真空遮断器用 $\text{Ni}_3\text{Al-Cr}$ 電極材料の電気的特性

渡 辺 隆 二* 安 藤 寿*
 岩 下 喜代次* 黒 沢 幸 夫*

J. Japan Inst. Metals, Vol. 54, No. 3 (1990), pp. 346-351

Electrical Characteristics of $\text{Ni}_3\text{Al-Cr}$ Alloy Electrode for Vacuum Circuit Breaker

Ryuuji Watanabe*, Hisashi Andoh*,
 Kiyoji Iwashita* and Yukio Kurosawa*

Various electrodes of $\text{Ni}_3\text{Al-Cr}$ alloys were prepared for high withstand-voltage vacuum circuit breakers. The microstructures and the basic electrical properties for the electrodes were examined.

The ingots of these alloys were made by a high frequency induction melting method. In these microstructures, Cr particles were dispersed homogeneously in Ni_3Al matrix.

It was found that the $\text{Ni}_3\text{Al-Cr}$ electrodes have a higher withstand-voltage than that of conventional Cu alloys, and a good interruption-ability.

The $\text{Ni}_3\text{Al-Cr}$ alloys are promising as a practical electrode material for high withstand-voltage vacuum circuit breakers.

(Received September 25, 1989)

Keywords: vacuum circuit breaker, electrode material, Ni_3Al intermetallic compound, withstand-voltage, interruption-ability, chopping-current

I. 緒 言

真空遮断器⁽¹⁾では、電流遮断時のアークによる損傷や投入時の先行アークによる軽い溶着等で電極面が荒れやすい。電極面の凹凸は電極間隙において電界集中の原因となり、耐電圧性を大きく左右する。

従来から真空遮断器用電極材料のほとんどは、通電性を考慮し、Cu や Ag をベースとした合金が適用されてきているが、遮断アーク熱によって表層部が溶けたり、溶着を起こすなど、面荒れが激しい。このために耐溶着性の改善を目的として Cu, Ag 系に Pb, Bi, Te などの第3元素を添加した材料⁽²⁾および高融点の Cr や W 粉末焼結マトリックス中に Cu や Ag を溶浸した材料⁽³⁾などが開発されてきた。しかし Cu や Ag を含有した材料では、現状よりも更に耐電圧性を高くするには限界があった。

本研究では Cu や Ag に変え、高融点の金属間化合物の中で比較的導電性が良く、高周波真空溶解が可能な Ni_3Al 化合物に着目し、これをベースとして、耐溶着性を持たせるために Cr を分散させた、いわゆる $\text{Ni}_3\text{Al-Cr}$ 系の電極材料を検討した。

本報告はこれらの材料の組織、および耐電圧特性を中心に真空遮断器用電極としての電気的特性を調べた結果である。

II. 実 験 方 法

1. 試料作製方法

本実験に用いた原材料の化学組成を **Table 1** に示す。真空溶解による電極材料の作製方法を **Fig. 1** に示す。まず、マグネシアるつぼ中に Cr と Ni をセットし、 10^{-2} Pa の真空中で溶解し、次いで蒸気圧の高い Al の蒸発損失を防ぐため、Ar ガスを $1\sim 4\times 10^3$ Pa 封入してから、Cr-Ni 溶湯中に Al を添加するようにした。Al 添加後、るつぼ中でいったん凝固させ、再度同一雰囲気下で再溶解し、均質化を図ってから軟鋼製の金型に鑄造した。金型の直径は 60 mm、溶解量は 2 kg である。

このインゴットから後述するような試験電極と、組織観察、電気抵抗、X 線回折等の試料を採取した。電気抵抗測定試料は棒状 (3 mm×3 mm×50 mm) とし、四端子法を用いて室温で測定し、この値を導電率 (IACS%) に換算

Table 1 Source materials used for electrode making (mass%).

Cr	C: 0.01	Si: 0.12	P: 0.002	S: 0.025	Al: 0.68	Fe: 0.16
Ni	Co: 0.0001	Cu: 0.0001	Pb: 0.0001	Fe: 0.009	S: 0.001	C: 0.005
Al	Si: 0.006	Fe: 0.006	Cu: 0.0001	—	—	—

* (株)日立製作所日立研究所機能性薄膜研究センター (Thin Film Research Center, Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd. Hitachi)

Fig. 1 Schematic diagram of the ingot making process.

