解 説

複合材料への HIP 応用技術

滝 川 博*

1. ま え が き

HIP (hot isostatic pressing: 熱間静水圧成形) は、1955年にアメリカにおいて核燃料集合体の拡散接合の手法として考案されたのが最初である。

その後、各方面で HIP の研究開発が進められ、粉体の加圧焼結、焼結体の高密度化、鋳造品の欠陥除去などにより機械的性質のすぐれた部品を製造することが可能となり、1970年に入ってから、超硬合金、工具鋼、Ni 基超合金、Ti 合金、フェライト、セラミックスなどの新分野で積極的に工業化が推進されつつある。HIP を用いた製品において、最も高度の技術が要求されるのは、航空機用エンジン材料である Ni 基超合金の場合である。また最も多量に生産されているのは高速度鋼であり、いっぽう最も幅広く数多くの HIP 装置が使われているのは超硬合金の分野である。

'80 年を境に HIP 装置の設置数は、世界的に急速に増加している。これは、この時期から新素材の開発の気運が高まり、開発手段として HIP がきわめて有効であることが認められたためである。とくに、近年省資源、高比強度などの要請から、HIP を利用して拡散接合によって複合材料を製造する技術が見直されつつある。

ここでは、まず HIP 装置の概要について述べるとともに、最近とくに注目されている HIP によって複合化された新しい製品を紹介する。

2. HIP 装 置

HIP 装置は、図 1 に示すように、1) 圧力容器、2) 圧媒ガス (通常は Ar) の加圧、回収装置、3) 圧力容器に収納される加熱装置、4) 加熱電源および制御装置、5) 安全装置、6) 製品ハンドリング装置などの付帯設備から構成される。また、HIP 装置本体は、図 2 に示すように、圧力容器の内部に抵抗加熱炉が内蔵された構造であり、外部からガス圧、加熱電力を供給して高

圧高温処理を行なう。

図 3 には HIP 装置の外観写真を示す。

温度としては、480°C (Al 粉末) から 1,700°C (W 粉末) まだがよく使われる。もっとも、セラミックス用には、2,000°C の HIP 装置が市販されている。圧力は、1,000 kg/cm² がよく使われるが、装置としては、2,000 kg/cm² 仕様のものが多い。

図 4 に HIP 装置の用途別分類を示す。これによると、'84 年末では、国内 HIP 設置台数は 72 台であり、'85 年末もしくは '86 年初めには 100 台に達する。

用途別に見ると、R & D 用が '84 年末には 46% を占め、'85 年には 50% をこえることが確実であり、HIP 利用の研究意欲の高さを示している。

3. HIP による複合化製品

HIP によって複合化する場合、主として次の三つの方法がある。

- (1) 固体/固体の拡散接合 (クラッドの形成、複雑形状部品の形成、コーティングの形成)
- (2) 固体/粉末の固化および拡散接合
- (3) 粉末/粉末の固化および拡散接合

HIP によって拡散接合する場合、被接合面をシールする必要がある。たとえば、接合すべき面の周囲を溶接、ろう付けなどの方法で封じってしまう方法がある。しかし、一般的な方法としては、図 5¹⁾ に示すように被接合体あるいは中子を組み合わせる金属カプセル中に真空密封し、HIP 後機械的あるいは化学的方法でカプセルおよび中子を取り除く方法である。

図 5 a はクラッド材の例である。爆着のような通常の方法に比べて、HIP 法では最終形状に近い複雑なものを作ることができる。その他に、広い面を完全に接合できる、多方向の接合面を一度に接合できるというメリットがある。図 5 b は複雑形状部を拡散接合で作る場合の例であり、中子あるいは二次圧力媒体を使うのが特徴である。中子は HIP 後製品より除去しやすいように、セラミックスの薄い層でコーティングしてから用いられる場

* Hiroshi TAKIGAWA : 神戸製鋼所材料研究所
(651 神戸市中央区脇浜町 1-3-18)

図1 HIP装置の全体系統図

図2 HIP装置本体概念図

図3 HIP装置

炉内：200φ×500mm、
2000°C、2000 kg/cm²

図4 HIP用途別分類

図5 HIPによる各種接合方法

合もある。図5cはコーティング材としてカプセルを利用する方法であり、HIP後脱カプセル処理が不要なために経済的である。ただし、コーティング材(カプセル)の溶接性は優れていることが必要である。たとえば、Cu部品の表面をTiでコーティングすることが当方法では可能となる。そのほかに、粉末を緻密化するためのHIP条件と拡散接合条件がよく似ていれば、図5d, eに示すような固体/粉末、粉末/粉末の部品も作ることができる。

3.1 複合タービンホイール

米国のDetroit Diesel Allison (DDA)社等で、直径6～8インチの小型ガスタービン用複合ホイールの研究開発が行なわれている。タービンホイールのうちブレード部分は高温強度が必要であり、一方向性凝固あるいは単結晶などの casting 法による結晶粒径の大きな材料が適している。他方ディスク部分は中程度の温度域での強度と疲労強度が重要であり、粉末冶金法による微細組織の材

