

应变合金译文集

北京冶金研究所

75.5/
249
C.2

应 变 合 金 译 文 集

600 课题协作组供稿

1955.11.17

北 京 冶 金 研 究 所

目 录

一、高温应变电阻合金的研究

- 1 · 高温应变丝的研究····· (1)
- 2 · 应变计用高阻合金····· (9)
- 3 · 高温应变计合金····· (21)
- 4 · 高温电阻应变计····· (22)
- 5 · 测量高温下静态应变的电阻应变计····· (30)
- 6 · 测量650℃以上静态应变的电阻应变片····· (48)
- 7 · 高温应变测量用电阻材料····· (62)
- 8 · 高温电阻应变计用的贵金属合金····· (69)
- 9 · 含9~10% Al 的 Fe—Cr—Al 应变计合金····· (79)

二、与高温应变电阻合金一些主要性能有关的问题

1. Ni—Cr 基精密电阻合金的电阻行为····· (85)
2. 铁—铬—铝合金应变丝电阻的稳定性····· (88)
3. 钒对Fe—Cr—Al系合金性能的影响····· (93)
4. 特殊添加剂对Fe—Cr—Al合金氧化皮保护性能的影响····· (99)
5. 关于Fe—Cr—Al合金温度—时间的不稳定性····· (102)
6. SYTT——高温抗氧化性合金····· (105)
7. Fe—25Cr—4 Al (含Y或Sc) 合金氧化物粘附性的机理····· (109)
8. 锆对Fe—Al—Cr合金抗氧化及机械性能的影响····· (127)
9. 精密电阻合金····· (133)

三、关于应变片性能的研究

1. 高温应变片的温度特性····· (138)
2. 电阻丝型应变片的温度特性····· (147)
3. 消除应变片温度影响的实际措施····· (150)

四、附录

1. NAS—942 粘贴式电阻应变计标准····· (167)
2. 日本电阻应变计术语 NDIS—4002—70····· (174)
3. 电阻应变计····· (178)

高温应变丝的研究

电阻应变计在高温使用时(本文讨论的应变计最高使用温度为871℃)跟许多因素有关。这些因素在常温使用时是不需考虑的,但由于工作温度高而必须考虑的是:(1)应变计材料的抗氧化性;(2)电阻温度系数和热膨胀系数;(3)冶金学稳定性;(4)工艺性能。此外,良好的应变计材料还必须具有高而稳定的电阻系数。可用的应变灵敏系数和与粘结剂的适应性以及适当的抗蠕变和抗疲劳性能。

以上列举的一些特点是阿穆尔研究基地(Armour Research Foundation)作为研究改善高温应变计材料的基础。阿穆尔研究基地是由海军材料中心的航空结构实验室主办的。

选 材

因为用作高温应变计材料的最起码的要求是在高温时的抗氧化性能。所以工作的第一步是围绕所选择的一些铁基,镍基和钴基合金的氧化性能进行研究。所选择的成份通过氧化试验来分类。试验是将小直径的短棒试样在静止的空气中于871℃下加热,100个小时作为一个周期。在试验中温度控制在 $\pm 2.8^\circ\text{C}$ 。试验完毕,试样经目视检查并测量其尺寸变化。试样的重量变化不测定,因为引起重量变化的因素难以断定。

根据上述的氧化试验选出铁—铬—铝三元平衡图上含铁量高的一角作进一步探讨。其中还有最有希望的钴基和镍基成份的合金。三元平衡图(图1)指出铁—铬—铝系含铁高的一角试验用的单相线。在本研究中感兴趣的成份区,划有横的阴影线。其中选出作进一步研究的合金以黑点表示。在每一点附近的字母表示阿穆尔研究基地选出的独特的合金。

铁—铬—铝合金的制备

工作的这一阶段只致力于评定铁基合金的效果。选择了该系列中的四种成份作为代表性的合金并示于图1。合金成份如下:

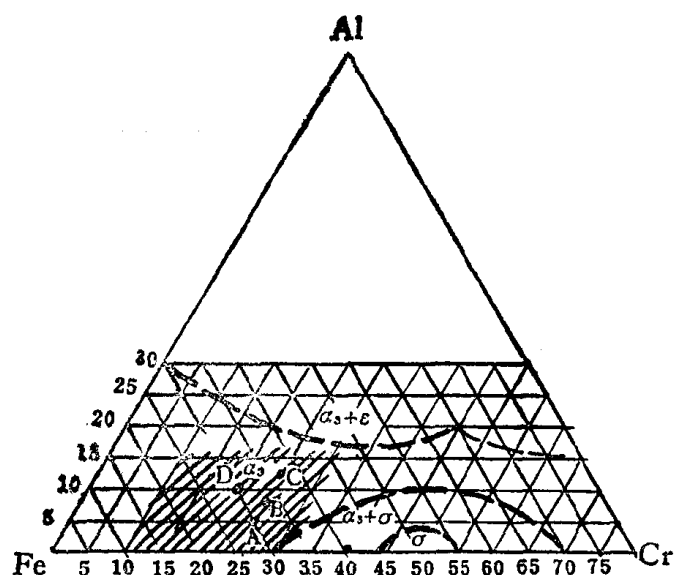


图1 铁—铬—铝三元系富铁角平衡相图

合	金	标	称	成	份
		铁	铬	铝	
A		70	25	5	
B		67.5	25	7.5	
C		62.5	25	12.5	
D		70	20	10	

用于初步研究电阻温度系数和热膨胀系数的合金料采用真空熔炼并浇铸成 8—10 磅的锭子。这些合金属于“难加工”类型，在加工过程中应小心处理。

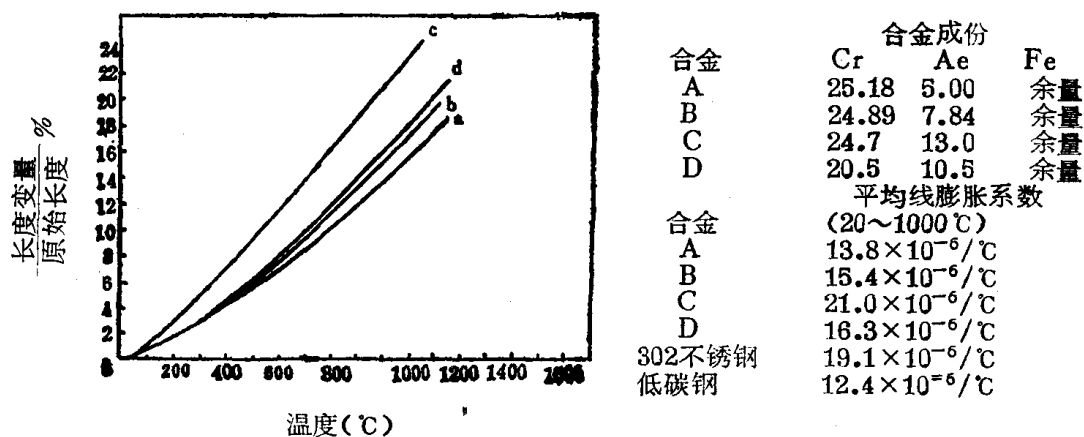
锭子的加工过程是由压锻，锤锻，热旋锻组成。通过这些工序得到直径大约为 1.27 mm 直径的丝。在局立佛—亨利公司 (Driver Harris Co) 进一步冷拉成细丝。中间退火温度为 871°C。

铁铬铝合金的性能

电阻系数和电阻温度系数：

为了大致测定所选定的四种合金的电阻温度特性，以便决定哪一种合金值得进一步拉成细丝。所以在小圆棒上测定合金的热膨胀系数和电阻温度系数 (图 2, 图 3)。在每种情况下试样都是真空熔炼，真空浇铸成圆棒并磨削到 76.2mm 长，6.3mm 直径的尺寸。热膨胀数据是用带有石英棒和千分表的膨胀仪测得的，而电阻——温度关系是用电流—电阻法和标准电阻器测定的。使用感应加热，试样温度是用火花焊接法焊在试样中心的热电偶进行测量的。

可以看出二个系数之间存在一定的趋向。合金 A 的热膨胀系数最小，电阻温度系数最大而合金 C 的热膨胀系数最大，负的电阻温度系数最大。合金 B 和合金 D 的数值一直介于上述二者之间。



注横坐标，1000—1600 各向前移动一格

图 2 四种 Fe—Cr—Al 合金在 20—1200°C 时的热膨胀系数

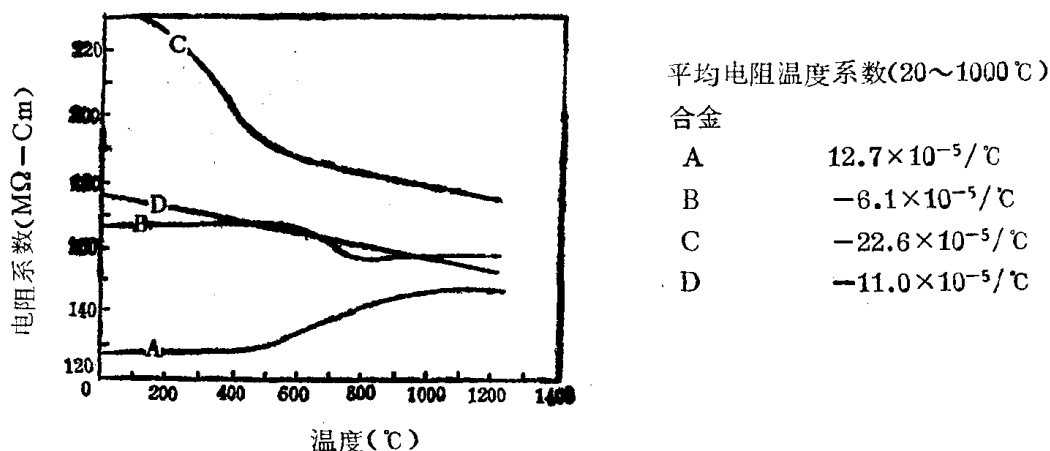


图3 四种铁—铬—铝合金的电阻系数及温度的关系曲线

由于上述的结果，需进一步研究只用合金B和合金D制作细丝应变计。所以这样决定，其原因之一是由于合金C不易得到高质量的锻件，首先是要获得足够量的二种合金细丝，由局立佛—亨利公司试制把试棒拉成细丝。棒材由ARF提供。但是这将只能得到小批量的丝材。试验时很快就用完。显然很需要增加丝材的批量。所以委托局立佛—亨利公司，利用他们的专用设备来生产大量的丝材。这时只致力于合金D的研究并且准备好了四批数量相等但分别生产的丝材。因此将检验不同生产工艺对性能的影响。

共生产了四种批量的丝材。

在生产四种批量丝时遇到了困难。特别是在局立佛—亨利公司热锻棒材由6.3m/m直径锻到适合于拉拔尺寸时。所以这道工序由ARF用改良的热旋锻技术来完成，延伸棒材到直径大约为1.27mm，然后拉拔到0.0254mm直径，中间退火温度912℃。

只有原计划4批料中的三批做成。其成分见表1。

表1 三批合金D线材的成分(名义成分Fe—20Cr10Al)

炉号	铬	铝	硅	碳	铁
9254	20.53	9.76	0.02	0.03	余量
9255	20.60	9.82	0.02	0.03	余量
9258	20.24	9.92	0.07	0.01	余量

对其中的一个炉号进行了物理性能测定，结果如下：抗拉强度12302公斤/厘米²屈服强度7944公斤/厘米²。

延伸率5.5%，应变丝的长度为254mm。

应变灵敏系数：

高温下合金B和合金D的应变灵敏系数用图4所示的试验装置来测定。贴有应变计的试棒放入立式管式炉中并加上纵向拉力。用铂带伸长计和目镜带刻道的显微镜来测量应变。通过装在横梁上面夹持器的细牙螺纹来加负载，纯粹的静应变灵敏系数由这个装置测得。

