

冷变形和热处理对金属电阻应变系数的影响^①

何 华 春^②

(昆明贵金属研究所)

摘 要

经再结晶退火后, 纯金属、固溶体和长程有序合金的电阻应变系数减小, 冷加工时则增大。纯金属和固溶体的电阻应变系数随温度升高单调下降。晶体缺陷, 弥散析出相以及原子排列的有序程度是影响电阻应变系数的主要因素。

关键词: 铂基合金, 钨基合金, 多元合金, 金基合金, 冷变形, 热处理, 电阻应变系数

1 前言

在拉伸或压缩变形时金属与合金的电阻将发生变化。这种现象谓之应变-电阻效应。在弹性范围内电阻相对变化 $\Delta R/R$ 与应变 ε 之间存在比例关系。其比值称为电阻应变系数 k 。借助电阻应变系数可把机械量转换成电学量。 k 越大, 所做传感器的灵敏度越高。电阻应变系数的大小仅决定于材料本身的特性, 而且与合金状态密切相关。Bertodo^[1]和增本、中村等人^[2]研究过金属与合金的电阻应变系数。作者也曾研究合金成分对电阻应变系数的影响^[3]。但是, 关于冷变形和热处理对金属材料电阻应变系数的影响迄今未见报道, 系统地研究这个问题是有意义的。

2 实验方法

设计的应变-电阻测量装置是由试样、夹头、框架、引线、和千分表构成的。应用它可以测量各种金属丝或带材在形变过程中的电阻变化。试样平直地夹在两端夹头中, 其标距长

267.22mm, 对电阻率很小的金属丝标距可达 648.74mm。微微转动螺旋拉伸试样, 用千分表测量伸长, 每间隔 0.05 或 0.10mm 拉伸一次。夹头两端分别焊接两对电流和电位引线。试样在拉伸时的电阻变化用 QJ-19 型双臂电桥测量。

应用 GY-700 型高温应变计和 UCAM-8BL 型多用数字仪测定单丝应变片在不同温度下的电阻应变系数。贴应变片的粘结剂为 P₁₂₂, 在 700℃ 稳定化处理 1 h。

硬态指断面收缩率 ϕ 大于 80% 的加工态。退火态系再结晶退火或高温稳定化处理试样。

3 实验结果

3.1 室温电阻应变系数

应用自制电阻-应变装置, 测量金属丝在形变过程中的电阻相对变化 $\Delta R/R$, 再分别计算出不同应变 ε 时的电阻应变系数。试验得到的 k 与 ε 的关系见图 1。在弹性范围内 k 为常数。超过弹性极限时 k 随 ε 急剧下降。纯金属和固溶体合金的电阻应变系数在形变量足够

^①于 1991 年 5 月 28 日收到

^②研究员

大时趋近于2。

退火态和加工态试样在室温下的电阻应变系数 k 和电阻率 ρ 列于表1。按相变类型分别叙述如下。

3.1.1 纯金属和固溶体 由表1可见, 对纯金属和固溶体合金, 再结晶退火时电阻应变系数和电阻率均减小, 冷加工时则增大。不均匀固溶体(如PdW合金)也有同样现象, 不过硬态电阻率是减小。

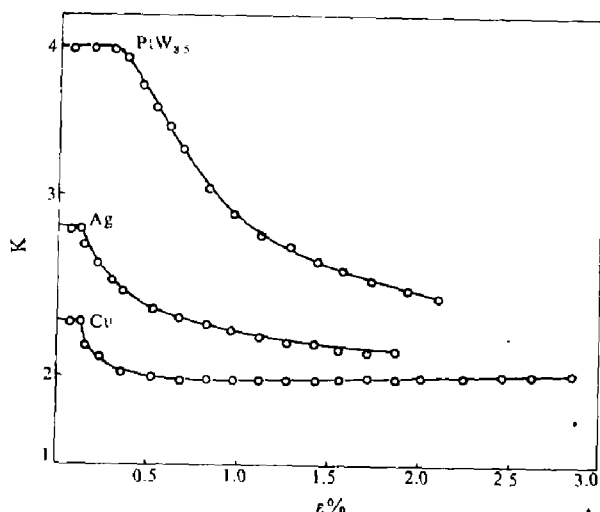


图1 电阻应变系数 k 与应变 ε 的关系

3.1.2 有序合金 对正常有序合金Pt-8.5Cu, 由于冷变形和热处理引起的 k 和 ρ 值之变化与纯金属和固溶体合金的相似(见表1), 但变化量较大。有序Pd-42Au-11Fe和Pd-38Au-11Fe-1Al具有反常效应^[4]。经过适当

