接合の高精度化に対する電極構成の適正化に関する検討*

—非鉄金属の抵抗熱源応用蒸気シールド加圧接合法及びその品質のインプロセス制御に関する研究(第2報)—

町田一道**, 加柴良裕**, 奥田滝夫**, 仲田周次***

Selection of Electrode Constitution for Preventing Work Deformation*

—Study on Vapor Shielded Pressure Bonding Process for Nonferrous Metals by Resistance Heating and Its Inprocess Quality Control (Report 2)—

by Kazumichi Machida**, Yoshihiro Kashiba**, Takio Okuda** and Shuji Nakata***

Dissimilar joint of nonferrous metals like as contact-bars of electromagnetic switchgears are required both high quality at bonds and non-deformation of works.

For the purposes, vapor-shielded pressure bonding process and inprocess control system applicable to the process are developed.

From the view point of controlling work deformation, heating characteristics and temperature distribution while bonding is suggested to be controlled by computer simulation shown in the Report 1.

In this study, the actual proof for the computer simulation, clarification of heating mechanism at each material system and selection of electrode constitution to prevent the work deformation are experimentally examined for the joint couple of disk-shape Ag and Cu.

Results obtained are summarized as follows;

- (1) Electrodes Mo-Mo give relatively flat temperature distribution all over the joint materials.
- (2) Electrodes CuCr-CuCr can give the peak temperature at the bonding interface, so that the material (Ag) deformation is effectively controlled. But, twice current is necessary to bond in comparison with electrodes Mo-Mo.
- (3) The computer simulation applied in the Report 1 is proved to be proper for estimating heating characteristics and temperature distribution in the bonding process, that is, both results of the experiments and the simulation agree with each other.
- (4) Arrangement of electrodes such as CuCr to Ag side and Mo to Cu side can achieve a deformation-free bonding under relatively lower current condition and lower average temperature in Ag materials.
- (5) In the above-mentioned constitution of electrodes, the optimum current range becomes to be enlarged. Since the allowable current limit against deformation extends to higher current condition.

Key Words: Contact-bar of electromagnetic switchgear, Resistance butt welding, High quality welding, Vapor-shielded pressure bonding, Inprocess control, Nonferrous metal

1. 緒 言

非鉄金属材料を対象とした高精度・高品質接合法として、新しく抵抗熱源を応用した蒸気シールド加圧接合法を研究開発した。本研究の第1報では、接合時に発生する材料の変形を抑制することを目的として、大気中における実験と数値計算により、電極・材料系における温度上昇特性と温度分布について解析し検討を加えた。この結果、電極の直径および電極材質を適正に選ぶことによって、材料の変形を大幅に抑制しつつ効率的に接合界面の温度上昇が図れる可能性の高いことを明らかにできた。ただし、数値計算においては、接触抵抗を例えば被膜抵抗のような均一な抵抗体置として与えた、熱損失に対しては主として発熱部から電極長手方向への熱伝導だけを考慮したなどの幾つかの仮定があった。そこで本報

においては、この数値計算によるシミュレーション結果の妥当性を立証するとともに、計算で予測された変形抑制の手段に対してその効果を実験的に検証するとともに、発熱・温度上昇機構を考察した。

2. 実験装置、供試材料および実験方法

接合実験装置としては、直上加圧方式の加圧ヘッドを具備した位相制御式定電流特性の単相交流溶接機(100 kVA, 最大短絡電流 30 kA)を用いた。また、電極はモリブデン(Mo)およびクロム銅(CuCr)の各材料を長さ 8 mm, 直径 10 mm の一定寸法に加工し、クロム銅製水冷形台座電極に金ろうによる真空ろう付で接合して用いた。

供試材料として、接触子の接合への応用を考えて、接点と台座金属の代表例として 779°C の共晶点を有する Ag 材と Cu 材の組合せを選んだ。いずれも純度は 99.99%, 形状寸法としては厚さ 2 mm, 直径 4 mm の円板で、機械加工後 1500 番のエメリー紙によって研磨面を得て、接合の直前にアセトン液による超音波洗浄を施

*原稿受付 昭和61年5月13日昭和60年6月抵抗溶接研究委員会が発表

**正 員 三菱電機(株)生産技術研究所 Member, Mitsubishi Electric Corp.

***正 員 大阪大学工学部 Member, Osaka University

し、水洗した。

電圧測定においては、直径 500 μm の Cu 線を、電極端部及び被接合材の板厚中央の側面の各位置に溶接して測定用リードをとりだし、通電中の全波形を記録して実効値に換算してサンプリングした。また温度は、直径 100 μm のクロメル・アルメル熱電対の先端を電極および被接合材の界面に挿入し、接合時の加圧力で固定して測定した。被接合材の変形量は、接合前後の材料外周の径をノギスで測定し、その差として求めた。

