

討19 中径電縫鋼管電縫溶接における溶接現象監視と自動制御

新日本製鐵(株)製品技術研究所

○ 芳賀博世

名古屋製鐵所 渡辺 豊, 山田 祚穂, 光製鐵所 桜井謙輔

1 緒言

中径電縫管はラインパイプ・油井管として苛酷な環境で使用される事例が増えている。このため高い溶接部品質、とりわけ継手性能を損う冷接・ペネトレータ等溶接欠陥のない健全な溶接部が要求される。欠陥発生防止技術を確立するため、高速度カメラによる溶接現象観察により溶接機構と欠陥発生機構を明らかにした。これ等の知見に基づき、溶接現象の監視と制御という全く新しい方法を開発し、高い信頼性を持つ電縫管の製造が可能になった。

2 高周波電縫溶接現象と溶接機構

電縫溶接プロセスを高速度カメラで観察すると、図1に模式的に示したように、エッジの溶接点とV収束点とが分離する場合があります。その態様により溶接現象を3種類に分類できることが判る。第1種溶接現象ではV収束点と溶接点が一致する。第2種溶接現象ではV収束点から比較的短い狭間隙が形成される。V収束点で両エッジは絶えず分離接触を繰り返す。第3種溶接現象では溶接点・V収束点間距離が長く、溶接点がV収束点とスライズ中心の間のある範囲を周期的に移動するのが特徴である。

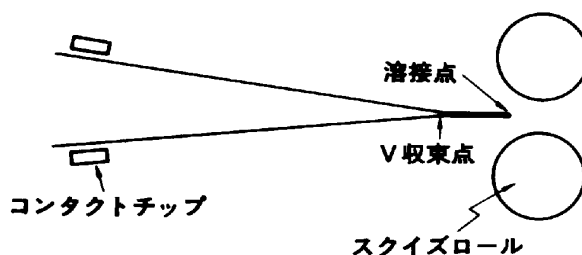


図1 電縫溶接現象の模式図

溶接点がV収束点から分離する理由は、高周波電流による抵抗加熱でエッジに形成された熔融金属が電磁力によって外に排除されるためである。溶接現象の分類の必然性は、Vスロート部におけるエッジの接近速度と、熔融によるエッジの後退速度との大小関係によって説明されている。またV収束点におけるエッジの分離・接触の繰り返しおよび溶接点の周期的移動現象は、通回路の変化によるインピーダンスと電流変化が原因である。¹⁾ エッジの熔融速度は入熱によって決り、接近速度は造管速度とV収束角の積で与えられる。従って、入熱、速度、V収束角度は溶接現象の型を決める主要因子である。特に、他の溶接条件が与えられれば、入熱のみで溶接現象が決まる。

3 溶接現象の型と溶接欠陥の関係

明らかな低入熱や著しい高入熱時発生する未溶着や溶け落ち欠陥は別として、電縫管の溶接欠陥はマクロ的には冷接とペネトレータに大別できる。図2に示すように、冷接とペネトレータはミクロ的な形態にも著しい差が認められる。冷接破面は中に介在物を含む径1μ程度の微小ディンプルの集合から成っている。

冷接の発生原因は熔融不足によるエッジ酸化で、ペネトレータは電磁力によって排出された熔融ビードがV収束点～溶接点間のエッジ間隙に還流する際生ずるスラグ巻込みであることが明らかにされている。^{2),3)} エッジの接近速度を充分大きく設定し、エッジを充分熔融させる入熱を加えれば、第1種溶接現象で熔融溶接が実現するであろう。この時冷接もペネトレータも発生しない理想的な溶接が期待できるが、しかしこれを実際に実現しているの

