アルミニウムの溶湯鍛造

松 井 光 次*

1. はじめに

溶湯鍛造法は、鋳型内の溶湯に機械的な圧力を加え、溶湯状態から完全凝固に至るまで高圧力下で成形凝固させる鋳造法である。

このため、高圧鋳造法あるいはスクイズキャストイングとも呼ばれている。

溶湯鍛造法は、鋳造の手法でありながら収縮巣やガス巻込みによる鋳造欠陥のない高品質・高強度の製品が得られることから、自動車部品、二輪車部品、家電部品などへの適用が行われ、近年大いに期待されている加工法である。

また、セラミック成形品やセラミック粒子・繊維を用いた金属基複合材料の製造技術としても注目されている。

ここでは、アルミニウムの溶湯鍛造について述べることにする。

2. 溶湯鍛造法の概要

(1) 溶湯鍛造法の各種

溶湯鍛造法は、基本的に次の3つに大別される。①プランジャー加压凝固法、②直接押込溶湯鍛造法、③間接押込溶湯鍛造法。

(i) プランジャー加压凝固法

プランジャー加压凝固法は、図1(a)に示すように溶湯の上面にパンチによって直接高圧力を加えて、成形、凝固させる。溶湯の全外周は金型に押付けられるため、製品と金型間のエアギャップは発生せず、溶湯は急冷凝固する。凝固時間は重力鋳造に比べて約1/3に短縮される⁽¹⁾。組織は微細化し、収縮巣やガスによるピンホールのない、機械的性質の優れた高品質の製品が得られる。単純形状の厚肉製品に適用さ

図1 溶湯鍛造法の各種。

れる。

本方式の凝固は、鋳物外周全面から凝固が始まり内部に向かって進行するので、圧力が不足すると鋳物内部の最終凝固部に収縮巣が発生する。したがって周囲の凝固層を塑性変形させ、収縮巣の発生を抑えるだけの圧力を凝固完了時まで加え続けることが必要である。

(ii) 直接押込溶湯鍛造法

直接押込溶湯鍛造法は、図1(b)に示すように雄型パンチと金型でキャビティを構成し、雄型パンチの押込みによって成形、凝固させる。注湯量によって底部肉厚が変動するので、定量給湯が必要である。

溶湯はパンチの運動と反対方向に押し上げられ、成形後加圧圧縮される。凝固中および凝固終了直後も塑性変形できる

* 株式会社ユーモールド部長(〒755 宇部市大字藤曲字昭和開作2575-62)
Squeeze Casting of Aluminum Alloy; Mitsuji Matsui(U-MOLD, Ube)
Keywords: squeeze casting
1994年7月28日受理

圧力が加えられているので、溶湯の冷却速度は大きく、高品質で耐圧性の良い製品が得られる。カップ状製品の製造に適している。

(iii) 間接押込溶湯鍛造法

間接押込溶湯鍛造法は、図1(c)に示すように別個に設けたキャビティに溶湯を押込む方法で、湯道を太く、短くして溶湯を低速で連続した流れとしてキャビティに充てんし、加圧凝固させる。溶湯の移動が大きく、パンチとキャビティとの間に距離があるので適正な加圧鋳込条件を設定することが重要である。本法は、小物部品の多数個取りに適している。

(2) 加圧下の凝固現象

(i) 冷却速度

プランジャー加圧凝固法によって成形した場合の冷却曲線の一例を示す。図2⁽²⁾の鋳造法案および金型寸法により、Al-8%Si合金を高圧力下で凝固させた時の冷却曲線を図3に示す。図3⁽²⁾に示すように加圧下凝固においては、溶湯の全外周が金型に押付けられた状態で凝固が進行して鋳物と金型間の熱伝達が良くなり、重力鋳造に比べて冷却速度は著しく速くなっている。この凝固時間をChvorinov則($t=K(V/S)^2$)で整理すると、図4⁽²⁾となりその比例定数は高圧材 212 ks/m²、重力材 421 ks/m²、素材径が同じなら高圧材の凝固時間は重力材の約1/2である。また、加圧力 39.2 MPa における鋳物・金型間の熱伝達率は、重力鋳造のその4倍にも達する⁽²⁾。

(ii) 凝固組織⁽³⁾

一例として、Al-5%Si合金を用いて、直径50 mm、高さ115 mmの円筒状鋳物を高圧力下で凝固させた時の凝固組織を図5に示す。図5⁽³⁾に示すように、重力鋳造での組織は全面等軸晶であるが、98 MPaの加圧ではインゴットのほぼ中心にまで達する柱状晶が生成している。294 MPaでは外周部から生成した柱状晶は短かく、中央部に粗大な等軸晶域が形成されている。588 MPaで加圧すると外周部をわずかに残して、ほとんど全面に細かい等軸晶が生成している。

図6⁽³⁾は、重力鋳造および加圧力 98 MPaでのインゴット

図2 鋳造法案および金型寸法⁽²⁾。

図3 冷却曲線⁽²⁾。

図4 (体積/表面積)の2乗と凝固時間の関係⁽²⁾。

の外周部、中心部およびその中間の位置でのマイクロ組織を示している。重力鋳造でのデンドライトは太く、ずんぐりしている。一方加圧下で凝固した場合は、細長いデンドライトが生長し、主軸に対して二次の枝は極端に短かく、デンドライト・セルは微細である。そして加圧下では、マクロ組織で観察されるように、中心部に近い柱状晶のデンドライト間隙に帯状の共晶域が存在している。また、中心には柱状晶上直角

図5 マクロ組織と加圧力(Al-5%Si 合金)($\times 3/5 \times 3/4$)⁽³⁾.

