焼結接合による金属粉末と溶製材との組合せ材に関する研究*

田端 強^{*1}, 真崎 才次^{*1}, 北川 啓次^{*2}
松岡 靖和^{*2}, 久恒 貴史^{*2}Composite Preforms Made of Metal Powder
and Solid Metal by Sinter BondingTsuyoshi TABATA, Saiji MASAKI, Keiji KITAGAWA,
Yasukazu MATSUOKA and Takashi HISATSUNE

In the conventional die-compaction of a thin and long pipe-shaped machine component such as a shaft guide, density distribution is nonuniform because of the friction between the powder and the die wall. To overcome this disadvantage, the sinter bonding method of powder and solid metal is applied. Iron powder with additions of copper and carbon powders, and a steel pipe are placed concentrically in a closed-die and are compressed together. The powder is compacted not only axially by the punch but also radially by the solid metal which deforms incompressibly. Bonding between the powder and the solid metal is carried out during the sintering process. The density distribution in the composite preforms is fairly uniform in spite of the thin and long shape. The bond strength is high at the midlength of the composite preforms and low at both of their edges. The dependence of the bond strength on the added powders is explained by the maximum dimensional changes of the powder compact and of the steel which occur during sintering.

Key Words: Powder Metallurgy, Plastic Forming, Sintered Materials, Powder Compaction, Sinter Bonding, Composite Materials

1. 結 言

粉末冶金法によって作られる焼結機械部品は、複雑形状が比較的容易に得られるという特徴のため、現在多くの産業分野で用いられている。しかし金属粉末を金型で圧縮成形するということから、圧縮方向に断面形状が変化するような部品、あるいは横穴を持った部品などは成形できない。そこで一つの部品を2個以上の部分に分けて別々に成形し、これらを組合せて焼結すると同時に接合して一体化する、いわゆる焼結接合法^{(1)~(5)}が開発された。

この焼結接合法を圧粉体と溶製材との接合に利用できれば、圧粉体同士の接合の場合とは別の利点が考えられる。すなわち、必要な部分のみに粉末を用い、その他の部分には溶製材を利用することによって、複雑な形状部品が比較的容易に得られるという粉末冶金法の利点を残しつつ、粉末の使用量を減らすことができる。また長尺あるいは薄肉の溶製材と組合せることによって、通常の粉末成形法では製作困難な形状が可能となる。さらに部分的に材質を変えたり、強度を大き

くしたり、多孔質にすることもできる。以上のような考えから、著者ら⁽⁶⁾⁽⁷⁾は圧粉体と溶製材との焼結接合材に関する研究を行ってきた。そして溶製材の塑性加工と粉末の圧縮成形を同時に行って、組合せ材を作り焼結接合する方法⁽⁶⁾を提案した。

ところで、シャフトのガイドなどに用いられる薄肉で長尺の管状の焼結部品を製作する場合、金型と粉末間の摩擦のために、密度が著しく不均一となる。このような問題の一つの解決法として、上述の方法の応用を考えた。すなわち、円筒形金型内で金属粉末と鋼管(溶製材)を同時に圧縮し、焼結接合させた。このようにして得られた接合材の焼結体部分の密度分布を調べ、さらに焼結体部分と溶製材との間の接合強度について考察を行った。

2. 実験方法

用いた粉末は、噴霧鉄粉に電解銅粉および黒鉛粉を添加混合したものである。銅添加量を0, 3.0, 4.5, 6.0 wt%, 黒鉛添加量を0, 1.0, 2.0 wt%と変化させ、これらを組合せた12種類の粉末を用いた。なお黒鉛添加量が通常の焼結機械部品と比べて多い場合があるのは、シャフトガイド等の部品における潤滑性を考慮したためである。溶製材には、外径15 mm、内径11

