

第三次航空用电阻应变片及 测试技术交流会报告选编



航空工业部第七技术情报网

1982

序

一九八〇年十月部第七技术情报网在广西南宁召开了第三次航空用电阻应变片及测试技术交流会。会上共交流了63篇技术报告和资料，基本反映了这个专业近三年来的国内外技术状况。

一九七八年以来的三年内，部内外的电阻应变片及测试技术又有了新的发展，出现了一批新的研究成果，其中有的达到国内先进水平，填补了空白；有的达到或接近国际水平。这些成果主要表现在：

研制了新的应变电阻金属材料，如用于制造中温自补偿应变片的康铜、卡玛、镍铬锰硅等金属箔材，以及铁铬铝、金钼铬、铂钨铼镍铬钨等高温应变合金丝材。

研制了新的粘结剂，如 J—37 室温固化中温粘结剂、常压固化 250℃ 聚酯粘结剂、P12—9 型 800℃ 高温粘结剂等。

研制了许多新品种、新规格的应变片，箔式应变片得到了推广使用。新研制的应变片有：纸基箔式应变片、0.2×0.8 小标距应变片、150℃ 和 250℃ 温度自补偿箔式片、中温弹塑性应变计、水下应变片、剥落式高温应变片和断裂丝片等等。

研制了多种应变式传感器，如双层弓型应变传感器、小载荷和小压强传感器以及应变记忆元件等。

广泛开展了应变电测技术的研究工作，重视了对测试结果的误差分析工作，初步开展了高温应变测试和复合材料的测试工作。

制定并出版了航空工业部《电阻应变计》部标，完成了《应变片电测原理及测试技术》一书的编写工作。

本文集共选编了 18 篇技术报告。在此仅向参加本文集审编工作的陶宝祺、吴永端、马良琨、朱尤亮、黄培清等同志表示感谢。

编者

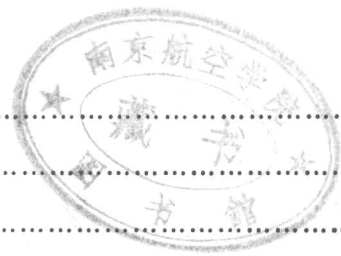
VZ16.1
1001



30272044

目 录

序	
贵金属应变材料的发展	1
温度自补偿应变康铜箔的研究	13
800℃温度自补偿应变片研制小结	19
800℃无机粘结剂的研制	27
微型箔式应变片研制报告	31
断裂丝片性能的实验研究	35
常温水下应变片的研制	41
剥落式高温应变片	50
中温弹塑性电阻应变计	53
应变记忆元件、双层弓形应变传感器、小载荷和小压强传感器	59
飞机操纵系统应变式力传感器	67
用应变片测量飞机起落架载荷的试验技术	85
高速旋转抽真空下的应变测量	96
GH—37一级涡轮叶片800℃下的应力——应变测量的数学处理方法	103
A732B—950气动式刷环引电器	110
旋转轮盘应变电测数据处理与误差分析	123
导线电阻在不同测量桥路中对应变读数的影响	146
钻孔法测量残余应力的一些技术问题	152



448424

贵金属应变材料的发展

贵金属研究所 童立珍

摘 要

本文介绍对贵金属应变材料的技术性能要求，国外的贵金属应变材料的研究概况，国内的研究进展以及国产材料的应用情况。

一、贵金属应变材料在科技领域中的应用及技术性能要求

随着航空、航天、核工程技术的迅速发展对高温构件热应力的测量不断提出了新的要求，例如航天器和超音速飞机发动机某些零、部件需要在 760°C 至 1200°C 的条件下测量应力^[1]，也要测量低温下的应力等等。

为了满足上述各领域的要求，高温应变材料必须具备以下综合性能：

在电学性能方面，要求电阻率大，电阻温度系数小，电阻—温度关系曲线在工作温度以内尽量接近直线。反复加热和冷却时这一关系曲线重复性好，抗氧化性好，即在工作温度下长期保温后电阻变化小（即零漂小）。

在弹性—电学性能方面，要求灵敏系数大，且在应变测量范围内为常数，灵敏系数与温度关系尽量是一水平线，反复加热重复性好。

高温机械性能方面，在工作温度下机械滞后小，弹性应变极限大，疲劳强度高。

在上述性能要求中，根据应变材料的不同用途，对电阻应变丝要求亦不同。例如，高温静态测量应变丝，要求合金抗氧化性好，内部结构稳定是主要的。对高温动态测量，疲劳强度，高灵敏系数是很关键的性能。而作为常温各种传感器，大的电阻率和灵敏系数，高强度，小的机械滞后为主要性能。可见，对应变材料的性能要求很高，使用环境与条件又多种多样，是比较困难的材料研究项目。

二、国外贵金属应变材料研究概况

从1856年汤姆生发现了金属在应变时电阻变化的规律以后，到40年代，人们开始研制应变计，促进了应变材料的研究工作。在高温应变合金方面，从高温稳定性出发，首先注意到铂及其合金。在贵金属应变合金方面，最先取得成果是英国发动机公司 R. Bertodo，从1953—1968年期间，相继发表了很多文章^[2, 3, 4, 5]，他系统地研究了46种合金系，认

为最好的高温应变材料是铂钨合金。紧接着 Easterling^[6], Maddocks(1964), Sidhn(1965), Mccalvey(1966), Grindrod(1967)^[7], 等人也分别对低浓度 PtW合金进行了深入研究。后来美、日也采用 PtW丝制造高温应变计^[8]。

