移行式窒素プラズマジェット切断装置の特性

Characteristics of Transfer Type Nitrogen Plasma Jet Cutting Equipment

秋山修* 鹿島孝之* 伊藤隆清** Osamu Akiyama Takayuki Kashima Takakiyo Itô

要 旨

移行式窒素プラズマジェット切断装置は陽極降下の熱を有効に切断に利用できるので,切断速度が早く切断 面がきれいで切断コストも低いなど利点が多く,高効率の切断が可能である。このような特長を生かすように 研究を進め,安定したプラズマジェットを発生するには,ガスの流れでアークを挟搾(きょうさく)するのが有 効であることを解明し,実用可能な装置を開発した。

またガン損失率 9~12%,母材への熱移行率 25%,プラズマの平均温度 8,600°K などの特性を求め,切断能 力はエンタルピに影響されることを示し、本装置を使用した場合の標準切断条件,切断コストを算出しプラズ マジェット切断が有利なことを示した。

1. 緒 言

直流アーク放電のアーク柱の回りをガスで冷却すると,サーマル ピンチ効果によりアークが狭搾され,アーク柱の電流密度が増し温 度が高まりプラズマが発生する。プラズマジェット装置はこのよう にして生じた高温のプラズマを小孔からジェットとして噴出させ, その熱を利用するものである。これを切断に利用する場合,電気的 な接続から分類して非移行式と移行式の2種類になる。



非移行式はタングステン製の陰極と小孔のある銅の陽極(ノズル) との間にアーク放電を起こし小孔から噴出するジェットを利用する 方式であり,移行式は陰極と被切断材(以下母材と呼ぶ)との間に アークを発生させジェットとともにアーク熱を利用する方式であ る。移行式はその使用法からもわかるように母材にも通電するので 金属に限られるが,母材側の陽極降下が溶融に作用するため熱をよ り有効に利用でき切断能力を高めることができる。またノズルへ直 接大電流を流さないためガンの構造上にも利点がある。

このような観点から窒素ガスを使用して切断コストが低く,しか も高効率の切断が可能な移行式プラズマジェット切断装置の研究を 行ない,国産機としては初めて実用可能な装置を開発した。

以下移行式窒素プラズマジェット切断装置の概要と電気的特性, 熱力学特性,切断特性などの結果について述べる。

なお本研究は昭和42年度通産省鉱工業技術試験研究補助金を受けて行なったものである。

2. 装置の概要

プラズマジェット装置は図1の構成で,垂下特性の直流電源と高 周波発生装置,ガス制御装置,時間制御装置からなる制御箱および プラズマジェットを発生するガンが主体となる。特に移行式の場合 にはガンのノズルから抵抗を介して直流電源の+側端子へ接続し, ノズルへ流れる電流を小電流に制限している。

移行式プラズマジェットの発生にはまずガスをガンへ流したの ち,電極とノズルの間に高周波電圧,直流電圧を印加し,この間に アーク放電を起こさせ小電流の非移行式のプラズマジェット(これ をパイロットアークと呼ぶ)を発生させる。パイロットアークの電





図2 ダブルアークの説明図

流の増加や高周波電圧の遮断,台車の送行などの自動操作に必要な 信号として使用される。

プラズマジェットの停止は切断終端で母材とガンが離れアークが 切れたとき、または停止スイッチを押したときに電源を切り、電極 の冷却後ガスを自動的に止める方法で行なわれ、高い無負荷電圧が ガンにかからないようになっている。

移行式ブラズマジェットの問題点にダブルアークがある。ダブル アークというのは放電が陰極から母材へ直接起こらず,図2に示す ように陰極からノズルへ放電しさらにノズルから母材へ放電する現 象をいい,移行時に起こりやすい。ダブルアークが発生するとノズ ルが溶損するばかりでなく陰極の消耗を早め,さらにアークがガス により挟搾されなくなるために切断能力が落ち切断面も荒れるよう になる。 ダブルアークを防止するため条件を変えて種々実験した結果,ガ スの流れを改善することによりダブルアークが発生しなくなること がわかった。またこのような構造のもとでは電極の寿命も長くなり, 実用上の効果が大きいことを確認した。