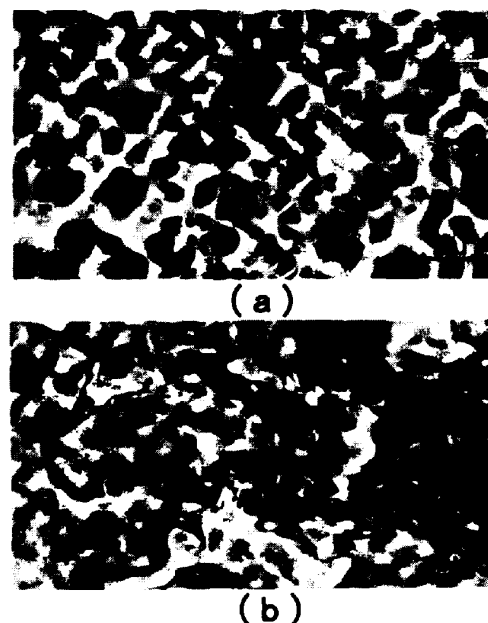


写真1 Si-Mn鋼電縫部破面上の (a)冷接、(b)ペネトレータのSEM像

は一部の小径ミルのみで、中径管溶接における実現可能性の検討は今後の課題である。

中径電縫管の溶接では、第1種溶接現象は多くの場合冷接を伴い、第3種溶接現象では大型ペネトレータが多発する。欠陥発生は第2種溶接現象において極小となる。

4. 端面電流分布の不均一が温度分布とエッジ形状に及ぼす影響

高周波溶接電流はエッジ端面に一様に分布せず、端面の中心部に比しコーナー部により集中する。⁴⁾

電流分布の不均一が溶接プロセスに及ぼす影響を解明するため、溶接終端部断面を2.5～5mm間隔で顕微鏡観察した。なお、突き合せ面の正確な形状を把握するため、溶接電流通電停止と同時にアプ



写真2 溶接過程の代表的位置における断面マクロ写真、(板厚9.5mm)

セット圧を開放して通電停止後の変形を防止した。また高速度カメラで溶接現象を撮影し、溶接終了時のV収束点、溶接点位置を試料上に求めた。写真2に顕微鏡写真の代表例を、図2に顕微鏡観察によって得られた端面の温度分布すなわち昇温・溶接過程を示す。コーナー部は電流の集中によって偏加熱を受け、給電直後より溶融開始する。溶融金属は電磁力によって突き合せ面の外に排除されるから、コーナー部の溶融によりエッジ端面は凸面になる。凸面形状はコーナー部の溶融が進むにつれて著しくなる。図2から判るように板厚1/4～3/4部が融点に到達するのはV収束点に於てである。この過程は、コーナー部がダレたため未溶融の板厚中心部のみがV収束点において接触し、また接触の結果電流は突然中心部に集中し中心部の急激な溶融が開始したものと考えられる。V収束点～溶接点間では接近した板厚中心部にも電流が集中するため中心部の溶融は急速に進行する。このため溶接点ではエッジの凸面形状が幾分改善されている。

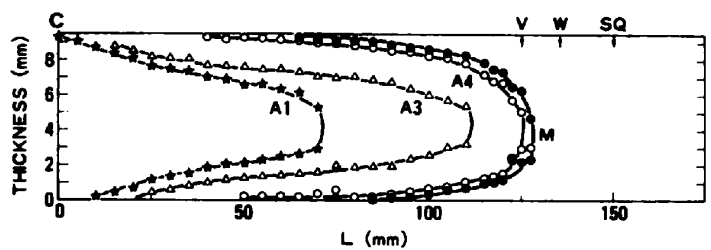


図2 溶接終端部におけるエッジ端面の温度分布

C:給電点, V:V収束点, W:溶接点, SQ:スクイズ中心

図3に示したようにコーナー部の先行溶融量は板厚に比例し、エッジの凸面化は厚肉になる程著しい。加熱の遅れる部分は板厚によらず板厚1/4～3/4部である。

中径管は小径管に比し厚肉で、種々の理由により溶接速度が制限されている。従って第1種溶接現象の入熱で板厚中心部を確実に溶融させることは困難である。第2種溶接現象は端面全厚に亘る溶融を保証する。溶融不足は冷接を過剰溶融はペネトレータを発生させる。中径管の電縫溶接に於ては第2種溶接現象が最適であろう。

以上のような中径管の電縫溶接の特徴を把握し、溶接欠陥発生を防止するには溶接現象を監視制御するのが最も自然である。

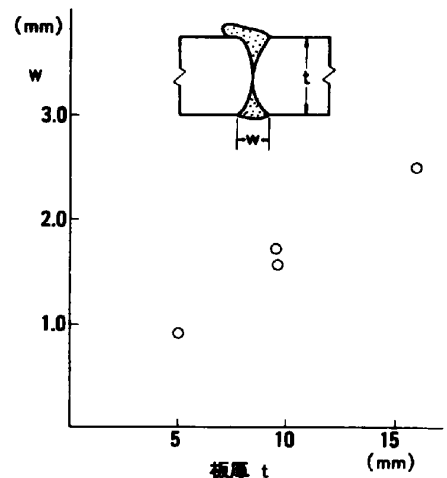


図3 V収束点までのコーナー部の溶融量と板厚の関係

5. 溶接現象の監視方法

3種類の溶接現象の基本的特徴は溶接点位置の周期的変動で、これは電気回路的には負荷インピーダンスの変動に他ならない。従ってインピーダンス変動によってもたらされる全ての電気的量は原理的に溶接現象の検出に利用できる。このような量として溶接電流・電圧等があるが、周波数を測定することにより溶接現象を最も明瞭に把握できる。⁵⁾ 周波数測定は負荷インダクタンス測定と全く等価である。

