1300~1450	1120 <sup>①</sup>	8~12	330~350
Ni36CrTiAlMo5 (3J2)	980℃,水淬 >50%冷变形 750℃,4h回火	1400~1750	1300~1600		5~10	400~420
Ni36CrTiAlMo8 (3J3)	1000℃,水淬 >50%冷变形 750℃,4h回火	1400~1900	1300~1600	1300 <sup>②</sup>	5~10	420~450

① 50%冷变形,700℃回火0.5h。

② 50%冷变形,750℃回火0.25h。

表 10-68 冷变形铁镍铬高弹性合金的回火制度

合 金	合 金 状 态	回 火 制 度
Ni36CrTiAl	淬火带材	650~700℃,2~4h
	淬火后冷轧带材	600~650℃,2~4h
	淬火后冷拔丝材	600~650℃,2~4h
Ni36CrTiAlMo5 和 Ni36CrTiAlMo8	淬火合金 淬火后冷变形合金	700~750℃,4h 650~700℃,4h

表 10-69 铁镍铬合金经各种热处理后的性能

Ni36CrTiAl 合金				Ni36CrTiAlMo8 合金			
热 处 理 规 范	σ <sub>0.002</sub> /MPa	δ(%)	HV	热 处 理 规 范	σ <sub>0.002</sub> /MPa	δ(%)	HV
常规热处理 950℃,2min水淬 700℃,2h回火	350 800	38 15	180 380	常规热处理 1000℃,2min水淬 700℃,2h回火	500 1000	22 6	220 430
形变热处理 950℃,2min水淬 50%冷变形 700℃,0.25h回火	350 580 1150	38 8 2	180 330 435	形变热处理 1000℃,2min水淬 50%冷变形 700℃,0.25h回火	500 820 1300	22 4 3	220 380 540
二次淬火形变热处理 950℃,2min水淬 50%冷变形 950℃,3s快速淬火 700℃,0.25h回火	350 580 820 1120	38 8 25 8	180 330 345 430	二次淬火形变热处理 1000℃,2min水淬 50%冷变形 1000℃,3s快速淬火 700℃,0.25h回火	500 820 920 1240	22 4 22 8	220 380 450 560

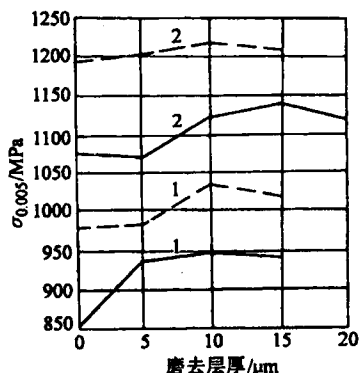


图 10-95 形变热处理和电抛光对铁镍铬合金弹性极限的影响

1—Ni36CrTiAl 实线: 950℃水淬, 700℃回火 2h; 虚线: 950℃水淬, 20%变形, 700℃回火 2h  
2—Ni36CrTiAlMo8 实线: 1020℃水淬, 750℃回火 2h; 虚线: 1020℃水淬, 20%变形, 750℃回火 2h

## (二) 镍基高弹性合金

镍基高弹性合金的主要特点是耐热性和低温韧性好, 工作温度可低于零度或高于 180℃; 耐蚀性较好, 但弹性性能较差。合金主要有高导电性镍铍合金和高温镍铬合金两类。

### 1. 镍铍合金

(1) 合金的特性 合金有很高的导电性(所以也称为高导电弹性合金), 同时还具有高的强度、弹性和疲劳极限, 高的抗氧化性能和耐蚀性, 但有磁性。由于耐热性较好, 一般可用作在较高温度下工作的导电弹性材料, 并可取化铍青铜制造导电弹性元件, 如航空仪表中的导电弹性敏感元件, 仪表用膜盒、膜片和内燃机用的各种阀门弹簧等。

典型的合金为 NiBe<sub>2</sub>。铍含量超过 2% (质量分数) 以后, 合金的热加工性能变坏。加入 B、Co、Mo、W 可提高耐热性, 且降低电阻温度系数。主要的镍铍合金及其性能、用途见表 10-70。

表 10-70 镍铍高弹性合金的成分、性能和用途

合金 (主要成分(质量分数)%)	最高工作 温度/℃	线膨胀系 数 $\alpha$ / ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	密度 $d$ /( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	电阻率 $\rho$ ( $\Omega \cdot \text{mm}^2$ /m)	主要特点和用途
NiBe <sub>2</sub> (Be2Ni 余量)	250	13.5 (硬回火)		0.35(软态) 0.10(硬回火)	室温和高温弹性优于 3J1。用于微动开关接触簧片和高温下工作的特殊弹簧等

## 第十章 功能合金的热处理

合金 (主要成分(质量分数)%)	最高工作 温度/°C	线膨胀系 数 $\alpha$ /( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	密度 $d$ /(g/ $\text{cm}^3$ )	电阻率 $\rho$ ( $\Omega \cdot \text{mm}^2$ /m)	主要特点和用途
NiBe2Ti (Be2, Ti0.5, Ni 余量)	250		8.84		合金中加入钛后,疲劳抗力和耐蚀性更好。用于微动开关接触簧片和高温下工作的特殊弹簧等
NiBe2Co3W6 (Be1.7; Co3; W6, Ni 余量)	400			0.35	耐热性优于 NiBe2, 电阻温度系数较低。用于微动开关接触簧片和高温下工作的特殊弹簧等
NiBe2Co3W8 (Be1.7, Co3, W8, Ni 余量)	450			0.52	耐热性更高,用于微动开关接触簧片和高温下工作的特殊弹簧等