ここでの実験は大気中で行い、接合結果の評価としては第1報¹⁾と同様に、被接合材同士の界面温度が共晶点 779°Cを十分うまわる800°Cに到達して接合外周部に所定量の溶融金属を排出し、かつ被接合材の変形量が 300 μm 未満にとどめられた場合を良好な接合結果と定義した。

3. 各電極構成における加熱機構の解明と変形抑制の観点によるその選定

第1報における数値計算の結果から、電極材質を適正に選定すれば、界面を接合温度に到達させる際の被接合材内部の平均温度をより低く維持でき、その結果変形の発生量を大幅に抑制しうることが予測された。そこで、まず Mo 及び CuCr の各電極を用いて、被接合材の温度分布を実際に抑制しうるかを実験的に調べた。通電時間の経過にともなう被接合材界面の温度 θ_1 及び被接合材 Ag と電極の界面の温度 θ_2 の変化を Fig. 1 に示す。比較のため、計算結果も細い実線と破線で示してあるが、図に見るように、両電極の場合とも、 θ_1 、 θ_2 の温度上昇傾向の実験結果は計算のそれとよく一致している。また、それぞれの電極材質における θ_2 の温度上昇に着目すると、Mo 材の場合、 θ_1 が接合到達温度である 800°C まで上昇した時点で θ_2 も 780°C 付近の高温に上昇してしまっている。これに対し、CuCr 材を用いた場合では、接合終了時点においてさえ 550°C 程度とかなり低い温度に抑制されており、材料内の温度分布に対して電極材質が大きな影響を与えることが実験的にも証明された。

同時にここで、この接合法における被接合材の温度上昇特性・分布を知るうえで、第1報で検討した熱抵抗プログラムによる数値計算の適用が妥当であることも実証

できた。

次に、被接合材にこのような温度上昇特性を与える発熱機構を知るため、電極及び被接合材の各点における電圧変化を実測し、この結果をもとに系の発熱分担を考察した。Fig. 2 は通電中の V_1 、 V_2 及び V_3 の各電圧の測定結果である。Mo 材では通電初期の V が高く、徐々に低下して5サイクル以降ではほぼ一定になるが、この時点においてさえ V_1 が 0.55 V と高い値を示している点が注目される。このうちとくに、上下双方の電極と各被接合材との界面近傍における V 、すなわち $(V_1 - V_2) + V_3$ の分担比率がきわめて高く、このうち材料内部の V 相当分 $(V_2 - V_3) \times 2$ を差し引いても、 V_1 のおよそ75%が界面近傍（電極内の至近距離範囲をある程度含む）で発生していることになる。一方、CuCr では Mo 材のように初期の V がとくに高いという傾向は示さず、全通電時間を通して低い値の V_1 特性を示している。この場合は逆に、 V_1 に占める $(V_2 - V_3) \times 2$ の比率が極めて高く、全体の70%以上が被接合材自身で発生していることになり、Mo 材の場合と対照的である。すなわち、この結果から Mo 材では電極の被接合材との界面近傍が、また CuCr 材では被接合材自身がそれぞれ発熱の主体を分担していると言える。そこで、さらに発熱機構を明確にするため、系の内部における電位分布を計算によって詳細に調べた^{*)}。この結果を、それぞれの系の軸方向中心線上の電位差および断面における等電位分布として Fig. 3 に示している。図に見るように、Mo では初期 ($T=1$ サイクル) においては電極と被接合材との界面で著しく高い V を発生しており、各材料内部での V は小さい。それが10サイクル目になると、界面そのものの V は初期の20%以下に低下する一方で、とくに電極内部での界面近傍で、界面そのものの3倍程度の V 上昇が発生しており、これが終盤まで相対的に高い V を維持させていると言える。これに対し、CuCr 材では初期における界面の V および電極、被接合材内部の V とも低くとどめられており、 $T=10$ サイクルになると界面および電極材の内部ともさらに低下するが、相対的に被接合

Fig. 1 Comparison of measured and calculated temperatures at each point between both electrode materials

Fig. 2 Comparison of typical voltage curves at each point between both electrode materials

*) 計算の境界条件としては、界面に厚さ 100 μm のノードで被膜抵定のような均一の抵抗体層を仮定し、これに実測にもとづく R_c の関数を与えた。

Fig. 3 Distribution of voltage at each heating stage

Fig. 4 Comparison of temperature distribution patterns between typical electrode constitutions