した。X線回折は板状(20 mm × 18 mm × 1 mm)とし、理学電機製 RU-100PL 型 X線回折装置を用いた。

2. 電極特性評価方法

電極特性の評価は、前報⁽⁸⁾と同様、Fig. 2 に示すような組み立て式排気型真空遮断装置を用い、直径 20 mm (電接面球 R30 付) の電極を組込み、(573 K, 7.2 ks) のベーキング処理後 10^{-4} Pa の真空中で、以下の電気特性を調べた。耐電圧試験は Fig. 3 に示すような回路で、交流 360 A を 100 回遮断し、表面をクリーニング後、電極間を 2.5 mm に保持し、極間にインパルス電圧を 5 kV ステップで徐々に増加させながら印加した。この過程で最初に放電し始める電圧をその電極の耐電圧値とした。

遮断性能は、回路定数との関係で周波数が 58 Hz の交流電流を、約 500 A ステップで増加させながら遮断を繰り返し、その途上で遮断不能となる電流量をその電極の限界遮断性能とした。

Fig. 2 Experimental apparatus for the interruption test and test electrode.

Fig. 3 Circuit for measurement of withstand-voltage.

遮断電流の測定⁽⁸⁾は、電流遮断時の電流波形をデジタルメモリに記憶させた後、シンクロスコープに再現させて遮断電流の値を読み取った。これらは 1 試料につき 50 回測定し、最大および平均値を求めた。

III. 結果および考察

1. $\text{Ni}_3\text{Al-Cr}$ 系合金の組織および物性

高周波真空溶解し、金型に鋳造した $\text{Ni}_3\text{Al-Cr}$ 系合金のインゴットの外観を Fig. 4 に示す。それぞれのインゴットとも鋳肌は銀白色を呈し、外観上の欠陥はない。

これらを均質化焼鈍(1473 K, 18 ks)した後の試料についての X 線回折結果を Fig. 5 に示す。この回折結果では Ni_3Al の回折ピークが明瞭に現われている。一方、Cr 添加量が 30, 40% と多い(c), (d) では Ni_3Al の規則格子反射(100)が極めて弱くなり、Cr(200)や(211)のピークの立上りが認められる。

Table 2 は Ni_3Al および $\text{Ni}_3\text{Al-Cr}$ 合金の面間距離 d を比較した結果であるが、 $\text{Ni}_3\text{Al-Cr}$ 合金は面間距離が Ni_3Al に比較して大きくなる。これは Ni_3Al の一部が Cr で置換された、いわゆる $(\text{Ni, Cr})_3\text{Al}$ の構造をとっているものとみられる。

Ni_3Al 中には Cr は最大で 10 mol% 程度固溶されることが知られているが⁽⁴⁾、本報告はそれと良く一致している。

これら均質化焼鈍後の組織を Fig. 6 に示す。いずれの組織とも、前述したような高温焼鈍によっても、 Ni_3Al のデンドライトが消失しきれずに残っている。これらの組織において $(\text{Ni, Cr})_3\text{Al}$ および Cr を正確に特定することは難しいが、黒いデンドライトの周囲に別に観察される微細な晶出物が Cr(α 相⁽⁵⁾)で、その他は $(\text{Ni, Cr})_3\text{Al}$ であると思われる。

Fig. 4 Views of $\text{Ni}_3\text{Al}-\text{Cr}$ ingots. Fig. 5 X-ray diffraction patterns of $\text{Ni}_3\text{Al}-\text{Cr}$ alloys.
(a) $\text{Ni}_3\text{Al}-10\text{Cr}$, (b) $\text{Ni}_3\text{Al}-20\text{Cr}$, (c) $\text{Ni}_3\text{Al}-30\text{Cr}$, (d) $\text{Ni}_3\text{Al}-40\text{Cr}$ (mass%).

これら $\text{Ni}_3\text{Al}-\text{Cr}$ 合金の導電率を Fig. 7 に示す. 通常 Ni_3Al の電気抵抗は $374 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}^{(6)}$ であり, これを導電率に換算すると 4.6 IACS% となり, 今回の Ni_3Al そのものはこれとよく一致した. ただし Cr 量 10~60 mass% 合金における導電率は図から分かるように, 1~3 IACS% と低い. この理由としては, Ni_3Al 中への Cr の固溶効果によるものと考えられる. つまり, 電気抵抗変化としてみれば, Cr 量が約 10 mol% (約 11 mass%) 程度までは Nordheim の法則に従って抵抗が増加し, それ以上では Cr の増加量に従い, その複合則に従って徐々に電気抵抗が下がるためと思われる.

