21世紀に向けてのチタン材料の展望

チタンの溶解・鑄造の現状と将来展望

金 井 章*

1. はじめに

チタンは、高融点活性金属と称されるように、熔融状態では取り扱いにくい金属材料である。高温での大気との反応を防ぐための雰囲気制御、耐火物との反応を防ぐためのモールドの材質の選定・構造の設計、熱源の選定などの組合せで各種の溶解法が考案され、実用化されている。以下にチタン溶解法の現状を紹介し、その将来の展望を試みた。

2. 原 料

(1) スポンジチタン(通称: スポンジ)

主原料であるスポンジは、 TiCl_4 を金属 Mg で還元して得られる。多孔質で圧縮成形性に富んでおり、通常 1~13 mm の範囲で粒径が整えられている。嵩比重は真比重の 25~40% 程度で、1000 ppm 程度までの塩素を含んでいる。

(2) スクラップ

切削屑や板を細かく切断した小片スクラップとビレットや厚板などの半製品の切端の塊状スクラップに大別される。チタンは、溶解中の成分調整が困難なので、予め組成の知れた原料を配合して使用しなければならない。したがってスクラップ発生から使用にいたるまでの規格別の厳格な分別管理を必要とする。

(3) 母合金

チタン合金の溶解は、多くの場合母合金を使用する。Ti-

6Al-4V 合金には 50Al-50V 母合金が最も良く利用されている。その他、チタン合金に適した多くの 2~5 元系の母合金が市販されている。

3. 消耗電極式真空アーク溶解法(VAR)

世界のチタン溶解能力の 85% 以上は、VAR (Vacuum Arc Remelting) 炉である。VAR 炉の構造を図 1 に示す。

VAR 法は、円柱形に成形した電極を水冷銅モールド中でアーク放電させ、滴下した溶湯を逐次固めていくという方法

図1 消耗電極式真空アーク炉。

* 株式会社住友シチックス尼崎 支配人兼技術部長(〒660 尼崎市東浜1)
Present Features and Future Prospects in Titanium Melting and Casting; Akira Kanai (Sumitomo Sitix of Amagasaki, Inc., Amagasaki)
Keywords: titanium, titanium alloy, melting, casting, ingot, vacuum arc remelting
1997年9月30日受理

である。滴下した溶湯は、銅モールドに接触している部分からすぐに凝固してスカルを形成し、銅モールドを保護する。スカルの内側ではアーク熱により深いプールが形成される。

スポンジを溶解する場合、スポンジ中に含まれている $MgCl_2$ がガス化することにより急速に膨張して液滴をスプラッシュとしてはじき飛ばす。VAR の場合は、消耗電極が蓋代わりとなり、スプラッシュを押さえる役目を果たす。また、モールド壁に付着したスプラッシュは、溶解の進行にしたがって上昇する溶湯に取り込まれる。このような仕組みで歩留り低下を防ぎ、スプラッシュの堆積による運転トラブルも防げるのでスポンジには最も適している溶解法である。

VAR では1回の溶解で生成したインゴットを2次電極として再度 VAR 炉で溶解するダブルメルト法が通常である。場合によってはトリプルメルトも行う。モールドの径は、電極より大きいので、溶解回数を重ねるにしたがいインゴットの径は必然的に大きくなる。

(1) 電極製作

スポンジの場合は、圧縮成形性が良いことを利用してプレスにてコンパクトを成形し、そのコンパクトを組み立て、溶接により電極とする。通常、電極溶接はアルゴン雰囲気中でプラズマアークにより行われる。

小片スクラップはスポンジに30%程度まで混入できる。多量のスクラップの混入は、電極の強度を下げるので好ましくない。添加元素はプレス直前に混合する。

(2) 運転、制御

安定な溶解状態を持続し、モールドへのサイドアークを防ぐために溶解中はアーク長を一定に保つ必要がある。アーク長の制御には、電圧制御方式と滴下する溶滴と溶湯との短絡回数を電氣的に計数することによって制御するドロップショート制御方式がある。