* 原稿受付 平成2年5月9日。

^{*1} 正員、大阪工業大学工学部(〒535 大阪市旭区大宮5-16-1)。^{*2} 大阪工業大学大学院。

mm の高压配管用炭素鋼鋼管 STS 35 を長さ $l_0=95$ mm あるいは 140 mm に切断したものをを用いた。管内面の中心線平均粗さは $0.5 \mu\text{m Ra}$ と一定にした。

図 1 に実験方法の概略を示す。内径 15 mm のコンテナと直径 8 mm の心棒との間に溶製材を配置し、粉末を上端より流し込み、リング形ポンチによって、両押しによる圧縮成形を行った。この方法では、粉末と溶製材が同時に圧縮されるため、粉末はポンチによって軸方向に圧密されるだけでなく、溶製材の塑性変形によって半径方向にも圧密される。このように組合せ成形したものを組合せ材と呼ぶことにし、これを焼結接合したものを焼結接合材と呼ぶことにする。潤滑材として、溶製材とコンテナとの間にはスプレシ PTFE を用い、粉末と心棒との間にはステアリン酸亜鉛を用いた。また比較のために、溶製材を用いず、従来どおり粉末のみをコンテナと心棒間に充てんして圧縮成形を行った。これを焼結したものを粉末一体材と呼

図 1 実験方法の概略

図 2 粉末一体材と焼結接合材の断面

ぶことにする。さらに溶製材のみの圧縮も行った。焼結は 1150°C で 30 min 間、アルゴンガス中で行った。

図 2 (a) に粉末一体材、(b)、(c) に焼結接合材の断面を示す。(a) は圧縮ひずみ $\epsilon=0.46$ の場合である。(b) は溶製材の初期長さ $l_0=95$ mm で、 $\epsilon=0.2$ の場合であり、(c) は $l_0=140$ mm、 $\epsilon=0.15$ の場合である。いずれの場合も肉厚に比べて長さが大きいため、粉末と金型間の摩擦によって、ポンチから遠ざかるほど密度は低くなると考えられる。そこで粉末一体材および焼結接合材の焼結体部分の長さ方向の密度分布を調べた。試料としては鉄粉のみからなる一体材と、溶製材と鉄粉のみからなる接合材を用いた。これら試料を中心線を含む平面で切断し、研磨後、焼結体部分の長さ方向にビッカース硬さの分布を調べた。次に均一密度の鉄焼結体によってあらかじめ求めていた硬さと密度の関係図を用いて、硬さ分布を密度分布に換算した。

焼結体部分と溶製材部分との接合強度が長さ方向にどのように変化するかを、各粉末成分の接合材について調べた。図 2 (b) の寸法の接合材を長さ方向に九等分し、それぞれについて図 3 に示すように焼結体部分を溶製材から押し抜いた。このときの最大荷重を接合面の面積で除して、せん断強度を求めた。

焼結体部分と溶製材との接合強度は、焼結中における両者間の拡散に起因する。ゆえに焼結中に圧粉体と溶製材との間に寸法変化の差があると、両者間の接触圧力の高低に影響し、ひいては拡散の良否に影響する。すなわち、接合強度に影響することになる。そこで焼結過程(室温からの加熱、焼結、冷却過程)における圧粉体および溶製材の寸法変化を調べた。圧粉体の相対密度は 0.8、寸法は $5 \times 5.5 \times 15$ mm で、長手方向の寸法変化を測定した。また溶製材に対しても同じ過程で寸法変化を調べた。なお $10^\circ\text{C}/\text{min}$ の昇温速度で加熱し、焼結温度 1150°C で 30 min 間保持し、同じ速度で冷却した。測定雰囲気はアルゴンガスである。