热处理的合金发生长程有序时, 电阻应变系数显著减小, 而电阻率大大增加(见表1)。淬火Pd-42Au-11Fe的 k 值(2.67)大于退火态(1.70)。这是由于淬火形成的短程有序使 k 增加的结果。

3.1.3 相分解合金 Pd-10Fe-5Cr-1Al、Pd-30Ag-14Cu-10Au-10Pt-1Zn、Au-14Cu-10Ag-5Pt-1Ni合金, 在等温时效过程中析出第二相, 其相变属于成核-长大机制。它们在淬火或硬态下的电阻应变系数比较低, 等温退火时 k 和 ρ 增加, 其典型曲线如图2所示。

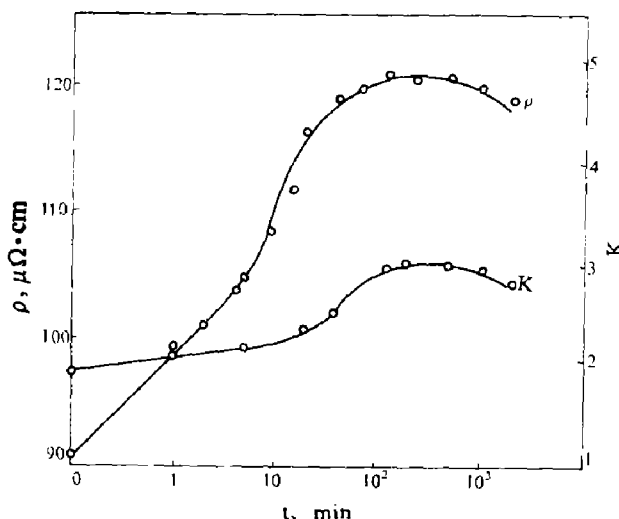


图2 硬态Pd-10Fe-5Cr-1Al合金在500℃时效的电阻率和电阻应变系数

表1 金属与合金的 k 和电阻率 ρ

金属材料	退火态		硬态	
	k	$\rho, \mu\Omega \cdot \text{cm}$	k	$\rho, \mu\Omega \cdot \text{cm}$
PT	4.87	10.5	5.57	
Ag	3.08		3.52	
Al(Al ₂ O ₃)	2.24		2.34	
Cu	2.31		2.39	
PtRh ₁₃	4.08	20.5	5.53	20.8
PdW ₂₀	2.64	110.0	2.98	104.2
PdNi _{25.2} Cr _{9.6}	2.26	74.3	2.53	71.6
PtCu _{8.5}	1.39	54.4	1.69	60.3
PdAu ₁₂ Fe ₁₁	1.70	182.0	3.26	62.8
PdAu ₃₈ Fe ₁₁ Al ₁	1.85	221	2.97	67.0
PdFe ₁₀ Cr ₃ Al ₁	2.84	89.5	2.26	83.2
AuCu ₁₄ Ag ₁₀ Pt ₉ Ni ₁	2.01	16.2	1.50	20.4
PdAg ₃₀ Cu ₁₄ Au ₁₀ Pt ₁₀ Zn ₁	3.01	20.4	1.92	33.1

由图可见, k 随时间的变化与 $\rho-t$ 曲线相似, 经过一定孕育期后 k 和 ρ 均达到最大。

图3是硬态 Cu-38Pt 合金在 300℃ 处理时电阻率和电阻应变系数与时间的关系。在 20min 前 ρ 迅速下降, 之后下降速度减小, 而 k 随 t 的变化则相反。 ρ 之所以降低是由于该合金的相变属于 Spinedal 有序分解^[5]。

