直流フラッシュ現象とコンデンサ並列挿入によるその制御*

仲田 周次**, 大城 直樹***

Direct Current Flash Welding Phenomena and Its Control by Inserting the Capacitor in Parallel with Specimen*

by Shuji Nakata** and Naoki Ooshiro***

Direct current flash welding phenomena and the control of flashing characteristics by inserting the electric condenser in parallel with specimen were studied experimentally in the single phase direct current flash welding process using thin sheet of low carbon steel and stainless steel.

It is shown that in single phase-full wave direct current flash welding process, the flashings with large current often occur near the phase of the voltage being zero in terminal of the welding transformer and the maximum values of these flashing current are 3-6 times of those near the maximum phase in terminal voltage as similar as those in alternate current flash welding process.

But, by inserting the electric capacitor with high capacity in parallel with specimen, flashing became more fine and continuous at not only the neighborhood of zero value but that of peak value in terminal voltage. These phenomena are caused by feeding enough large current at very short duration to break and burn off the contact part in abutting specimen end by charged capacitor, and furthermore, the effective inductance in the welding power source can be adjusted to decrease to small value by connecting the capacitor.

Thus, it is confirmed that the degree of concaves at abutting ends of specimens decrease by fine and continuous flashing, and, as the result, the flash welded joints with good mechanical property are obtained easily.

Furthermore, it is confirmed experimentally that the polarity effect on the amount of specimens burned off by flashing is small in direct current flash welding process, that is, the difference of the amount flashed off in anode and cathode is nearly 10%.

1. はじめに

フラッシュ溶接継手の機械的性質がフラッシュ溶接現象によっても大きく影響されることはすでによく知られている。すなわち、アプセット寸前においてフラッシングが数サイクルとだえると、試材端面に酸化物など介在物が形成され、アプセットによってそれらが接合面にもちこまれるため、継手強さが低下すること¹⁾、フラッシュ過程においての大電流の短絡・アークの発生は試材端面の凹凸の度合を大きくし、それは溶接部に融合不良などの欠陥をもたらすこと²⁻⁵⁾、さらに交流のフラッシュ溶接においては電源電圧が零になる位相が必ず存在するため、その位相近傍で比較的大電流短絡・

アークが発生し易くなり、その結果、溶接継手強さの低下をもたらすこと⁵⁻⁶⁾ などである。

本論文はフラッシュ溶接の適応制御システムの研究の一環として、上述のようにフラッシング状況と継手の溶接品質との間に密接な関連性があることから、単相全波整流式の直流溶接電源を用いた場合のフラッシュ現象およびコンデンサ並列挿入法によるフラッシングの微細化、試材端面の凹凸の度合、溶接欠陥の発生度合などへの効果、極性による試材の溶融・飛散量の差異などについて検討し、コンデンサ並列挿入方式の直流フラッシュ溶接の有用性を明らかにしたものである。

2. 溶接装置および供試材料

本実験で用いた溶接装置の電源装置として、Fig. 1 に示すような回路構成のものを設計・試作し、使用している。これにみるように、直流は単相全波整流によっている。本来ならば溶接二次電圧のリップルの低減のため三相全波整流式などを採用すべきであるが、研究室の電源

*原稿受付 昭和56年3月5日 (昭和55年度春季全国大会にて発表)

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

***正 員 大阪大学工学部 (現在三菱自動車工業 (株)) Member, Faculty of Engineering, Osaka University (Present Address: Mitsubishi Motors Company)

設備容量の関係から単相全波式を採用している。ダイオードとしては電流容量 3,200 A のものを 4 個並列に接続, 合計 8 個使用している。

また図にみるように, 試材と並列に大容量の電解コンデンサを並列に挿入し, 電源特性の改善を計っている。このコンデンサは急放電用のもので, その容量は 1 F である。これには電圧 25 V, 容量 1,000 μ F の電解コンデンサを 1,000 個薄いバークライト板で電氣的に絶縁された 3 mm 厚の銅板上に並列に接続し, この部分でのインダクタンスの減少をはかっている。

