

H1307-08
0385-9894/14/¥500/ 論文 / JCOPY

〔 解 説 〕

レーザー・アークハイブリッド溶接

＜チタン、チタン合金およびニッケル基合金のハイブリッド溶接＞

(株)栗本鐵工所 山本 尚嗣・廖 金孫
Naotsugu Yamamoto Jinsun Liao
大阪大学 中田 一博
Kazuhiro Nakata

1. はじめに

資源・エネルギー問題は人間社会にとって最重要課題の1つであり、化学プラントをはじめとする各種プラントはその課題解決のための基幹産業である。近年、化学プラントの新規建設のみならずメンテナンス事業も増加傾向にある。このような背景の下で、当社は化学装置事業部を設立し、化学プラント関連の各種装置やソリューションを提供することになった。化学プラントに採用される材料は多種多様であり、その中で耐食性の優れたチタンとチタン合金や、耐熱性・耐食性の高いニッケル基合金等は重要な金属材料である。化学プラントの新設及び維持管理の際、これらの材料の溶接・接合技術が必要不可欠である。

他方、工業分野の基盤技術である溶接・接合技術は日進月歩で変貌しつつある。最近では、より高品質・大出力のファイバーレーザーが開発され、これに伴いレーザー溶接技術は多くの工業分野に使われるようになった。また、レーザー溶接による突合せ溶接時のルートギャップ裕度狭さという短所を克服するために、レーザーとアークを組み合わせた溶接技術、いわゆるレーザー・アークハイブリッド溶接（以後、ハイブリッド溶接）技術が開発された。これらの溶接方法はエネルギー密度が高いため、溶け込みが深く、中厚板に対して高い溶接効率及び継手品質が得られる特長がある。今後、化学プラントの大型化が進み、中厚板で構成されるより複雑な構造物が現れると予想され、そのような構造物を製

造する際に高精度、高品位、高能率に溶接できる方法として、ハイブリッド溶接技術が有望であると考えられる。

前述の事情を踏まえて、著者らはチタン、チタン合金及びニッケル基合金の溶接・接合技術の研究開発を行ってきたので、その内容を簡潔に紹介する。

2. ハイブリッド溶接

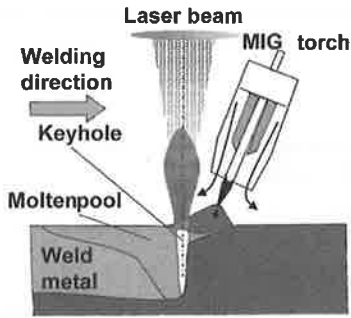
2-1 ハイブリッド溶接の背景 および基本原理

ハイブリッド溶接の発案や研究は40年以上前から始まっている。1977年10月に日本特許：特公昭56-49195「ティグとレーザーの併用溶接」（工業技術院）があり、この中でTIGのトーチとレーザーを一体に組み合わせるとともにティグトーチノズルの上部に穴を開け、この開口よりレーザーをTIG電極先端に近接するように照射して、深溶込み溶接することがすでに出願されている。

一般的にハイブリッド溶接の定義は、時間的にも空間的にも、特性が基本的に異なる溶接法のそれぞれの溶融池が第1図に示すように同一である場合をいう。

2-2 ハイブリッド溶接の種類および特性

ハイブリッド溶接はそれぞれの異なるプロセスの組み合わせが可能であるため、各種の組み合わせの方法が提案され、実用化のために、多くの研究が国内外でなされてきた。特に、レーザーとガスシールドアーク溶接の組み合わせは適切なワイヤを用いることで、溶接金属のビード



第1図 ハイブリッド溶接の概略図

形状、化学組成、継手性能などの制御が可能であるため、近年、鉄鋼材料において特に研究・開発が活発になってきた。初期の段階では、CO₂レーザとTIGアークとの組み合わせによるハイブリッド溶接法の研究が多く行われた。1990年代になると高出力のYAGレーザが開発され、1994年からそのハイブリッド溶接も開発された。また2003年頃からはファイバーレーザの高出力化により、ハイブリッド溶接にファイバーレーザが適用されるようになってきている。

ハイブリッド溶接の特性を従来のアーク溶接およびレーザ溶接と比較したものを第1表に示す⁽¹⁾。第1表からレーザ溶接およびアーク溶接に比べて、ハイブリッド溶接は高能率で低歪み

