研究

焼結鍛造における焼結体の変形過程と密度変化*

渡辺三千雄**, 栗野 洋司**, 団野 敦**
小野田誠次**, 木村 尚**

Michio Watanabe, Yoji Awano, Atsushi Danno, Seiji Onoda and Takashi Kimura:
Deformation and Densification of Porous Preforms in Sinterforging.

In order to clarify deformation and densification behaviors of porous preforms in sinterforging, effects of preform density, forging temperature and forging pressure on the cracking and densification were investigated, using Fe-0.5C powder preforms.

In hot upsetting between two flat dies, there was no significant difference in deformation behavior between powder preforms and wrought steel billets, except that the former showed the tendency to crack at lower strain. Mean density of the sinterforged specimens increased with increasing preform density and forging temperature. Density distribution in the sinterforged specimen was quantitatively obtained by means of X-ray photoanalysis. In case of hot upsetting, the densification of the specimen proceeded from the core where punch pressure was high and also lateral material flow was large. Density distribution was made to be more homogeneous by reducing the cooling effect of the die. In hot repressing, it was observed that the densification proceeded from the upper part of the specimen.

(Received April 18, 1974)

I 緒 言

焼結鍛造は金属加工技術として注目をあびているが、材料特性に比べ焼結材の変形に関する報告は比較的少ない。Bockstiegel¹⁾, Fischmeister²⁾, Kuhn^{3,4)}らによって基本的な特性は一部明らかにされているもののまだ充分とはいえない。したがって焼結鍛造は溶解材鍛造技術を参考にして開発されているのが現状と言える。そこで各種加工様式のうち、最も基礎となる熱間での自由すえ込み(二つの平坦な型間)とコイニング(円柱形密閉コンテナ内)をとりあげ、焼結材の形状および密度変化、加圧力と密度の関係ならびに若干の鍛造条件の影響などを溶解材 S55C と比較検討し、焼結材の変形挙動を実験的に明らかにしようとした。

鍛造による焼結材の変形挙動を把握する上で鍛造過程での試料密度分布を知ることは重要なことである。しかし現状では試料密度分布を定量的に測定する良い方法がなく一般には試料断面マクロ写真法¹⁾と硬さ分布測定による方法²⁾が報告されている。そこで著者らはX線透過写真を用いて試料密度分布の定量測定法を検討し、試料密度分布の面からも焼結材の変形挙動を考察した。

II 実験方法

II-1 プレフォーム

プレフォームは神戸製鋼製噴霧鉄粉アトメル 300M に日本黒鉛製天然黒鉛 ACP を 0.6% 添加混合し、 $30\phi \times 15 \sim 60$ mm の円柱形状に圧縮成形後、脱炭防止のためアルミナ粉末中に埋込み 1100°C で 30 分間普通純度のボンベ水素雰囲気中で焼結して作製した。焼結後のプレフォーム中炭素分析値は 0.53% であった。プレフォーム密度は 5.0, 6.5 g/cm³ の 2 種類とした。プレフォームはいずれの実験点も 3 個ずつ使用した。

II-2 鍛造には 250 t のナックルジョイントプレス(スライドストローク数: 50 c.p.m.)を用いた。鍛造加熱は 700~1100°C で 15~20 分間普通純度のボンベ水素雰囲気中で行った。鍛造金型は自由すえ込みでは 80 mm ϕ 1 対の平面状のものを、コイニングではコンテナ内径 31 mm ϕ のものを使用し、型温の影響を検討する場合に約 200°C まで予熱した以外は特に予熱せずに用いた。型面のアラサはすえ込型表面およびコンテナ内面とも実験前の測定

* 昭和48年10月本協会秋季(金沢)大会にて発表, 昭和49年4月18日受理

** (株)豊田中央研究所, 名古屋市昭和区久方2-12 (〒468)

で約 1.5 S であった。型面潤滑は水溶性コロイダルグラファイトを毎回塗布して行った。鍛造荷重はパンチ背面位置に組込んだ円筒形ロードセル（半導体ひずみゲージ張付）で測定した。ロードセルの校正は油圧式圧縮試験機で 200 t までの荷重をかけて行った。

II-3 密度測定

試料全体の平均密度は水浸法で測定した。試料密度分布は試料薄片を X 線透過撮影したフィルムの黒化度をミクロフォトメータで測定する方法で行った。

III 実験結果

III-1 熱間自由すえ込み

III-1-1 すえ込率の影響

Photo. 1 に $30\phi \times 30\text{ mm}$ のプレフォームを鍛造加熱温度 900°C 、すえ込率 20~80% の間ですえ込んだ試料の側面外観を示した。写真の左端および中央列はそれぞれプ