流は比較的小さく、母材とノズルの間にはその間の抵抗により200
~300Vの電圧がかかる。パイロットアークを母材に触れさせると
プラズマジェットは導電性であるため陰極から母材へ電流が流れ,
母材との間の主アークへ移行し,大電流の強いプラズマジェットと
なる。このとき母材へ流れる電流を検出し、それが、ガス流量、電
 * 日立製作所亀戸工場 ** 日立製作所亀戸工場 工学博士



図3 移動速度とアーク電圧





図4 プラズマ条件とアーク電圧の関係

4. 熱力学特性

移行式プラズマジェットはアーク放電を伴った高温高速の熱流で あるから,厳密に考えれば単純な熱流体として扱うことはできない が,電離度が小さいという条件のもとでは熱流体として考えても大 きな誤りはないと思う。

4.1 ガン損失率と熱移行率

ガン損失は陰極部分の熱損失とノズル部の熱損失の和で, 全入力

ノ ズ ル: 2.8¢ ガ ス N₂: 72.5*l*/min 切 断 速 度: 450 mm/min 軟 鋼: 25 t

図5 切断時アーク電圧電流波形

3. 電気的特性

移行式プラズマジェットは母材を陽極に使用するのでアーク発生 中は常にガンを移動させることになり、電気的特性も移動によって 影響を受ける。ガン移動速度と電圧の関係は図3に、電流、ガス流 量、ノズル母材間距離と電圧との関係は図4に示すとおりである。

ガン移動速度が大きくなるにつれてアーク電圧が低下しており, 移動速度の増加とともに陽極点が母材表面近くにくるためと考えら れる。またガス流量の増加とともに電圧が高くなるのはアークの挟 搾性が強くなることを意味し,ノズル母材間の距離とともに電圧が 上昇するのはアーク柱の伸びに対応したものであり,伸びに対する 電位傾度は 3.1 V/mm である。

アーク電圧・電流の波形は図5に示すとおりで、アーク電圧の変動は陽極点の変動によると考えられるが、規則性はなく変動の範囲 も10V以下である。 に対する比がガン損失率であるから、冷却水の温度上昇を測定し (1)式より算出する。

ここに, n_G : ガン損失率(%) Δt : 冷却水の温度上昇(\mathbb{C})

q: 冷却水流量(kg/s) P: 電 気 入 力(kW)

c: 冷却水の比熱

熱移行率は母材に伝わる熱量の全入力に対する割合である。実際 の切断時の熱量を測定することは不可能であるから,図6に示す形 状の水冷基板を作り中心の穴にプラズマジェットを移行させ,この 基板の冷却水の温度上昇を測定しガン損失率と同様に熱移行率を算 出した。

図7にガン損失率,図8に熱移行率の実験結果を示す。いずれも 電気入力,ガス流量に関係なくほぼ一定の値を示している。

図9は水冷基板を使用したときの電圧電流波形を示したものである。図5と図9を比較すると変動周期に差が見られるが、電圧の変動幅に大きな差はなく切断時と同等と考えられる。

4.2 エンタルピ, 平均温度, 電離度

プラズマジェットへの入力は全電気入力からガン損失および陽極 損失を差し引いたものであるが,水冷基板を使用する測定法では陽 極損失のみを分離することはできないから,水冷基板への移行熱量





図10 エンタルピ



を使用して求めるものとすると(2)式となる。

 $W_{P} = \frac{P}{4.2} - W_{G} - W_{T} \quad \dots \quad (2)$

ここに、 W_P : プラズマジェットへの入力 (kcal/s)

W_G: ガン損失 (kcal/s)

Wr: 水冷基板への移行熱量 (kcal/s)