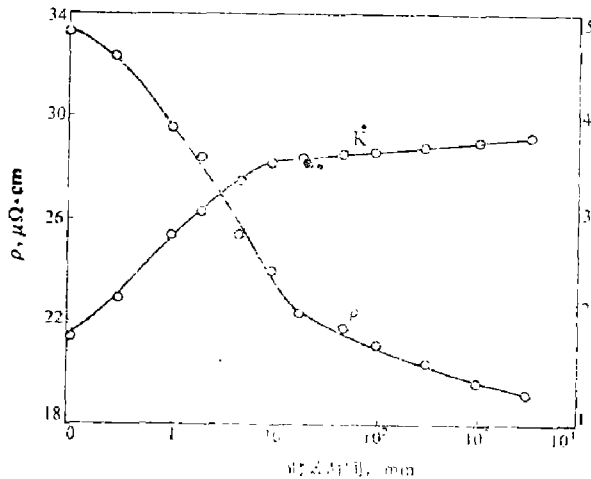


图3 硬态 Cu-38Pt 在 300℃ 时效的 ρ 和 k 之变化

3.2 高温电阻应变系数

将一些典型金属和合金作成单丝电阻应变片, 然后测量它们在不同温度下的电阻应变系数, 结果见图4。当温度升高电阻应变系数不再是常数, 问题复杂得多。

从图4曲线2可见, 纯金属和固溶体 PtW 合金的电阻应变系数一般随温度升高单调下降, 温度特性的一致性很好。因此, 常用电阻温度系数低的固溶体合金丝作为应变片敏感栅。

从图4曲线1可见, 纯 Fe 有异常现象。在 450℃ 前电阻应变系数随温度升高急剧增加到 7.64, 随后 k 值缓慢减小。第二次升温测量时 k 普遍增加, 在 300℃ 时 k 高达 8.7, 超过了理论值。

从图4曲线5、6、7可以看出, Au-30Cu 和 Pt-8Cu 的电阻应变系数均随温度升高逐渐增加, 而 Pd-38Au-11Fe-Al 相反。Au-30Cu 在有序-无序转变温度附近有一转折点, Pt-8.5Cu 和 Pd-38Au-11Fe-1Al 在有

序-无序转变温度时出现一小峰。

从图4曲线4还可看出, Pd-10Fe-5Cr-1Al 合金的电阻应变系数随温度升高而减小, Pd-30Ag-10Cu-10Au-10Pt-1Zn 以及 Au-38.6Pd-3Cr 的 k 值则随温度升高而增加(图4曲线3和8), 后两种合金在相分解温度附近出现一个小峰。

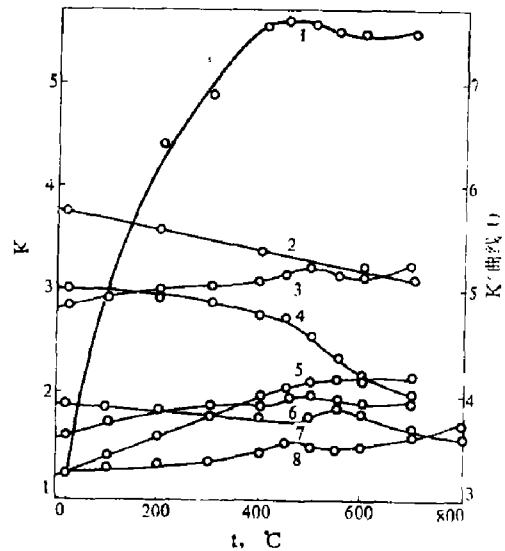


图4 金属与合金 $k-t$ 曲线

- | | |
|-----------------|-------------|
| 1—Fe; | 2—PtW; |
| 3—PdAgCuAuPtZn; | 4—PdFeCrAl; |
| 5—AuCu; | 6—PtCu; |
| 7—PdAuFeAl; | 8—AuPdCr |

4 讨论

在单向拉伸下金属材料的电阻应变系数可以表示为

$$k = d \ln R / d \ln L = (1 + 2\mu) + d \ln \rho / d \ln L \quad (1)$$

式中 R 和 L 为试样的电阻和长度; μ 为泊松比。第一项是形变的几何效应, 第二项为形变体中的物理效应。多数金属的 μ 值在 0.35 左右, 显然 k 的大小主要决定于电率应变系数 $d \ln \rho / d \ln L$ 。

冷变形产生大量晶体缺陷, 电阻率增加, 见下式

$$\rho = \rho_0 + \rho_R = \rho_0 (1 + \rho_R / \rho_0) \quad (2)$$

式中 ρ_0 —退火态电阻率; ρ_R —冷变形产生的

残余电阻率。对 (2) 式取对数并展成幂级数, 由于 $\rho_0 \gg \rho_R$, 则有

$$\frac{d \ln \rho}{d \ln L} = \frac{d \ln \rho_0}{d \ln L} + \frac{\rho_R d \ln L}{\rho_0 (\ln \rho_R - d \ln \rho_0)} \quad (3)$$