与此仪器相连接的测量电路图见图5。

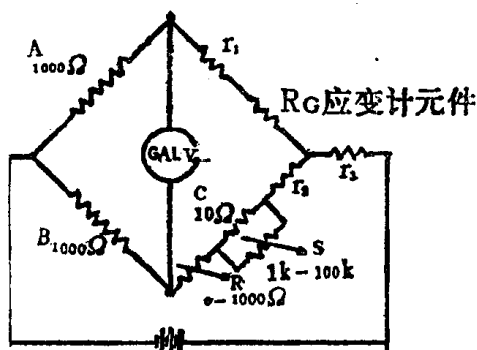


图5 用于在不同温度下静态校准
三线应变计的惠斯登电桥线
路图

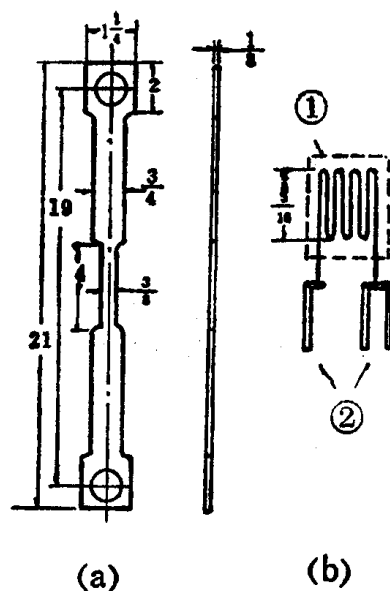


图6 用于静态校准试验
的试验梁和应变计
(a)试验梁(不按比例)
(b)应变计(放大的)
①工作栅 ②引线

它是由一个改良了的惠斯登电桥组成，用精密电阻保持其桥臂比值1：1。因此应变计电阻，在桥臂中将产生1：1关系的变化。对应变计采用三线法连接是为了消除导线电阻的影响。测量臂并联和串联一个平衡电阻，分别用于粗调和细调。

应变计是用直径0.025mm的细丝扁平地绕五圈，十股绕成平行的栅形，并适当地点焊在卡玛（Karma）引出片上。图6所示是一个应变计的图样。使用Allen P—1高温应变胶，按照推荐的程序进行粘结，二种不同成份的应变计有时可成对进行试验。

采取下列步骤进行应变灵敏系数的测定：

1. 使测试梁和应变计在测试温度下处于热平衡状态
2. 在试件板梁上加上一个任意的应变变量。
3. 记录同时测定的应变计电阻和光学引伸仪的伸长。
4. 把加上的应变迅速减小到零，再进行一组同样的测量。

5. 把有载荷下的电学光学总的应变变量减小到对应于空载下的应变变量。用一般的方法计算应变灵敏系数，利用此法所得到的应变灵敏系数在很大程度上消除了漂移的影响。

用直径为0.025mm的合金B和合金D的细丝做成的应变计的应变灵敏度是在302不锈钢，钛合金C—110M（含锰7%的合金）和udimet500（高温镍基合金）等试件材料上进行的试验温度在760℃以下，单位应变变量在2195微时/时以下。还研究了几次热循环对应变灵敏系数的影响。试验结果列于表2～表4。

表 2 在 302 不锈钢试件上测得的静态应变灵敏系数的平均值。应变范围大约 500~1000 微吋/吋

温 度 °C	合 金 B			合 金 D
	第一次循环	第二次循环	第三次循环	
室 温	1.88	—	2.37	没有资料
537	2.02	2.11	2.06	
649	2.08	—	2.04	
760	—	1.84	1.99	

表 3 在钛合金 C-100M 试件上测得的静态应变灵敏系数平均值。应变范围大约 600~1500 微吋/吋。

温 度 °C	合 金 B		合 金 D	
	第一次循环	第二次循环	第一次循环	第二次循环
室 温	2.02	1.98	1.99	1.99
328°	2.06	2.13	2.11	2.14
537。	2.09	2.08	2.11	2.07

表 4 在 UDIMET 500 合金基体上测得的静态应变计灵敏系数平均值。应变范围大约 600~2200 微吋/吋

温 度	合 金 B		合 金 D	
	第一次循环	第二次循环	第一次循环	第二次循环
室 温	2.21	2.29	2.23	—
328	2.13	—	2.15	—
537	1.99	—	2.03	—
760	1.97	—	1.97	—

分析这些结果，可以看出在一般情况下，应变灵敏系数分散度不大，而且还发现研究的二种成份的合金具有类似的特性，热循环对应变计灵敏系数的影响不大，然而对应变计的电阻来说并非如此，因为二种合金应变丝电阻都随热循环而减小。在 UDIMET 500 试件材料上试验时应变计灵敏系数在温度增高时下降小而有规律。在第一次热循环时，应变计的骨架破裂了。很可能这种情况使应变计灵敏系数下降。

电 阻 稳 定 性

应变灵敏系数测定工作的成果之一就是发现由于热循环而引起应变计固有电阻的变化。二种成份的合金都显示出这种现象，而且都是电阻减少。变化量为原来室温时应变计电阻的 1~10% 之间。