エンタルピはプラズマジェットが熱平衡状態にある理想気体と考 えると、エネルギー収支つり合いの式からプラズマジェットへの入 ガン損失率を9~12%,熱移行率を25%としたときのエンタルピ および平均温度の結果を図10,図11に示す。ガス流量の少ないほ どエンタルピが大きく温度も高くなるので、実用上問題にならない 範囲でガス流量を減らすほうが望ましいと言える。

電離度を求めるには Saha 氏の式を用い, 窒素ガスの一価電離を 数値計算し図 12 のようにまとめておき, 平均温度の結果から求め た。ガス流量 60 l/min のとき 40 kW で 2.3×10⁻⁴, 80 kW で 3.4× 10⁻³となり電離はほとんど行なわれていない。しかしこれは平均温 度から求めたものであり,実際はプラズマジェットの中心部の温度 がこれより高く局部的に電離度の大きい所があると考えられる。

5. 金属の切断特性

プラズマジェットの切断能力は電流,ガス流量,ノズル母材間距離,水素ガス添加量などの要素に影響される。これらの関係がどのようになっているかドラグラインを測定して比較した。また標準切断条件を求めるため切断速度とドラグライン,切断面の傾斜,ドロスの有無の関係を調べた。

ドラグラインというのは図13に示す切断面にできるすじをさす のであるが、この上端と下端の幅1を測定する。切断速度が遅くじ ゅうぶんに切断できる場合はほとんど垂直になっており、切断速度 を早めるに従い傾斜がつくようになる。したがってドラグラインの 幅が小さければ切断能力に余裕があると言える。切断面の傾斜は図 13に示す切断面に直角方向の切り落とされた上端と下端の寸法差

力に等しく(3)式が成立する。

$$W_P = m h(T) = m \int_0^T C_P(T) dT$$
.....(3)

ここに、 m: 質量流量 (g/s) C_P : 定圧比熱 h: エンタルピ (kcal/g) T: 温 度 プラズマジェットの平均温度は(3)式によって求めたエンタルピ を用いてエンタルピ・温度曲線から図式的に求められる。 の1/2をとり、切断面の片側の平均の傾斜で示される。

----- 40 -----

母材として厚さ20mmのステンレス鋼を使用した場合の電流,ガ ス流量,ノズル母材間距離,水素ガス添加量とドラグラインの関係 を示したのが図14である。電流の増加に対してはドラグラインが 短くなり切断能力が向上するが,ガス流量,ノズル母材間距離,水 素ガス添加量の増加に対しては逆に長くなり切断能力は減少する。 電流,ガス流量の変化によって切断能力が変わるのはエンタルピの 移行式窒素プラズマジェット切断装置の特性



335

変化と対応しており、エンタルビの大きさがいちばん影響している と考えられる。

次に数種の板厚について切断速度とドラグライン、切断面の傾斜 の関係を示したのが図15である。図中太線で示した部分はドロス がほとんどつかない場合を示している。

どなめらかになる。切断速度が遅い場合には表面にかすがつくよ うになり、ザラザラした面でドラグラインもわからなくなる。

(2) ドロス: ステンレス鋼, アルミはつかない条件がある が, 軟鋼, 銅は必ずつく, しかし標準条件ではつき方は少なくハ ク離しやすい。一般に切断速度が早いほど大きくつく。

(3) 切りしろ: 上端の寸法は60kWの場合6~8mm, 100 kWの場合7~10mmである。切断速度が遅い場合に広くなる傾

- 一般に金属の切断に当たって要求される事項は母材の利用方法に
- よっても異なるが
 - (1) ドロスが少ないこと。
 - (2) 面が平滑であること。
 - (3) 面の傾斜が少なく直角に近いこと。
 - (4) 切りしろが小さいこと。
 - (5) 切断速度が早いこと。
 - (6) 切断コストが安いこと。

向がある。

41 -

- (4) 水素ガス: 添加により面がなめらかになるがドロスがつ きやすくなる。また傾斜を少なくするには添加することが有効で ある。
- プラズマジェット切断の場合の単位長当たりのランニングコスト は(4)式で求められる。



