真空遮断器用 Ni-Al-Cr 電極材料の電气的特性

渡 辺 隆 二* 安 藤 寿*
岩 下 喜代次* 黒 沢 幸 夫*

J. Japan Inst. Metals, Vol. 55, No. 3 (1991), pp. 337-343

Electrical Characteristics of Ni-Al-Cr Alloy Electrode for Vacuum Circuit Breaker

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

Several electrodes were fabricated using Ni_3Al -Cr and NiAl-Cr alloys for high withstand-voltage vacuum circuit breakers. The microstructure and basic electrical properties for the electrodes were studied. Cr particles were detected and found to be dispersed homogeneously in these alloys.

Ni_3Al -Cr and NiAl-Cr electrodes have a high withstand-voltage with a mean value of 110 kV.

Further more, the electrodes were found to be comparable in performance to conventional of copper alloys electrodes in their interruption-ability and chopping-current. These Ni-Al-Cr alloys show promise as a practical electrode material for high voltage vacuum circuit breakers.

(Received September 25, 1990)

Keywords: vacuum circuit breaker, electrode material, NiAl intermetallic compound, Ni_3Al intermetallic compound, Withstand-voltage, Interruption-ability, Chopping-current

I. 緒 言

真空遮断器は小型でありながら大電流遮断特性に優れ、しかも遮断速度が速いという特長を有することから、急速に需要が高まっている⁽¹⁾。近年、設備の高電圧化、あるいは小型化、軽量化を図る上で、耐電圧特性の向上が望まれている。

真空遮断器用真空バルブ電極の耐電圧特性は、電流遮断アークや投入時の先行アークにより生ずる電極面の荒れに大きく左右される。とくに、電極面の突起は電極間隙において電界集中の原因となり、耐電圧特性を損なう原因となる。

従来の真空遮断器用電極としては、大電流通電性を考慮し、主に Cu, Ag ベースの合金が適用されてきている。しかし、これらは高融点材料でないため、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、面荒れが激しく、高耐電圧化を図るには限界があった。そこで高耐電圧化を目的として、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合金系として Ni-Al 合金に着目した。Ni-Al 2 元系合金には NiAl_3 , Ni_2Al_3 , NiAl および Ni_3Al の 4 種の金属間化合物が存在する。この中の Ni_3Al 化合物をベースに Cr を分散させた Ni_3Al -Cr 系の電極については、すでに報告した⁽²⁾。

本報告は更に電気抵抗が低く、融点が高い NiAl 化合物をベースとし、Cr を添加した NiAl-Cr 系の電極について組織、材料物性、耐電圧特性などを調べ、 Ni_3Al -Cr 系と比較検討した結果である。

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。電極合金は高周波真空溶解法により作製した。具体的には、マグネシアるつぼ中に Cr と Ni 原料をセットし、 10^{-2} Pa の真空中で溶解し、次いで Al の蒸発損失を防ぐため、Ar ガスを $1\sim4\times 10^3$ Pa 封入してから、Cr-Ni 溶湯中に Al を添加した。これらは軟鋼製の金型に鋳造した。このインゴットを抵抗加熱式環状電気炉を用いて、 10^{-3} Pa の真空中で均質化焼鈍(1473 K, 18 ks)を施した。金型の直径は 60 mm、溶解量は 2 kg である。作製した合金の

Table 1 Source materials used 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)

Table 2 Composition of NiAl-Cr Alloys.

Sample	Composition [mass% (at%)]		
	Ni	Al	Cr
NiAl	68.5 (50.0)	31.5 (50.0)	—
NiAl-5Cr	65.1 (47.9)	29.9 (47.9)	5.0 (4.2)
NiAl-10Cr	61.6 (45.7)	28.4 (45.7)	10.0 (8.4)
NiAl-20Cr	54.8 (41.5)	25.2 (41.5)	20.0 (17.0)
NiAl-30Cr	47.9 (37.0)	22.1 (37.0)	30.0 (26.0)
NiAl-40Cr	41.1 (32.3)	18.9 (32.3)	40.0 (35.4)

組成を **Table 2** に示す。このインゴットからワイヤカッティング装置(放電加工機)を用いて、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、室温にて測定した。

2. 電極特性評価方法

電極特性の評価は、前報⁽²⁾と同様、**Fig. 1** に示するような組み立て式排気型真空遮断装置を用いた。試験電極は直径 20 mm(電接面球 R30 付、厚さ 5 mm)の電極を銀ろう(BAg-8)付けにより固定し、ベーキング処理(573 K, 7.2 ks)後 10^{-4} Pa の真空中で、以下(1)~(3)の電気特性を調べた。

Fig. 1 Experimental apparatus for the interruption test and test electrode.

(1) 耐電圧試験

耐電圧試験は **Fig. 2** 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。

(2) 遮断性能試験

遮断性能は、周波数が 58 Hz の交流電流を、約 0.5 kA 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容量をその電極の限界遮断性能とした。

(3) 裁断電流測定

裁断電流の測定⁽³⁾は、電流遮断時の電流波形をデジタルメモリに記憶させ、裁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。

Fig. 2 Circuit for measurement of withstand-voltage.