Fig. 1 Electrical circuit of power source in direct current flash welding process

Fig. 2 Electrical equivalent circuit on inserting the capacitor in parallel with the specimen

Fig. 1 に示すようにコンデンサを並列挿入した直流電源の 2 次無負荷電圧は 14 V であるが, コンデンサを取り除いた場合には 10 V (R. M. S) である。また 2 次短絡電流は 7,100~11,900 A で, その値は溶接電源の 1 次側に挿入している抵抗値の調整によっている。

Fig. 2 は溶接電源回路の等価回路である。ただし, ダイオードは除いている。この図中の L_1+L_2 の値は 1.33 μ H, R_1+R_2 のそれは 1.69 m Ω であり, L_2, R_2 のそれは各々 0.6 μ H, 0.25 m Ω である, (2 次短絡電流 8,900 A の場合)。図において, SwI を閉じてコンデンサに充電し, 次いで二次電圧が 14.0 V になった後, Sw I を開き, 次に Sw II を閉じるとき, 閉路後 1.7 msec において約 10,000 A となる電流を流しうることが確かめられている。

なお, フラッシュ電流など Fig. 1 の各回路に流れる電流の測定は各回路に直列に挿入された無誘導シャントの出力にオシログラフに導き, 測定・記録している。またフラッシュ電圧は試材の 1 部より取り出し, フラッシュ電流の場合と同様; 測定・記録している。

なお, 溶接装置本体は板カム式の通常のフラッシュ溶

接装置をそのまま使用している。

供試材料として, 主に板厚 1 mm, 板巾 25 mm の冷間圧延鋼板 (SPCC) を用い, その他必要に応じて板厚 1 mm, 巾 50~100 mm の冷間圧延鋼板 (SPCC), ステンレス鋼板 (SUS 304) を用いている。

3. 単相全波整流式直流電源におけるフラッシュ現象 (並列挿入コンデンサのない場合)

まず, 溶接電源回路で試材と並列に挿入されているコンデンサを取り除いた場合のフラッシュ現象について検討を加えた。

Fig. 3 は並列コンデンサを取除いた場合のフラッシュ過程でのフラッシュ電圧・電流オシログラムを示したものである。なお, これはフラッシュ開始後 0.5 秒後のもので, プラテン移動速度は 11 mm/sec である。これにみるように, 電圧が零となる位相近傍で約 4,000~7,000 A の大電流短絡・アークが発生しているのが注目される。この傾向は本実験の範囲ではフラッシュ開始後の時間にそれほど依存しないことが確かめられている。

さらに, 上述の傾向は, プラテン移動速度が大きくなると, いちじるしくなる傾向にある。Fig. 4 はプラテン移動速度を変化した場合のフラッシング電流最大値とフラッシング発生回数との関係を示したもので, 最もフラッシング発生回数の多いのは比較的小電流の 500~2,500 A の範囲であり, プラテン移動速度に大きく関係しない。2,500~5,000 A の大電流のフラッシングはプラテン移動速度に依存し, 移動速度が大きくなると, より大電流のフラッシングが発生している。また, これら

Fig. 3 Oscillogram of the flashing voltage and current (V=10V, I=8,900A, v=11mm/sec, t=0.5 sec, 1 mm $\times$ 25 mm SPCC)

Fig. 4 Relation between the frequency of flashing and peak flashing current in various platen velocities (1 mm×25 mm SPCC)

の関係は2次短絡電流が7,100~11,900 Aの範囲で変わらないことが別途確かめられている。

次に、これらフラッシングをその発生時期すなわち溶接変圧器の端子における電圧位相により区間 A, B^{*})に分類し、その区間でのフラッシングの発生回数とフラッシュ電流最大値との関係を見ると、端子電圧が大きい電圧位相区間 A ではフラッシュ電流は250~2,300 Aに分布するが、電圧が零近傍では(区間 B)3,000~5,000 Aの大電流フラッシングがかなりみられる。これは端子電圧が零となる位相近傍では、アーク力の減少により、短絡が生成され易くなること³⁾、および短絡部の溶融・飛散に必要な電流を供給しえないことによる。また、フラッシング電流をある程度減少させるためにプラテン移動速度を小さくすると、フラッシュ休止時間の増加を招き、新たに別の問題を生起することとなる。