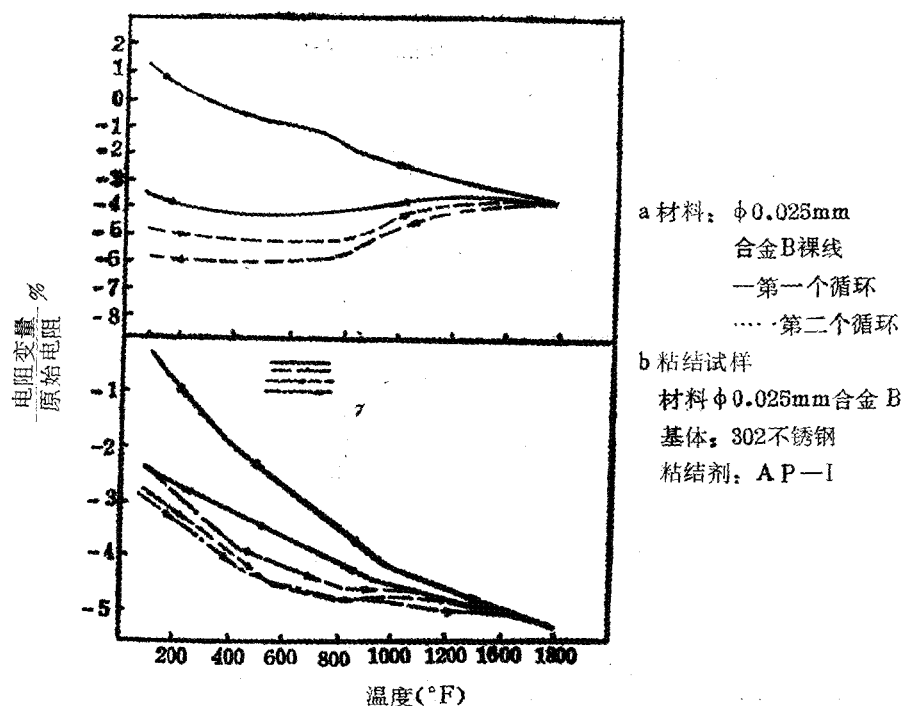


图7 热循环对电阻的影响

这个特性促使去研究热循环对合金B和合金D线材电阻的影响。合金B和合金D的细丝试样粘在302不锈钢的试件上经受热循环。在不同热循环中,定期测量试样的电阻。小直径的热电偶其热端用粘结剂粘在接近于试样的地方用以测定试验温度。这一系列试验中直径为0.025, 0.0375和0.05mm的丝材适用于合金D,只有0.025mm的丝材适用于合金B。试验结果见图7~图10。

图7(a)与(b)指出直径为0.025mm的合金B线材在自由状态和粘结状态其热循环特性曲线不同。图7(a)曲线是用短的裸线得出的,而图7(b)的曲线是由粘结试样观察得到的。可以看到在任何热循环中裸线试样偏离初始电阻值的漂移量相当大,这表明粘结剂在某种程度上起了防止氧化的作用。

在热循环时比较了用不同直径的合金D丝材做成的应变计性能,发现了一个甚为重要的结果。这些资料表示在图8~图10。当丝材直径增大时发现应变计的电阻稳定性有一定的增加,室温下电阻的变化总结于表五。

表5

应变计尺寸mm	电阻变化量与原始电阻的百分比		
	第一次循环	第二次循环	第三次循环
轧扁的 $\phi 0.025$	-1.1	-2.2	-3.5
直径 $\phi 0.025$	-1.75	-2.65	-3.15
直径 $\phi 0.0375$	-1.41	-2.10	-2.50
直径 $\phi 0.05$	-0.75	-1.10	-1.40

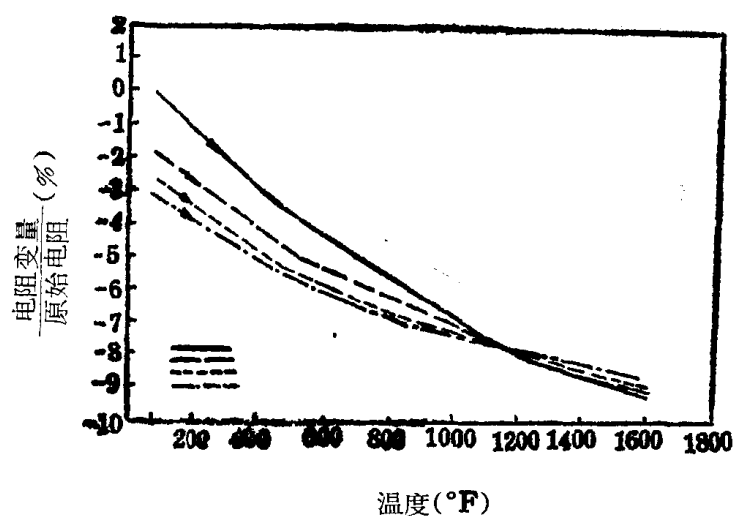


图8 热循环对合金D丝材电阻的影响
材料: $\phi 0.025\text{mm}$ 合金D (炉号9258)
原始应变计电阻值 331.5Ω

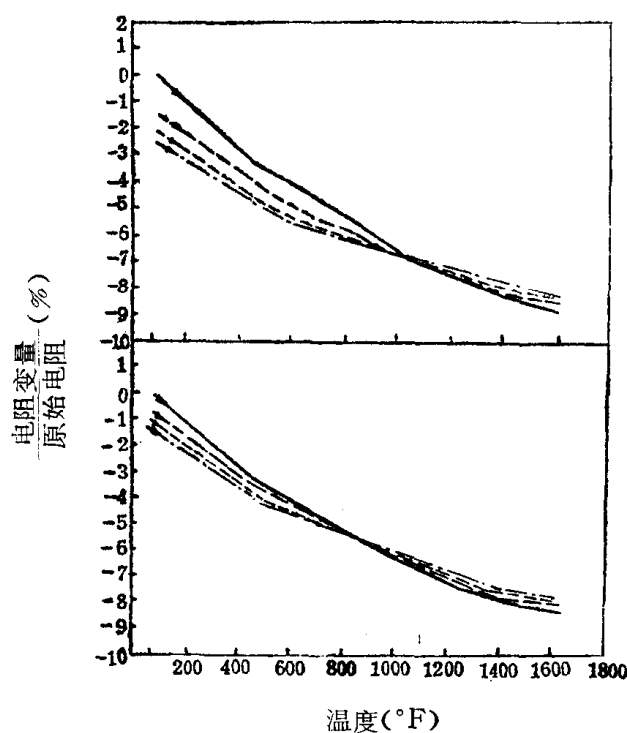


图9 4个热循环对应变计电阻的影响
(a) 材料 $\phi 0.0375\text{mm}$ 合金D (炉号9258), 基体材料: 302不锈钢, 粘结剂 AP-J, 原始应变计电阻: 145.2Ω 。——第一次循环, ----第二次循环,第三次循环, - - - -第四次循环。
(b) 材料: $\phi 0.05\text{mm}$ 合金D (炉号9258), 原始应变计电阻: 77.2Ω