(2) 合金的热处理 镍铍合金在淬火状态下为单相固溶体, 塑性很好, 容易加工成元件。为了提高弹性和导电性, 合金必须回火。图 10-96 为 NiBe2 合金经不同温度淬火后在 550°C 时的回火曲线。回火过程中  $\beta$  相 (NiBe) 沉淀析出造成硬化。表 10-71 中给出了镍铍合金的热处理制度和相应的力学性能。

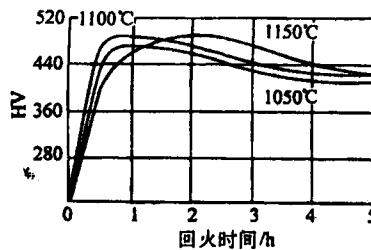


图 10-96 NiBe2 合金经不同温度淬火后在 550°C 时的回火曲线

### 2. 镍铬合金

(1) 合金的特性 镍铬高弹性合金主要是镍铬铌合金, 有很高的热强性、热稳定性、耐蚀性 (在浓硝酸溶液中) 和高温松弛抗力, 所以被称为耐热、耐蚀高弹性合金或高温高弹性合金。在淬火状态下, 合金为单相过饱和  $\gamma$  固溶体, 塑性很好, 可用冷变形制造形状复杂的弹性元件。回火后, 由于弥散析出  $\text{Ni}_3\text{Nb}$  型的  $\gamma'$  和  $\gamma''$  相, 合金的强度和弹性极限大大提高, 松弛抗力的稳定性温度达到 500 ~ 550°C。制造形状不复杂的弹性元件时, 采用形变热处理可进一步提高强度水平及在 550 ~ 650°C 下的松弛抗力。这类合金有 Ni70CrNbMoAl、Ni70CrNbMoWAl、Ni60CrNbMoWAl 等, 其成分见表 10-72。

(2) 合金的热处理 通常, Ni70CrNbMoAl 合金的最佳淬火温度为 1100 ~ 1150°C。含钨的 Ni70CrNbMoWAl 以及 Ni60CrNbMoWAl 合金的淬火温度约为 1150°C。图 10-97 是两种含钨合金的回火曲线。它们获得最高强度和弹性极限的最佳回火



温度在 750℃ 左右。三种镍铬铌高弹性合金的热处理制度和力学性能见表 10-73。松弛抗力如图 10-98 所示。它们的松弛抗力都很好，在较高温度（550~600℃）下，以 Ni70CrNbMoWAl 合金为最佳。

回火前的冷变形（20%~30%）可提高合金的强度和松弛抗力（见图 10-99 和图 10-100），并使回火曲线的峰值温度提前到 650~700℃。

合金在氧化性浸蚀条件下的耐蚀性很高，其中以 Ni60CrNbMoWAl 最好。它在形变热处理（淬火+冷变形+回火）状态下的腐蚀速度（0.00005mm/a），比一般热处理（淬火+回火）状态下的腐蚀速度（0.00057mm/a）低很多。

Ni70CrNbMoWAl 和 Ni60CrNbMoWAl 合金，经 1150℃ 淬火、冲压和 750℃ 回火 5h 后，具有高的承受高温循环载荷的能力和高温蠕变抗力，适于制造工作温度达 550℃ 的膜片型弹性敏感元件。

表 10-71 镍铌高弹性合金的热处理和力学性能

合金	热处理制度及合金状态	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	伸长率 $\delta$ (%)	屈服极限 $\sigma_{0.2}$ /MPa	弹性极限 $\sigma_e$ /MPa	弹性模量 $E$ /GPa	硬度 HV
NiBe2	软化: 1020~1050℃, 水冷	< 850	> 2.5	< 450			< 250
	软回火: 500~520℃, 2~3h	1700~1830	3.5~7.5	1400~1500		200	500
	硬回火: 480~500℃, 2~3h	> 1700	> 3	> 1450	> 1200	210	> 470
NiBe2Ti	软化: 1020~1050℃, 水冷 硬回火: 500℃, 2~3h	1600		1400	850	200	225 500
NiBe2Co3W6	软化: 1060℃, 水冷 硬回火: 600℃, 45min	1750		1700	1640	200~210	165~185 430~560
NiBe2Co3W8	软化: 1060℃, 水冷 硬回火: 600℃, 45min	1750		1720	1650	200~210	190~220 540~590

① 以高导电性为主要指标时，热处理温度可提高至 530℃。

表 10-72 镍铬铌高弹性合金的化学成分(质量分数%)

合金	C	Cr	Nb	Mo	W	Al	Ni
Ni70CrNbMoAl	≤0.06	14~16	9.5~10.5	4~6	—	1.0~1.5	余量
Ni70CrNbMoWAl	≤0.06	14~16	9~10	3~4	1.7~2.3	0.6~1.1	余量
Ni60CrNbMoWAl	≤0.06	24~26	8~9	3~4	1.7~2.3	0.6~1.1	余量