以上単なる単相全波整流直流電源においては、2次端子電圧が零となる位相近傍で大電流のフラッシングが生じ、単にプラテン移動速度の低下によっては、この大電流フラッシングの完全な消失は困難で、反面フラッシュ休止時間の増加をもたらす、これらの解決には他の改善方法を見出すことが必要となる。

4. コンデンサ並列挿入によるフラッシング特性の改善とその効果

次に、単相全波整流直流電源において Fig. 1 に示したように被溶接材に並列に大容量のコンデンサを挿入し、2次端子電圧 V_2 が零となる位相近傍でのフラッシングの小電流化および電源回路の実効リアクタンスの適正化

^{*} 区間 A とは、端子電圧(1サイクル間)の位相角 $\pi/4 \sim 3/4\pi$, $5/4\pi \sim 7/4\pi$ の区間を、区間 B は $0 \sim 3/4 \sim 5/4\pi$, $7/4\pi \sim 8/4\pi$ の区間をいう。

Fig. 5 Oscilloscope of flashing voltage, flashing current, terminal voltage of transformer (v_2) and the current flowing into the diodes (i_2) in flashing process. ($V=14$ V, $I=8,900$ A, $v=11$ mm/sec, $t=0.5$ sec, 1 mm×25 mm SPCC)

によるフラッシングの微細化・連続化への効果について検討を加えた。

Fig. 5 はコンデンサを並列挿入した場合のフラッシュ電圧・電流オシログラムで、そのフラッシュ条件は Fig. 3 の場合のものと同一である。なお、図中の v_2 は溶接変圧器の2次端子電圧を、 i_2 は変圧器の2次端子よりダイオードをへて負荷側へ流れる電流を示している。(Fig. 2 参照)。図にみるように、コンデンサの並列挿入によってフラッシングは短時間・小電流となり、かつ2次端子電圧の位相と関係なく、フラッシングの最大電流値は小さく、最大2,000 Aにとどまっている。なお2次端子電圧が零となる位相近傍で、2,000 A 前後の電流がダイオードを流れている。さらに、フラッシングは連続的に発生している。

Fig. 6 は2次端子電圧の位相区間 A, B におけるフラッシング発生回数とフラッシング電流との関係を示したもので、プラテン移動速度3 mm/sec および11 mm/sec の場合である。区間 A, B ともにフラッシングはその電流が約750 A のものが最も多く、より大電流のフラッシングの発生は減少し、3,000 A 以上のものは認められず、移動速度の増加に伴い750~1,500 A のフラッシングが多くなる。

Fig. 6 Relation between the frequency of flashing and peak flashing current in the period A and B at platen velocity of 3 or 11 mm/sec (1 mm $\times$ 25 mm SPCC)

Fig. 7 Effect of the capacitor inserted on the flashing characteristics (1mm $\times$ 25mm SPCC)

Fig. 7 はコンデンサ並列挿入によるフラッシング特性改善の効果を示したものである。区間 A, B ともにコンデンサの挿入により、フラッシングの発生回数は約 2 倍以上となり、かつ 1,500 A 以下の小電流フラッシングが主となり、Fig. 4 にみられた区間 B での大電流フラッシングはほとんど消失する。これは 2 次端子電圧が零となる位相近傍では、試材突合せ端面間に形成された短絡部の溶融・飛散に必要な電流が溶接変圧器からの供給のみでは不足するが、この不足電流を並列コンデンサよりの放電電流により補うためである。

