Fe-Cr 系合金の電気抵抗歪率について*

増 本 量** 中 村 直 司**

Hakaru Masumoto and Naoji Nakamura: The Strain Gauge Factor and Electrical Properties in a Cold-Worked State of Iron-Chromium Alloys. The strain gauge factor K at room temperature, the electrical resistivity ρ at 20°C and its mean temperature coefficient C_f , and the mean thermal electromotive force E_{mf} in the temperature range of 0° to 40°C have been measured with wires of Fe-Cr alloys containing 0~50% chromium in a cold-worked state of about 98% reduction. It has been found that the largest value of K obtained is 6.2 for the Fe-Cr alloy containing 20% chromium, ρ , C_f and E_{mf} of which are 44.6 $\mu\Omega$ -cm, 32.7×10^{-4} and 11.0 $\mu V/^\circ C$, respectively.

(Received January 1, 1968)

1. 緒 言

電気抵抗歪計は細線または箔の電気抵抗が弾性歪によって変化する現象を利用して、逆に抵抗変化を測つて応力あるいは歪量を知るものであるが、その原理はすでに 1856 年に Kelvin 卿が発見したものである。その後第 2 次大戦前後アメリカにおいて歪計への応用面に対する研究が盛んに行なわれ、今日では物理量の変換素子として微小変位、重量、加速度、トルクあるいは摩擦などの測定に広く用いられておるばかりでなく、平衡型記録計などの工業計器の機械量-電氣量変換素子としても利用されておる。歪計は種々に分類されるが、ここでは冷間加工した金属細線を用いる場合のみについて取扱うことにする。一般に金属細線の長さ、断面積および比電気抵抗をそれぞれ L , A および ρ とすれば、その全抵抗は $R = \rho(L/A)$ で表わされる。Higson⁽¹⁾ に

よれば歪に伴う抵抗の変化は物質の寸法の変化によるものと、物質自体の比電気抵抗の変化によるものとの二つの部分からなりたつ。すなわち上式を微分すれば、

$$dR/R = dL/L - dA/A + d\rho/\rho \quad (1)$$

となる。さらにポアソン比を σ とすれば、 $2\sigma(dL/L) = -dA/A$ の関係があるから、(1)式は

$$K = dR/R / dL/L = 1 + 2\sigma + d\rho/\rho / dL/L \quad (2)$$

となる。この K がいわゆる抵抗歪率†とよばれるものである。通常用いられる歪計材料では $\sigma \approx 0.3$ であるから、 K を大きくするためには $d\rho/\rho / dL/L$ を大きくしなければならない。すなわち金属細線に引張り変形を与えたとき、材料の長さ方向の電気抵抗が大巾に増す必要がある。なおそのほか歪計材料として主要な条件は電気抵抗が大きいこと、電気抵抗の温度係数が小さいこと、対銅熱起電力が小さいこと、加工性や機械的性質がよいこと、低廉安価なことなどである。しかしこれらの条件をすべてみたす材料はいまのところ見つかつていない。

現今一般に多く用いられておるものは Table 1 に示す

** 財団法人電気磁気材料研究所(The Foundation; The Research Institute of Electric and Magnetic Alloys, Sendai)

* 1967 年 10 月 本会札幌大会に発表; 財団法人電気磁気材料研究所報告, No. 22.

(1) G.R. Higson: J. Sci. Instr., 41 (1964), 405.

† ゲージ率あるいは歪感度ともいう。

Cu-Ni 系合金で、とくに高温においては Ni-Cr 系合金が用いられておるようである。前者は非常に小さい比電気抵抗

III. 測定結果ならびに考察

Table 1 Characteristics of electrical resistance strain gauge alloys.