図6 ミクロ組織と加圧力(Al-5%Si 合金)($\times 50 \times 4/5$)⁽³⁾.

に著しくけい素濃度が高い棒状の偏析帯が認められる。加圧によって共晶のけい素は極端に微細化する。

加圧下で凝固すると柱状晶が生成しやすいのは、加圧によって溶湯と金型が密着し、その結果熱伝達が良好となり溶湯内に大きな温度勾配が発生するためである。また、等軸晶が生成するのは、加圧によって融点が増し、かつ急速に冷却されるため、凝固が進行している固液界面の前面に組成的過冷が生じ、液相中に新たに核が発生するためである。

マクロおよびミクロ組織において観察されるように、加圧下で凝固すると、低融点組成である共晶は最終凝固部に濃化し、著しい正偏析を生じる。この異常偏析は機械的性質を低下させるため、その防止について十分考慮しておく必要がある。

(3) 機械的性質

溶湯鍛造材は、引張強さ、伸びなどの機械的性質が他の鋳

造法から得られたものより著しく向上する。機械的性質の向上は、加圧力が増加するに伴って増加する傾向がある。

例えば、図7⁽⁴⁾に示すようにAl-Cu合金においては、引張強さは1.5～2倍、伸びは2～2.5倍、衝撃値は2～3倍となる。この加圧効果は特に凝固温度範囲の広い合金、鋳造割れの発生しやすい合金などに対して効果が著しい。現在実用に広く使用されている鋳造合金の溶湯鍛造材と重力鋳造材との機械的性質の比較を図8⁽⁵⁾に示す。溶湯鍛造材の機械的性質は、他の鋳造法のそれと比べて最高の水準にある。

3. 溶湯鍛造法の現状

最近の溶湯鍛造法による製品開発は、溶湯鍛造装置の開発とともに自動車部品を中心に大きな伸びを示しつつある。

ここでは代表的なスクイズキャスティングマシンとその製品例について述べる。

図7 加圧力と機械的性質との関係⁽⁴⁾.

図8 溶湯鍛造材と重力鋳造材の機械的性質の比較⁽⁵⁾.

(1) スクイズキャストマシン

スクイズキャストマシンは、溶湯を金型キャビティに射出し高圧をかける射出装置と、その高圧に抵抗して金型を保持する型締装置から成っている。

図9は自動車用アルミホイールの製造用に開発されたマシンで、新しい加圧方式(図10)が採用されている。このマシンは、堅射出装置と型締力1800トンの堅型締装置(金型が上下方向に動く)から構成されている。最大の特徴は、堅方向の射出装置で、この射出装置を傾転自在とし、外でスリーブに注湯し、次にスリーブと金型とドッキングさせて射出加圧するところにある。この機構を用いると、注湯後射出開始までの時間を短縮できる。鋳造サイクルは約120sと短く、既にこのマシン10数台により、月産10万個の溶湯鍛造アルミホイールが生産されている。

図11は中小物部品の生産に使用されているマシンである。加圧方式を図12に示す。このマシンは、前述と同様の傾転堅射出装置と従来のダイカストマシンに多用されている横型締装置(金型が水平方向に動く)から成っている。これは堅型ス

図9 堅型締スクイズキャストマシン。

クイズキャストの高品質性と横型ダイカストの高生産性の両立をねらったところに特徴がある。

いずれのマシンも動作には油圧が使用されている。

(2) 実用製品例

(i) 自動車用アルミホイール

自動車用のホイールには、今だスチールホイールが多く使用されているが、バネ下荷重の低減は自動車の運動性能(操縦安定性, 制動性, 乗り心地など)を大きく向上させるので、スポーツカーや高級車の一部では軽いアルミホイールが100%装着されるようになってきた。スクイズキャストで生産されているアルミホイールを図13に示す。年間120万個生産されている。

1. 注湯中

2. 注射出シリンダーの傾転位置よりの復帰

3. スリーブホルダーの上昇、スリーブの下金型へのドッキング完了

4. プランジャーチップの上昇と溶湯の金型内への射出

図10 加圧方式.

アルミホイールの製法には、他に重力鑄造法(GC)、低圧鑄造法(LP)、鍛造法(FG)などがある。これらの製法による製品とスクイズキャストイング(SC)による製品の機械的性

図11 横型締スクイズキャストイングマシン.