レフォーム密度の 5.0 g/cm^3 と 6.5 g/cm^3 の焼結材の場合であり、右端列は溶解材 S55C の場合である。写真の右側にはそれぞれのすえ込率を示した。焼結材と溶解材との間でた形変形の形には顕著な差は認められなかったが、焼結材では溶解材にくらべ外周縦割れの発生が著しく $30\phi \times 30\text{ mm}$ のプレフォームは限界すえ込率が 40~53.3% の間にあった。焼結材に発生した外周縦割れは、プレフォーム密度 6.5 g/cm^3 に比べ、 5.0 g/cm^3 のプレフォームではより細かく、数多く発生するという違いがみられたが限界すえ込率には顕著な差はみられなかった。

Fig. 1 に前述実験条件でのすえ込率と試料の横広がり変形量 (D/D_0) および試料平均密度の関係を示した。 D_0 はプレフォームの外径、 D はすえ込み後の試料の最大外径である。焼結材はすえ込率を高くしていくと横広がり変形量 (D/D_0) は増加し溶解材と同傾向の変形をした。 (D/D_0) の値は密度の高いプレフォームの方が大きかったが、いずれも溶解材よりは小さかった。鍛造加熱温度を 700°C から 1100°C まで変えても、またプレフォームの直径と高さの比を 0.5 から 2 まで変えてもこの傾向はほぼ同様に認められた。

試料平均密度はプレフォーム密度が 5.0 g/cm^3 の場合、すえ込率の増加とともにほぼ直線的に上昇したが、プレフォーム密度 6.5 g/cm^3 の場合は限界すえ込率を超えるとほとんど上昇しなくなった。

III-1-2 平均加圧力と試料平均密度との関係

Fig. 2 に前述条件での平均加圧力と試料平均密度との関係を示した。いずれのプレフォームでも平均加圧力を高くしていくと試料平均密度は上昇したが、試料外周に縦割れが生じた後は加圧力を増しても密度上昇は少な

Photo. 1 Side view of upset specimens.
Forging temp.: 900°C
Preform size: $30\phi \times 30\text{ mm}$

Fig. 1 Effect of reduction in height on lateral flow and mean density in upsetting.
Forging temp.: 900°C

Fig. 2 Relation between mean pressure and mean density in upsetting.
Forging temp.: 900°C

った。同一加圧力ですえ込んだ試料の平均密度は密度の高いプレフォームの方が高く、この差は加圧力を増しても縮まらなかった。

III-1-3 鍛造加熱温度の影響

Fig. 3 に $30\phi \times 30$ mm のプレフォームを鍛造加熱温度を変えてすえ込んだ場合の平均加圧力、試料平均密度および横広がり変形量 (D/D_0) の変化を示した。すえ込率は40%一定とした。試料平均密度と横広がり変形量は鍛造加熱温度の影響を受けなかったが、平均加圧力は鍛造加熱温度が高くなると急激に低下した。平均加圧力の低下に及ぼす鍛造加熱温度の影響は溶解材より焼結材の方が、また焼結材ではプレフォーム密度の低い方が影響を受けにくかった。

Fig. 3 Effect of forging temperature on mean pressure, mean density and lateral flow. Reduction in height: 40%

III-2 熱間コイニング

III-2-1 平均加圧力と試料平均密度の関係

Fig. 4 に $30\phi \times 40 \sim 52$ mm と高さを変えたプレフォ

Fig. 4 Relation between mean pressure and mean density in repressing. Forging temp.: 900°C

ームを鍛造加熱温度 900°C でコイニングした場合における平均加圧力と試料平均密度の関係を示した。プレフォームの密度にかかわらず比較的低加圧力で試料平均密度は急激に上昇した。しかし加圧力を増しても試料は理論密度になかなか達しなかった。同一加圧力での試料平均密度は自由すえ込みの場合と同様、プレフォーム密度の高い方が高くなったがこの密度差は自由すえ込みの場合と違って加圧力を増していくとなくなった。

III-2-2 鍛造加熱温度の影響

Fig. 5 に $30\phi \times 34 \sim 40$ mm と高さを変えたプレフォ

Fig. 5 Effect of forging temperature on mean pressure and mean density in repressing.