Material	Strain gauge factor K	Specific resistivity ρ ($\mu\Omega$ -cm)	Temperature coefficient of specific resistivity $C_f (\times 10^{-4}/^\circ\text{C})$	Thermal electromotive force relative to copper $E_{mf} (\mu\text{V}/^\circ\text{C})$	Heat treatment
40~45% Ni-55~60% Cu-0~1% Mn	2.04~2.12	45~50	± 0.2	-45	Heated at temperatures lower than about 300°C after cold working
80~85% Ni-15~20% Cr	2.1~2.65	100~120	± 0.2	+4	—

抗の温度係数 C_f を示すが、抵抗歪率および比電気抵抗は小さく、対銅熱起電力 E_{mf} は大きい。また後者は大きい比電気抵抗、小さい抵抗の温度係数および対銅熱起電力を示すが、抵抗歪率も小さく優秀とはいえない。その他 Pt を主体とする合金、Fe および Cr を主体とする合金などについてもその特性が研究されており、一般に抵抗歪率は割合に大きい、その他の特性、価格などについては難点が多い。よって著者らはまず Fe および Cr を主体とする合金の基本となる Fe-Cr 2 元合金についてその特性を研究した。

II. 試料ならびに実験方法

合金の原料は電解 Fe (純度 99.96% 以上) および金属 Cr (純度 99.6%) で、その化学分析の結果は Table 2 のとお

Table 2 Results of chemical analysis of metals used.

Metals	Fe (%)	Cr (%)	C (%)	S (%)	Si (%)	P (%)	Mn (%)	Cu (%)	Al (%)
Fe (el)	—	—	0.005	0.005	0.005	0.004	0.005	0.004	—
Cr (mt)	0.21	99.6	0.03	0.02	0.07	0.01	—	—	0.06

りである。試料を造るには、まず全量 100 g のうち Fe をアルミナ坩堝に入れ、酸化を防ぐため表面に水素ガスを吹きつけながら、空気中で高周波誘導電気炉によつて溶かした。つぎにこれに Cr を投入してよく攪拌し均質な溶融合金とした後、これを内径 10 mm、高さ 120 mm の鉄型に鋳込み、その造塊を約 1000°C で鍛造して径 5 mm の丸棒にした。さらにこれにスエーピングと引抜きによつて冷間加工を施したのであるが、その最後の冷間加工率が約 98% になるように加工の中間段階において 1000°C で焼鈍を行ない加工して直径 1 mm (電気抵抗測定用)、0.5 mm (対銅熱起電力測定用) および 0.06 mm (抵抗歪率測定用) の 3 種類の線状試料を作つた。最後にこれらからそれぞれ長さ 10 cm、1 m および約 70 cm のものを切り取り、比電気抵抗およびその温度係数、対銅熱起電力ならびに抵抗歪率を電位差計および精度 ± 0.008 mm の測定顕微鏡を用いて測定した。

Fig.1 は Hansen⁽²⁾ による Fe-Cr 2 元系合金の状態図である。本系については従来非常に多く研究がなされておる

Fig.1 Equilibrium diagram of Fe-Cr alloys.

が、Fe 側の α 相内における固相反応については種々の説が出されており、まだ確定したとはいえない。したがって冷間加工した合金の組織についてはなおこれを明らかにすることが出来ない、本研究に用いた試料の組織については全然触れないことにする。Fig.2 は約 98% の冷間加工を施した Fe-Cr 2 元系合金線 (0.06 mm ϕ) の室温における抵抗歪率と組成との関係を示す。一般に金属細線において弾性限内では Hooke の法則と同様、歪を増すと抵抗は直線的に増加し、弾性限を越えるとその増加の割合は次第に緩やかになり遂には破断してしまうので、図には弾性限内の直線部分から計算した抵抗歪率を記入しておいた。図に見るように抵抗歪率は Fe の 4.2 から Cr 約 3% の極小まで減少し、後急に増加して Cr 20% で 6.2 の非常に大きな極大値に達する。その後 Cr の増加とともに比較

(2) M. Hansen: *Constitution of Binary Alloys*, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, (1958).

的に減少する。Fe の値は Weyerer⁽³⁾ の値とよく一致している。現在金属線で 6 以上の抵抗歪率をもつものは Pt-

Fig. 2 Strain gauge factor at room temperature in Fe-Cr alloys in a cold-worked state of about 98% reduction.