材自身の内部で高い V を確保するようになる。

以上の数値計算の結果を Fig. 2 における実験結果とあわせて考察すると、各電極材を用いた場合の系の発熱機構とそれにもなう温度上昇特性は次のように説明できる。すなわち、Mo 材では被接合材との接触界面で初期において大きい抵抗発熱を生じ、これがこの部分での温度上昇およびそれにもなう材料抵抗率の上昇を促進し、その後、電極の被接合材との界面近傍における高い集中抵抗が主として系の発熱を担うようになる。このため、被接合材は発熱源に狭まれた形態となるため、材

料全体が平均的に温度上昇する特性を示す^{**}。一方、CuCr では、Mo 材のような特異な発熱のきっかけはなく、通電時間の経過とともに相対断面積が小さい被接合材自身が高い電流密度によって温度上昇して行く。この際、電極は相対的に高い熱伝導率による伝熱損失と形状効果にもとづく集中抵抗発熱との均衡により、被接合材に対しては適度な冷却作用を及ぼしているため、被接合材内部では、接合界面から電極との接触面に向かって下降する温度分布を形成しながら温度上昇するという特性が得られるものと理解される。Fig. 4 は、接合温度到達時点での各電極による温度分布の違いを数値計算によって求めた結果である。CuCr 材を用いた場合には、Mo 材に比べて被接合材の内部で斜線で表示した分だけ、すなわち平均温度で 150°C 程度も低い温度にとどめられた状態で接合界面で接合温度に到達させようことを示している。

以上、電極材質の違いにもとづいて、それぞれ異なる加熱機構および温度上昇特性・分布が得られることが説明できたが、次に、この変形発生量に及ぼす影響を調査した。この実験結果を Fig. 5 に示すが、接合界面を約 800°C に到達させて接合部を得るうえで、Mo 材では被接合材 Ag が約 500 μm の変形を発生するのに対し、CuCr 材では 100 μm 以下に抑制できることが実証された。Fig. 6 は、それぞれの典型的な接合部の断面を示すが、 ϕ 10 mm の CuCr 材の採用により、高精度な加圧接合が達成できることがわかる。なお、この電極構成を

^{**} この際、Mo 材の熱伝導率が相対的に低いことも、界面近傍での発熱の維持を助けているものと考えられる。

用いると、共晶点を有しない被接合材の組合せ、たとえば Cu 材同士に対してさえ界面の選択的溶融による接合が達成できることを別途確認している。

以上の結果から、第1報における実験結果で示した Mo 材による狭い接合条件範囲に対し、CuCr 材の採用によって許容変形量 ($\Delta\phi \leq 300 \mu\text{m}$) の規制線を相対的に大電流側に拡大でき、条件裕度の拡大を図れる見通しが得られた。ただし、CuCr 材の場合、系全体が低い抵抗率で構成されているうえ電極材の熱伝導率が高いので、接合界面を 800°C に上昇させるためには Mo 材の場合の約2倍の 10.5 kA という高い電流値 (被接材断面での電流密度としては約 840 A/mm^2) が必要であり、加熱効率の観点からは大幅に不利となっている。また、本実験においては、電極材質に無関係に Ag 材との間でまれに凝着を発生することがあったが、この発生傾向に対してもより小電流で接合できる方が有利と考えられる。そこで次に、小電流化による加熱効率の向上策を検討した。

Fig. 5 Influence of electrode materials used on heating characteristics

Fig. 6 Typical cross sections at bonlds with each electrode material

4. 電極材料構成の適正化による加熱効率の改善

まず、第1報の実験結果において Ag 材が $1000 \mu\text{m}$ を越える著しい変形を発生する条件下、すなわち $\phi 4 \text{ mm}$ の Mo 電極を用いた場合においてさえ、Cu 材の方はただか $50 \mu\text{m}$ の小さな変形量にとどまっていた事実が注目される。すなわち、高温・加圧条件下において、Cu 材は Ag 材に比べてはるかに大きい変形抵抗を示す材料特性であることがわかる。したがって、Ag 材の変形を抑制しつつ効率良く接合界面温度を上昇させるうえで、Cu 材側からの投入熱量を相対的に増大することが得策と考えられ、第1報の数値計算の結果からはこれが実現することが予測された。そこで、実験により Cu 材側に Mo 電極、Ag 材側に CuCr 電極を配置した場合の温度上昇特性及び温度分布と変形発生量を調査した。その結果を Fig. 7 に示すが、まず接合界面を 800°C に上昇させるために必要な電流値は、Mo 同士における 5.5 kA および CuCr 同士の 10.5 kA のほぼ中間である 8.0 kA 程度となる。また、温度上昇特性を見ると、Cu-Mo 材界面温度 θ_3 は通電初期から急峻な上昇特性を示しているのに対し、Ag-CuCr 材界面では θ_2 で示すよ