可以看到直径 0.05mm 的丝材要比 0.025mm 的丝材稳定得多。前者经三次循环的改变量比后者一次循环的改变量还要小。另一方面,在这些特殊循环下,温度在 537°C 到 871°C 温度内, 0.025mm 线材电阻的改变量要比 0.05mm 线材电阻的改变量要小。

在一系列的热循环的最后一次试验中产生一个意外的结果。因为对任何一个特殊循

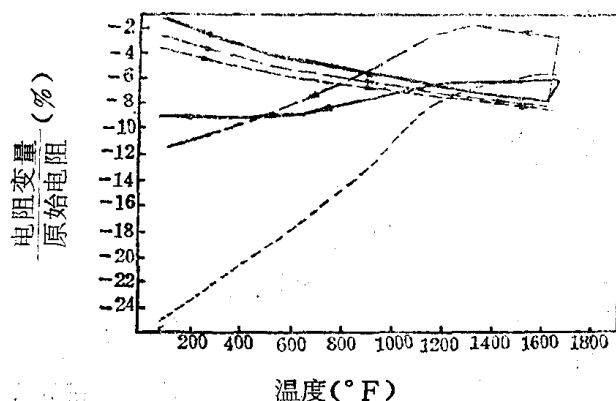


图10 经四次正常热循环后在887℃保温63小时的热循环对合金D电阻的影响。

材料：合金D(炉号9258)，

基体材料：302不锈钢，粘结剂：AP—I

——直径0.05mm，-----直径0.0375mm，·····直径0.025mm

环在最高温度的时间是很短的（大约一小时或不到一小时）。所以决定测定长期置于871℃温度下的效果。

图10就是说明这些试验的结果。把三种尺寸的试样进行四次额定的短时热循环，但是在第五次热循环时在冷却前871℃温度下保持63小时。可以看到由于长期置于871℃，电阻—温度曲线的形状和斜率已经发生很大的变化。此时曲线显示出电阻系数为正，应变计电阻呈现很大的变化。0.025mm的丝变化最大而0.05mm的丝变化最小。

研究各种不同直径的合金D的热循环特点表明：电阻的不稳定和高温时丝材的氧化过程有关。在氧化进行时，主要有二个原因使应变计的电阻改变，首先是横截面的减小而引起的电阻增加，其次是丝材的成份变化。这是由于它的成份中的一种或几种元素和氧化合而失掉。成份的变化反映到电阻系数的变化，并且在所讨论的情况下是使电阻系数减小的倾向。由于在任何情况下应变计电阻是减小的，这也表示出后一因素是占优势的。

总结和结论

1. 含铬和铝的铁基合金作为电阻应变计材料使用，经过研究认为是有希望的。含铬到25%，含铝到12.5%的合金可加工成小直径的棒材，并且含铬到20%，含铝到10%的合金可以拉拔到0.025mm直径的细丝。

2. 研究的合金成分具有大的电阻系数，并且温度系数也大（从正到负）。

3. 合金B和合金D的应变灵敏系数完全相似，其值大约为2。

4. 使用的试件材料类型对合金B、合金D的应变灵敏系数的影响即使有的话也很小。

5. 合金B和合金D的应变灵敏系数在室温到760℃的温度范围内几乎恒定不变。

6. 合金B和合金D都呈现温度升高电阻下降的现象。其降低量跟应变计以前的温度—时间的经历有关。

7. 经受热循环时，用直径为0.05mm的合金D丝材做的应变计，其电阻要比用0.025mm丝做的稳定性好得多。

应变计用高阻合金

前 言

与其它类型的应变计相比,丝式应变计的很大优点是利用它能够研究高温下工作的零件的应力。这一点引起了研究工作者的很大兴趣。

大家知道,热稳定应变计用来测定 800°C 以下的瞬时动态应力,其中包括研究燃气涡轮叶片的工作情况。但是,利用丝式应变计在较高和高温条件下测定静态应力变形的问题尚未解决。

解决这一问题的困难是应变计的合金丝必须具备各种良好性能,但是,这些性能不仅受到高温使用条件的限制,而且还受到应变计连接的零件材料性能的限制。

在高温条件下测定机械零件变形时,要确定应变计电阻的相对增量,此增量是由零件变形引起的电阻变化以及零件和应变计温度升高引起的电阻的变化组成。在测定中后一种情况决定着主要的系统误差,因为电阻温度变化的平均值大,而精确地测定出零件和应变计表面的实际温度是不可能的。

必须消除这些系统温度误差,这些误差首先取决于应变计合金丝的电阻温度系数的大小,并且也决定于零件和应变计材料的线膨胀系数之差。

所以,用作高温下测定机械零件变形的应变计合金丝应当满足下列要求:

温度超过 400°C 时,合金丝仍具有良好的抗氧化性能。

制做丝材的合金的电阻温度系数应当小。

丝材的线膨胀系数应当等于或大于实验件合金的线膨胀系数。

合金应当具有足够大的应变灵敏系数,不低于 0.5。

比电阻不应小于 $0.5 \text{ 欧姆} \cdot \text{毫米}^2/\text{米}$ 。

能够满足上述条件的还要算是氧化性强的电阻铁铬铝或镍铬合金。

许多科研单位利用它们制造了高温应变计。实验表明,由于这些合金在加热和冷却过程中电气性能不稳定和电阻温度系数过高。上述合金不能用来制造温度补偿应变计的丝材。

本文的目的就是要研究 900°C 以下,具有低电阻温度系数的合金,并且研究用它来制造测定耐热合金零件应力用的应变计温度补偿丝可能性。

研究方案如下:

研究铁—铬—铝系合金。

研究添加铬或其它元素的镍基合金。

研究热处理规范对成份最适宜的合金的性能的影响。

试样的制备及其研究方法

为进行研究熔炼了几批合金，每炉重量为2.5~5公斤。

合金锭经过锻造、轧制，然后拉制成直径1~0.8毫米的丝材。成份最适宜的合金拉制成直径0.03~0.05毫米。

用直径2—3毫米，长1米并在900~1000℃水中淬火以后的专门试样测定电阻。

在《Эталон》工厂的УТВ装置上，用汤姆逊(ТОМСОН)双电桥测定电阻。

将直径1~0.8毫米的丝材试样缠绕在直径25毫米的石英管上，以此方法研究电阻与温度关系。在此情况下还是利用ТОМСОН电桥。

以被测合金丝材做电流电位端引线，并与试样焊接。试验以前将制成的试样在1000℃退火2小时，随后以每小时200℃的速度进行冷却。试样是在管式电炉内空气中加热的，电炉应保证整个试样沿长度受热均匀。加热和冷却时，每经过50℃测定一次电阻。用带电位计的铂—铂铑热电偶ПП-1测定加热温度。

测定电阻时通过试样的电流大小应不致使试样额外受热。

试样加热至900℃时，按照在示差膨胀仪上得到的膨胀曲线测定了线膨胀系数。

无论是铸锭试样或锻件试样的显微组织分析均在加有少量重铬酸盐的Крыин试剂中浸磨后进行。

研究结果

一般的高阻合金以及制造应变计用的合金加热时电阻的变化列于图1。

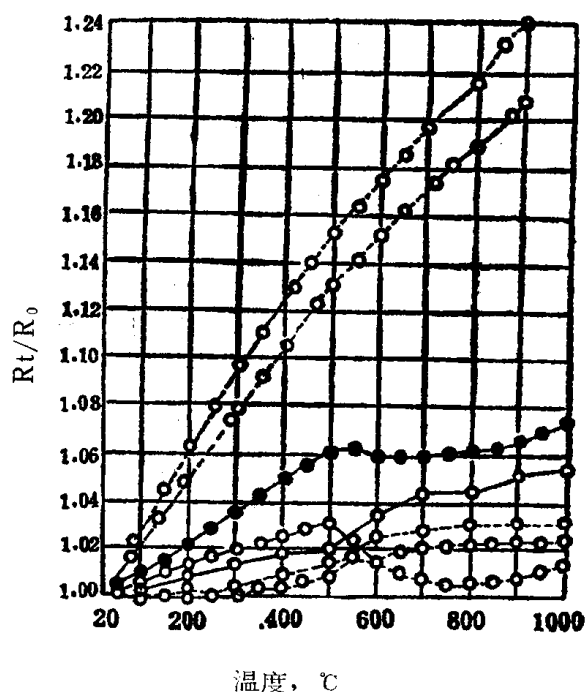


图1 各种合金在较高温度(20—1000℃)下电阻的变化

代表符号	材料名称	Cr	Ni	Mn	Al	Mo	W	V	Fe	ρ 欧姆毫米 ² 米
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
○—○	ЭИ595	23.0	—	—	4.50	—	—	—	余量	1.35
○····○	ЭИ626	28.0	—	—	5.50	—	—	—	余量	1.40
○—·—·—○	ЭИ627	30.0	—	—	5.50	—	—	—	余量	1.45
○····○	X20H80	20.81	73.59	—	—	—	—	—	无	1.05
○—·—·—○	ИЗОЭ ластик	5.98	39.3	0.75	—	1.35	—	0.83	余量	1.03
○····○	爱林瓦	8.01	33.91	2.84	—	—	2.60	—	余量	1.15
○—○	X15H60	18.60	60.55	—	—	—	—	—	余量	1.14

《Изоэлластик》和《Элипвар》合金加热至 900℃ 时电阻急剧增大, 说明这些合金在规定的温度范围内具有大的温度系数 $3 \cdot 10^{-4} 1/\text{度}$ 。由于化学成分不同, 这些合金加热至 900℃, 其线膨胀温度系数由 $5 \cdot 10^{-6}$ 到 $12 \cdot 10^{-6} 1/\text{度}$ 。

镍铬合金 H60X15 和 H80X20 的温度与电阻的关系曲线呈 S 形^[2]。

镍铬合金 H60X15 加热至 500℃ 时具有很高的电阻温度系数 ($1.5 \cdot 10^{-4} 1/\text{度}$)。镍铬合金 H80X20 的电阻温度系数就小得多 ($7.3 \cdot 10^{-5} / \text{度}$)。但是, 从 500 至 1000℃ 范围内加热时, 合金的电阻温度系数变化不定。

镍铬合金 H80X20 和 H60X15 的线膨胀系数与 ЭИ437 合金接近相等 ($16 \cdot 10^{-6} / \text{度}$)。这些合金加热至 1000℃ 仍然是抗氧化的。

铁铬铝合金 ЭИ595、ЭИ626、ЭИ627 具有同样曲线性的电阻与温度关系。加热至 1000℃ 时这些合金的平均电阻温度系数相应为 $4.3 \cdot 10^{-5}$ 、 $3 \cdot 10^{-5}$ 及 $2.5 \cdot 10^{-5} / \text{度}$, 并且随着合金中铝和铬的含量增加, 温度变化曲线愈来愈平缓。