料が最も適している。大型ガスタービンの場合には、通常両者を機械的に結合する方法がとられているが、小型の場合には寸法的制約などの理由により機械的な結合方法をとることができない。そこで両者を HIP を利用して拡散接合する方法が考えられており、DDA 社の例を図 6 に示す²⁾。

この例では、タービンプレードは Mar-M 246 と呼ばれる Ni 基合金で精密鑄造法によって作られている。タービンディスクは PA 101 と呼ばれる Ni 基合金で粉末原料を HIP により成形焼結したものである。

まず両者の接合面、すなわちブレードリングの内周とディスクの外周を研削し、研削後真空脱ガスを行なって接合面の清浄を高める。

つづいて両部品を焼ばめし、焼ばめ後両者の接触線を真空ロウ付けすることによりシールする。

この後 HIP 処理を行なうことにより、きわめてすぐ

図 6 複合タービンホイールの製造工程

れた冶金結合がえられたと報告されている。

同様の複合タービンの例が Avco-Lycoming 社等からも報告されている。また図 7 にはこのような方法で作られた複合タービンホイールの断面の例を示す³⁾。

3.2 複合タービンプレード

燃料費の高騰で、産業用ガスタービンの性能向上に対する要求が増大し、ガス温度を高める必要が生じている。このため、HIP 法を用いて高温特性に優れた大型の複合タービンプレードを作る試みがなされている。要求特性は 3.1 節のディスクの場合と同様で、高温におけるクリープ特性と強度で、これらの特性を合わせもった材料が望まれている。その一つとして、一方方向凝固合金 (DS) と超合金粉末の組合せがあり、図 8 に示す方法で HIP される。3 種類の DS 合金と 2 種類の超合金粉末を HIP で接合し、高温の引張り試験を行なった。結果を表 1 に示すが、DS が Mar-M 200+Hf, René 80 H の場合、破断はすべて接合面で起こっており、これを解決するためには今後さらに HIP 後の熱処理を検討せねばならない⁴⁾。

さらに、米国では次世代ガスタービンの一つとして、1,500°C 付近の高温で作動する水冷ガスタービンを考慮している。図 9 に示すような耐熱合金、熱伝導度の優れた銅合金などを組み合わせた複合タービンノズル (インコネル 617, MZC 銅合金, Alloy 50 より構成) の試作が HIP 方式を用いて行なわれている⁵⁾。

また、図 10 に示すように超合金 Mar-M 200 粉末と 0.5 mm の W 線を HIP で複合化したタービンプレードが試作されている。このブレードは HIP 成形後、さらに恒温鍛造によって最終に近い形状に形成される。この際、超塑性特性を利用することによってマトリックスの変形抵抗を低下させて、W 線の界面に発生する欠陥を防止することができる⁶⁾。

3.3 B 繊維/Al 合金のパイプ

B 繊維で強化された Al 合金パイプがスペースシャトルの機体構造部材として使用されており、この部材は図

図 7 複合タービンホイールの断面

表1 HIP 拡散接合した超合金の高温引張り特性

複 合 材	試験温度(°C)	HIP および 溶体化温度 (°C)	0.2 YS (kg/mm ²)	UTS (kg/mm ²)	EL (%)	RA (%)	破断部
M 200+AP 1	538	1,177	84.2	87.0	0.7	3.1	B L
	538	1,204	96.8	101.5	0.8	3.3	B L
	538	1,219	96.5	114.6	6.4	10.5	B L
M 200+AP 1	649	1,219	102.3	126.1	5.8	11.2	B L
M 200+PA 101	538	1,219	107.1	116.5	2.2	6.6	B L
R 80 H+AP 1	538	1,191	92.1	92.1	0.2	0.6	B L
R 80 H+PA 101	538	1,191	108.6	110.5	0.5	0.8	B L
441+AP 1	538	1,232	86.0	102.1	6.6	17.5	C
441+PA 101	538	1,232	91.9	114.6	2.2	7.2	C

M 200 : Mar-M 200+Hf, AP 1 : Low Carbon Astroloy, R 80 H : René 80 H, PA 101 : Low Carbon IN 792 +Hf, 441 : Mod. René 150, BL : Bondline, C : Casting

図8 一方向凝固超合金と超合金粉末の HIP 接合方法

(a) 組立て前の部品

(b) HIP により接合したノズル

図9 水冷ガスタービン用複合ノズル

- 11 に示す工程により製造されている^{7,8)}。
- (1) B 繊維が特定方向に配列された Al 合金シートを裁断し、軟鋼製マンドレルに巻きつける。
 - (2) この外周に軟鋼製外側マンドレルをかぶせ、内外マンドレルのすきまに両端から Ti 合金部品を挿入し、その後軟鋼製溶接リングをはめて溶接密封する。
 - (3) 全体を加熱しながら内部を脱気し密封する。
 - (4) 密封後、520°C、700 kg/cm² の条件で HIP する。
 - (5) HIP 処理後、内外マンドレルを機械加工で削り、最後は酸処理によりマンドレルを完全に除去する。
 - (6) このあと、両端に Ti 合金の継手を電子ビーム溶接して完成品ができあがる。

