受賞記念講演

急冷凝固粉末アルミニウム合金の開発

武田 義信^{☆1}, 明智 清明^{☆2}, 藤原 敏男^{☆2}^{☆1} 住友電気工業株式会社伊丹研究所無機材料研究部, 〒664 伊丹市昆陽北1-1-1.^{☆2} 住友電気工業株式会社焼結製品事業部, 〒664 伊丹市昆陽北1-1-1.

Developments of Rapidly Solidified Aluminum Alloys

Yoshinobu Takeda^{☆1}, Kiyoaki Akechi^{☆2} and Toshio Fujiwara^{☆2}^{☆1} Itami Research Laboratories, Inorganic Materials Research Department, Sumitomo Electric Industries, Ltd.,
1-1-1 Koyakita, Itami 664. ^{☆2} Powder Metal Products Division, Sumitomo Electric Industries Ltd.,
1-1-1 Koyakita, Itami 664.

Received March 5, 1996

SYNOPSIS

Rapidly solidified powder metallurgical aluminum alloys for automobile and home appliance industries were developed. Rapid solidification made it possible to refine microstructures and to expand the range of alloy composition. Al-Si-TM(Transition Metal) alloys have higher strength, higher Young's modulus, lower CTE(Coefficient of Thermal Expansion) and better machinability than those of conventional aluminum alloys.

The powder was consolidated into NNS(Near Net Shape) either by CIP-hot extrusion or by compact-hot forging process. The new extrusion process eliminates expensive encapsulating and scalping processes, hot pressing and/or hot forging. The new direct powder forging process gets rid of surface layer on particles which blocks sintering. The parts made of the alloys have been commercially manufactured and used as key components of air conditioners and motorcycle engines.

KEY WORDS

Rapid Solidification, Al-Si alloy, Powder Extrusion, Powder Forging, Mechanical Properties, wear resistance, machinability, hydrogen, Young's Modulus, Thermal Expansion

1 緒言

急冷凝固アルミニウム合金は、急冷凝固によって得られる組織微細化や過飽和固溶等を利用して物理的、機械的特性を改善することを目的に研究開発されてきた。高性能アルミニウム合金のニーズが高い宇宙航空産業用には、高力耐SCCA1-Zn-Co系合金、高比剛性Al-Li系合金、高耐熱Al-Fe系合金などが開発されている。一方自動車産業や家電産業用では主¹⁾に鋳鉄や鋼で設計されている部材をアルミニウムにして軽量化するニーズが最も重要であり、そのためには宇宙航空用とは異なる要求特性を満足する新

しい合金を開発する必要があった。また、急冷凝固アルミニウム粉末合金の製法として知られていた粉末押出法²⁾は、真空加熱脱ガス処理、缶詰処理、缶除去処理などが必要で、経済性の点から問題があり、民生用に採用されるには思い切った新しい製造方法の開発も必要であった。筆者らはコンプレッサ用のベーン、ローター³⁾、スクロール⁴⁾などの部品と、2輪車のシリンドラライナー⁵⁾の急冷凝固アルミニウム粉末合金化に成功した(Photo. 1)。また直接粉末押出法と直接粉末鍛造法、およびそれらによって得られた急冷凝固粉末アルミニウム合金の機械的特性及び物理的特性に

ついて報告する。

Photo. 1
Structural components made of rapidly solidified Al-Si alloys.

2 直接粉末押出法

代表的な急冷凝固アルミニウム合金粉末の固化方法は、次のFig. 1の工程によることが知られていた。

Fig. 1
Processing route of conventional wrought PM aluminum alloys.

この製造方法は、粉末表面に存在する結晶水や水分を除去したのち、押出することで素材を作り、さらにそれを部品形状に鍛造加工し、仕上げ加工するものである。しかし、この方法では脱ガス、ホットプレス、押出、鍛造と幾度も熱間加熱されるため、急冷凝固によって得られた微細組織や準安定相などが損なわれる上、製造コストがかさむ問題点があった。

筆者らの開発した製造方法は、Al-Si系合金に限定した製造方法であるが⁶⁾、熱履歴を最低限にし押出工程でNNS (NEAR NET SHAPE) を付与する以下の方法である。

Fig. 2
Newly developed processing route for Al-Si-TM alloy powder extrusion.