日

評

論

プラズマジェット発生条件 表1

			60 kW	100 kW
ガ	ス	<i>a</i> = 0.076	Q = 45	Q=55
	カ	b = 5 $\eta = 0.7$	V = 200 I = 300	V = 200 I = 500
却	水	C=12.5	W=10	W=10
	賃	d = 10		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
耗			e=4	<i>e</i> =5
	ガ 却 耗	ガ ス 力 却 水 賃 耗 品	ガス $a = 0.076$ 力 $b = 5$ $\eta = 0.7$ 却 水 $C = 12.5$ 賃 $d = 10$ 耗 品	ガス $a = 0.076$ $Q = 45$ ガ $b = 5$ $V = 200$ $\eta = 0.7$ $I = 300$ 却水 $C = 12.5$ $W = 10$ 賃 $d = 10$ 耗 品 $e = 4$

表2 粉末切断の使用条件

		板厚(mm) 単 価	20	30	40
酸素	(<i>l</i> /min)	0.05 ¥/l	78	137	200
アセチレン	(l/min)	0.238¥/l	7.7	12.2	14
鉄 粉	(kg/min)	140 ¥/kg	0.17	0.17	0.18
切断速度	(mm/min)		400	220	170

ここに, p: 切断コスト(¥/m) *I*: 電 流(A) v: 切断速度 (m/min) η: 直流電源の効率 c: 水道料金(¥/m³) a: ガス単価(¥/l) W: 冷却水量(l/min) Q: ガス流量(*l*/min) b: 電力料金(¥/kWH) 賃(¥/min) $d: \bot$



V: アーク電圧(V) e: 消耗品費(¥/min) プラズマジェットの発生条件を表1とした場合の切断コストは図 18に示すとおりである。図には粉末切断の使用条件を表2とした場 合の切断コストも示してある。ステンレス鋼の切断は速度が早いこ とからもプラズマ切断が粉末切断の15~25%で有利であり,面がき れいなことから後処理の工数も少なくてよいことを考えれば,設備 費を考慮してもプラズマ切断が有利となる。

言 6. 結

移行式窒素プラズマジェット切断装置において、ガスの流れを改 善することによりダブルアークが発生せず, 電極の消耗も少なくな り,実用上の効果が大きいことがわかった。

また実験結果から次の結論を得た。

る。

- (1) 移行式プラズマジェットの場合ガン損失率は9~12%,切 断に直接寄与する熱移行率は約25%である。
- (2) ガス流量の少ないほどエンタルピが大きく平均温度も高く なり、エンタルピ・温度曲線より求める平均温度は601/ min のガス流量で80kWの電気入力の場合8,600°Kであ

- (3) 実験の範囲内では、切断能力は電流が大きいほど、ガス流 量が小さいほど強くなり、したがってエンタルピが切断能 力に関係していると言える。
- (4) 標準切断速度はドラグラインの寸法が板厚の30~40%に なる切断速度が適しており、ステンレス板については60 kWの場合厚さ30mmで600mm/min, 100kWの場合厚 さ50mmで500mm/minである。
- (5) ステンレス鋼の場合プラズマ切断のコストは粉末切断の15 ~25% でプラズマ切断が有利である。

以上のように性能のすぐれている本装置は、今後非鉄金属関係の 切断作業にも活用されることが期待される。なお,昭和43年度も通 産省補助金を受け,高能率切断の大容量プラズマジェット装置につ き,引き続き研究を行なっている。

考 文 献 参

- (1) J.A. Browning: Welding J., 43, 275 (April 1964)
- (2) R.L. O'Brien: Welding J., 43, 1015 (Dec. 1964)
- (3) G.R. Spies: Welding J., 44, 815 (Oct. 1965)
- (4) A.B. Cambel: Plasma Physics and Magnetofluidmechanics, 139 (1963 Mc Graw-Hill)
- (5) 野村: 三菱電機技報, 41, 494 (昭 42-3)