このような方法で最大 92mmφ×2280mm までの種類の寸法の部材が作られており、実際スペース・シャトル

図10 W線で強化した最終形状に近い複合タービンブレード

図11 B/Al 複合パイプの製造工程

ルでの繰返し飛行が行なわれて信頼性が実証されつつある。なお、この材料を使用することにより、同じ部品を Al 合金で作る場合と比べて 44% の重量低減ができたことが報告されている。

3.4 パルプ・ボディ

エネルギー危機が叫ばれて以来、より深い場所におけるサワーガスや、オイルの探索がいちだんと熱心に行な

図12 接合バルブの製造方法

われているが、このためには、現在よりもさらに耐食性の優れたバルブ・コネクター・パイプが必要となっている。とくに、バルブに関しては全体を耐食性合金で作るときわめて高価になり、場合によっては、製造が困難となる。そこで、経済性に富み、かつ耐食性も満足する方法として HIP による複合技術が注目されている。バルブ本体の内面に、超合金 Alloy 625 粉末を HIP で接合するもので、カプセルを用いる方法を、図 12 に示す⁹⁾。

まず、低合金鋼でバルブ・ボディを作り、内面に軟鋼製の薄板で作ったカプセルをセットし、表面は溶接でとめる。そして、カプセルとボディのすき間に超合金粉末を充填し、この部分を加熱、真空脱ガスする。密封したのち、 $1,050 \text{ kg/cm}^2$ の圧力で HIP し、超合金粉末をボ

表2 Alloy 625 HIP 材と API 規格の比較

	Alloy 625 HIP 材 (熱処理)	API 規格 (Type 3)
UTS (kg/mm ²)	100.4	70.0
YS (kg/mm ²)	58.1	52.5
EL (%)	35.0	17.0
RA (%)	40.5	35.0

図13 HIP 法でステライト-6 がコーティングされたステンレス製ベアリングの断面

ディに固相拡散接合する。HIP 後、必要ならば熱処理を施し、その後機械加工あるいは化学的な処理によってカプセルを除去して、複合バルブが完成する。

HIP した超合金 Alloy 625 粉末の機械的特性は、表2に示すように、米国石油協会 (API) のサワーガス用材料規格 Type 3 を上回っている。

3.5 ベアリング

耐食、耐摩耗性にすぐれた合金 (ステライト) で被覆されたステンレス製のベアリングの切断面を図13に示す。この場合、ステンレスはカプセル自身の役目も果たしており、HIP 後はステライト (原料は粉末) の表面部だけを除去した。ステンレス-ステライト (粉) の接合複合材の機械的特性を表3に示す。ステンレスはオーステナイト系、フェライト系ともにステライトと十分に接合しており、引張り試験時の破断はそれぞれステンレス側で起こっている。

4. あとがき

複合材そのものは古くから実用化され歴史もある。しかし、最近の新材料に対するニーズの高まりとともに、

表3 ステンレス-ステライトのベアリング用複合材の機械的特性

材 料 1	オーステナイト系ステンレス (18Cr-9Ni)	フェライト系ステンレス (13Cr)
UTS (kg/mm ²)	50~70	80~95
0.2 YS (kg/mm ²)	18.5	55
材 料 2	ステライト 6 (HIP 材)	ステライト 6 (HIP 材)
UTS (kg/mm ²)	130	130
0.2 YS (kg/mm ²)	85	85
HIP 条件		
温度 (°C)	1,200	1,160
圧力 (kg/cm ²)	900	1,000
時間 (h)	3	3
熱処理	HIP まま	1000°C/oil + 650°C, 2h
複合材		
UTS (kg/mm ²)	57	88
破断部	ステンレス	ステンレス

新しい複合材の製造に関して、HIP による拡散接合の実用化が今後急速に進むものと思われる。その一つとして、セラミックスと金属との接合も興味のある課題である。本稿が複合化の一つの助けになれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) C. Nissel : *Powder Met. Int.*, **16**, 3 (1984), 113.
- 2) B.A. Ewing : *Proc. 4th Int. Symp. on Superalloys* (1980), 169.
- 3) Howmet Turbine Components 社カタログ
- 4) L.G. Peterson, D.E. Hrencein, W.F. Schilling & W.J. Ostergren : *Am. Soc. Mech. Eng.*, **82-GT-94** (1982), 1.
- 5) D.R. Spriggs & M.C. Muth : *Weld. J.*, **61**, 11 (1982), 41.
- 6) J.P. Immariageon & W. Wallace : *Met. Powder Rep.*, **38**, 10 (1983), 537.
- 7) 日本複合材料学会編 : 金属基複合材を知る事典, アグネ (1984), p.214.
- 8) M.D. Weisinger : *Met. Prog.*, May (1978), 60.
- 9) M. Bishop : *Ind. Heat.*, Oct. (1984), 18.