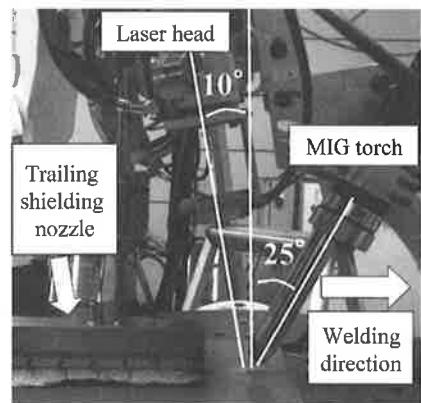
の溶接法であるばかりでなく、組立時に要求される許容継手ギャップも大きく、従来のレーザ溶接よりも適用しやすいことがわかる。

3. ハイブリッド溶接装置と実験方法

本研究で用いたハイブリッド溶接装置は、レーザは最大出力が10kW級のファイバーレーザ(IPG製YLR-10000)で、ミグアークは最大電流500Aのパルスミグ(ダイヘンDP500)である。構築したハイブリッド溶接ヘッドを第2図に示す。レーザは垂直から10°傾斜条件で、アークは垂直から25°傾斜条件で溶接を行っている。レーザビーム伝送のファイバー径は0.3mm、焦点距離は310mm、焦点位置でのビーム径は0.48mmである。レーザ・アーク間距離は2mmで固定し、ワイヤ突き出し長さも15mmで固定した。溶接前処理として接合面をエメリー紙によって酸化膜を除去し、アセトンにより脱脂を行っている。シールドガスには、Ar99.999%を用い、純チタン及びチタン合金Ti6Al4Vの溶接では、その流量をトーチシールドは30L/min、トレーリングシールドは50L/min、バックシールドは30L/minとしている。Ni基合金の溶接では、その流量はトーチシールドを30L/min、バックシールドを30L/minとしている(尚、トレーリングノズルは使用していない)。突合せ溶接を行う場合には、試験片にI型開先加工を行い、ジグによって固定し溶接している。

第1表 各溶接法の特性比較

比較内容	溶接方法		
	レーザ溶接	アーク溶接	ハイブリッド溶接
エネルギー密度	高い	低い	高いものと低いものと組み合わせ
熱効率	やや低い	高い	高い
熱源の相互作用	-	-	アーク安定作用
溶接速度	早い	遅い	早い
溶融特性	ビード幅は狭く	ビード幅は広く	ビード幅はやや広く
	溶け込みは深い	溶け込みは浅い	溶け込みはかなり深い
許容継手ギャップ	狭い	広い	広い
溶接金属への合金添加	可能	可能	可能
熱影響部の幅	狭い	広い	やや広い
溶接変形	小さい	大きい	小さい



第2図 ハイブリッド溶接装置

4. 各種材料のハイブリッド溶接性

4-1 純チタンについて

板厚4mm、6mmおよび12mmの純チタン2種に対して、第2図に示したハイブリッド溶接装置を用いて、各板厚について良好条件範囲を検討した。得られた良好条件を第2表に示す。いずれの板厚においても、良好条件を選択することでビード表面が銀白色（酸化が見られない）で継手効率（継手強度/母材強度×100）が100%（すなわち母材破断）の継手を得ることは可能である。純チタンのハイブリッド溶接においては（後述するその他の合金種においても）、健全な継手を得るための最も重要な溶接条件は、各板厚に適したレーザー焦点位置である。板厚4mmの場合はレーザー焦点位置を板表面に、板厚6mmの場合は板中央に、板厚12mmの場合は板裏面にセットする必要がある。また、本研究で用いたハイブリッド溶接装置（レーザーの最大出力10kW）では、板厚4mmと6mmの場合は1パス貫通溶接が可能であるが、板厚12mmの場合は両面1パス溶接が必要である。また、板厚4mmのハイブリッド溶接では、継手ルートギャップ裕度は1.0mmであった。純チタンのハイブリッド溶接の継手は溶接金属部と熱影響部の硬さが母材より高く、その理由は小傾角粒界の形成と大気若干混入によるものである。以上のように、溶接金属部が硬化しているため、引張

試験では母材破断を呈するが、溶接金属部の衝撃値は低下する。純チタンのハイブリッド溶接性についての詳細は、著者らの文献⁽²⁾⁽³⁾を参照していただければ幸いである。

4-2 チタン合金Ti6Al4Vについて

板厚5mmおよび12mmのチタン合金Ti6Al4Vに対して、第2図に示したハイブリッド溶接装置を用いて、各板厚について良好条件範囲を検討した。得られた良好条件を第3表に示す。いずれの板厚においても、良好条件を選択することで継手効率がおおよそ100%（一部溶接金属部破断）の継手を得ることは可能である。チタン合金Ti6Al4Vにおいても、健全な継手を得るためには、各板厚に適したレーザー焦点位置があり、板厚5mmの場合はレーザー焦点位置を板表面に、板厚12mmの場合は板裏面にセットする必要がある。また、本研究で用いたハイブリッド溶接装置（レーザーの最大出力10kW）では、板厚5mmの場合は1パス貫通溶接ができるが、板厚12mmの場合は両面1パス溶接が必要である。板厚5mmのハイブリッド溶接継手は引張試験時に母材破断を呈したが、板厚12mmのハイブリッド溶接継手は継手中央部にポロシティが存在したため、引張試験時に一部の試験片が溶接金属部で破断した。なお、これらの継手の溶接金属部と熱影響部はマルテンサイト組織が形成されたため、硬さが母材より高かった。チタン合