III. 結果および考察

1. NiAl-Cr 系合金の組織および物性

(1) 合金の組織

Fig. 3 に高周波真空溶解した NiAl-Cr 合金の均質化焼鈍(1473 K, 18 ks)後の光学顕微鏡組織を示す。

(a) から明らかなように、NiAl 化合物単相の焼鈍後は灰白色の大きな結晶となる。Cr はこの結晶粒界に沿って晶出し、それらは(c)~(f)から分かるように、白色に観察される。Cr 量が 30% 以上では、あたかも Cr 地に NiAl 粒が分散したような組織を呈する。また、別の特徴として、Cr 添加量を増すと組織は微細化される傾向にある。

これら均質化焼鈍後の試料についての X線回折結果を **Fig. 4** に示す。(a) の NiAl 単相の回折結果をみると、

Fig. 3 Microphotographs of NiAl-Cr Alloys.

NiAl の標準回折パターン⁽⁴⁾とよく合致している。また(b)の5%Cr,あるいは(c)の10%Cr添加材料をみると, Crの増加量に従い, Crピークが明瞭に現れている。基本的には, 本合金は α (Cr)+ β (NiAl)の2相共存領域の合金である。なお, NiAl(β)へのCrの固溶については, 750~1150°Cの高温域で数%のCrの固溶があることが報告されているが⁽⁵⁾, 室温下で固溶状態は調べられていない。ただし本研究のX線回折データをみると, Crを含有した合金系では, NiAl化合物のピークの回折角(2θ)がわずかながら低角度側にシフトする傾向がみられる。したがって, 室温下でも厳密には β 相へのCr固溶は若干あるものと考えられる。

(2) 導電性および硬さ

NiAl-Cr および Ni₃Al-Cr 合金の Cr 添加量と導電率との関係を Fig. 5 に示す。この結果から Ni₃Al および NiAl

単相の導電率は約5および18 IACS%である。知られている Ni₃Al および NiAl の電気抵抗値⁽⁶⁾を導電率に換算すると4.6および20.0 IACS%となり, Fig. 5 の値はそれとほぼ合っているとと言える。ここで, NiAl は Ni₃Al に対して約4.5倍の導電性を示し, 電極材料としてみると, 通電性や遮断性能面から NiAl-Cr 系の方が好ましい特性を有している。

次に NiAl-Cr 系と Ni₃Al-Cr 系の Cr 添加量と導電率との関係を見ると, Cr の固溶効果による違いが表われている。つまり, Ni₃Al-Cr 系では約10 mass%のCrの固溶⁽⁷⁾があり, 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。一方, NiAl-Cr 系では, Cr の固溶が少ないので, Cr 増加に従い, 徐々に抵抗は増

Fig. 4 X-ray diffraction patterns of NiAl-Cr alloys.

Fig. 5 Electrical conductivity of NiAl-Cr alloys.

える。なお、NiAl-Cr 系では、Cr 添加量が 30 mass% でも 10 IACS% 以上の導電性を示し、これは電極としてみると、とくに通電性および後述する遮断性能面から見てかなり有望である。

また、Fig. 6 の硬さ変化をみると、Ni₃Al-Cr および NiAl-Cr 合金とも Cr 添加量が増すにつれ、硬さは高くなる傾向にあり、ビッカース硬さで 250~400 Hv とかなり

Fig. 6 Vickers hardness of NiAl-Cr alloys.

硬い値を示す。

Ni₃Al-Cr では電気抵抗と同様に、10 mass%Cr で硬さの値にも屈曲点が見られる。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、経験的ではあるが、この硬さが大きいことが好ましい。これ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るためと思われる。

2. 耐電圧特性

耐電圧試験は、10⁻⁴ Pa 真空中でギャップ 2.5 mm の電極間に 500 V ステップで電圧を増加させ、絶縁破壊に至る限界の耐電圧値を測定するものである。

Fig. 7 に Ni₃Al-Cr および NiAl-Cr 合金電極の Cr 添加量と耐電圧との関係を示す。Ni₃Al-Cr 合金は Cr の増加に伴い耐電圧値は上昇し、おおよそ 30 mass%Cr 以上では

Fig. 7 Withstand-voltage of NiAl-Cr alloys.