第2種溶接現象においてはインダクタンス変化は僅かで、且つ極めて頻繁である(恐らく1000/秒以上)。電縫溶接で使用されている100~500KHz程度の周波数を短時間で最も精度よく測定するには、デジタルカウンタを使用して周期 $1/f$ (周波数の逆数)を計測するのが良い。カウンタ方式で全ての溶接現象を明瞭に判別するのに必要な測定条件は現象観察及び理論的推定から

- (1) 測定誤差 $\leq 0.01\%$
- (2) 測定繰り返し回数 ≤ 4000 回/秒。

このカウンタ出力 $1/f$ の変動分をアナログ化して表示すれば溶接現象を監視できる。⁶⁾

図4に溶接現象監視装置の構成を示す。カウンタ出力は任意の時点でスイッチ操作によりAに保持される。以後の出力Bは引算器により $B-A$ が演算され、演算結果はD/A変換器でアナログ化されオシロスコープ等に表示される。

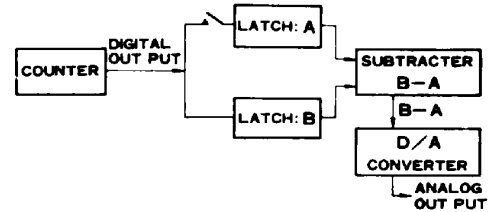


図4 溶接現象監視装置の構成

図4の装置を使用してCRTで観察される $1/f$ 変動波形を写真3に示す。この例では溶接機の発振周波数は約400KHzでカウンタの基準周波数100MHz、100周期平均周期を4000回/秒測定した。



写真3 各溶接現象における $1/f$ 変動波形の代表例
横軸, 1div=5msec; 縦軸, 1div=2.5nsec

図5に示すように、V収束点~溶接点間距離 Δl と、 $1/f$ 変動振巾 $\Delta 1/f$ とはほぼ比例関係にある。板厚が厚くなるに従い同一 Δl に対する $\Delta 1/f$ の値が小さくなるが、これはインダクタンスが板厚が厚くなるに従い小さくなるためである。

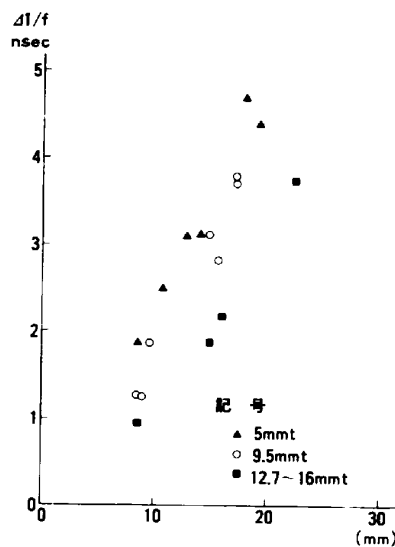


図5 V収束点~溶接点間距離、 Δl

図6に $\Delta 1/f$ と溶接部における欠陥占有面積率(欠陥破面率)の関係を示した。溶接速度が高速になる程低い $\Delta 1/f$ で欠陥面積率が極小になりまた極小値も小さくなる。このように $\Delta 1/f$ を測定することにより最適溶接条件の定量的把握が可能である。