さらに 2 次端子電圧があまり変動しない位相の区間 A においても、並列コンデンサの挿入により、フラッシングが微細化されているのは、電源回路の実効インダクタンスがコンデンサの並列挿入により、 $L_1 + L_2$ から L_2 に減少し、動特性が大巾に改善されたためである。このこ

Fig. 8 Influence of the capacitor inserted on the time necessary to reach the peak value of short circuiting current in flashing process (1 mm $\times$ 25 mm SPCC)

Fig. 9 Influence of the capacitor inserted on the degree of concaves in the abutting ends of specimens (1 mm $\times$ 25 mm SPCC)

とは Fig. 8 に示すフラッシング最大電流値とその到達時間の関係によって裏付けられている。

なお、コンデンサの並列挿入によるフラッシングの微細化などの諸現象は SUS 304 材においても、又板巾が 50~100 mm の SPCC 材においても同様に認められることが別途確かめられている。

Fig. 9 は所定のフラッシュ代に達した時点における試材端面の凹凸の度合にコンデンサの並列挿入がどの程度の影響をおよぼすかを示したもので、試材としては陰極側のそれをとっている。なお、試材突合せ端面での凹凸の度合は端面での凹み量の最大値で表現している。すなわち、フラッシュ代が所定の値に到達した時点でプラテンを引戻し、試材を冷却せしめ、その試材突合せ端面に垂直な平面に平行に試材板厚の中央まで研摩した後、そ

の端面先端よりの最大凹み量を読み取り顕微鏡で測定している。またこの端面凹み量は現象上かなりばらつくため、試材数としてはコンデンサの挿入時および挿入しない時各々約50本をとり上げ、凹み量を測定している。

Fig. 9 にみるように、試材突合せ端面での凹凸の度合はコンデンサの並列挿入によって大きく低減され、さらに、フラッシュ代の増加に伴い、コンデンサの挿入により、試材端面での凹凸の度合は小さくなる。これはコンデンサの並列挿入によって、フラッシング電流（最大値）が低減されることならびにフラッシュ代の増加に伴い試材突合せ端面の温度が上昇し、その結果、フラッシング電流がフラッシュ代とともに減少することによるものである。

5. 試材の溶融・飛散量におよぼす極性の影響

ふつう鉄鋼材等のフラッシュ溶接を行う場合、試材端

Fig. 10 Effect of polarity on the amount burned off at specimens (I) (1 mm × 25 mm SPCC)

Fig. 11 Effect of polarity on the amount burned off at specimens (II) (1 mm × 25 mm SPCC)

面間に短時間のアーク発生を伴う⁷⁾。一般にアークの電極への電気的入力は極性によって異なる⁸⁾ため、フラッシュ過程中的の溶融・飛散量は極性によって異なることが考えられる。

Fig. 10 は極性の差異による試材端面の溶融・飛散量（図中に示す最大値で表示）の差を示したもので、陽極側の溶融・飛散量が陰極側のそれに比して約10%程度大きくなっている。Fig. 11 は試材の陰極側と陽極側の消耗長さ比とその試材の存在比率を示したものである。

上述のように試材の溶融・飛散は極性によって約10%程度異なるが、その程度は実用上無視しうるものと考えられる。

6. コンデンサ並列挿入方式の採用の有無と溶接部欠陥との関連性

コンデンサ並列挿入方式の採用による溶接品質への影響をみるために板巾 50 mm、板厚 1 mm の SPCC 材、SUS 304 材を用いて、コンデンサ挿入の有無との関連のもとに同一条件で溶接を行い、それら溶接部での欠陥発生の度合について比較・検討した。

なお、2次無負荷電圧は 14 V（コンデンサ挿入の場合）および 10 V（コンデンサなしの場合）で、2次短絡電流はいずれの2次無負荷電圧の場合も 11,900 A である。またいずれの場合もフラッシュ代 10 mm、アプセット代 5 mm で、アプセット電流は流していない。プラテン移動はほぼ等加速度で、フラッシュ時間 1.3 sec、アプセット加圧力 1,000 kg である。