Fig. 6 Density distribution of powder preforms in hot upsetting and repressing. Forging temp.: 900°C Preform density: 6.5 g/cm³

ームを鍛造加熱温度を変えてコイニングした場合の平均加圧力と試料平均密度との関係を示した。加熱温度は大きく影響を及ぼし、同一加圧力での試料平均密度は鍛造加熱温度が高いほど高くなった。1100°Cと900°Cでは平均加圧力10 t/cm²を加えるといずれも試料平均密度はほぼ理論密度に達したが700°Cでは平均加圧力11 t/cm²を加えても理論密度の99%に達しなかった。

III-3 試料密度分布

III-3-1 鍛造による試料密度分布変化

Fig. 6にIII-1-1とIII-2-1で述べた試料の鍛造過程における密度分布変化をX線透過写真法により測定した結果を示した。自由すえ込みではすえ込率を増していくと試料中央部および斜め方向にのびるせん断変形域の密度は高くなるが、試料上下面および外周部の密度は上昇しにくかった。コイニングでは比較的均一に試料上面側から密度が上昇することがわかった。

III-3-2 プレフォーム冷却防止策の影響

Fig. 7に30φ×30 mmのプレフォームを鍛造加熱温度900°C、すえ込率40%一定で鍛造した場合の試料密度分布に及ぼすプレフォーム冷却防止策の影響を示した。(A) 型予熱をせずにプレフォーム上下面は平坦な場合、(B) 下型のみを200°Cに加熱した場合、(C) プレフォーム下面に3個の小さい突起をつけた場合(下型予熱なし)の密度分布を示した。試料密度分布は(A)にくらべ(B)と(C)は試料下面の低密度域(7.05 g/cm³以下)がみら

Fig. 7 Effect of anti-cooling measures on density distribution of upset specimens.
Forging temp.: 900°C
Preform density: 6.5 g/cm³

れず密度分布はより均一化した。

IV 考察

IV-1 熱間自由すえ込み

本実験で焼結材の限界すえ込率にはプレフォーム密度が顕著な影響を及ぼさなかったが Kuhn ら⁴⁾も同様の結果を報告しており、プレフォーム密度が低いほどプレフォームの延性は小さくなる反面、試料のたる形変形は小さいため試料外周部に生ずる円周方向引張応力が小さくなり、これら二つの影響が相殺されるためであると説明している。しかし Bockstiegel ら¹⁾はプレフォーム密度が低いほど限界すえ込率は高くなると報告しており、密度の低いプレフォームは横広がり変形が起る前に密度がある程度上昇し、横広がり変形が小さくなるためであると説明している。たしかに試料外周部に生じる縦割れは外周部に材料強度より大きな円周方向引張応力が作用したときに発生するものと考えられるが、円周方向引張応力の大きさはたる形変形の程度により決まるものと考えられ、これには型面とプレフォーム間の摩擦係数が大きく影響するので、摩擦係数を一定にして比較しなければならない問題であり今後検討を要する。また焼結材に発生する割れには鍛造により排出されるプレフォーム中の気体も影響を及ぼしているものと考えられる。

同一加圧力で鍛造した際の試料平均密度はプレフォーム密度が高いほど高くなるという現象は、純鉄のプレフォームを用いて型面にテフロンシートを敷き冷間自由すえ込鍛造した Kuhn ら³⁾の実験でもみられ、平均加圧力の増加とともにプレフォーム密度の影響は小さくなると報告している。しかし Fig. 2では加圧力を増加してもプレフォーム密度の影響はほとんど小さくなっていない。この違いは本実験では型面の摩擦係数が大きいためプレフォームはたる形に変形しその結果外周部に縦割れが発生したため試料平均密度が低くなったことが主原因と考えられる。

Fig. 3に示したように同一平均密度を得るための平均加圧力に及ぼす鍛造加熱温度の影響はプレフォーム密度が高いほど著しいので、この点を考慮してプレフォーム密度と鍛造加熱温度を決定する必要があることがわかった。

Fig. 6およびFig. 7に示した自由すえ込試料の密度分布図は Fischmeister ら²⁾が平面ひずみの変形様式で熱間鍛造した試料断面を硬度法で測定した密度分布図と定性的に類似していたが、X線透過写真法により変形過程での試料密度分布がより詳しく明らかとなった。また三木ら⁵⁾が冷間自由すえ込鍛造した溶解材の試料断面を硬度法で測定したひずみ分布図と定性的に類似しているのも興味深い。

Fig. 7 に示したようにプレフォーム表面の冷却を防止することは試料密度分布の均一化に有効であることがわかったが、Bockstiegel ら¹⁾も加工速度を大きくすることによって同じ効果をあげている。これはプレフォーム表面が金型により急冷されると冷却層の変形抵抗が急激に増大し、試料密度分布を不均一にする要因の一つになるためと考えられる。このプレフォーム表面層の変形抵抗が試料密度分布に及ぼす影響については Kuhn ら⁴⁾も型面潤滑の点から検討しており、アルミニウムを熱間鍛造した場合型面潤滑をすることによって試料密度分布はより均一になると報告している。このように焼結鍛造品は表面に低密度層が生じやすいので表面層の密度分布測定は重要なことであるが、著者らの行ったX線透過写真法では約2mmの表面層がX線の干涉作用のため密度が正確に測定できない欠点があるので今後改善する予定である。