飽和し、平均で 110 kV を示す。一方、NiAl-Cr 合金は Cr 添加量が 10 mass% と少ないものが平均 110 kV を示し、その後 Cr の増加に伴い逆に直線的に下がる傾向にある。また、原因はよく分からないが、Cr 量が多くなると平均値が低くなるだけでなく、ばらつきの範囲も大きくなっている。

なお、現在汎用真空遮断器として使用されている 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 Cr-30~40 mass%Cu 焼結合金⁽⁹⁾ の実測値は平均 80~90 kV である。したがって、Ni₃Al-Cr および NiAl-Cr 合金電極の耐電圧値は従来の真空遮断器用電極に比べ非常に高い値である。

No.	Electrode Material (mass %)	Chopping Current , J / A					Interruption-Ability , E / kA				
		0	2	4	6	8	0	2	4	6	8
1	Ni ₃ Al- 5Cr	<div><div></div><div>Mean</div><div>Max.</div></div>					<div><div></div></div>				
2	Ni ₃ Al-20Cr	<div><div></div></div>					<div><div></div></div>				
3	Ni ₃ Al-30Cr	<div><div></div></div>					<div><div></div></div>				
4	Ni ₃ Al-35Cr	<div><div></div></div>					<div><div></div></div>				
5	Ni ₃ Al-50Cr	<div><div></div></div>					<div><div></div></div>				
6	NiAl-10Cr	<div><div></div></div>					<div><div></div></div>				
7	NiAl-20Cr	<div><div></div></div>					<div><div></div></div>				
8	NiAl-30Cr	<div><div></div></div>					<div><div></div></div>				
9	NiAl-40Cr	<div><div></div></div>					<div><div></div></div>				

Fig. 8 Chopping-current and interruption-ability of Ni-Al-Cr alloys.

Fig. 9 Views of electrodes after interruptions.

3. 裁断電流特性および遮断性能

Fig. 8 は $\text{Ni}_3\text{Al-Cr}$ および NiAl-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, Cr 添加量による差はない。また, これらの裁断電流レベルは従来の Cu-Pb や Cr-Cu 合金電極の特性と殆ど変わらず, とくに低サージ特性は見られない⁽³⁾。

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ず, 約 8~10 kA の範囲である。これらの値は従来の Cu-Pb 電極の 7 kA, あるいは Cr-Cu 電極の 10 kA に殆ど遜色ない性能である。

Fig. 9 に耐電圧特性の良好な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, 表面をクリーニング後, 約 10 kA の限界遮断試験後ではあるが, これらは, 遮断アークによる激しい熱履歴と繰り返しの溶着や引

Electrode

a. Surface after Interruption

b. Remelted Layer

c. Basis Metal

Fig. 10 Microphotographs of Ni-Al-Cr electrode after interruptions.

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、滑らかな面を呈している。この電接面の平坦さが電界集中を少なくし、耐電圧特性の向上につながっているものと考え。Fig. 10はこの遮断試験後の電極の表面、および表層の断面組織を示す。(a)は遮断アークで叩かれた電接面の表面をSEM観察した結果である。この写真から、表面は溶融し、波打ち模様となっていることが分かるが、これらの溶融痕は水平方向に伸び、大きな段差や突起の形成は少ない。また(b)に示すように、約500~600 μm の表層は遮断アークによる再溶融層が形成され、もとの組織(c)とは異なった微細組織となる。これは高温の遮断アークにより、繰り返し急熱、急冷を受けたための再溶融凝固組織であり、Crの地に Ni_3Al 化合物が微細に分散している。つまり、電極として過酷な熱衝撃を受けた後も、ベースとなる Ni_3Al と耐溶着用のCrとからなる組織はかなり均一であることが分かった。

IV. 結 言

高耐電圧真空遮断器用電極材料として、 $\text{Ni}_3\text{Al-Cr}$ および NiAl-Cr 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を調べた結果、次の結論を得た。

- (1) いずれの合金とも比較的均一な組織を有し、Crの分散性が良好である。
- (2) $\text{Ni}_3\text{Al-Cr}$ 合金の耐電圧はCr添加量の増加とともに

増し、約30 mass%Crで最大110 kVを示すが、逆に NiAl-Cr 合金では10 mass%Crが最大を示し、その後Crの増加に伴い下がる。

- (3) いずれの電極とも遮断電流レベルは最大値は6~8 A、大電流遮断能力としては直径20 mmで約10 kA遮断が可能であり、従来のCu合金電極と遜色ない。

本研究を行うに当り有益なご助言、ご指導を賜りました(株)日立製作所国分工場受変制御設計部 津田英明主任技師に深甚なる謝意を表する。

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) 渡辺隆二, 安藤 寿, 岩下喜代次, 黒沢幸夫: 日本金属学会誌, **54**(1990), 346.
- (3) 渡辺隆二, 安藤 寿, 岩下喜代次, 黒沢幸夫: 日本金属学会誌, **53**(1989), 711.
- (4) Powder Diffraction File, Sets 19-20 (1974), 470.
- (5) A. Taylor and R. W. Floyd: J. Inst. Metals, **81**(1952), 451.
- (6) 高融点化合物便覧: 日ソ通信社, (1960), 240.
- (7) Raymond F. Decker and Chester T. Sims: *The Superalloys*, A Wiley-Interscience Publication, (1972), 48.
- (8) 水谷彦広, 森宮 脩, 奥富 功: 日本金属学会会報, **11**(1972), 893.
- (9) 例えば特公昭45-35101号。