

鑄鉄粉の粉末冶金

Powder Metallurgy of cast Iron

埴 健三*・中川 威雄*

Kenzo HANAWA and Takeo NAKAGAWA

鑄鉄の切粉を粉砕して粉末冶金用鉄粉として使う再生利用プロセスにおける留意点を具体的に述べる。鑄鉄粉のもつ利点と欠点を明確にし、利点を生かして使う道しるべとした。

1. 鑄鉄粉の粉末冶金の特徴

鑄鉄は日本で年間約 500 万 t 生産されており、その 10% が切粉となるとしても年間 50 万 t の切粉が生じていることになる。たとえば自動車のシリンダーブロック一つから 5 kg 程度の切粉が生じる。自動車は日本で年間 800 万台近く生産しているので、自動車のシリンダーブロックから生じる切粉だけで 4 万 t の量になる。現在ではこれらの切粉は集められてブリケットマシンで塊めてから、他の原料と一緒に溶解して再利用している。粉末冶金用鉄粉の生産量が現在年間 5 万 t ぐらいであるから自動車のシリンダーブロックから出る切粉の量とほぼ同量である。したがって 50 万 t という量は膨大な量であり、その一部でも粉末冶金用鉄粉として利用されれば、鉄系の粉末冶金分野への影響は大きいものと考えられる。

量的に最も多い切粉は当然鋼の切粉であるが、鋼の切粉は延性が高いため粉砕が容易ではない。焼鈍をかきながら何回も粉砕しても通常の粉末冶金のプロセスに乗せられるような粉末とするには、かなりのコストがかかり切粉を再生利用する利点が失われる。また粗い粉砕粉を原料として鍛造を加えても大きな表層欠陥が残り、また必ずしも母材並の強度は得られない。¹⁾ これらの理由により鋼材切粉の粉末冶金用鉄粉への再生は経済的利点が少なく、一時期世界的に研究されたが実用されていないようである。

鋼の切粉に対し鑄鉄の切粉は粉末にして再生利用するのに次のような利点を持っている。

- ① 鑄鉄中に分散する黒鉛がチップブレイカーの働きをして短小な切粉が得られる。
- ② 切粉の中に黒鉛がさらに細かく分散しているのでそれを粉砕して微粉にすることが容易である。
- ③ 鑄鉄は切削油なしの乾式切削が可能であり、油で

汚れていないきれいな切粉が得られる(ただし、切削油がついている切粉であっても再生利用は可能である)。これらを見れば鋼の切粉再生の場合に問題となった微粉化の困難さは、ほとんど問題とならないことがわかる。鑄鉄粉は切粉を再生した安価な粉末であるということだけでなく、以下に述べる如く普通の鉄粉にはないいくつかのすぐれた性質を持っている。

鑄鉄粉のすぐれた性質として第 1 は、鑄鉄粉の焼結品が母材鑄鉄よりもはるかによい機械的性質を示す点である。母材の FC 15 や FC 20 は引張強さがせいぜい 15 から 20 kgf/mm² 程度である。ところが、その切粉から作られた鑄鉄粉は圧粉・焼結するだけで 40 kgf/mm²、粉末鍛造すれば 90~100 kgf/mm² の引張強さが得られる。鑄鉄は特別な合金元素を使用しなくても、黒鉛を完全に球状化すれば熱処理によって引張強さ 130 kgf/mm² まで可能と言われている。ただし鑄造した場合どうしても偏析が起こるので、安定的に理想的な組織を得るのは困難であるため 130 kgf/mm² を鑄鉄で保証することは今のところ難しいとされている。粉末冶金法により製造すれば組織のコントロールが容易であるから、鑄鉄粉は高強度部品を製造するには適した原料となる。また鑄鉄中に含まれるシリコンは鋼を強化するのに有効な元素であるが粉末冶金用の添加元素としてはいくらか研究^{2),3)}はあるもののほとんど使われていない。鉄粉に純 Si を添加²⁾するにしてもフェロシリコンを添加³⁾するにしても、Si が酸化されやすいことと合金過程が複雑なことなどがあってうまくゆかない。またアトマイズ法などで合金鋼粉を作ろうとしても、アトマイズ時に Si が酸化されて表面の酸化被膜となってしまう、鉄中に固溶して残る Si がほとんどない。⁴⁾ したがって鑄鉄を粉砕した鑄鉄粉は大量生産が可能な唯一のシリコン合金鋼粉とみなすことができる。よって Ni, Mo などの高価な合金元素を含んだ合金鋼粉と鑄鉄粉を比較対抗させることができる。

鑄鉄粉のすぐれた性質の第 2 は、鑄鉄の持っていた耐磨耗性、大きい減衰能などの特性をそのまま生かし、さ

* 東京大学生産技術研究所 第 2 部

らに鑄造法では作ることが不可能なものを粉末冶金法を利用して製造できることである。たとえば鑄鉄の薄板や砥粒を含ませた鑄鉄ポンド砥石、潤滑剤を含ませた自己潤滑性摺動材があげられる。これらは鑄鉄粉がただ単に安価な鉄粉代用粉としてだけでなく、他の方法では作ることができない特別な機能を持った材料を作る原料として使うことを示すものである。