Fig. 7 Heating characteristics with electrodes of CuCr-Mo constitution

うにゆるやかな温度上昇特性となっており、前出第3項で明らかとなったそれぞれの電極材質による発熱機構の特徴を反映している。その後、接合完了時点 ($T=15$ 秒)

Fig. 8 Temperature distributions by typical electrode constitutions

イクル)においては、前者が1000℃程度に到達している一方で後者は500℃以下の低い温度にとどめられている。この結果、Ag 材の変形量も 100 μm 程度と小さく抑えられており、Cu 材でも期待どおり小さな変形量にとどめられていて、各々の被接合材に適応した電極材質の選定・配置による温度分布制御の効果が実証できた。なお、このような小電流化および Ag 材側での低温化によって、電極との界面凝着の発生傾向も抑制されるという副次的効果も得られた。

Fig. 8 は、電極材質の選定・配置によって得られる、とくに被接合材内部の温度分布を詳細に知るための数値計算の結果である***。CuCr-Mo 電極を配置した場合、実線で示すように、Mo-Cu 界面での約 1000℃ から、CuCr-Ag 界面の 500℃ 強へと被接合材内部で直線的に下降する温度分布となっていて先に実測した各点の温度と一致しており、Mo 材側での効率的な発熱による大入熱投与および CuCr 材による適度な冷却という2つの効果を併せ持った加熱機構となっていることを明確に裏づけている。この結果、とくに変形が問題となる Ag 材内部の温度に注目して別の電極構成の場合と比較すると、Mo 材同士(破線)と比べて斜線部に相当する大幅な低温化が図られている。さらに、CuCr 材同士と比較しても平均温度で70℃程度低く維持され、加熱効率の向上による低電流化の効果が相乗的に得られている。

以上のように、被接合材である Ag 材および Cu 材に対し、それぞれ CuCr 電極と Mo 電極を選定・配置し、各電極材質の特性に起因する異った発熱機構を併用することによって、系に対して制御された温度上昇特性及び分布を与えることが可能となった。その結果、被接合材の変形を抑制し、かつ相対的に高い加熱効率で接合を達成することができた。

Fig. 9 には、各電極構成による接合条件領域を比較して示す。図において、一点鎖線で示すように上記の検討結果にもとづいて選定した CuCr-Mo 材の電極構成の場合、Mo-Mo 電極構成による条件域に比べてその領域全体を相対的に大電流側に移行させているが、 $\Delta\phi \leq 300 \mu\text{m}$ の規制線をさらに大電流まで拡張して約2倍の広い

Fig. 9 Ranges of bonding conditions by typical electrode constitutions

Fig. 10 Typical cross section at bonds with electrodes CuCr-Mo (I: 8.2 kA, P: 23.5 MPa, T: 15 cycles)

条件域を確保できている。ただし、 $I=8 \text{ kA}$ 近くになると CuCr 電極と Ag 材料間で凝着を発生した。いったん凝着を発生した電極をそのまま継続して用いると、凝着の頻度が加速的に高くなり、接合結果も大きく変動するようになる。そこで、大電流用の接点として用いられている耐凝着性が優れた材料のうち、とくに Ag 材との界面での発熱特性や熱伝導性などの特性値が CuCr 材に近似した Cu (40%) - W 焼結合金を選定し、その効果を検討した。その結果、CuW-Mo の電極構成により、CuCr-Mo と同様の温度上昇特性及び温度分布を確保でき、かつ凝着の発生を防止できるようになった。なお、さらに大電流の条件下では Mo 電極側で凝着を発生するようになるが、材料変形も考慮した条件範囲としては、図中に実線で示すように十分な裕度が確保できている。この条件下で得られた接合部の断面写真を Fig. 10 に示す。界面で良好な接合が達成できていることを示す溶融金属の排出が認められ、材料変形も小さくとどめられており、接触子の接合実用性を考えた本報での基準を十分満足した接合結果である。