苏联 Правочеров 和 Савицкий(1962)研究了 Pd—Ag₃₅—Pt₅, Pd—Ag₃₅—W₅等合金, 这些合金有较低的电阻温度系数, 尤其是 Pd—Ag—W, 在100—700℃范围内接近零, 然而抗氧化性能太差, 没有得到应用。

美国在1967年公布的 Pt—Rh—Os, Pt—Pd—Ir, Pt—Rh—Mo, Pt—Pd—Rh^[9]等三元合金, 共同的特点是有较高的灵敏系数, 但电学性能比 PtW合金差, 没有得到广泛应用。

R. Bertodo, 于1968年提出 Pt—Pd—Mo三元合金^[10], 他认为是目前综合性能最好的高温应变合金。

美国 William, T. Bean 等人1969年报导的合金^[11], 其中 Pt—Ni₁₀, Pt—Ni₃—W₂, Pt—Ni₃—Cr₂, Pt—W₃等合金抗氧化性能较好, 使用温度达1400°F(760℃), 作者认为 Pt—W—Ni比 Pt—W 稳定, 建议用 Pt—Ni—Cr作补偿丝。国外报道的某些 Au, Pd, Pt系高温应变电阻合金性能列于表1。

国外学者 R. Bertodo 研究了铜、镍、银、金、铁、铂、钨、等46种金属和合金系^[4,5], 并详细地讨论了铂合金的性能。他认为在面心立方铂金属中加入ⅥA类元素可得到最好的结果。但是加钼会把铂的抗氧化能力减到不允许的低值。加铬和钨由于形成稳定的氧化层, 减低了氧化速度。大约含15—20%重量的铬和7—15%重量的钨, 提供了最合适的性能。含钨的铂合金最主要的性能表示在图1中。从氧化速率和氧化机理来看, 含8—10%重量的钨, 在1000℃时静止空气中氧化速度最小。如图2所示。而且认为含钨量小于大约8.5%时合金会严重氧化, 这是形成铂氧化物组成的松散氧化膜之故。含钨量高于8.5%的合金趋向于形成非松散的钨化物。在图2中可看出, 最有希望的合金看来是含钨量大约8.5—9.5%的合金。Pt—W的稀合金在所有温度下都是单相的, 除稍高的电阻温度系数以外, 显示了高温应变合金所需的一切特性。后来的高温应变材料发展都与 Bertodo 以上的研究工作紧密联系的。

表1 国外某些高温应变合金性能

合金名称	电阻率 $\mu\Omega \cdot cm$	电阻温度 系数 $10^{-6}/^{\circ}C$	应变灵敏 系数 K	附注
Au—Pd	41	302	1.8	高温下不稳
Au—Pd—Fe	156	~0	2.7	高温下不稳
Au—Cr	36.9	11	-	高温下不稳

〔续表1〕

合金名称	电阻率 $\mu\Omega \cdot cm$	电阻温度 系数 $10^{-6}/^{\circ}C$	应变灵敏 系数 K	附注
Au—Pd—Cr	71.5	12	—	高温下稳定性好
Au—Pd—W	85.5	47	—	高温下不稳
Au—Pd—Mo	100	-120	—	高温下不稳
Pd—Cr	100	375	1.6	高温下不稳
Pd—Mo	104	135	1.6	高温下不稳
Pd—W	68	168	5.1	高温下不稳
Pd—Ag—W	40	~0	1.25	高温下不稳
Pd—Rh—Ru	87	750	—	高温下不稳
Pd—Rh—Mo	42	150	—	高温下不稳
Pd—Ag—Pt	38	15	—	高温下不稳
Pt—W ₈	59	246	3.7	高稳定性达1400° F
Pt—W _{9.5}	76	139	3	高稳定性达1400° F
Pt—W—Re	89	82	2.4	高温下不稳
Pt—Ag ₃₃ —W ₃	46	~0	—	高温下不稳
Pt—Rh ₀ —Mo ₀	67	222	2.6	高温下不稳
Pt—Rh—Os	28	730	4.7	高温下不稳
Pt—Rh—W	40	400	—	高温下不稳
Pt—Pd—Ir	49.7	250	4.3	高温下不稳
Pt—Pd—Rh	30.1	556~657	4.3	高温下不稳
Pt—Pd ₄₅ —Mo ₁₀	78	100	4	高温下不稳
Pt—Ni ₁₀	32	630	4.2	高稳定性达1400° F
Pt—Ni ₈ —W ₂	31.3	680	4.2	高稳定性达1400° F
Pt—Ni ₃ —Cr ₂	38	440	4.1	高稳定性达1400° F