第2表 純チタンのハイブリッド溶接性

供試材料				溶接条件及び継手機械的性能									
合金種類	板厚 [mm]	引張強度 [MPa]	伸び [%]	溶接条件						継手強度 [MPa]	伸び [%]	継手効率 [%]	破断位置
				開先と積層	電流 [A]	溶接材料	フォーカス位置	レーザー出力 [kW]	溶接速度 [cm/min]				
純チタン	4	389	38.4	I型 1層	STi0120J φ1.2mm	f ₀ =0mm	8	100	376	32.3	100	B.M.	
								125	383	27.3	100	B.M.	
								150	387	36.0	100	B.M.	
								150	386	33.7	100	B.M.	
								150	380	32.7	100	B.M.	
	6	386	42.9	I型 1層	150	f ₀ =-3mm	10	200	395	36.8	100	B.M.	
								300	393	38.0	100	B.M.	
								200	393	34.9	100	B.M.	
	12	393	38.8	I型 2層	150	f ₀ =-12mm	10	200	393	34.9	100	B.M.	

第3表 チタン合金Ti6Al4Vのハイブリッド溶接性

供試材料				溶接条件及び継手機械的性能									
合金種類	板厚 [mm]	引張強度 [MPa]	伸び [%]	溶接条件						継手強度 [MPa]	伸び [%]	継手効率 [%]	破断位置
				開先と積層	電流 [A]	溶接材料	フォーカス位置	レーザ出力 [kW]	溶接速度 [cm/min]				
Ti6Al4V チタン合金	5	1,086	17.0	I型 1層	200	STi6400 φ1.2mm	f _d =0mm	8	300	1,051	17.3	100	B.M.
								10	300	1,061	17.0	100	B.M.
	12	1,031	20.7	I型 2層	150	STi6400 φ1.2mm	f _d =-12mm	一層目:8 二層目:10	200	1,034	9.3	100	B.M. [1/3] W.M. [2/3]
								一層目:10 二層目:10	200	1,038	11.5	100	B.M. [2/3] W.M. [1/3]

金Ti6Al4Vのハイブリッド溶接性についての詳細は、著者らの文献⁽⁴⁾を参照していただければ幸いです。

4-3 Ni基合金インコネル600について

板厚4mmおよび12mmのインコネル600に対して、第2図に示したハイブリッド溶接装置を用いて、各板厚について良好条件範囲を検討した。得られた良好条件を第4表に示す。いずれの板厚においても、良好条件を選択することで継手効率がおおよそ90%（溶接金属部破断）の継手を得ることは可能である。Ni基合金インコネル600においても、健全な継手を得るためには、各板厚に適したレーザ焦点位置があり、板厚4mmの場合はレーザ焦点位置を板表面に、板厚12mmの場合は板裏面にセットする必要がある。また、本研究で用いたハイブリッド溶接装置（レーザの最大出力10kW）では、板厚4mmの場合は1パス貫通溶接ができるが、板厚12

mmの場合は両面1パス溶接が必要である。なお、これらの継手の溶接金属部と熱影響部は結晶粒径が粗大となっているため、硬さが母材より低かった（このため溶接金属部破断を呈す）。板厚12mmのハイブリッド溶接継手においては、入熱量が多い場合に、溶接金属中央部に凝固収縮により発生したと考えられる微細な割れが見られた。インコネル600のハイブリッド溶接性についての詳細は、著者らの文献⁽⁵⁾を参照していただければ幸いです。

4-4 Ni基合金ハステロイC-276について

板厚4mmのハステロイC-276に対して、第2図に示したハイブリッド溶接装置を用いて、良好条件範囲を検討した。得られた結果を第5表に示す。いずれの条件においても、継手効率が100%（母材破断）の継手を得られるが、熱影響部にハイブリッド溶接の溶け込み形状に起因した微細な割れが発生した。これはMoリッチな

第4表 インコネル600のハイブリッド溶接性

供試材料				溶接条件及び継手機械的性能										備考
合金種類	板厚 [mm]	引張強度 [MPa]	伸び [%]	溶接条件						継手強度 [MPa]	伸び [%]	継手効率 [%]	破断位置	
				開先と積層	電流 [A]	溶接材料	フォーカス位置	レーザ出力 [kW]	溶接速度 [cm/min]					
インコネル 600	4	718	41.2	I型 1層	100	YNiCr-3 φ1.2mm	f _d =0mm	8	200	641	23.5	89	W.M.	
					150			8	200	649	24.2	90	W.M.	
					200			8	200	646	24.0	90	W.M.	
	12	705	43.4	I型 2層	150	YNiCr-3 φ1.2mm	f _d =-12mm	8	150	681	29.6	97	W.M.	
								10	150	674	27.4	96	W.M.	
								10	200	685	29.0	97	W.M.	