チタンの溶解では溶湯の粘度が高いため、電圧制御が使われる。通常、電圧は30~40 V に設定され、アーク長は30~70 mm に維持される。

(3) VAR 炉に取り入れられている諸機能

(a) 同軸給電方式

大電流の給電による磁場のためアークが偏らないように、炉頂から同心円状に均等に給電する方式で、均等なアークにより表面の良好なインゴットが得られる。

(b) 電極秤量と溶解速度制御

溶解中の消耗電極の重量を連続的に秤量し、その減量速度を制御する方式である。この溶解速度制御により溶湯プールの深さを一定に保ち偏析の少ないインゴットが得られる。

(c) 溶湯の電磁攪拌

モールドの外側のソレノイドコイルに電流を流し、溶湯を攪拌する方法である。電流の強弱、交番のサイクルの選択に

より溶湯を正逆方向に回転させたり、静止させたりできる。また、アークを収束させる効果もある。

4. 非消耗電極溶解

非消耗電極型の溶解法は、原料を電極の形に成形する工程が省け、原料の性状の制約も少ない長所がある。特に新規に工場を建設する場合は、高いプレス設備の投資が節約できる。

タングステン電極または水冷銅回転電極からアークを発生させる方法と電子銃を熱源とした電子ビーム (Electron Beam=EB) 溶解、プラズマトーチを熱源としたプラズマアーク (Plasma Arc=PA) 溶解などがある。

EB および PA 溶解は、工業規模での稼働例もある⁽¹⁾が、大半は実験室規模で使用されている。

EB および PA 溶解は工業的にはむしろ次項のハース溶解で活用されている。非消耗電極溶解は2次溶解として VAR を行うのが一般的である。

5. ハース溶解

ハース溶解は、非消耗電極溶解の1種である。溶湯をモールド内で凝固させる前に水冷銅ハース上を流動させることにより、介材物の溶解または沈降を果たそうとする溶解法である。航空機ジェットエンジン部品材料の最大課題の一つは疲労破壊源となる介在物の回避にある。

介在物には LDI (Low Density Inclusion) と呼ばれる窒化物 (図2) や酸化物系と HDI (High Density Inclusion) と呼ばれる W, Mo などの高融点金属系がある。ハース溶解は、この両者の除去に有効ということで脚光を浴びたが LDI 除去には必ずしも完璧では無かった。しかし、ハース上の溶湯の滞留時間や温度の制御⁽²⁾などにより介材物除去方策の方向が見定められ、再び注目されるようになってきた。

図2 チタン合金中の窒化チタン介材物 (LDI)。

図3 ハース溶解概念図。

図3にハース溶解炉の概念図を示す。EBを熱源としたものをEBCHR(Electron Beam Cold Hearth Remelting)炉、PAを熱源としたものをPACHR(Plasma Arc Cold Hearth Remelting)炉という。

図4は、5個のEBガンを備えた世界最大の出力3300kW、インゴット重量最大16トンのEBCHR炉である。

ハース溶解法のその他の特徴は、矩形、異形のインゴットが作れることである。特にシャープなビームで電氣的に精密な制御ができるEBCHRでは、溶湯とモールド壁との境の際までビームを照射できるので表面品質の良い異形インゴットが得られる。

図4 3300 kW EBCHR 炉。
(Titanium Hearth Technologies 社(米)提供)。

欠点としては、電力消費量が高いこと、スプラッシュによるトラブルのためスポンジの配合率に限界があることなどである。更にEBCHRには、高真空と溶湯表面の過熱によりAl, Crなどの合金元素の蒸発という問題がある。蒸発によるロス分はそれを見込んだ配合で目標成分を得ることはできるが、蒸発金属の真空系への蒸着などの問題は残る。

6. 鋳物

鋳物はnear-net形状により原材料、切削費用の節約で有

利である。航空機部品では、鋳物の信頼性から回転部品には使われていないが、静止部品には多く使用されている。最近では、ゴルフクラブヘッド用としてチタン鋳物の需要が大幅に伸びている。

(1) チタン鋳物用の溶解法

鋳物の溶解に必要な条件は、鋳込みに必要な量の溶湯を一度に適度な過熱状態で保持することである。

上記の条件に近い溶解法として消耗電極式のスカル・アーク法が主に採用されている⁽³⁾。スカル・アーク法は、VAR法と同様に消耗電極をアークで溶かした後、ただちに水冷銅るつぼを傾動して鋳型に溶湯を注ぎ込む方法である。清浄な溶湯を短時間に得ることができるが、溶湯の過熱保持が十分にできない欠点がある。