図 3 接合強度の測定

3. 実験結果と考察

図4に、組合せ材、溶製材のみ、粉末のみをコンテナ内で圧縮成形したときのポンチ圧力 p と圧縮ひずみ ϵ との関係の例を示す。ただし p は圧縮成形荷重をポンチの断面積で除した平均圧力である。溶製材のみを変形させたときの p も同様に求めてある。組合せ材のポンチ圧力 p の上昇こう配は、粉末のみの上昇こう配に比べて非常に大きい。これは、溶製材には体積変化がないため、粉末はポンチによって軸方向に圧縮されると同時に、溶製材の塑性変形によって半径方向にも圧縮されるので、同じ圧縮ひずみに対して粉末の密度上昇が急速におこるためである。図中のA点は平均相対密度が0.8に達する点である。実際には密度は不均一な分布を示すが、平均密度は、粉末のタップ密度がわかっているから、計算で求まる。組合せ材の場合、粉末のみの場合に比べて非常に小さい圧縮ひず

図4 ポンチ圧力 p と圧縮ひずみ ϵ との関係

図5 粉末一体材の長さ方向の相対密度 ρ の分布 ($\epsilon=0.46$ の場合)

みでA点に達している。これは、圧縮成形用コンテナの高さが小さくてよいということで、本方法の長所の一つである。

図5に粉末のみを成形し焼結した粉末一体材の長さ方向の相対密度 ρ の分布を示す。端面からの距離 l は図2に示すとおりである。ただし圧縮ひずみ ϵ は0.46である。本実験の場合両押し成形のため、相対密度は両端部で高く、中央部付近で低くなっている。その差の最大値は約0.1に達している。

図6(a)に、初期長さ $l_0=95$ mmの溶製材を用いた焼結接合材の焼結体部分の相対密度 ρ の分布を示す。圧縮ひずみ $\epsilon=0.15$ と0.20のいずれにおいても、図5の結果と比べて、相対密度の不均一さは非常に小さくなっている。 $\epsilon=0.20$ の場合、高密度にもかかわらず相対密度の最大値と最小値の差は0.04以下である。これは、粉末がポンチによって軸方向に圧縮成形されると同時に、溶製材の塑性変形により半径方向に圧縮されるためである。図6(b)に、 $l_0=140$ mmの溶製材を用いた場合で、 $\epsilon=0.15$ のときの結果を示す。この場合、長さ l と肉厚 t の比はさらに大きくなっているが、比較的均一な密度分布が得られている。金属粉末を圧縮成形する場合に、相対密度が均一であることは、焼結後の製品の機械的性質や寸法精度が均一であることに

(a) $l_0=95$ mm, $\epsilon=0.15$ と0.20の場合

(b) $l_0=140$ mm, $\epsilon=0.15$ の場合

図6 焼結接合材の長さ方向の相対密度 ρ の分布

つながるため、重要なことである。ゆえに本成形法の利点の一つとして、高密度で均一な密度分布が得られるということが挙げられる。

図7に、図6(a)に示した焼結接合材の焼結体部分の肉厚 t の分布を示す。両端部を除いて t はほぼ均一な分布である。両端部で t が大きくなっているのは、上下のポンチと溶製材との摩擦のため溶製材の半径方向の変形が拘束されたためである。

図8(a), (b)に焼結体部分と溶製材部分との接合強度 τ の長さ方向の分布の例を示す。銅添加量が増加

すると接合強度は高くなっている。また中央部と端部の接合強度を比較すると端部の接合強度はかなり低くなっているが、これは次のように考えられる。焼結過程における圧粉体と溶製材との寸法変化の違いにより、両者間に軸方向の相対的なすべりを生じる。このすべりは端部で最大となるため、接合がさまたげられ、接合強度が小さくなったと考えられる。しかし、シャフトガイドのような機械部品の場合、部分的に大きなせん断荷重がかかることはないと考えられるため、不均一な接合強度分布があっても問題はないであろう。接合強度を調べた際の破面の様子について少し述べておく。接合強度が高い場合には、焼結体表面がむしり取られ、それが溶製材に付着していた。すなわち焼結体部分がせん断破壊しており、完全な接合が達成されたと考えられる。しかし接合強度が低くなるに従い、焼結体の付着量が少なくなっていた。焼結接合材の接合強度を比較するために、図8および黒鉛添加量が1.0 wt %に対する同様の図より最大接合強度 $\tau_{\max}$ を求めた。結果を図9に示す。銅添加量が0 wt %と3.0