第5表 ハステロイC-276のハイブリッド溶接性

供試材料				溶接条件及び継手機械的性能										備考
合金種類	板厚 [mm]	引張 強度 [MPa]	伸び [%]	溶接条件						継手 強度 [MPa]	伸び [%]	継手 効率 [%]	破断 位置	
				開先と 積層	電流 [A]	溶接材料	フォーカス 位置	レーザー 出力 [kW]	溶接 速度 [cm/min]					
ハステロイ C-276	4	761	68.1	I型 1層	100	YNiCrMo-4 φ1.2mm	fa=0mm	6	200	764	64.8	100	B.M.	熱影響部 (ネイル ヘッド首 下)に微細 な割れ
					150			6	200	761	63.1	100	B.M.	
					200			6	200	763	65.1	100	B.M.	
					100			8	200	762	66.4	100	B.M.	
					200			8	200	764	64.7	100	B.M.	

p相もしくはμ相が偏析したためである。この微細の割れはX線透過試験で検出されず、また引張強度にも影響がなかった。このため、割れの検出には十分注意しなければならない。いずれの条件においても、溶接部の硬さは母材と同等か若干硬化していた。これは、溶接金属部の組織が母材の組織とは異なり、微細なラメラ状の組織であったためと考えられる。ハステロイC-276のハイブリッド溶接性についての詳細は、著者らの文献⁽⁵⁾を参照していただければ幸いである。

5. おわりに

本稿ではハイブリッド溶接の基本原則、特徴および装置構成を紹介した上で、化学装置に用いられるチタン、チタン合金及びニッケル基合金のハイブリッド溶接の実験結果を述べた。ハイブリッド溶接法を実生産に採用する場合には、使用環境を想定した継手の評価が必要である。

<参考文献>

- (1) M. Kutsuna: レーザ・アークハイブリッド溶接, 溶接プロセスの高機能化に向けた新しい展開, 溶接法ガイドブック6 (2008)
- (2) Takahiro Murakami, Kazuhiro Nakata, Naotsugu Yamamoto and Jinsun Liao, Formation of One Pass Fully-Penetrated Weld bead of Titanium Plate by Fiber Laser and MIG Arc Hybrid Welding, Material transactions, Vol.53, No.4 (2012)
- (3) 山本尚嗣・廖 金孫・村上孝浩・中田一博: “純チタン厚板のファイバーレーザー・ミグアークハイブリッド溶接性に関する基礎的検討”, 日本金属学会誌, Vol.77, Number 2 (2013)
- (4) 山本尚嗣・廖 金孫・村上孝浩・中田一博: “チタン合金Ti-6Al-4Vのファイバーレーザー・ミグアークハイブリッド溶接性に関する基礎的検討”, 日本金属学会誌, Vol.77, Number 3 (2013)
- (5) 山本尚嗣・廖 金孫・中田一博: “Ni基合金のファイバーレーザー・ミグアークハイブリッド溶接性に関する基礎的検討”, 日本金属学会誌, Vol.76, Number 7 (2012)

【筆者紹介】

山本尚嗣

(株)栗本鐵工所 技術開発室 金属材料技術開発部
材料応用グループ 技術主任
〒559-0021 大阪市住之江区柴谷2-8-45
TEL: 06-6686-3259 FAX: 06-6686-3229
E-Mail: na_yamamoto@kurimoto.co.jp
(主なる業務歴及び資格)
工学博士

廖 金孫

(株)栗本鐵工所 技術開発室 金属材料技術開発部
材料応用グループ グループ長
〒559-0021 大阪市住之江区柴谷2-8-45
TEL: 06-6686-3259 FAX: 06-6686-3229

株式会社栗本鐵工所

(代表者) 福井秀明
〒550-8580 大阪市西区北堀江1-12-19
TEL: 06-6538-7731
URL: http://www.kurimoto.co.jp/
(資本金) 31,100(百万円)
(年商) 98,100(百万円)
(従業員数) 1,914名

中田一博

大阪大学 接合科学研究所 教授
〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘11-1
TEL: 06-879-8666