インダクション・スカルは、図5に示すようにスリットを切った水冷銅るつぼの外側から誘導加熱する方法で、溶湯過熱保持、溶湯攪拌、清浄溶解などチタンの鋳物用の溶解とし

図5 インダクションスカル炉。

て優れた特徴を持っているが、現状では50kg程度の溶解が限界である。

そのほかEB溶解、PA溶解も使われることもあり、酸素の若干のピックアップはあるがカルシアるつぼを使った誘導加熱溶解もある⁽⁴⁾。

(2) 鋳型材

大型部品では黒鉛が使用される。ロストワックス法による精密鋳造ではCaO, ZrO₂などの酸化物系が鋳型材として使われる。図6にチタン合金鋳物製品例を示す。

7. 開発段階のチタン溶解法

(1) エレクトロスラグ溶解法(ESR)

ESR(Electro Slag Remelting)炉は、VAR炉と似た構造で、溶湯プールの上をスラグでカバーし、消耗電極の先端はスラグの中に埋没させている。スラグの抵抗加熱で消耗電極

図6 各種チタン铸件.
(真空冶金㈱提供).

が溶けてスラグ中を滴下する。

スラグには CaF_2 単独⁽⁵⁾と CaF -金属 Ca の混合物⁽⁶⁾を使った実施例がある。狙いの一つは金属の清浄化にあるが、いずれも原料の純度を維持する程度で、清浄化効果は現れておらず、表面品質にもなお改善の余地がある。

ESR の特徴は、電極よりも断面積の小さいインゴットや、矩形のインゴットを得ることが可能なことである。

(2) 連続コールドクルシブル溶解法(CCCM)

CCCM(Continuous Cold Crucible Melting)は、铸件の項で図5に示した方法と原理的には同じであるが、るつぼを底無し引き下げ方式とし、長尺のインゴットを得る方法である。この方法で Ti-6Al-4V 合金スクラップ溶解で 150 mm 径、2.5 m 長さのインゴットが得られている⁽⁷⁾。

(3) オーバーフロー法

図7に示すようにロール上に薄く铸込んで一気にストリップを得る方法である。タンディッシュに満たされた溶湯をチルロール上にオーバーフローさせる方法⁽⁸⁾などがある。

図7 オーバーフロー法概念図。

オーバーフロー法により 100~300 mm 幅で 0.4~0.7 mm の厚さのチタン合金板が得られている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

8. チタン溶解・鑄造の将来展望

(1) 溶解・鑄造の低コスト化

VAR 法に代わる次世代の溶解法の条件は、1 回溶解で済むもの、製品に近い形状、例えばスラブ状のインゴットの鑄造が可能なものである。EBCHR は、この条件に近く電力消費量などの問題が解決されれば、スクラップを主原料としたスラブやビレットの半連続鑄造用として次期溶解法の有力な候補になる。

CCCM も半連続鑄造として実用化に近いが、未だ開発段階であり、大型の溶解は実現していない。

直接薄板を製造するオーバーフロー法も興味ある方法である。成功すればストリップの低コスト化には大いに寄与する。

(2) 高品質チタンの溶解・鑄造

航空機用エンジン部品では、介材物の回避が最大課題である。ハース溶解の他に、ESR の清浄化効果にも期待が寄せられている。ESR で介材物除去に成功すると高品質チタン溶解用としてかなりの位置を占める可能性がある。

低コスト化、高品質化両目的用として21世紀初め迄は、ハース溶解が伸びてゆくとみられている。実際に、最近大型のハース溶解炉、特に EBCHR 炉の設置やその計画が米国および日本で数例続いている。

文 献

- (1) 中山 傑, 玉利 修, 中坪修一, 西村 司: 材料とプロセス, 4(1991), 246.
- (2) R. G. Menzies, C. E. Shamble, D. G. Backman and G. B. Hunter: Electron Beam Melting and Refining State of the Art, (1993), 12.
- (3) 小川久幸: チタニウム・ジルコニウム, 38(1990), No. 1, 45.
- (4) 内田省寿: 三井造船技報, 143(1991), 32.
- (5) A. Choudhury, H. Scholz and N. Ludwig: Titanium 92, (1993), 2331.
- (6) V. N. Radchenko, O. V. Tarlov, A. P. Maksimov, I. N. Dubinsky and S. Yu. Andrienko: Titanium 92, (1993), 2377.
- (7) M. Garnier and P. Paillere: 6th Int. Iron and Steel Cong., (1990), 260.
- (8) T. A. Gasper, L. E. Hackman, M. Aindow and H. L. Fraser: AD Rep. AD-227639, (1990), 1.
- (9) T. A. Gasper, I. M. Skonnik, R. K. Bird and W. D. Brewer: Synth. Process. Light-weight. Met. Mater., (1991), 119.