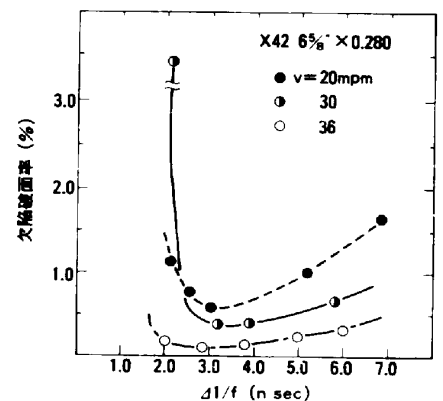


図6 溶接条件と欠陥発生率の関係

6. 溶接現象の自動制御

溶接部品質を支配する主要な溶接条件因子は入熱の他に、溶接速度、V収束角度、アプセット量、突き合せ形状等がある。このうち入熱を除く他の因子は定量的把握が可能で最適条件に設定することが出来る。入熱の設定は通常運転者の火色判断に委ねられることが多い。他方入熱以外の因子は一旦設定すると十分な応答速度で微妙な調整をすることは困難である。しかもこれ等の因子は溶接中微妙に変動しており、その変動を補うには入熱の調整によるのが最も容易である。

全ての溶接条件の変動は溶接現象に反映される。そこで溶接現象が常に第2種現象の範囲にあるように入熱を調整すれば溶接条件は自動的に最適に保たれる。具体的には $\Delta I/f$ が設定範囲内にあるように入熱制御すればよい。 $\Delta I/f$ のフィード・バック制御により溶接現象の安定が得られ溶接部品質の信頼性は飛躍的に向上する。

溶接現象を安定化するには、しかし、フィード・バック制御のみに依存することは必ずしも賢明とは云えない。板厚速度等、容易に計測可能な因子の変動に対してはフィード・フォワード制御を採用し、溶接現象を一定に保持するように制御するのが好ましい。

$\Delta I/f$ 計測に基いて溶接現象を監視制御することにより、スパーク・スケール飛び込み等インピーダンス変化を伴う多くの突発異常に対処することも可能になる。図7にスパークによる $\Delta I/f$ の異常波形の例を示した。

$\Delta I/f$ によるフィード・バック制御、突発異常監視、速度・板厚変動に対するフィード・フォワード制御をシステム化した中径電縫管自動入熱制御方法の概略を図8に示す。⁷⁾

7. 結 言

高周波電縫溶接機構と欠陥発生原因を解明し、中径電縫管の溶接においては欠陥発生を極小にする最適溶接現象は第2種溶接現象であることを明らかにした。溶接現象をリアルタイムで把握するには $\Delta I/f$ を計測するのが最も良い。この溶接現象の監視方法を基に自動制御方法を開発した。試作された自動入熱制御システムは名古屋製鉄所14ミルに導入され、高級電縫管の安定生産を可能にした。

〔参考文献〕

- 1) Haga, H. et al. Welding Phenomena and Mechanisms in High-Frequency Electric Resistance Welding, Welding Journal 59(7)208-S~212-S
- 2) Haga, H. et al, The Mechanisms of Formation of Weld Defects in High-Frequency Electric Resistance Welding, Welding Journal 60(6)104-S~109-S
- 3) 芳賀, 青木, 佐藤他, ペネトレータの発生機構について, 鉄と鋼 63(4)S370, 1977
- 4) 芳賀, 佐藤, 今井, 高周波電縫溶接の研究第2報, 溶接学会講演概要第19集 P344~P345, 1976
- 5) 芳賀, 青木, 佐藤, 溶接部靱性の優れた電縫鋼管の開発, 鉄と鋼 66(4)S411, 1980
- 6) 芳賀, 佐藤, 高周波電縫溶接における周波数変動の検出とその品質管理への応用, 溶接学会抵抗溶接研究委員会 RW-177-80,
- 7) 山田他, 電縫鋼管の自動入熱制御, 鉄と鋼 68(12)S1235, 1982

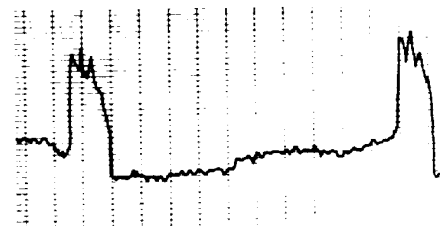


図7 給電接触子のスパークによる $\Delta I/f$ の異常波形
横軸 1 div = 10 msec
縦軸 1 div = 0.625 nsec

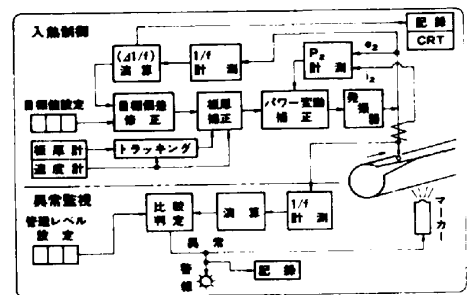


図8 自動入熱制御システム概略図