

Al-Si 系粉末アルミ合金の製造と

その成形加工に関する研究

学位論文内容の要旨

Al 合金は構造用材料として鋼に次いで多く使われている材料であるが、軽量でかつ加工性に優れている反面、強度、剛性、耐熱性等の機械的性質は鋼に比べると劣り、また熱膨張係数が大きい。精密機械部品等の材料としてはその利用が制約されている。強度、耐熱性、耐摩耗性等の機能特性の改善をはかるためには、Si や Fe、Ni 等の合金元素の添加や熱処理による組織の調整等が有効であることが知られているが、これらの合金元素はいずれも Al に対する固溶度が小さく、凝固速度の遅い従来の溶解鋳造法では粗大晶出物が生成され材料が著しく脆化する。従ってこれらの晶出物を Al 材料の製造過程で微細に維持出来かつマトリックスの固溶強化が達成出来れば、材料の脆化が阻止出来るとともに Al 合金の強度、剛性、耐熱性等の機械的特性は大幅に改善されることが考えられる。これらの観点から、本研究では、以下の目的で研究開発を進めた。

はじめに、エアアトマイズ法による粉末製造と熱間押し出し法による粉末成形をベースとする部品製造技術の研究開発と実用化を行い、強度、耐摩耗性、物理的特性にすぐれた Si 含有量が 17~40% の Al-Si 合金を開発した。しかしながらこれらの技術開発ではコスト面、機能面（特に切り欠き感受性）で未だ十分に市場の要求を満たすものでなく、更なる技術開発としてこれらの状況を踏まえ、粉末の冷却速度の大幅な改善をはかった新しい粉末製造技術（SWAP）の開発と、この粉末を利用した新しい粉末成形加工技術である高速超塑性加工技術の開発により、機械的性質の向上、部品のコスト面、機能面の課題を同時に解決した。本論文はこれらの研究内容をまとめたもので、以下の内容で構成される。

第 1 章では、本研究の背景と目的を述べている。

第 2 章では、エアアトマイズ法による Al-Si 系急冷凝固粉末の製造法と熱間押し出し法による粉末成形加工技術の開発について述べている。急冷凝固粉末は、冷却速度が 10^3 K/s で Si 粒子を分散した粉末を作製できたが、粉末粒径は $10 \sim 500 \mu\text{m}$ の範囲に広がり、使用には粒度調整が必要である。粉末固化は熱間押し出し法を適用し、引張り強度、耐摩耗性、物理的特性に優れた Al-12~40Si 系合金を開発でき、自動車、電機、電子部品として量産実用化を計ったが、同時に切り欠き疲労強度の低下、コスト面での問題を明らかにした。

第 3 章では、エアアトマイズ法に代わる高速回転水流法（SWAP）による超急冷凝固粉末の作製と固化成形した材料の機械的性質を述べている。冷却媒体として回転水流を利用

することにより、 10^5 K/s の超急冷速度を実現でき、含有ガス成分の低減と Si 粒子の微細化、結晶粒組織のより微細化等を実現できた。また固化材料の引張り強度、高温での切り欠き強度も 15% 増加した。また高温で高速超塑性が発現することを見出した。

第 4 章では、高速超塑性利用による経済性の高い部品製造プロセスの構築について述べている。高速超塑性を利用して各種部品加工を行う場合のプロセスの全体コンセプト、目標について検討し、その課題を明らかにしている。

第 5 章では、高速超塑性を発現するためのプリフォーム製造技術の開発について述べている。サブミクロン組織のプリフォーム製造技術として、従来の熱間押し出し法に代わる放電プラズマ焼結 (SPS) を利用し、超塑性発現に最適な条件およびプロセスを検討した。成形性の高いプリフォームを得るための印加電流、加圧力、粉末および型の予備加熱温度を明らかにした。

第 6 章では、高速超塑性の部品加工プロセスの開発と評価について述べている。SWAP 超急冷粉末と SPS によるプリフォーム製造技術をベースとする高速超塑性部品加工技術の条件最適化をはかった。本プロセスによる部品開発並びに疲労強度を中心にした機能評価の結果、切り欠き感受性の大幅な改善ができた。第 7 章は総括である。

最後に本研究は、Al 合金にも拘わらず高速水流を利用し従来のガスアトマイズ法に比べ 2 桁速い冷却速度の微細結晶粒組織の粉末製造に成功した、この結果、急冷凝固粉末の適用粒度の拡大が可能となり、粗い粉末を利用することにより粉末酸素量の低減ができた。この粉末の成形固化材が高速超塑性を発現することを見出し、放電プラズマ焼結でプリフォームを作製することにより、高 Si 含有で高い成形性を有しかつ低酸素含有量の Al-Si 材料が作製できた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 工 藤 昌 行