また, Fig. 8 の硬さ変化をみると, Cr 量 10~60 mass% でビッカース硬さが 300~400 Hv と高く, Cr 量が増えると硬さも増える傾向にある. ただし, Cr 量が 60 mass% を越えるとインゴットに割れが生じやすくなる. なお, 真空遮断器用電極の高耐電圧化のためには, 融点が高く, 蒸気圧が低いという他に, この硬さが大きいことが好ましい. $\text{Ni}-\text{Al}-\text{Cr}$ 系 3 元合金に置ける Ni_3Al (γ' 相) は, とくに高温硬さ特性が高く, 約 1073 K 付近まで Hv 値が 200 を有している⁽⁷⁾. このことは電極としてアークの連続投入, 遮断が繰り返されても電接面の変形や突起等の発生が少なく, 局所的な電界集中が起こりにくくなり, 次節で述べる耐電圧特性の改善につながるものと思われる.

2. 耐電圧特性

耐電圧試験は 10^{-4} Pa の真空中で交流 360 A の小電流

Table 2 The interplanar spacing of Ni_3Al and Ni_3Al -Cr Alloys.

Ni_3Al [hkl]		Interplaner spacing, d/nm			
		Ni_3Al	Ni_3Al -10 mass%Cr	Ni_3Al -20 mass%Cr	Ni_3Al -30 mass%Cr
1	100	0.3592	0.3623 ↑	0.363 ↑	0.3615 ↑
2	110	0.255	0.2919 ↑	0.2882 ↑	—
3	111	0.2068	0.2076 ↑	0.2083 ↑	0.2081 ↑
4	200	0.179	0.1799 ↑	0.1805 ↑	0.1805 ↑
5	220	0.1263	0.1266 ↑	0.1271 ↑	0.1271 ↑
6	311	0.1078	0.3108 ↑	0.1083 ↑	0.1085 ↑

Fig. 6 Microphotographs of Ni_3Al -Cr alloys.
(Cr content in mass%)

遮断を100回繰り返し、その後に 500 V ステップで電圧を増加させながら印加し、絶縁破壊する電圧を測定するものである。一般的に、繰り返し負荷開閉すると、アーク熱に

Fig. 7 Electrical conductivity of Ni_3Al -Cr alloys. Fig. 8 Vickers hardness of Ni_3Al -Cr alloys.

よる溶着等によって電接面は非常に荒れやすく、これが極間の電界集中の原因となり耐電圧を劣化させることが多い。従って、耐電圧を向上させるために最も重要なことは、電接部表面が遮断アークで叩かれた後でも、表面の滑らかさがいかに保たれているかどうかである。

Fig. 9 に Ni_3Al -Cr 合金電極の Cr 添加量と耐電圧との関係を示す。 Ni_3Al -5 mass%Cr 合金電極では最小耐電圧値は 55 kV、平均で 78 kV であるが、Cr 量の増加に伴い耐電圧は上昇し、おおよそ 30 mass%Cr で平均で 110 kV の最高値を示す。これは前節で挙げた Cr 量と硬さとの関係と似た傾向を示している。30 mass%Cr 以上の添加量と

Fig. 9 Withstand-voltage of $\text{Ni}_3\text{Al-Cr}$ alloys.

なると、耐電圧は殆ど変わらず、むしろ僅かではあるが下がる傾向がみられる。なお、現在汎用真空遮断器として使用されている $\text{Cu-0.7 mass\%Pb}$ 合金⁽⁸⁾が平均で 20~30 kV、あるいは最も高耐電圧用とされている $\text{Cr-30~40 mass\%Cu}$ 焼結合金の実測値は平均 80~90 kV であり、 $\text{Ni}_3\text{Al-Cr}$ 合金電極の耐電圧特性は従来の真空遮断器用電極に比べ非常に高い値である。

Fig. 10 に $\text{Ni}_3\text{Al-Cr}$ 合金電極の遮断試験後の外観を示す。交流 360 A を 100 回以上遮断し、更に後述するような限界の遮断性能試験として約 10 kA の短絡電流遮断した後ではあるが、比較的遮断アークによる外観の損傷は少ない。特に特徴的なことは、遮断アークによる激しい熱履歴と繰り返しの溶着や引き剥がし力を受けているにもかかわらず電接面の起伏は小さく、また比較的滑らかである。このことが電界集中を緩和し、耐電圧特性の向上に寄与しているものと考えられる。