押出機に装入する成形体ビレットを得るには通常の型押し成形では L/D (長さ/直径) 比が大きすぎて均一な密度を有するビレットが得られないが、静水圧を利用するCIPではこれが可能である。また、CIP成形は金型成形の様に潤滑剤を必要としないので、汚染を嫌うアルミニウム合金粉末の成形には適していた。

雰囲気加熱は、従来の真空脱ガスにかわるものである。脱ガスの目的は固化された材料が部品として使用される際に、有害な欠陥を有しないようにすることである。つまり、途中の熱処理や使用時の温度環境でブリストアを発生しないようにすることが目的である。このためには粉末固化の直前に水分や水素を除去することが必要であるが、どの程度除去する必要があるかは、固化後曝される温度環境によって異なる。溶接を施す場合には1 ppm以下の水素含有量まで除去することが必要であるが、熱間固化温度より高温に曝したりすることが想定されない用途の場合には、1 ppm以下にする必要はない。また、残留水素量による機械的性質への影響は、20 ppm以下の場合、殆ど無視できる程度であり、特に疲労強度への影響も認められなかった。

粉末表面の水分や結晶水などの熱分解反応については既に詳しく報告されていたが、雰囲気下での効率的な脱ガス方法については前例がなかった。特に、小さな試験片ではなく、数十kgあるビレットを連続的に加熱して脱ガスする場合についての工業的条件の確立には反応速度と熱伝導の両面からの検討が必要であった。

熱間押出工程は、加熱されたビレットを固化するとともに、目的とする断面形状に成形する最も重要な工程である。アルミニウム合金の押出は極めて一般的な技術であるが、それは溶製展伸アルミニウム合金のすぐれた展伸性を利用したものである。本質的に伸びの

少ない過共晶 Al-Si 合金では容易でなく、さらに急冷凝固で高強度になり変形抵抗も増大している場合には、押出の温度、速度、ダイスの設計など従来のアルミニウム合金の押出技術で用いられて来た条件では困難であった。

粉末の押出工程においては、押出比即ちピレットの断面積と押出材の断面積の比が、押出材の機械的特性を左右するので適切な押出比の設定が必要である。

Fig. 3に機械的性質のおよぼす押出比の影響を示した。一般に押出比が大きいほど粉末には強力なせん断変形が加わるため、強固な粒子間結合がなされる。しかし、高い押出比は、高い押出力を必要とし、ひいては高価で大きな押出機を必要とし、ダイスの寿命も小さくするなど、工業的にはデメリットが多い。従って、必要な機械的特性を満足させる最低条件以上で且つ押出機の能力以内で押出比を設定することになる。

Fig. 3 Effect of extrusion ratio on mechanical properties of Al-17Si-5Fe-2024 PM alloy.

3 直接押出法による粉末合金

実用合金として開発した合金は、いずれも過共晶 Al-Si 合金であり、急冷凝固による初晶 Si の微細化と遷移元素の合金化による分散強化を目的とした合金である。Photo. 2には、Si 晶の大きさの違いを、溶製材と急冷凝固粉末材について示した。

Photo. 2 Silicon crystals in cast A390 alloy and PM extruded Al-25Si alloy.

Si 晶は、数 μm 以下に微細化されることにより、粗大で脆い Si 晶によって阻害されていた機械的特性が改善され、また切削時に工具を摩耗させることも大幅に抑制される。

Fig. 4は Si 量を変化させた場合の機械的特性を、Fig. 5は旋削加工の工具摩耗を調べた結果である。

Fig. 4 Effect of silicon content on tensile properties of PM and cast Al-Si binary alloys.

Fig. 5 Machinability of PM Al-20Si-5Fe alloy.