Fig. 12(a), (b) は上述のフラッシュ条件のもとで、SUS 304 材を用いた場合のアプセット過程突入寸前におけるフラッシュ発生状況を示したもので、(a) 図はコンデンサを並列挿入しない場合、(b) 図はコンデンサを並列挿入した場合である。図にみるように、アプセット過程寸前のフラッシュ過程では、プラテン移動速度がかなり大きくなっている（約 16 mm/sec）、コンデンサを並列に挿入していない場合（(a) 図）には、3節で述べたように、2次電圧が零位相近傍でのフラッシング電流（最大値）が 6,000 A に達するほど大きくなっている。一方、コンデンサを挿入している場合（(b) 図）では、同一プラテン移動速度でもフラッシング電流は 2,000~4,000 A と小さく、さらにフラッシングは微細化されている。

上述のことは、コンデンサ挿入の場合には挿入しない場合に比較して、アプセット寸前での試材端面は比較的斉一となり、かつ試材端面表面の酸化度合も小さくなっていることを物語っている。

かくして溶接継手のイバリを除去した後、曲げ試験し

(a) In the case of no capacitor ($V=10V$)

(b) In the case of the capacitor inserted ($V=14V$)

Fig. 12 Oscillogram of flashing voltage and current just before upsetting ($I=11,900A$, $1\text{ mm} \times 50\text{ mm SUS304}$)

た場合 (曲率半径 5 mm), SPCC 材の溶接継手の場合, コンデンサ挿入の有無にかかわらず接合面で割れを生じることなく, 180° 曲がりうる。しかし, SUS 304 材の場合には, コンデンサを挿入しないと, Fig. 13 にみるように接合面でしばしば割れが発生する。しかもこの破断面をみると, 破面上に酸化膜がみられる。一方, コンデンサを並列挿入した場合の溶接継手は接合面で割れを生じることなく, 180° 曲がりうる。なお, 各条件下での試

Fig. 13 Specimen fractured in weld plane in bend test ($1\text{ mm} \times 50\text{ mm SUS304}$)

験片数は各々10本である。

以上の結果は単一溶接条件のもとでの比較試験結果であるが, 交流式や単なる単相全波整流式直流フラッシュ溶接の場合に比較して, コンデンサを並列挿入した単相全波整流式フラッシュ溶接では, フラッシュ過程の全期間にわたってフラッシュが連続的かつ微細化され, その結果, アプセット寸前における端面の凹凸の度合が小さく, 端面が齊一で, 面合接に酸化物など介在物の形成が抑制されることを意味している。

7. 結 論

単相全波整流による直流フラッシュ現象について, 軟鋼薄板を主な対象として検討した。主な結論を次に述べる。

(1) 単相全波整流電源による直流フラッシュ現象においては 2 次端子間電圧が大きく脈動し, 端子電圧が零位相近傍において大電流の短絡・アーク (フラッシング) が発生する傾向が大きく, その電流最大値は端子電圧の最大値近傍のそれに比較して 3~6 倍にも達している。なお, この現象は交流電源を用いた場合のフラッシュ現象とはほぼ同じものである。

(2) 単相全波整流電源において, 被溶接材側の近傍に大容量のコンデンサを並列に挿入することにより, 2 次端子電圧の零位相近傍にて発生するフラッシングの電流の最大値を小さくしうる。これは, フラッシュ過程に試材突合せ端面間に形成された短絡部の熔融・飛散に必要な電流を並列挿入されたコンデンサよりの放電電流により補うことによっている。

さらに, この方式においては 2 次端子電圧が最大となる位相近傍においても, フラッシングを微細化することが可能となる。これはコンデンサの並列挿入により溶接変圧器, 溶接機の 2 次回路の一部およびダイオードのインダクタンス分と関係なく被溶接材と並列コンデンサとの間のインダクタンスによってフラッシングの特性が支配されるためである。このことはコンデンサの並列挿入によって, 溶接電源回路の実効インダクタンスを容易に制御しうることを物語っている。