Fig. 11 はこれら繰り返し遮断後の電極表層の断面組織を示す。(a)図に示すような遮断アークによる再溶融層が形成され、それらは厚さが約 500~600 μm で柱状晶を呈し、電接面と垂直方向に生長している。この溶融層を拡大すると、(b)図のように黒色の Ni_3Al 粒子が非常に微細に分散し、初期の組織とは大幅に変化している。

3. 裁断電流特性および遮断性能

Fig. 12 は各種 $\text{Ni}_3\text{Al-Cr}$ 合金電極の裁断電流特性および遮断性能試験結果を示す。

これらの合金の裁断電流レベルはいずれも最大が 6~8 A、平均が 4~5 A の範囲にあり、 $\text{Ni}_3\text{Al-Cr}$ 合金の Cr 量による差はみられない。これらの裁断電流レベルは上記した従来の Cu-Pb や Cr-Cu 合金電極と殆ど変わらない。

大電流の遮断性能についても材料間での優劣は認められ

Fig. 10 Views of $\text{Ni}_3\text{Al-Cr}$ electrodes after interruptions.

Fig. 11 Microphotographs of $\text{Ni}_3\text{Al-30 mass}\%\text{Cr}$ electrode after interruptions.

No.	Electrode Material (mass %)	Chopping Current, J/A	Interruption-Ability, E/kA
		0 2 4 6 8	0 2 4 6 8 10
1	$\text{Ni}_3\text{Al-5Cr}$	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>
2	$\text{Ni}_3\text{Al-20Cr}$	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>
3	$\text{Ni}_3\text{Al-30Cr}$	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>
4	$\text{Ni}_3\text{Al-35Cr}$	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>
5	$\text{Ni}_3\text{Al-50Cr}$	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>
6	$\text{Ni}_3\text{Al-60Cr}$	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>

Fig. 12 Chopping-current and interruption-ability of $\text{Ni}_3\text{Al-Cr}$ alloys.

ず、約 8~10 kA の範囲である。ただし遮断能力は、従来の Cu-Pb 電極が有する 7 kA よりは大きく、Cr-Cu 電極の 10 kA にほぼ近い性能である。

本研究を行なうに当り有益な御助言、御指導を賜りました(株)日立製作所国分工場受変制御設計部 津田英明主任技師、日立研究所 杉田 恒博士に深甚なる謝意を表する。

IV. 結 言

高耐電圧の真空遮断器用電極材料として、 $\text{Ni}_3\text{Al-Cr}$ 系高周波真空溶解合金を作製し、これらの組織および耐電圧を中心に真空遮断器用電極としての電気的特性調べた結果、次の結論を得た。

(1) 本合金は比較的均一な組織を有し、Cr の分散性も良好である。

(2) 耐電圧は Cr 添加量の増加とともに増すが、約 30 mass%Cr で最大を示し、2.5 mm ギャップで平均 110 kV の耐電圧値を有する。

(3) 遮断電流レベルは最大値で 6~8 A で、大電流遮断能力としては直径 20 mm で約 10 kA 遮断が可能である。

文 献

- (1) Y. Kurosawa, K. Iwashita, R. Watanabe, H. Andoh, T. Takasuna and H. Watanabe: IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol PAS-104(1985), No. 12, 3634.
- (2) 水谷彦広, 森宮 脩, 奥富 功: 日本金属学会会報, 11(1972), 893.
- (3) 例えば日本特許: 特公昭45-35101号.
- (4) Chester T. Sims *et al*: *The Superalloys*, A Wiley-Interscience Publication, (1972), 48.
- (5) Chester T. Sims *et al*: *The Superalloys*, A Wiley-Interscience Publication, (1972), 584.
- (6) 高融点化合物便覧, 日ソ通信社, (1960), 240.
- (7) Chester T. Sims *et al*: *The Superalloys*, A Wiley-Interscience Publication, (1972), 537.
- (8) 渡辺隆二, 安藤 寿, 岩下喜代次, 黒沢幸夫, 津田英明: 日本金属学会誌, 52(1988), 1144.