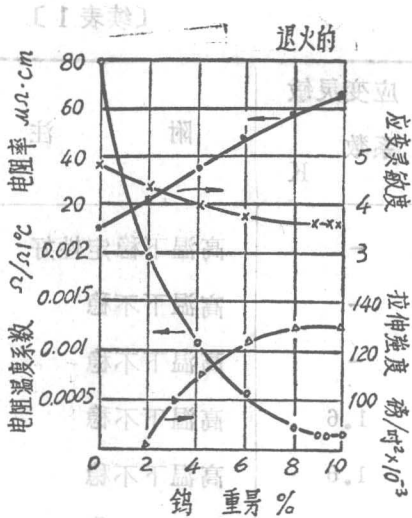


图1 铂钨合金的电学和机械性质

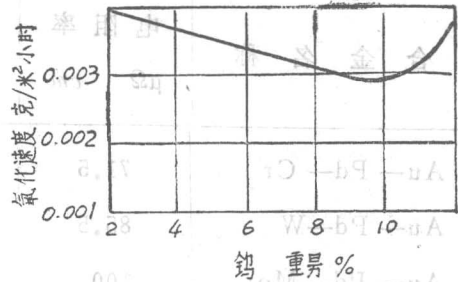


图2 铂钨合金的初始氧化速度

三、国内贵金属应变材料研究进展

随着高温热构件 (700°C 以上温度) 静态和动态应力测量, 及某些高精度传感器的需要, 促进了贵金属应变材料的研究。从1966年开始贵金属研究所进行了大量研究工作。第一阶段从1966到1974年, 主要是仿制了国外现有的性能较好的贵金属合金。已研制成功的有 $\text{PtW}_{8.5}$, $\text{PtW}_{9.5}$, $\text{PtW}_{10.5}$ 等合金。主要性能都赶上了国外水平。71年以后, 研制成功了 PtWRe , PtPdMo 等。这两种合金电阻温度系数比 PtW 低, 但高温稳定性不如 PtW 合金好, 这些合金性能见表3。

上述合金研制成功, 填补了国内贵金属应变材料的空白, 为高温应变片和各种传感器的研制创造了有利条件。

为了满足高精度压力传感器的需要, 对 PtW 合金的制备工艺进行了研究^[12], 不同的制备工艺对 PtW 合金性能影响较大。旧工艺加工态的电阻温度系数为 $300\sim 500 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 经过特殊热处理以后^[13] 电阻温度系数降到 $200 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 左右。而新工艺制得的 PtW 合金硬态温度系数为 $267 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 只需 950°C 短时间退火便降到 $190 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 硬态灵敏度为 5.2, 退火后为 4.2。与国外一些作者所报道资料的比较见表2。可见不同作者报道的数据不同, 大致可分为两组, 一组温度系数在 $216\sim 248 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 另一组在 $300\sim 500 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 之间。这说明不同作者采用的合金制备工艺不同, 不同的冶金因素对 PtW 合金性能影响很大。对 PtW 合金要获得更好的综合性能, 采用热拉制工艺是必要的。丝材在使用温度 700°C 以上热拉拔, 提高了合金丝的机械性能, 且保持在使用温度下的组织稳定性, 这对高温应变测量尤其重。要同时为 PtW 合金拉制8微米的超细丝创造了条件, 扩大了 PtW 合金作为各种传感器元件的使用范围。

表2 Pt—W 合金性能比较

年份	合金名称	电阻温度系数 10 ⁻⁶ /°C	一定温度间隔 内电阻变化% 20—800°C	应变灵敏 系数
1963—64年	Bertodo			
1964年	Bertodo	246	0	3.7 ± 0.378
1965年	Bertodo			
1963年	Easterling	216	0	4.45
1963~64年	Redfern	300	~ + 1%	未注明
1964年	Maddocks	~ 300	未注明	未注明
1965年	Sidhu	324	+ 0.5%	~ 4
1967年	Grindrod	248	0+	3.4
1966年	Mecalvey	325	未注明	~ 4
1973年	贵金属研究所	220	线性良好	3.7
1975年	贵金属研究所	190	"	4.2

第二阶段的研究工作于1974年以后，在仿制国外产品基础上，开始研制我国独特的贵金属应变合金。在解决700°C以上高温静态和1000°C动态测量的应变材料方面，贵金属所的研究工作获得满意的成果。

首先对PtW合金进行改制。PtW合金在700°C以下是目前较好的高温应变材料，但是在800°C的以上到1000°C的高温下，氧化挥发严重，疲劳强度低，无论静态或动态测量都达不到使用要求^[14]，因此对PtW合金必须进行改良。以PtW合金为基体，再添加一些其它合金元素，改善高温抗氧化性能。这些添加剂是在元素周期表中离铂较近的某些元素。高熔点的铈添加到PtW合金中显著提高合金的强度，降低了电阻温度系数，但加剧了氧化和挥发。为此需要选取那些能在合金表面形成致密氧化膜的元素，如镍、铬、铝等，其中镍与铂同族，它在铂钨和铈中的溶解度较大，是优先考虑为抗氧化元素。其次也考虑加铬和稀土元素钇的作用。贵金属所近年来仿制和改进的贵金属应变合金有：PtW₈，PtW_{8.5}，PtW_{9.5}^[13]，PtWRe，PtPdMo，PtWReNi^[14]，PtWReNiCr，PtWReNiCrY等，补偿丝PtNiCr，PtNiCrY，PtIrNiCrY等，它们的性能列于表3和图3、图4中。

从图3中可见，PtW_{9.5}比PtW₈的抗氧化性好，与Bertodo的资料中钨含量对氧化性

的影响曲线一致。PtW-Re合金温度系数低,但高温抗氧化性差,零漂太大。在PtW-Re中加适量的Ni, Cr以后,温度系数比PtW,大大提高了抗氧化能力,而灵敏系数下降