铁铬铝合金由于化学成分不同而引起的线膨胀系数的变化很小, 等于 $14 \cdot 10^{-6} / \text{度}$ 。

图 2 表示锰镍铜和康铜合金加热至 800℃ 时电阻变化曲线。加热至 400℃ 时, 这些合金的电阻温度系数小。超过这一温度时, 曲线形状向温度系数明显增大的方面变化, 除去尚未弄清的组织变化以外, 这一现象应当认为是剧烈氧化的结果。

上述试验数据证实了以前的假设——寻求新材料最适合的合金系是镍—铬和铁—铬系合金。

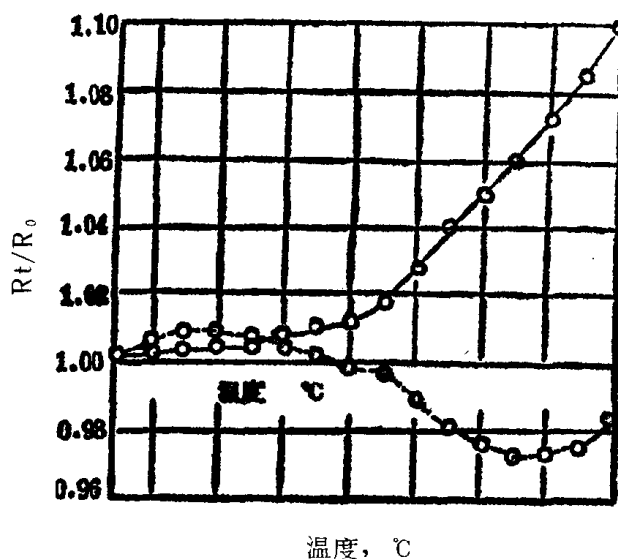


图 2 各种合金在较高温度 (50 至 800℃) 时电阻的变化

代表符号	材料名称	Ni	Mn	Cu	ρ 欧姆·毫米 ² 米
———	康 铜	41.0	1.0	余 量	0.6
-----	Mn-Ni-Cu合金	27.6	61.63	4.9	1.93

铁—铬—铝系合金

在第一批炉次中（表1）所研究的合金含铬25—30%、铝5—8.5%，其它元素的含量接近相等。在铝含量实际不变的条件下，随含铬量的增加，比电阻和线膨胀系数变化很小。在任何温度下，电阻温度系数略有减小。

表 1

炉号	化 学 成 分								比 电 阻 欧姆·毫米 ² 米	线膨胀 系数	电阻温度系数		
	C	Si	Mn	Cr	Al	S	P	Fe			50— 400℃	400— 600℃	600— 1000℃
357	0.05	0.53	0.22	25.34	5.45	0.004	0.024	余量	1.42	—	2.8×10^{-5}	10.4×10^{-5}	6.9×10^{-5}
267	0.045	0.20	0.32	30.71	5.90	0.004	0.007	余量	1.41	14.30	2.6×10^{-5}	7.0×10^{-5}	1.9×10^{-5}
354	0.07	0.53	0.22	28.95	5.10	0.004	0.014	余量	1.45	13.50	0.9×10^{-5}	5.4×10^{-5}	1.1×10^{-5}
356	0.04	0.53	0.23	33.02	5.10	0.003	0.026	余量	1.43	13.90	1.3×10^{-5}	3.4×10^{-5}	0.4×10^{-5}
3-362	0.03	0.45	0.26	25.45	5.00	0.006	0.032	余量	1.39	—	4.7×10^{-5}	10.4×10^{-5}	3.3×10^{-5}
3-259	0.07	0.53	0.34	25.54	6.35	0.004	0.035	余量	1.50	13.90	-0.6×10^{-5}	6.6×10^{-5}	1.3×10^{-5}
176	0.025	0.22	0.08	25.55	6.89	0.009	0.025	余量	1.45	14.10	2.5×10^{-5}	11.7×10^{-5}	2.6×10^{-5}
265	0.045	0.44	0.32	25.70	6.55	0.004	0.004	余量	1.52	14.80	-3.4×10^{-5}	3.0×10^{-5}	-0.1×10^{-5}
267	0.03	0.56	0.36	25.45	7.26	0.004	0.004	余量	1.56	14.95	-4.6×10^{-5}	0.7×10^{-5}	-0.8×10^{-5}
269	0.04	0.45	0.32	25.53	8.30	0.005	0.004	余量	1.62	14.95	-7.9×10^{-5}	-4.0×10^{-5}	-2.5×10^{-5}

必须指出，含铬量超过28%时，合金变脆，并且难以拉制。

铝含量由5%增加8.5%时，比电阻由1.39增大至1.62欧姆·毫米²/米，而电阻温度系数减小了。

线膨胀系数略有增大，由 $13.9 \cdot 10^{-6}$ 至 $14.95 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

加热温度由50至1000℃时，铝含量对电阻变化的影响可以从图3中明显看出。

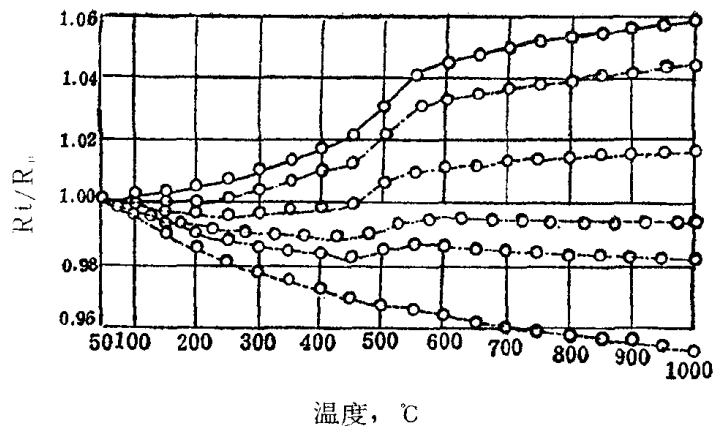


图3 加热温度50—1000℃时, Fe-Cr-Al 合金中铝含量对电阻变化的影响

代 表 符 号	炉 号	Cr	Al	Fe	ρ 欧姆·毫米 ² 米
-----	362-B	25.4	5.0	余 量	1.39
- . - . -	176	25.5	6.8	余 量	1.45
-----	259-6	25.5	6.35	余 量	1.50
- . . - . .	265	25.7	6.5	余 量	1.52
- . . . - . .	267	25.4	7.2	余 量	1.56
.	269	25.5	8.5	余 量	1.62