IV-2 熱間コイニング

Bockstiegel ら¹⁾は密度6.0~6.8g/cm³のFe-0.3C成分のプレフォームを鍛造加熱温度1100°Cにてコイニングした結果、密度上昇に及ぼすプレフォーム密度の影響は小さいと報告している。一方Fig. 4ではプレフォーム密度の高い方が同一加圧力での試料平均密度は高くなっている。これは著者らの実験の方が鍛造加熱温度は低く、プレフォーム密度差は大きかったことに起因しているものと考えられる。

平均加圧力と試料平均密度の関係については Bockstiegel ら¹⁾が実験を行っているものの、平均加圧力8t/cm²までの結果でそれ以上の平均加圧力と試料平均密度の関係は不明である。本実験で約10t/cm²までの平均加圧力を加えた結果、Fig. 4 に示したようにいずれのプレフォームもほぼ理論密度に達することがわかった。しかし平均加圧力約6t/cm²で試料平均密度は理論密度のほぼ99%に達しており、この程度の密度でよければあまり平均加圧力を高くしなくてもよいことがわかる。したがってコイニング形式の焼結鍛造で理論密度をねらうことは、型負荷の制限もあり、かつプレフォームの重量バラツキを厳しく抑える必要も生じ必ずしも得策ではないと考えられる。なお Kaufman⁶⁾が理論解析をした結果、いかに高圧力を加えても多孔質体の空隙を100%消失させることは不可能であるという結論も参考にすべきと考える。

Fig. 5 によれば平均圧力を約10t/cm²加えた場合の試料平均密度は鍛造加熱温度900°Cと1100°Cでは差がみられない。したがって平均圧力を10t/cm²以上加える場合には金型寿命と熱エネルギーの面から900°Cの方が有利である。また鍛造加熱温度700°Cで理論密度の99%以上の高密度体を得ようとすることは型強度の面から避けた方がよいと考えられる。

Fig. 6 に示したようにコイニングの場合、試料密度がプレフォーム上面側より比較的均一に上昇するのは、自由すえ込みよりコイニングの方が材料の自由度が少なく、静水圧成分やひずみの分布は均一になり、かつ下パンチより上パンチ側の方がプレフォームとコンテナ内壁間で生じる摩擦損失分だけ圧力が高くなるためであろう。

V ま と め

熱間での自由すえ込みとコイニングにおける焼結材の変形挙動を溶解材と比較検討し、あわせて変形過程における試料密度分布の定量測定を行った結果次のことが明らかになった。

1. 自由すえ込みにおける焼結材の横広がり変形は溶解材と定性的に類似していたが、横広がり変形量はプレフォーム密度が低くなるほど小さかった。また焼結材は溶解材より低いすえ込み率で外周に縦割れが発生しやすかった。
2. 自由すえ込みにおいて同一密度を得るための平均加圧力は鍛造加熱温度が高くなると低下したが、プレフォーム密度が高くなるほど影響が大きく、低下しやすかった。
3. 自由すえ込みとコイニングいずれの場合もプレフォーム密度と鍛造加熱温度が高いほど試料平均密度は上りやすかった。密度上昇に及ぼすプレフォーム密度の影響はコイニングより自由すえ込みの方が大きかった。
4. 焼結体の鍛造過程における試料密度分布の変化は、自由すえ込みにおいて試料中央部とせん断変形域の密度が高く、試料上下面と外周部の密度は低くなり幅広い密度分布を示した。一方コイニングでは試料上面側から密度上昇し比較的均一な密度分布となった。
5. プレフォームに突起をつけたり、金型の予熱によって金型によるプレフォームの冷却を少なくすることにより試料密度分布をより均一化する効果が認められた。

おわりに本実験に関し終始ご指導とご助言を賜った豊田中央研究所栗野泰吉代表取締役所長およびご討論いただいた粉末冶金グループの方々に厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1) Bockstiegel and H. Olsen: Powder Met. Third European Powder Met. Symposium Part 1 (1971) 127.
- 2) H. F. Fischmeister, B. Arén and K. E. Easterling: Powder Met., **14** (1971) 144.
- 3) H. A. Kuhn and C. L. Downey: Int. J. Powder Met., **7** (1971) 5.
- 4) C. L. Downey, Jr. and H. A. Kuhn: Technical Report, Drexel University, Dept. Metallurgical Engineering Philadelphia, Penn. U.S.A. May 11, 1972.
- 5) 三木, 玉野, 横川: 第24回塑性加工連合講演会 講演論文集, (1973) 480.
- 6) S. M. Kaufman: Int. J. Powder Met., **8** (1972) 183.