(3) コンデンサの並列挿入は交流式電源では実現困難なフラッシュ過程でのフラッシングの微細化と連続化を同時にもたすが, これは交流式電源およびコンデンサのない場合に比較して, フラッシュ過程での試材端面での凹凸の度合を小さくし, 端面形状を齊一にする効果をもたらし, かつ端面表面の酸化物形成を抑制する傾向をもつ。

(4) 直流フラッシュ溶接においては, 試材の極性によってフラッシュ過程での試材の熔融・飛散の度合が

多少異なっている。すなわち、陰極側試材の溶融・飛散に比して陽極側のそれは約10%大きくなっている。しかし、この程度の極性効果では実用上問題はないと考えてよいであろう。

(5) ステンレス薄鋼板を対象としてコンデンサの並列挿入による溶接部欠陥形成におよぼす影響を検討した結果、コンデンサを挿入しない場合のみ、曲げ試験において接合面の一部に割れを生じることが多く、この場合破面に酸化物など介在物が認められる。これはアプセット寸前での大電流のフラッシングによって形成される端面の大きな凹凸によるものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 安藤, 仲田, 福井「鋼のフラッシュ溶接現象の研究(第3報)」溶学誌, 40 (1971) 137
- 2) H. Kilger: "Production Technique and Quality of Flash Welded Joints", W. J. 24 (1945), 413s
- 3) 安藤, 仲田, 杉本「鋼のフラッシュ溶接現象の研究(第2報)」溶学誌 40 (1971) 35
- 4) 安藤, 仲田, 福井「鋼のフラッシュ溶接現象の研究(第4報)」溶学誌, 40 (1971) 232
- 5) V. S. Sidiyakin and B. D. Drlov: "Flash-Butt Welding Thin-walled Components on D.C.", Weld. Prod. 1969, No. 9, 40.
- 6) 奥田, 稲田, 馬場, 原「矩形波電圧方式フラッシュ溶接機」溶接学会抵抗研委資料 RW-146-78 (1978), 三菱電機技報 52 (1978) 9
- 7) 安藤, 仲田, 杉本「鋼のフラッシュ溶接現象の研究(第1報)」溶学誌 39 (1970) 1084
- 8) 安藤, 長谷川「溶接アーク現象」第4版 p. 73, 85 (1970)産報

溶接プロセスのオンライン検出のための画像処理(第2報)*

—アーク光のスペクトル特性を考慮した画像の改善—

井 上 勝 敬**

Image Processing for On-Line Detection of Welding Process (Report 2)*

—Improvement of Image Quality by Incorporation of Spectrum of Arc—

by Katsunori Inoue**

It is possible to improve the visual information, which is obtained from the arc welding process, by taking the wavelength spectrum into consideration.

In the first stage of this paper, the spectrum of welding arc and molten pool is measured with a grating monochrometer. This measurement indicates that CO₂ arc, Ar arc and molten pool have their characteristic spectrum respectively.

The images of the arc welding process are improved and the configuration of the molten pool is relatively emphasized by selecting the image pickup device and the optical filter on the basis of the spectrum characteristics in the next.

The bead width and the penetration depth are measured by digital processing of these images in real time in the final stage and the results of measurement agree well with the actual bead width and penetration depth.

1. 緒 言

アーク溶接過程の進行箇所より得られる視覚情報は、溶接過程の自動制御のために、多くの有用な情報を提供することは、既に報告した^{1,2)}。この情報を撮像装置で

捕え、専用処理装置やディジタル・プロセッサで処理し、有用な情報を抽出する方式についても、既に報告した^{3,4)}。

この論文では、アーク光の波長スペクトル特性を考慮することによって、得られる視覚情報をより有用なものにする方式について報告する。

アーク溶接進行中に、撮像装置で溶融池を監視すれ

*原稿受付 昭和56年4月3日(昭和52, 55年度春季全国大会にて発表)

**正 員 大阪大学溶接工学研究所 Member, Welding Research Institute of Osaka University