表 3 贵金属所研制的合金性能

合金名称	电阻率	电阻温度系	应变灵敏	抗拉强度
	$\mu\Omega \cdot cm$	数 $10^{-2}/^{\circ}C$	系数	kg/mm^2
PtW ₈	58	225	3.7~4.2	95
PtW _{8.5}	62	191	3.7~4.2	100
PtW _{9.5}	76	170	3.5	136
PtPd _{4.5} Mo _{1.0}	86	130	2.5	84
PtW _{7.5} Re _{5.5}	82	113	3.5	137
PtW _{8.5} Re ₅ Ni ₂	77	171	3.2	135
PtW ₈ Re ₄ Ni ₂ Cr _{0.5}	80.3	142	3.2	144
PtW ₈ Re ₄ Ni ₂ Cr ₁ Y _{0.2}	73	160	3.2	105
PtW ₁₀ Re ₃ Ni ₂ Cr ₁ Y _{0.2}	83	150	3.2	91
PtNi ₂ Cr ₁	29	1000	-	43
PtNi ₂ Cr ₁ Y _{0.2}	29	977	-	43
PtIr _{2.0} Ni ₁ Cr ₁ Y _{0.2}	42	508	-	-

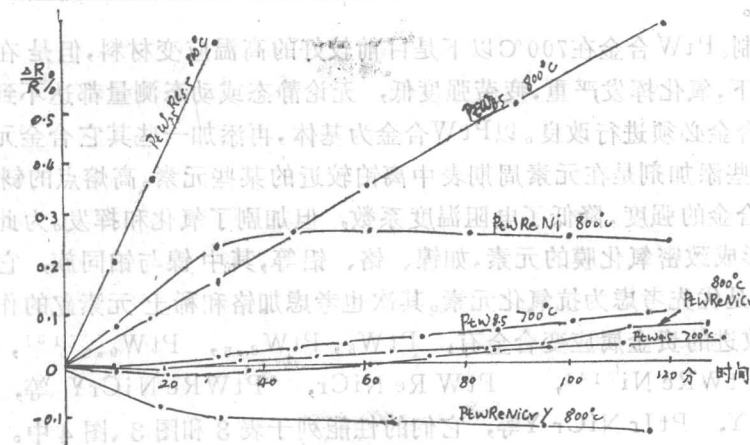


图 3 合金的零漂

不多。在800°C的漂移比PtW小很多,半小时后电阻几乎不变化。在PtWReNiCr中加入微量的钇以后,基本上保持了PtWReNiCr的性能,改善了合金在800°C以上到1000°C的电阻与温度

变化线性关系,如图 4,这

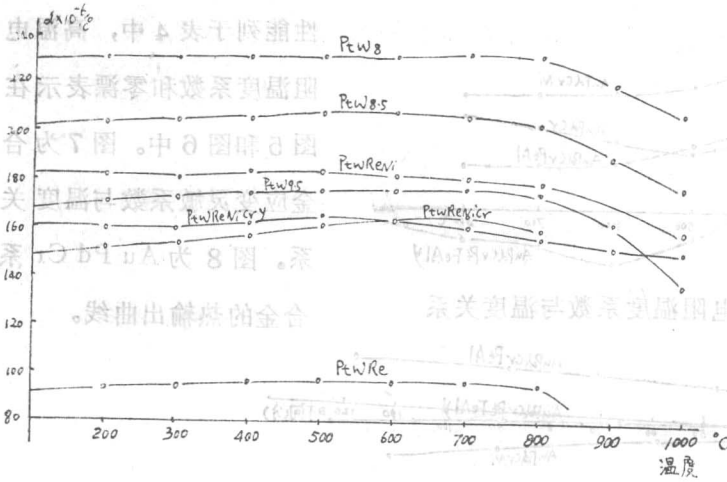


图4 合金电阻温度系数与温度关系曲线

是很大的改进。以上合金的性能可以满足800℃静态和1000℃动态测量要求。

新研制成功的铂钨铼镍系合金比铂钨性能大有改进，是目前较好的高温应变材料。但是由于温度系数太大，在静态应用中只能作半桥式温度补偿片，给制片和

和补偿技术都带来困难。因而使用范围受到限制。为此贵金属所在寻找温度系数接近于零或负值，抗氧化性能好的贵金属应变材料方面，开辟了新的途径。

第三阶段，1977年以来开始研制新合金。在研制高温应变测量导线AuPdCr合金时，发现了AuPdCr合金具有很低的电阻温度系数^[15]和良好的高温抗氧化性能，以及足够的组织结构稳定性，因而在此基础上发展了以AuPdCr为基的一系列高温应变材料；AuPdCr，AuPdCrNi，AuPdCrPtAl，AuPdCrPtFeAlY等合金。这些合金

表4 AuPdCr系合金性能

合金名称	电阻率 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$	电阻温度系数 $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 0-800℃	灵敏系数 室温	抗拉强度 kg/mm^2
AuPd _{3.88} Cr ₃	56	24	1.3	57
AuPd ₃₇ Cr ₄ Ni ₂	67	50	1.2	-
AuPd ₃₅ Cr ₅ Pt ₅ Al _{0.2}	78	25	1.3	70
AuPd ₃₈ Cr ₃ Al ₁	62	300	1.4	-
AuPd ₃₄ Cr ₆ Pt ₇ Fe ₂ Al _{0.2} Y _{0.2}	106	0~7	1.4	63
AuPd ₃₂ Cr ₇ Pt ₉ Fe ₃ Al _{0.2} Y _{0.2}	118	-38	1.4	63.7