随着铝含量的增加, 电阻温度变化曲线的倾斜角急剧减小。铝合金超过6.35%时, 加热时发现电阻减小, 其电阻温度系数变为负值。

含8.5%铝的合金的温度与电阻依赖关系曲线在500℃时没有明显的弯曲, 但是, 合金中铝含量超过6—6.5%时, 由于产生脆性, 这种合金很难拉制成丝材。

所以, 对于进一步研究用的最适合的合金成分为25%Cr、5%Al。以余量铁为基础进一步研究了各种元素对铁铬合金性能的影响。

往上述成分的铁铬铝合金固溶体中添加钼、钛、铌和铜对比电阻和线膨胀系数无多大影响。与无添加元素的合金比较, 所有这些合金的电阻温度系数或是增大, 或是变化很小。含钒的合金是个例外。添加钒提高合金的电阻, 大大降低其温度系数。含有上述元素的铁铬铝合金加热不超过1000℃时, 电阻变化曲线示于图4。

在研究铬(26—27%)和铝(5—5.5%)含量固定, 而钒的含量由2.8%至5.8%范围内变动的合金时, 铝和钒的共同影响更为明确了,

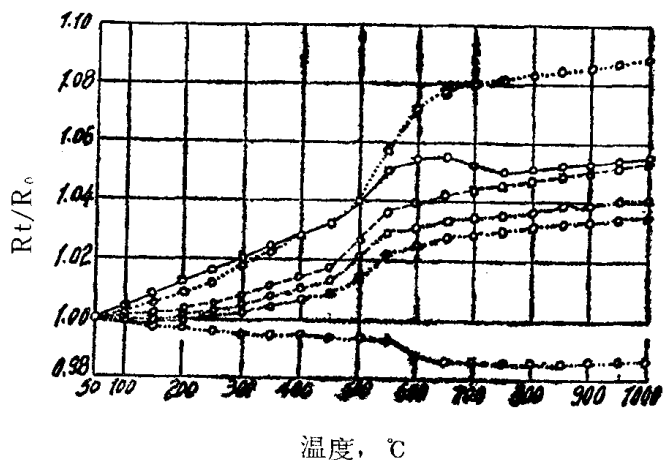


图4 各种元素对加热50—1000℃的合金电阻变化的影响

代表符号	炉号	Cr	Al	Ti	Nb	Cu	V	Co	Fe	$P \frac{\text{欧姆} \cdot \text{毫米}^2}{\text{米}}$
-----	177	25.24	5.17	2.05	—	—	—	—	余量	1.39
----	180	25.50	5.60	—	—	0.40	—	—	余量	1.39
-.-.-	358	24.80	5.30	—	2.50	—	—	—	余量	1.45
-...-	428	25.07	5.50	—	—	—	3.54	—	余量	1.49
-....-	357	25.34	5.45	—	—	—	—	—	余量	1.44
.....	273	25.25	5.09	—	—	—	—	6.03	余量	1.37

而且在铬(26—27%)和钒(2.3—2.9%)含量固定,而铝含量在2.8%至5.8%范围内变动时也有同样的情况。这些元素对电阻和电阻温度系数的影响相近,如果使这些元素适当地配合,就可以得到电阻温度系数小的满意的合金。这些合金的电阻与温度关系曲线的特点是极为平缓的。随合金中铝和钒的含量增加,曲线与横座标轴的倾斜角逐渐减小(图5和6)。

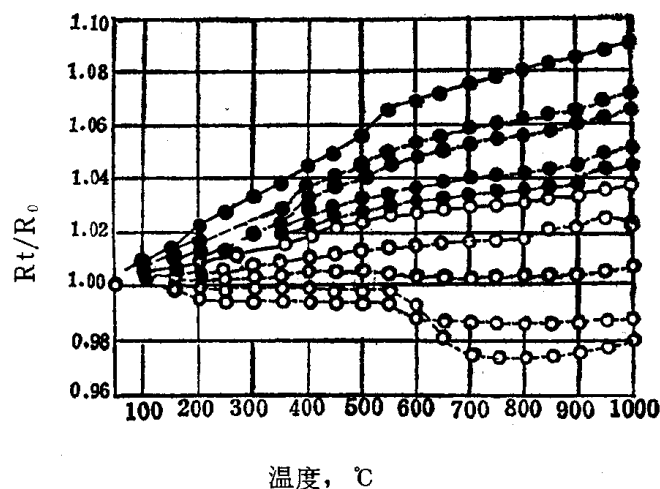


图5 50至1000℃温度下含V的Fe-Cr-Al合金中铝含量对电阻变化的影响

代表符号	炉号	Cr	Al	V	Fe	$P \frac{\text{欧姆} \cdot \text{毫米}^2}{\text{米}}$
-----	1205	26.04	4.47	2.88	余量	1.32
-----	1206	26.75	5.12	3.13	余量	1.36
-.-.-.-	1209	26.80	5.03	3.00	余量	1.37
-...-.-	1207	26.70	5.30	3.40	余量	1.41
-....-.	1208	26.84	5.20	3.10	余量	1.40
-----	1210	25.80	5.07	3.60	余量	1.40
-----	1211	26.68	5.33	3.80	余量	1.43
-.-.-.-	0-817	26.63	5.55	3.48	余量	1.47
-...-.-	428	25.07	5.50	3.54	余量	1.49
-....-.	429	26.95	5.20	5.80	余量	1.52