図7 焼結接合材の焼結体部分の肉厚 t の分布

図8 焼結接合材の長さ方向の接合強度 τ の分布

図9 最大接合強度 $\tau_{\max}$ と黒鉛添加量 x との関係

図10 焼結過程における寸法変化曲線の例

図 11 最大寸法変化率 $\delta_{\max}$ と黒鉛添加量 x との関係

wt % の場合には $\tau_{\max}$ は黒鉛添加量 x とともに増加しているが、4.5 wt % と 6.0 wt % では x が 1.0 wt % のとき最も低くなっている。

図 10 に焼結過程における圧粉体と溶製材の寸法変化曲線の例を示す。焼結接合材の焼結体部分と溶製材部分との接合強度は両者間の拡散に帰因しているので、接合強度に最も影響を及ぼすのは、温度が最高で拡散が最も促進される焼結温度保持中の両者の寸法変化率である⁽⁵⁾。そこで図 10 およびその他の粉末成分に対する同様の図より、最大寸法変化率 $\delta_{\max}$ を求めた。結果を図 11 に示す。

図 9 の $\tau_{\max}$ についての結果は、図 11 の $\delta_{\max}$ についての結果と非常に類似している。焼結接合材の焼結体部分と溶製材との間の接合強度は、焼結中の両者の $\delta_{\max}$ の差に依存する。すなわち両者の半径方向の寸法変化を考えると、圧粉体の $\delta_{\max}$ が溶製材の $\delta_{\max}$ よりも高く、またその差が大きいほど、両者間の接触圧力が高く、拡散が促進され、接合強度も高くなる。このように考えると、図 9 の $\tau_{\max}$ の高低に関する結果は、図 11 の各成分の圧粉体の $\delta_{\max}$ と溶製材の $\delta_{\max}$ との大小

関係およびその差から、よく説明できる。

4. 結 言

円筒形金型内で金属粉末と鋼管（溶製材）を同時に圧縮し、焼結接合させることによって、薄肉で長尺の焼結部品を得る方法を試みた。そして焼結体部分の密度分布、焼結体部分と溶製材間の接合強度について検討した。その結果、次のことがわかった。

(1) 本成形法では、小さな圧縮ひずみで高密度化できるため、粉末のみを成形する従来法と比べて、圧縮成形用コンテナの高さを小さくできることがわかった。

(2) 焼結接合材の焼結体部分の長さが肉厚に比べて大きいにもかかわらず、比較的均一な軸方向密度分布が得られた。

(3) 焼結接合材の接合強度は軸方向に不均一であり、中央部が高く、両端で低くなった。

(4) 焼結接合材の接合強度は、黒鉛添加量が同じ場合、銅添加量が増すほど高くなった。また銅添加量が 0 wt % と 3.0 wt % の場合には黒鉛添加量の増加とともに高くなった。しかし銅添加量が 4.5 wt % と 6.0 wt % の場合黒鉛添加量が 1.0 wt % のとき最も低くなった。

(5) 焼結接合材の接合強度は、焼結過程における圧粉体と溶製材との最大寸法変化率の大小関係およびその差に依存した。

文 献

- (1) Schreiner, H., *Powder Metall. Int.*, 7-1 (1975), 21.
- (2) Tabata, T. and Masaki, S., *Int. J. Powder Metall. & Powder Tech.*, 15-3 (1979), 239.
- (3) 大矢根・沖本・佐藤, 粉体および粉末冶金, 26-7 (1979), 254, 259.
- (4) 沖本・佐藤, 粉体および粉末冶金, 29-3 (1982), 84.
- (5) 早坂・浅香, 材料科学, 21-3 (1984), 160.
- (6) 田端・真崎・矢部, 塑性と加工, 27-309 (1986), 1173.
- (7) Tabata, T., Masaki, S., Suzuki, H. and Zhu, B. Q., *Int. J. Powder Metall.*, 25-1 (1989), 37.