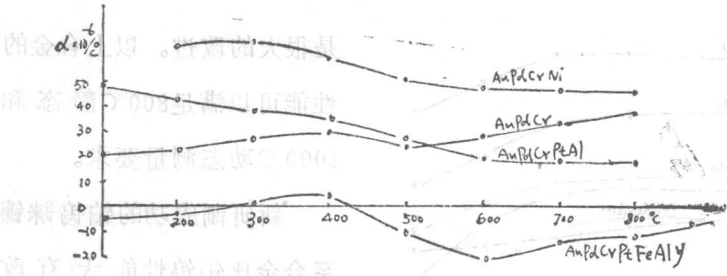


图5、AuPdCr系合金电阻温度系数与温度关系

性能列于表4中，高温电阻温度系数和零漂表示在图5和图6中。图7为合金应变灵敏系数与温度关系。图8为AuPdCr系合金的热输出曲线。

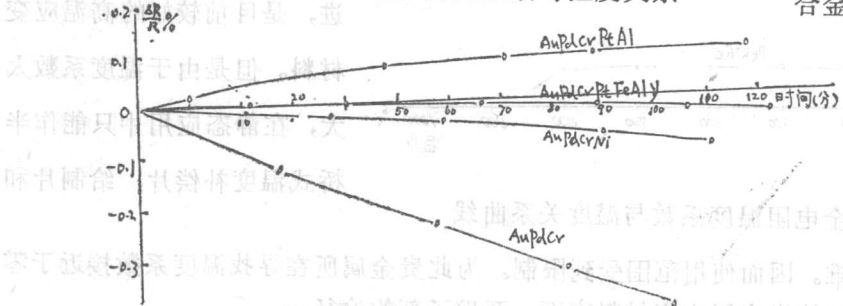


图6、AuPdCr系合金在800°C的零漂

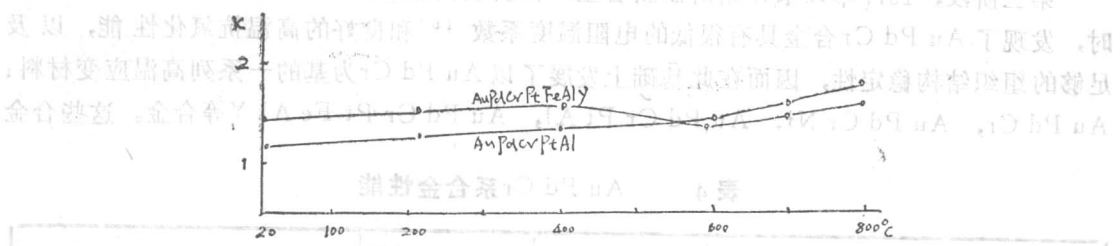


图7、AuPdCr系合金应变灵敏系数与温度关系

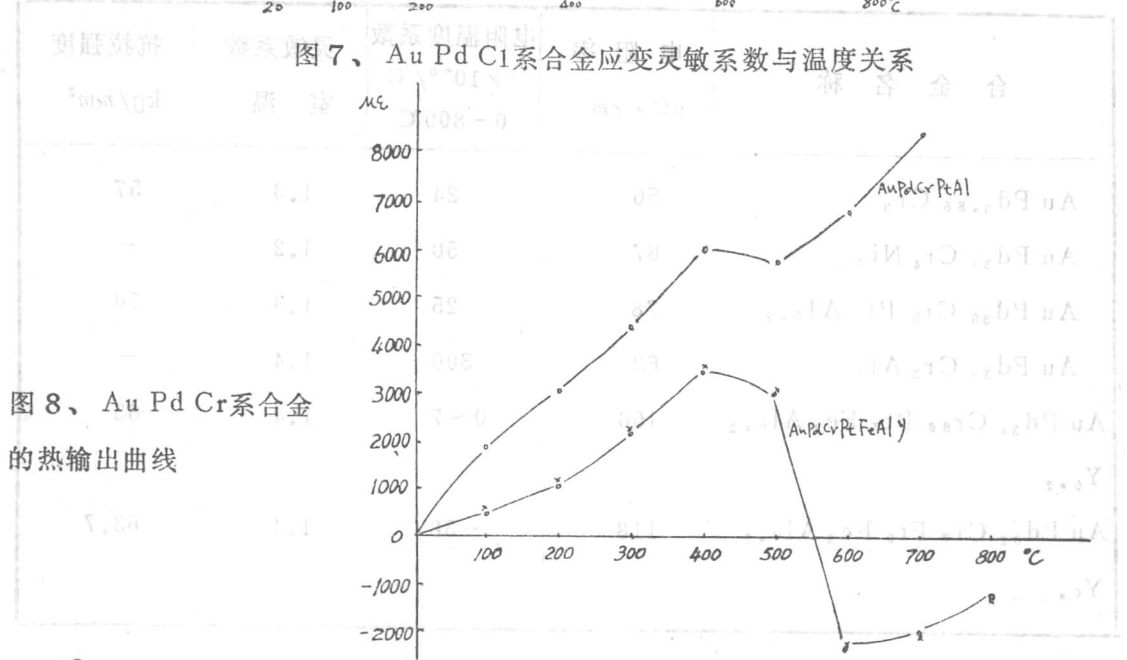


图8、AuPdCr系合金的热输出曲线

从以上图表可以看出 Au Pd Cr Pt Fe Al Y 七元合金系具有如下特性:

1、电阻率比 PtW 基合金高,电阻温度系数低很多,并能通过调整合金中铁含量使温度系数从正变到负。合金除 400°C 左右有拐点外,在 600~800°C 范围内温度系数变化不大,高温抗氧化性不比铂钨基合金差。

2、合金室温应变灵敏系数较低,但它随温度增加而增加。在 800°C 时有的合金增加 45%, k 为 1.8 左右,这对高温应变测量有利,基本上能满足静态测量要求,这一特性在现有的高温应变材料中是罕见的。PtW 合金和 Fe Cr Al 合金在 700°C 时灵敏系数下降约 20~25%。

3、合金电阻温度线性不如 PtW 系合金好。在 400°C 左右电阻温度曲线出现拐点,但热输出曲线重复性较好,700°C 时 4 次热循环后热输出小于 $130\mu\epsilon$,在 800°C 时二次热循环后热输出小于 $100\mu\epsilon$,热滞后小。表明合金的组织结构的变化是可逆,不影响性能稳定性。

在贵金属应变合金中能找到温度系数从正到负可调整的合金,这是很可贵的成功。对研制 800°C 单丝自补偿应变片或组合式应变片创造了条件。例如可用负温度系数的 Au Pd Cr Pt Fe Al Y 合金与具有正温度系数的 PtW Re Ni Cr Y 合金组成应变片,或与 Fe Cr Al 组合,可以提高 Au Pd Cr Pt Fe Al Y 合金的灵敏系数,改善电阻温度系数的线性,减小 PtW Re Ni Cr Y 的热输出,减小 Fe Cr Al 的热滞后,互相取长补短。适当的配比可使热输出减到最小。目前有关部门正在利用上述合金制作 800°C 单丝自补偿应变片和组合片,可以认为是很有前途的。

四、国内贵金属应变材料的应用情况

以上资料可以看出,贵金属应变材料近几年来在国内发展很快。上述合金研制成功,为国内贵金属应变材料填补了空白,并进一步丰富和发展了我国独特的贵金属应变材料,把高温应变材料的研究提高到新水平。为我国应变片研究单位提供了多种类型的贵金属应变材料,许多单位相继采用国产的 PtW, PtW Re, PtW Re Ni, PtW Re Ni Cr Y, Au Pd Cr Pt Fe Al Y 等合金研制了各种类型的高温应变片和传感器。

1973 年七机部 702 所用 PtW_{8.5} 与 Pt 丝研制成 WP 型高温应变计。用 PtW Re 与 Pt 丝制成 RP 型高温应变计,用于快速升温应变测量^[16]。

1975 年三机部 606 所用 PtW_{8.5} 与 Pt 组成 BNG-650 型半桥式应变片^[17]。用于 650°C 静态测量。

1975 年,三机部 574 厂用 $\phi 0.008\text{mm}$ 细 PtW_{8.5} 丝制成高精度小压力张丝压力传感器,达到国外同类产品性能^[12]。304 所用 $\phi 0.025\text{mm}$ PtW_{8.5} 丝制成脚踏力加速传感器。

1976 年,三机部 410 厂用 $\phi 0.04\text{mm}$ 的 PtW Re Ni 丝制成喷涂应变片,测量 1000°C 动态应力,在 $800\mu\epsilon$ 条件下丝栅承受 1×10^7 次振动,成功用于发动机涡轮叶片的动应力测量^[18]。

1977 年,北京航空学院用 PtW_{8.5}, PtW Re Ni, 与 PtIr 合金制成半桥式应变片,

用于700°C静态测量^[10]。

1977~1980年以来, 606所, 北航和702所等单位采用 PtW Re Ni Cv Y, Au PdCr Pt Fe Al Y等新材料研制800°C静态应变片, 并已取得成果。

五、展望

用于更高温度的应变合金, 无论在贵金属或贱金属领域中都是相当困难的任务, 到目前为止, 还没有获得完全理想的自补偿高温应变合金。存在的困难是低电阻温度系数与高灵敏系数的矛盾, 即任何使电阻温度系数降低的因素同时也导致灵敏系数减少。欲获得温度系数接近零和最大的灵敏系数, 必须对合金的内部结构与温度系数、灵敏系数的关系进行研究。

在新合金的研制中, 有些学者根据金属电子理论来设想新合金^[7]。过渡族金属具有高电阻, 其原因在于它含有未填满的d层电子壳, 致使 S—d电子的散射概率较大, 如果假设过渡族金属及其合金的 S层和d层电子完全是集体化的, 并服从费米分布, 那么过渡族金属的费米界是穿过整个 S层和d层带的。高的费米能级密度意味着具有高的电阻率, 金属及其合金的电阻温度系数随电阻率的增加而减少。当 ρ 增至最大, 则 α 降至最低。

图9是第一、二、三长周期过渡族金属及其合金的态密度 $N(E)$ 与电子浓度 e/a (或外层 $S + d$ 的总电子数) 的关系^[7]。由图9可知, 如果合金具有高的态密度, 而电子浓度又处在下列范围: 2.5~3.5, 4.5~5.2, 6.5~7.2, 8.8~10.2, 那么该合金的电阻温度系数就较小, 甚至接近于零。我们根据合金成份与电子浓度与态密度的关系所设想的合金如表5, 由此可以设想使某些成份的合金达到低电阻温度系数的目的。实践也说明这些理论有一定的实际意义, 如所设计的 Au Pd Cr Pt Fe Al Y合金电子浓度为10.14, 接近态密度峰值, 该合金电阻温度系数为 $0 \sim 7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。但增大某些合金含量或增加合金组元, 会带来加工困难和抗氧化性变坏等问题。因而必须相应的对合金制备工艺和加工手段不断改进, 以适应新合金的研制。今后有可能利用非晶态合金的成材手段, 如采用液态金属射流拔丝技术, 或用液态金属急冷转鼓方法把这些设想的难加工的高温合金加工成丝或薄膜, 便可扩大应变材料的研究范围, 并可能获得一些更特殊的性能。必将为发展高温应变合金带来新的跃进。