遷移元素を合金元素として添加することは溶製アルミニウム合金においては、凝固速度が遅いため粗大な金属間化合物を生成するので耐熱性を重視するピストン合金に僅かに使用されていただけで、一般には有害な不純物元素として忌避されていた。しかし、急冷凝固法では金属間化合物が粗大化せず、微細な化合物が

分散強化粒子となって合金の機械的特性を改善することがAl-Si合金においても認められた⁷⁾。また、遷移金属元素の添加は熱膨張係数の低下やヤング率の向上にも効果があり (Fig. 6⁸⁾)、鉄により近い特性を求めるには極めて好都合である。更に、耐摩耗性も著しく改善され、ロータリー式コンプレッサのローターやベーンに採用された。このローターは従来は焼結鋼が使用され、鋼のシャフトに圧入された上、ベーンとハウジングとの摺動摩耗に耐え、ベーンが冷媒を圧縮する際に発生する応力に耐える高い疲労強度が要求されていた。このような要求に応えることができる溶製アルミニウムはなく、急冷凝固Al-17Si-5Fe-2024粉末押出合金が初めて要求を満たすことができた。

Fig. 6 Effect of Fe content on physical and mechanical properties of PM Al-20Si alloy.

急冷凝固粉末にアルミナ粒子や黒鉛粒子を添加して押出することで、エンジンの铸铁シリンダライナーを軽量化代替することも可能になった⁵⁾。铸铁に比べ熱伝導が良く、アルミニウムエンジンヘッドと同種のアルミニウムであるため、切削加工性にも優れるため、高性能2輪車のエンジンに使用されている (Photo. 3)。

4 粉末鍛造

アルミニウム合金粉末の粉末鍛造は、粉末表面の酸化皮膜の存在から困難であるとされていた。それ故粉末押出法が使用されていた。混合粉末の焼結法は古く

Photo. 3 Cylinder liner for motor cycle engine made of Al-Si-Fe-Al₂O₃-Graphite PM extrudate.

から商業化されているが、焼結温度が高く、急冷凝固粉末の焼結には適しておらず、その上合金粉末では酸化膜を破る液相も得難いため、採用することができない。粉末鍛造で急冷凝固アルミニウム合金粉末を固化する試みは、固化したプリフォームを2次鍛造で深加工し、せん断変形を加えることによって可能であることが報告された⁸⁾。この方法は、工程の長さに加え2回熱間加工を必要とする点で、急冷凝固粉末の固化方法としては問題があった。

筆者らは、アルミニウム合金粉末の固化を鉄の粉末鍛造のような単純な工程で実現することを試みた。

Fig. 7 Powder forging process for RS aluminum alloy powder.

この製法と、上記押出法で得られた材料の機械的特性を比較した結果をTable 1.に示す。引張強さだけでなく、伸びにおいても、粉末鍛造材でも粉末押出材と同等以上の機械的特性を有するものが得られるようになった^{9) 10)}。これは、合金成分が易拡散性の合金元素であるSi, Cu, Mgである場合だけでなく、難拡散性の合金元素Fe, Niなどでも実現できている。粉末鍛造材は加熱工程などの熱履歴が短い分、急冷凝固の効果が良く保存され、優れた機械的特性を有している。

Table 1. Mechanical properties of powder extruded materials and powder forged materials prepared from the same powders

ALLOY COMPOSITION	POWDER EXTRUSION			POWDER FORGE		
	U. T. S. MPa	ELONGATION %	HARDNESS HRB	U. T. S. MPa	ELONGATION %	HARDNESS HRB
Al-25Si-2.5Cu-1Mg	470	0.9	87	490	1.3	88
Al-8Fe	300	14.5	52	400	15.3	70

更に、Al-8Fe 2元系の高温強度特性を評価した結果、高温強度特性においても、熱履歴の短い粉末鍛造材は粉末押出材と比較して極めて優れた特性を有していることが明らかとなった(Table 2)。

Table 2. Tensile properties of Al-8Fe PM alloy prepared by powder extrusion and powder forging.