質を図14に示す。スクイズキャストイングの製品品質は、他の鑄造法のものよりもっとも優れており、重力鑄造品と比べると引張強さで1.3倍、伸びで2.5倍程度の改善がなされている。

(ii) ナックルステアリングとリヤアクスルハウジング

これら(図15⁽⁶⁾、16⁽⁶⁾)は、自動車のサスペンションに使用されている部品で、図17⁽⁶⁾に示す箇所に搭載されている。従来はダクタイル鑄鉄で造られていたが、足回り性能の改善のため、アルミ化による軽量化を図ったものである。従来製品に比べ、約50%の軽量化を実現した(表1⁽⁶⁾)。

以上は強度部品に使用された例である。

(iii) アンチロックブレーキシステム(ABS)ハウジング

これは油圧部品に使用された例である。

ABSは、自動車の制動能力を向上させるシステムとして普及してきており、装着率は約15%である。自動車の安全性に対する要求の高まりとともに、その装着率は今後増加することが予想される。

このシステムの油圧をコントロールするABSハウジング(図18⁽⁶⁾)は、本体内部に複雑な油圧回路を有しており、40

図12 加圧方式.

図13 スクイズキャストによるアルミホイール。

図16 リヤアクスルハウジング⁽⁶⁾。

図14 各種製法による機械的性質の比較。

図17 足回り部品車両搭載位置⁽⁶⁾。

表1 同一足回り部品の材質別質量比較⁽⁶⁾。

材 質	比剛性 ($E^{1/3}/\rho$)	製品質量 (kg/個)	軽量化率 (%)
ダクタイル鋳鉄	3.5	5.2	—
ア ル ミ	7.1	2.4	54

4. 今後の課題

溶湯鍛造法は、高品質高強度鋳物の製造技術として期待されており、今後その拡大が予想されるが、確かな技術として大きく花開くには次のような課題の解決が必要である。

(1) 加圧装置、加圧方式の開発

各種装置、加圧方式が開発され、製品への適用が行われているが、さらに、圧力制御、加圧速度制御、局部加圧機構などをもつ加圧装置、加圧方式の開発が必要である。また、加圧装置に付随して酸化物の巻込みのない注湯装置、定量給湯装置が要求されている。

(2) 金型寿命の延長

金型材料としては従来より熱間ダイス鋼が多く使用されているが、金型表面は過酷な急熱急冷の繰返しを受けるため、ヒートチェックが発生しやすく金型寿命が短い。

図15 ナックルステアリング⁽⁶⁾。

MPa と非常に高い油圧が作用する。このため、油漏れに対して信頼性の高いアルミ押出材で造られていたが、材料費と機械加工費が高いという欠点がある。この欠点をスクイズキャストで克服し、約15%のコスト低減と約20%の軽量化を達成した。図19⁽⁶⁾に車両搭載位置を示す。

以上に溶湯鍛造法について述べてきた。ここで溶湯鍛造法の特徴を総括すると表2のごとくなる。

(a) 断面

(b) 外観

図18 ABSハウジング⁽⁶⁾.

図19 ABSハウジング車両搭載位置⁽⁶⁾.

金型寿命はコスト面に大きな影響を与えるので、セラミックを含めた新しい型材、金型の表面処理、金型方案、金型構造、金型温度コントロールシステム、離型剤およびその塗布方法の開発など金型寿命の延長を図る必要がある。

5. 結 言

溶湯鍛造法は、高品質高強度鋳物の製造技術としてその適用範囲を拡大しつつあり、また、複合材料の製造技術としても注目されている。他の鋳造法では難しい製品への適用および高付価化なども含め、さらに発展していくと予想される。

文 献

- (1) 鈴木鎮夫：ジャクトニュース，**330**(1984)，7333.
- (2) 藤井則久，藤井 満，森本庄吾，岡田千里：軽金属，**34**(1984)，446.
- (3) 雄谷重夫，松浦佑次，高田孝保，神尾彰彦，小沢英一：軽金属，**18**(1968)，377.
- (4) 野本光輝，時末 光，加藤数良，青木頭一郎：軽金属，**30**(1980)，212.
- (5) 岡田千里，藤井則久，大西修嗣：総合鋳物，**22**(1981)，13.
- (6) 鈴木 秀，大杉泰夫：型技術，**9**(1994)，44.

表2 溶湯鋳造法とその他鋳造法との比較.

	項 目		溶湯鍛造	ダイカスト	低圧鋳造	重力鋳造
鋳造的特徴	1	ゲート厚	厚	薄	厚	厚
	2	射出速度(mm/s)	30~200	1500~2500		
	3	加圧力(MPa)	50~120	50~100	重力+0.05	重力
	4	凝 固	高圧下で凝固	高速高圧噴射	低圧下で凝固	重力下で凝固
	5	凝 固 速 度	速い	より速い	遅い	遅い
	6	生 産 性	良	優	劣	劣
品質特性	7	ミクロ組織	微細	微細	並	並
	8	機 械 的 性 質	優	ガスボロシィ多い	良	良
	9	熱 処 理 性	可能	困難	可能	可能
	10	溶 接 性	可能	困難	可能	可能
	11	耐 圧 性	優	劣	劣	劣
	12	寸 法 精 度	優	優	劣	劣