副 査 教 授 高 橋 英 明

副 査 教 授 黒 川 一 哉

副 査 助 教 授 松 浦 清 隆

学 位 論 文 題 名

Al-Si 系粉末アルミ合金の製造と

その成形加工に関する研究

近年、省エネルギーの観点から、軽量かつ高強度材料創製の要求は高い。アルミ合金は、軽量でかつ加工性に優れているが、強度、剛性、耐熱性等の機械的性質は鋼よりも劣る。また熱膨張係数が大きいため加工後の寸法精度を高めることが難しく、精密機械部品等の材料としてその利用が制約されている。アルミ合金の強度、耐熱性、耐磨耗性等の機能特性の改善をはかるためには、Si、Fe、Ni等の合金元素添加と熱処理による微細析出物の析出等、組織の改善が有効であることは知られている。しかしこれらの合金元素はいずれもAlに対する固溶度が小さく、従来の溶解鑄造法では粗大晶出物が生成されて材料は著しく脆化する。従って凝固過程での晶出ではなく、その後の製造過程で微細析出物として析出させ、その大きさが維持出来ると共にマトリックスの固溶強化も達成出来れば、強度、剛性、耐熱性等の機械的特性は大幅に改善すると考えられる。一方、創製された材料を実用化するためには、従来材料の価格と同等あるいはそれ以下でなければならない。そのためには材料特性が高くかつ経済性に見合うプロセス開発が必要である。これらの観点から本研究は、以下のように進められた。

はじめに、エアアトマイズ法による粉末製造と熱間押し出し法による粉末成形をベースとする部品製造技術の研究開発と実用化を行い、強度、耐磨耗性、物理的特性にすぐれたSi含有量が17～40%のAl-Si合金を開発した。しかしながらこれらの技術開発ではコスト面でまだ十分に市場の要求を満たすものでなく、また機能面、特に切り欠き感受性で問題が残された。従って更なる材料とプロセス技術の開発として、冷却速度の大幅な改善をはかる新しい粉末製造技術の開発と、この粉末の成形加工法を検討している段階で高速超塑性の発現を見出し、それらを組み合わせることにより、機械的性質に優れかつコストを低減でき、さらに欠点であった切り欠き感受性の課題を解決することが出来た。本論文はこれらの研究内容をまとめたもので、以下の内容で構成されている。

第1章は、本研究の背景と目的を述べている。

第2章は、エアアトマイズ法によるAl-Si系急冷凝固粉末の製造法と、これまでのキャニング法よりも簡便な熱間押し出し法による粉末成形加工技術の開発について述べてい

る。10³ K/s で冷却された急凝固粉末には Si 粒子を分散させることができたが、粉末粒径は 10~500 μm の範囲に広がり、使用するためには粉末粒度調整が必要であった。種々の Si 濃度を変えた粉末から熱間押し出し法で作製された成形体のうち、引張り強度、耐摩耗性、物理的特性に優れた Al - 12~40Si 系合金を開発でき、自動車、電機、電子部品として量産実用化を計った。しかし切り欠き疲労強度が低下する、コスト面ではまだ鑄造材、鍛造材より高い等の問題が残された。

第 3 章は、エアアトマイズ法に代わる高速回転水流法 (SWAP 法) による超急凝固粉末の作製と固化成形した材料の機械的性質について述べている。冷却媒体として回転水流を利用することにより、10⁵ K/s の超急冷速度を実現できると共に、大きい粉末粒径まで Si 粒子の微細化および微細結晶粒組織とすることが出来た。その結果、広範囲の粉末粒径を利用することが可能となり、それが成形体の酸素濃度を低減させた。また成形体の引張り強度、高温での切り欠き強度も 15% 増加した。さらに高温で高速超塑性が発現することが見出した。

第 4 章は、高速超塑性利用による経済性の高い部品製造プロセスの構築について述べている。高速超塑性を利用して各種部品加工を行う場合のプロセスの全体コンセプト、目標について検討し、その結果、熱間押し出し法では析出粒子や結晶粒の粗大化により SWAP 法で作製した粉末特性を生かせないことから、高速超塑性を発現させるための新たな加工技術の開発が必要であることを明らかにした。

第 5 章は、前章を受けて、高速超塑性を発現するためのプリフォーム製造技術の開発について述べている。析出物や結晶粒が微細な組織を有するプリフォームを、従来の熱間押し出し法に代わる放電プラズマ焼結 (SPS) で製造できた。また超塑性発現のための最適な条件としての印加電流、加圧力、粉末サイズおよび型の予備加熱温度を明らかにした。

第 6 章は、高速超塑性の部品加工プロセスの開発と評価について述べている。独立的に行われた SWAP 急冷粉末と SPS によるプリフォーム製造技術を連結させ、高速超塑性部品加工技術の条件最適化を図った。その結果、欠点であった切り欠き感受性を大幅に改善することが出来ると共に、コスト面でも鑄造品と同等の価格まで低減でき、かつ鑄造品、鍛造材よりも優れた機械的特性を有する部品製造が出来た。

第 7 章は総括である。

これを要するに、著者は、高速回転水流による微細組織の Al-Si 合金粉末製造と放電プラズマ焼結および新知見の高速超塑性を組み合わせることで実用化出来るまでの材料創製と新プロセスの開発を行ったものであり、非鉄材料学、粉末冶金工学に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。