TEMPERATURE	POWDER EXTRUDED	POWDER FORGED
ROOM TEMP.	300MPa	400MPa
473 K	205MPa	330MPa
573 K	152MPa	300MPa

粉末鍛造においては、塑性流動を伴う「鍛造」と、軸方向の圧縮のみの「コイニング」の2種の方法がある。コイニング法は、粉末成形体が鍛造体と相似の形状に成形できなければならず、形状に制約を受ける。一方、塑性流動を伴う鍛造を行うには、被鍛造体そのものが塑性変形に十分耐える延性を有していなければならない。しかし、急冷凝固粉末の粉末鍛造においては、加熱されたプリフォームが未焼結状態であるため、塑性流動によって容易に自由表面で亀裂などの欠陥を生じるなどの問題があった。密閉鍛造であるコイニングでは、鍛造時にプリフォームに基本的に自由表面がなく、表面で引張力が発生しないため、表面欠陥が抑制されていた。この現象を塑性流動を伴う鍛造に利用

するため、多軸プレスによる背圧密閉粉末鍛造法を開発した⁴⁾。Fig. 8にその例を示すが、前・後方押出鍛造において、張出部の創成を差動圧のみで密閉金型中でおこなうため、単純なプリフォームから表面欠陥なしに複雑な形状の鍛造体を得ることができる。しかも、固化特性は初期段階でのコイニングで十分得られているので、塑性流動に依存する鍛造固化では問題があった材料の均質性は解決される。

Fig. 8 Closed die forging using counter pressure.

Fig. 9に、本粉末鍛造法を実用化した全自動一貫製造設備の概略図を示す。粉末成形から、鍛造後の熱処理と超音波自動探傷検査装置までがライン化されている。

Fig. 9 Fully automated powder forging plant for RS aluminum powder product.

4 まとめ

日本の産業の市場ニーズにあった急冷凝固アルミニウム合金粉末による粉末材料とその部品化技術を開発した。その技術開発の経緯をFig. 10にまとめた。

Fig. 10
Spiral innovation of RS powder metallurgical technologies.

市場ニーズを満たす製品を市場が受け入れるコストで製造できる技術を開発し、市場を拡大するには常に開発した技術の限界に挑戦し続けることが不可欠であり、急冷凝固アルミニウム合金の開発はその連続であった。一般市場で使用される急冷凝固アルミニウム合金を世界で最初に実用化した日本でも、まだその市場は極めて限られており重量にして年間2000トン程度の生産であると推定されるにすぎない。鉄と比較して地金価格から差のあるアルミニウムは、粉末材料であろうと溶製材であろうと、鉄鋼や鋳鉄材料から代替することが常にコストとの戦いである。しかし、アルミニウムのリサイクル性のメリットが最近見直されるようになっており、軽量で鉄鋼なみの特性を有する

優れた急冷凝固粉末アルミニウム合金は今後も省資源、省エネルギー、地球環境保護の社会的ニーズに答える粗形材技術として活躍できるものと考えている。

謝辞

本技術開発は、新材料の採用に多大の努力を惜しまれなかったユーザーの方々と、優れた原料粉末の開発に協力された粉末メーカーの方々の存在なしには成しえなかったものであり、ここに心からの感謝の意を表したい。また、困難な技術開発に挑戦し続けた研究員、課員とそれを支えた多くの技術職の方々にも感謝したい。

文献

- 1) W.E. Quest and R.E. Lewis : High Strength Powder Metallurgy Aluminum Alloys, (1982)7.
- 2) G.J. Hildeman, L.C. Labarre, A. Hafeez and L. M. Angers: High Strength Powder Metallurgy Aluminum Alloys II, (1985) 25.
- 3) T. Hayashi, Y. Takeda, K. Akechi and T. Fujiwara: SAE Technical Paper Series, 900407(1990).
- 4) T. Kaji, K. Takeuchi and Y. Takeda: Proceedings of 1993 Powder Metallurgy World Congress : (1993)891.
- 5) E. Koya, Y. Hagiwara, S. Miura, T. Hayashi, T. Fujiwara and M. Onoda: SAE Technical Paper Series, 940847(1994).
- 6) 特公 平1-20215: 高強度耐摩耗性アルミニウム焼結合金の製造方法.
- 7) Y. Takeda, Y. Odani, T. Hayashi, K. Akechi: J. Mater. Eng. 12(1990)311.
- 8) M. Otuski, S. Kakehashi, T. Kohno: Advances in Powder Metallurgy, 2 (1990)345.
- 9) T. Kaji, T. Hayashi and Y. Takeda: Science and Engineering of Light Metals RASELM '91(1991) 709.
- 10) K. Kondoh, T. Kaji, T. Hayashi and Y. Takeda: Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials 1992, 2(1993)339.