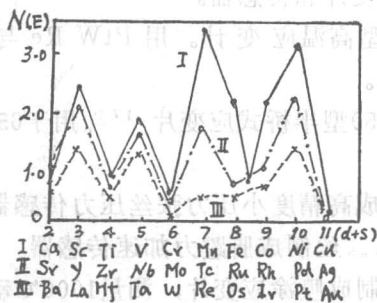


图9、过渡族 I、II、III 长周期金属在费米界上电子的态密度 $N(E)$ [自旋方向相同] 与外壳层 $(d+s)$ 的总电子数的关系。

表5. 理想的合金成份与电子浓度的范围

合金成份 (at%)	电子浓度 e/a
Pt—W ₃	8.88
Pt—Ti _{1.5}	9.1
Pd—Mo _{2.0}	9.2
Pt—Ta _{2.4}	9.0
Pt—V _{2.0} —comp	9.0
Pd—V _{2.0}	9.0
Pd—W _{1.0} —Rh _{2.0}	9.3
Pt—W _{2.2.5} —Re _{7.5}	8.8
Pd—Ag _{3.5} —W ₃	10.2
Pd—Ag _{3.5} —Pt ₃	10.35
Au _{4.9.6} —Pd _{3.4} —Cr ₇ —Pt ₇ —Fe ₂ —Al _{0.2} —y _{0.2}	10.14

从以上贵金属应变电阻合金的发展趋势来看，贵金属合金还是最有发展前途的高温电阻应变材料，主要以、Pd Pt为基，选择的合金组元应是周期表中邻近Ⅵ和Ⅷ主族的元素，如W、Re、Cr、Ni、Mo、V、Fe、Ta等。但是要获得抗氧化性及综合性能更好的应变合金，必须添加其他合金组元。同时对加入微量稀土元素如Y、Ce、Hf等要给予足够重视。

参 考 资 料

[1] 吴宗岱：国外高温应变片的发展概况，1979.3

[2] R.Bertodo. "Journal of Strain Analysis" Vol.1.No1.oct.1965.

[3] R.Bertodo,Brit. J.of Appl Phys 1968 19 (12) 1943—752.

[4] R.Bertodo,British Journal of Applied Physics 1968年 Vol1.1.No 12
(应变合金译文集)

[5] R.Btrtodo.测量高温下静态应变的电阻应变计 (译文)

[6] E. Ensterling "Brit. J.of Appl. Pnys" 1963,14 (4) .225

[7] 冯本政：“贵金属应变电阻合金的发展” “冶金” 1976.7.

[8] 桑原和夫：非破坏检查， Vol.19.No7.1970

[9] 贵金属所：“贵金属电阻应变合金的现状与展望” 1973.9

[10] R.Bertodo. "The Measurement of Steady Strains in Engine Parts 1967

- [11] William. J. Bean, N A S A C R—66775 1969年.
- [12] 贵金属研究所: 张丝压力传感器电阻应变超细丝的研究 1969年.
- [13] 贵金属研究所: 高温应变丝铂钨合金的研究1973.9.
- [14] 贵金属研究所: 高温电阻应变合金铂钨铼镍的研究 1977.9
- [15] 贵金属研究所: 新型高温应变测量导线 Au Pd Cr合金 1979年
- [16] 702所、贵金属所: 铂钨, 铂钨铼高温应变合金丝的应用 1973.5
- [17] 606所: 650°C半桥式粘贴应变片研制阶段小结 1975.11
- [18] 黎明机械厂、贵金属所: “用于1000°C动态测量的电阻应变片 1978年, 7月
- [19] 北京航空学院: “Development of Self—Temperature—compensated Resistance Strain Gagestor To 973°k (1292°F)” 1980.5, Presented at Fourth S E S A International Congress on Experimental Mechanics.

从以上贵金属合金电阻应变合金的发展来看, 贵金属合金电阻应变合金的发展, 主要是以 Pt-Pd 合金、Pt-Pt 合金、Pt-W 合金、Pt-Cr 合金、Pt-Ni 合金、Pt-Mo 合金、Pt-V 合金、Pt-Ta 合金等。但是, 随着合金材料性能的提高, 合金电阻应变合金, 必须添加其他合金元素, 同时加入微量贵金属元素如 Y, Co, Hf 等, 给予补偿。