Ir 系合金のみで、著者らの得た Cr 20% を含む Fe-Cr 合金の 6.2 は非常に大きい値といわねばならない。なお Fig. 2 の曲線において Fe_3Cr の組成付近に一つの小さな極小が現われておるのは、あるいは規則格子の存在によるのかもしれない。Fig. 3 は Cr 20% を含む Fe-Cr 合金線の長さの

Fig. 3 Relation between changes of resistance and length at room temperature in the Fe-Cr alloy containing 20% chromium in a cold-worked state of about 98% reduction.

変化による抵抗の変化を示す。図に見るように抵抗の変化は約 0.4% の長さ変化まではほとんど直線的で、合金は大体弾性限内にあるが、長さの変化がこの値を越えると塑性変形が起こり抵抗の変化は漸次減少する。なお直線部分の抵抗歪率は 6.2 で非常に大きい。直線部分の長さの変化は約 0.4% で非常に小さい。しかし合金線を実際に紙に接着した場合には、合金線が弾性限界を越えてもこの直線性は失われなれないという説⁽⁴⁾もあるので、この合金線の直線部分が短かいといつても一概に応用出来ないとはいえない。Fig. 4 は 5 種類の Fe-Cr 系合金について、熱起電力の温度変化を示したものである。図に見るようにいずれの合

金の熱起電力も温度とともにほぼ直線的に増加しており、Cr 10% の合金を除いて Cr 濃度が増すにしたがい熱起電力

Fig. 4 Thermal electromotive force relative to copper near room temperature in 5 kind of Fe-Cr alloys in a cold-worked state of about 98% reduction.

Fig. 5 Electrical properties of Fe-Cr alloys in a cold-worked state of about 98% reduction.

の温度による変化量は小さくなっている。0°~40°C の平均の対銅熱起電力は Fig. 5 に Cr 濃度に対して示しておいた。なおこの図には 20°C における比電気抵抗および 0°~40°C における平均の比電気抵抗の温度係数も掲げてある。

熱起電力は Cr 量の増加とともにはじめ少し増加して Cr 約 5% で小さな極大に達し、後単調に減少する。比電気抵抗は Cr の増加とともに最初急激に増加し、次第にその割合を減じて Cr 40% で $51 \mu\Omega\text{-cm}$ の値に達し、後に増加する。この Cr 40% 以上における急激な増加は σ 相の生成によるものであろう。抵抗の温度係数は Cr 量とともに Cr 約 3% までは非常に急激に減少するが、その後は緩やかに増加する。そして Cr 約 20% で極大に達し、以後次第に減少してゆく。すなわち抵抗歪率の最大値 6.2 を示す Cr 20% を含む合金の比電気抵抗の温度係数は 32.7×10^{-4} の大きな値を示しており、歪計の必要条件に照らしてみると一つの大きな欠点である。

(3) H. Weyerer: Z. Metallk., **44** (1953), 51.

(4) 青柳: ワイヤ・ストレインゲージ, 日刊工業社, (1959).

IV. 総 括

Cr 0~50% を含む Fe-Cr 2 元系合金について、約 98% の冷間加工を施した後歪計特性を測定してつぎの結果を得た。

(1) 抵抗歪率は Fe の 4.2 から Cr 含有量約 3% の極小まで減少し、つぎに急に増加して Cr 20% で 6.2 の大きな極大値に達した後急に減少する。

(2) 比電気抵抗は Cr 量の増加とともに最初急に増加し、次第にその割合を減じて Cr 40% で $51 \mu\Omega\text{-cm}$ の値に達し、後急に増加する。

(3) 比電気抵抗の温度係数は Cr 含有量約 3% までは非常に急激に減少し、つぎに緩やかに増加して Cr 約 20% における極大に達した後漸次減少する。

(4) 対銅熱起電力は Cr 含有量とともにはじめ緩やかに増加し、Cr 約 5% における小さな極大に達した後漸次減少する。

(5) Fe-Cr 系で最高の抵抗歪率 6.2 を示す Cr 20% を含む合金の比電気抵抗は $44.6 \mu\Omega\text{-cm}$ 、その温度係数は 32.7×10^{-4} および対銅熱起電力は $+11.0 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ で、これを歪計として用いるには一長一短がある。

最後に研究中御援助をいただいた東北大学金属材料研究所 斎藤英夫教授に感謝の意を表する。