弹性变形时伴随体积变形:

$$d \ln \rho_R / d \ln L = 0$$

$$\left(\frac{d \ln \rho}{d \ln L} \right)_e = \frac{d \ln \rho_0}{d \ln L} \times \frac{(1-2\mu)d \ln \rho_0}{d \ln V} \quad (4)$$

式中 $d \ln \rho_0 / d \ln V = 2 / (3 + 2\gamma)$;

V ——试样体积; γ ——格林爱森常数。

范性形变时没有体积变化:

$$(d \ln \rho_0 / d \ln L) \rightarrow 0,$$

$$\left(\frac{d \ln \rho}{d \ln L} \right)_p = \left(\frac{d \ln \rho_R}{d \ln L} \right) \frac{\rho_R}{\rho_0} = \frac{d \rho_R}{\rho_0^e} \quad (5)$$

Van, Buereh^[7], Broonm^[8]和 Pieffer^[9]等人指出

$$d \rho_R = A \varepsilon^B \quad (6)$$

式中 A 是依赖于杂质浓度和原始状态的常数。常数 B 可以是 1 (Al, Mo) 或 3/2 (Cu, Ag, Au), 高应力时为 3/4。

在形变过程中电阻率应变系数为弹性和范性两部分之和, 即

$$\begin{aligned} \frac{d \ln \rho}{d \ln L} &= \left(\frac{d \ln \rho}{d \ln L} \right)_e + \left(\frac{d \ln \rho}{d \ln L} \right)_p \\ &= (1-2\mu)(2/3+2\gamma) + A / \rho_0 \varepsilon_p^{B-1} \quad (7) \end{aligned}$$

将上式代入 (1) 式, 则得冷变形金属电阻应变系数

$$k = (1+2\mu) + (1-2\mu)(2/3+2\gamma) + A / \rho_0 \varepsilon_p^{B-1} \quad (8)$$

式中 γ 是原始态数值; 晶体范性形变时, $\mu=0.5$, 于是 (8) 式变为

$$k_p = 2 + A / \rho_0 \varepsilon_p^{B-1} \quad (9)$$

第二项总是大于 0, 但很小, 对 Cu 为 0.01, 与实验符合。因此, 金属材料的范性电阻应变系数 k_p 趋近 2, 一般比 2 略大一些。

从 (8) 式不难看出, 金属和固溶体经冷加工后电阻应变系数增加; 再结晶退火时第三项消失, k 减小。当合金中的原子规则排列时 k 降低得更多。

已知格林爱森常数与热膨胀系数 β 、定容

比热 C_v 、体弹性模量 E 和密度 d 的关系为 $\beta E / C_v d$ 。按照格林爱森定则, 比值 $\beta / C_v d$ 与温度无关, 只有 E 依赖于温度。因而正常金属和合金的电阻应变系数与弹性模量一样, 随温度升高单调下降。相变型合金在转变温度附近 β 、 C_v 、 E 和 d 产生不连续跃变, 从而导致 γ 和 k 的突变。Fe 电阻应变系数的反常行为与铁磁性有关。相分解合金在等温时效过程中析出弥散的第二相具有强化作用, 弹性模量显著升高, 从而 γ 和 k 也增加。

5 结论

1 再结晶退火金属, 固溶体和长程有序合金的电阻应变系数减小, 冷加工时则又增加;

2 相分解合金等温时效或退火后其 k 值高于硬态;

3 合金中原子排列长程有序时 k 显著减小, 短程有序、弥散析出相和晶体缺陷使 k 增加;

4 固溶体合金的电阻应变系数随温度升高而减小, 一些相变合金和铁磁性金属出现反常现象。

北京航空学院马良程和任小存同志协助测量高温电阻应变系数, 本所俞育东同志提供 Au—30Cu、五元和六元合金样品, 特此致谢。

参 考 文 献

- 1 Bertodo R. J. Appl. Phys., 1986, 12: 1743
- 2 增本, 中村. 日本金属学会志. 1968, 32: 681, 925
- 3 何华春. 贵金属. 1978, (2): 33
- 4 何华春. 物理学报. 1983, 32: 691
- 5 何华春. 李永年. J. Mater. Sci., 1988, 23: 1558
- 6 Lowson A W. Progress In Metals Physics, Chamers and King. 1965, 6, 144
- 7 Van Bueren H G. Acta Met., 1953, 1: 43
- 8 Broom T. Advances in Phys., 1954, 3: 9
- 9 Peiffer B R. J. Appl. phys., 1958, 29: 1581 & 1963, 34: 298