参 考 文 献

- [1] 吴宗培: 国外高温应变片的发展概况, 1978.3
- [2] R. Bertoldo, "Journal of Strain Analysis", Vol. 1, No. 1, 1967.
- [3] R. Bertoldo, Brit. J. of Appl. Phys 1968 19 (12) 7813-7821.
- [4] R. Bertoldo, British Journal of Applied Physics 1968年 Vol. 1, No. 12 (英文合金文集)
- [5] R. Bertoldo, 测量高温下静态应变的电阻应变片 (中文)
- [6] R. Bertoldo, "Brit. J. of Appl. Phys" 1963 14 (4) 325.
- [7] 周本顺: “贵金属电阻应变合金的发展”, “贵金属”, 1976.7.
- [8] 周本顺: “非铂合金”, 贵金属, Vol. 19, No. 1976.
- [9] 周本顺: “贵金属电阻应变合金的测试与问题”, 1973.9.
- [10] R. Bertoldo, "The Measurement of Steady Strains in Engine Parts 1967"

温度自补偿应变康铜箔的研究

上海有色金属研究所 胡白帆

摘 要

本文介绍温度自补偿应变康铜箔的研究情况。研究结果表明，在康铜中添加不同量的合金元素铈，通过适当的热处理工艺，可分别获得适用于普通钢、不锈钢、铝合金等材料的温度自补偿应变康铜箔。

前 言

应变测量技术广泛应用于各种工程，测量工作状态下材料中所受的应力。它具有使用方便、灵敏度高、稳定性好，并能作远距离测量等优点，为难于用理论分析解决的应力测量，提供了可靠的手段。它不但在直接验证设计理论，确定设计方案，检验工程质量，合理选用材料等方面起着重要的作用，而且在某些特殊工作环境下（如在流体压力下，在核辐射环境中等），更是必不可少的测量手段。

目前，我国生产的电阻应变片，在使用时都必须使用补偿片进行温度补偿方能工作，否则在温度稍有变化的情况下就无法进行测量。这不仅给使用带来不便，而且还影响精度，尤其在一些特殊情况下（如工作空间狭窄），则更难于使用和测量。因此，使用部门迫切要求研制具有温度自补偿性能的应变合金箔材，以提高应变测量的精度，扩大使用范围。

课题的目标是研制这样的合金箔材，用它制作的应变片，能分别适用于普通钢、不锈钢、铝合金、镁合金等四种工程材料试件，其应变计（应变片贴在结构上时）的热输出值 $\leq \pm 1.8 \mu\epsilon / ^\circ\text{C}$ ，或应变计的电阻温度系数 $\leq 3.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

根据温度自补偿的原理可知，要使应变计达到因温度变化而产生的电阻变化为零，则应变合金箔的电阻温度系数应符合 $\alpha_{\text{箔}} = K (\beta_{\text{箔}} - \beta_{\text{试}})$ 。

式中： $\alpha_{\text{箔}}$ ——应变合金箔的电阻温度系数。

$\beta_{\text{箔}}$ ——应变合金箔的线膨胀系数。

$\beta_{\text{试}}$ ——试件材料的线膨胀系数。

K ——应变片灵敏度系数。

这是消除由于温度变化而引起应变计产生误差的一个必要条件。但由于温度对材料的

影响是很复杂的， $\alpha_{\text{箔}}$ 、 $\beta_{\text{箔}}$ 、 $\beta_{\text{试}}$ 与温度的关系并不完全是线性的，K值也不是恒定不变的，因此，这只是一个近似条件。

尽管如此，仍可根据这个条件，对具有已知线膨胀系数的试件近似地选择具有适当的 $\alpha_{\text{箔}}$ 、 $\beta_{\text{箔}}$ 、k值的应变材料，以制成具有温度自补偿性能的应变计。

温度自补偿应变合金箔是没有通用性的。它只对线膨胀系数一定的试件材料具有温度自补偿的作用，即能够在一定的温度范围内，在某一结构材料上，使应变计的电阻不随温度而变化，或变化很小。

如果应变合金箔的线膨胀系数和K值基本不变，为达到温度自补偿的目的，只要控制箔材的电阻温度系数，使其满足 $\alpha_{\text{箔}} = k(\beta_{\text{箔}} - \beta_{\text{试}})$ 的条件就可以了。

试验研究

1、概述

康铜是有色合金中的老品种，它是由铜、镍、锰组成的单相均匀固溶体合金，具有良好的抗蚀性、耐热性、焊接性以及优良的加工性能。康铜的电阻率稳定，电阻值很灵敏地依弹性变形而变。更可贵的是其“电阻——应变”特性曲线具有很宽的线性范围（直至塑性变形区，仍是线性的）。该合金具备上述优良的综合性能，已成为最古老的应变材料，在国外这种材料，经不断改进，一直沿用到今天。特别是发现了其电阻温度系数，可通过添加少量其它合金元素及热处理等手段进行调整，从而有可能以它为基础制成温度自补偿应变材料。

根据普通钢、不锈钢、铝合金、镁合金的线膨胀系数，以康铜的线膨胀系数为 $15 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，按 $\alpha_{\text{箔}} = k(\beta_{\text{箔}} - \beta_{\text{试}})$ 计算可知，适用上述四种材料有温度补偿能力的康铜箔，应分别具有如下的电阻温度系数理论值：

试 料	普 通 钢	不 锈 钢	铝 合 金	镁 合 金
$\alpha_{\text{箔}} \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	+ 8	- 4	- 16	- 22

通过添加少量合金元素，改变合金成份和热处理工艺的办法，可调整 and 稳定箔材的电阻温度系数，从而获得各试件材料所需的 $\alpha_{\text{箔}}$ 值的康铜箔。

通过制片及其测试，再对工艺进行适当调整，可使箔材的性能符合使用要求。

2、箔材的样品制备和试验方法：

本试验所制备的部分合金成份如表 1