5. 結 言

Ag 材と Cu 材の組合せに対する抵抗熱源応用高精度・高品質加圧接合法において、接合界面での効率的な温度上昇及びその際の材料変形抑制とそれによる接合条

*** ここでは、Mo および CuCr 電極と被接合材との界面に、第1報での各電極同士の接合の計算に用いたそれぞれの接触抵抗の関数を与えた。

件裕度の拡大を目的として、電極材質及びその配置構成の適正化を図った。とくに本報では、第1報で行った数値計算による電極・被接合材の温度上昇特性及び温度分布のシミュレーションに対し、実験によってその妥当性を立証するとともに、計算によって予測された適正な電極構成の効果を検証した。

得られた結論は以下のとおりである。

1) Mo-Mo 電極構成では、被接合材内ではほぼ一様に均一な温度分布を示しながら上昇する特性を示す。この結果、Ag 材に著しい変形を発生する。

2) CuCr-CuCr 電極構成では、被接合材内において接合界面でピークとなる温度分布を示しながら上昇し、界面が接合達成温度の 800°C の時点でも電極側近傍では 550°C 程度の低温にとどめられている。この結果、材料変形は大幅に抑制できる。ただし、Mo-Mo 電極構成の場合の約2倍という大電流条件を必要とする。

3) 数値計算によって求めた温度上昇特性・分布は、

上記の実測結果とその傾向及び数値がほぼ一致しており、本研究における熱抵抗プログラムの適用の妥当性が実証された。

4) Ag 材側に CuCr 電極、Cu 材側に Mo 電極をそれぞれ配置する構成により、CuCr 電極同士の場合に比べて、Ag 材の平均温度をさらに低くできて材料変形を抑制しつつ、小電流により加熱効率の改善を図ることができる。

5) CuCr-Mo 電極構成の採用により、材料変形発生による規制線を大電流側に拡張でき、Mo 電極同士による構成の場合の約2倍の電流条件裕度を確保できるようになる。

参 考 文 献

- 1) 町田, 加柴, 奥田, 仲田; 接合部の温度上昇特性及び温度分布の制御についての検討, 溶接学会論文集 Vol. 4, No. 1 (1986), 40

Cu-Co-Cr-Ni-W 系インサート金属を用いた Si_3N_4 と高融点金属の接合現象

耐熱性ファインセラミックスの接合に関する研究 (第1報)

中尾嘉邦**, 西本和俊**, 才田一幸**, 堅田寛治***

Si_3N_4 to Refractory Metals Bonding using Cu-Co-Cr-Ni-W Alloy as an Insert Metal*

Study on Bonding of Heat-Resisting Fine Ceramics (Report 1)

by Yoshikuni Nakao**, Kazutoshi Nishimoto**, Kazuyoshi Saida** and Kanji Katada***

Bonding of Si_3N_4 to refractory metals has been investigated using liquid insert metals of copper base alloys. The bonding has been carried out in an electric furnace in vacuum of 6 mPa. Strength of joints was evaluated by tensile-shear tests made at temperature from room temperature to 1073 K .

Copper-Haynes No. 188 alloys which showed good wettability with Si_3N_4 were selected as an insert metal. Strength obtained for joints of Si_3N_4 to Si_3N_4 , tungsten, molybdenum, niobium and tantalum were about 160 MPa, 80 MPa, 100 MPa, 60 MPa and 55 MPa, respectively. Strength of joints of Si_3N_4 to tungsten and molybdenum increased with the rise of test temperature from room temperature to 473 K and reached 90 MPa and 100 MPa, respectively.

In the joint of Si_3N_4 to Si_3N_4 , voids were observed in the insert layer except for the insert metal of copper with 20–30% Haynes No. 188 alloys. Liquidus and solidus temperature of insert metals decreased with increasing copper content. The improved fluidity of the insert metal caused by the decrease in the melting temperature seemed to have the effect of preventing the void formation in the insert layer, resulting in improvement of the strength of the joint.

Key Words: Ceramics, Silicon nitride, Refractory metals, Bonding, Joint strength, Insert metal

1. 緒 言

ファインセラミックスは最近各分野で大きな関心を持たれており機能材料にとどまらず構造用材料としても今後ますますその用途が拡大する傾向が見られる。反面、

ファインセラミックスを工業材料として用いるためには解決しなければならない問題も多い。延性に乏しく機械加工が困難であるというセラミックス特有の欠点を補うため必要となる金属との接合技術もそのひとつといえる。現在、ファインセラミックスと金属の接合に関しては酸化物系セラミックスを中心にいくつかの方法が検討されており、その中には現在実用化されているものもあるが¹⁻⁴⁾、接合強さに関して問題があるものが多く、必

*原稿受付 昭和61年6月5日 昭和60年度春季全国大会で発表

**正 員 大阪大学 Member, Osaka University

***正 員 (株)小松製作所 Member, Komatsu Co. Ltd.