本報では、鑄鉄切粉の粉末冶金による再生プロセス全体を概観する。どのような鑄鉄の切粉が鑄鉄粉の粉末冶金に向いているか、粉碎はどのような方法がよいか、粉碎した鑄鉄粉に加えるべき処理、除炭、成形、焼結、粉末鍛造はどのようにすればよいかなどにつき順を追って述べることとする。

2. 鑄鉄母材と粉末化特性

鑄鉄は含んでいる黒鉛の形状によって一般に次のようにわけられる。

- ① 片状黒鉛鑄鉄
- ② 共晶状黒鉛鑄鉄
- ③ パーミキュラー状黒鉛鑄鉄
- ④ 球状黒鉛鑄鉄

黒鉛の形だけでなくマトリックスがフェライトかパーライトか、それとも両者が混合したものかによっても機械的性質は大きく異なる。片状・共晶・パーミキュラー・球状の順に靱性が向上して伸びが出る。また、フェライト地の中のパーライト地の面積がふえるにしたがって強度は上昇するが伸びは少なくなる。

さて鑄鉄粉の粉末冶金に最も向いた母材はどの鑄鉄か考察してみよう。まず次の3点に注目する必要がある。

- (i) 粉碎しやすい切粉を出す母材かどうか。
- (ii) 粉碎中に母材から分離する黒鉛を除去することによって、粉末中の炭素量を落とすので、黒鉛が母材から分離しやすいかどうか。
- (iii) 切粉の量は十分大量に出ているか。

どの鑄鉄も鋼の切粉に比べれば粉碎は容易であるが、パーミキュラー状黒鉛鑄鉄や球状黒鉛鑄鉄は切粉も大きく、切粉の塑性変形能が大きいので微粉にするのは困難である。さらに粉碎中に激しく加工硬化するので、焼鈍を加えなければ圧粉成形できない粉末になってしまう。それに対し、片状黒鉛鑄鉄と共晶状黒鉛鑄鉄は切粉が短小でもろいので、微粉にするのは容易である。ハンマーミルで一回粉碎するだけで100~200メッシュ程度まで微粉化され、粉末冶金用鉄粉として使える程度の粒度が得られる。

鑄鉄には3~4%程度の炭素が含まれるが、高強度材をめざす場合には、この炭素量は多すぎる。できるだけ簡単な方法で炭素量を下げる必要がある。この除去過程に手間がかかるようだ。鑄鉄粉の粉末冶金のメリットは

半減する。のちに述べる風力分級によって黒鉛粉を除去するのが最も有利であり、この方法で除炭可能な切粉が鑄鉄粉にむいていることになる。共晶状黒鉛は数ミクロンの非常に細かいものなので、粉碎しただけでは母材から分離しにくい。ほとんどの黒鉛が粒子中に残ってしまう。それに対し片状黒鉛の場合には黒鉛に沿って割れることが多いので黒鉛は粒子表面に出て、母材から分離し易い。したがってできるだけ大きい片状黒鉛を含んだ鑄鉄が粉碎もしやすいし、粉碎中に黒鉛が分離するので除炭可能である。粉碎条件が適当な場合には炭素量を1.4%程度まで低下させることができる。球状黒鉛鑄鉄は黒鉛が球状のかたまりで存在するので片状黒鉛よりも母材から脱落ししやすい。したがって微粉にすることさえできれば除炭は容易である。ただし変形能が大きいので微粉にするのは困難である。

一方切粉の量は片状黒鉛鑄鉄が圧倒的に多い。球状黒鉛鑄鉄も国内で年間100万t近く生産されるようになったが、量的にみると鑄鉄管がほとんどである。鑄鉄管はほとんど切削加工なしで使われ、切削加工を加えるときでもその切粉は大き過ぎて微粉化に大きな困難を伴う。パーミキュラー状黒鉛鑄鉄は将来増えると言われているが、現時点での生産量はそう多くない。マトリックスと比較するとフェライト地とパーライト地とではパーライト地の方が粉碎が容易である。ただし、この差は球状黒鉛鑄鉄の場合には顕著であるが、片状黒鉛鑄鉄ではフェライト地でも微粉砕が可能である。またフェライト地ならば、鑄鉄中の炭素はすべて黒鉛で存在するわけであるから、母材から分離する除炭可能な量がふえる。パーライト地の場合にはパーライト中のセメントタイトとして存在する炭素があるので、黒鉛の分離によって炭素量を低下させる下限が0.7%C程度と高くなる。したがって粉碎が容易な範囲内でフェライト地の方が除炭に有利となる。

以上を総合すると、片状黒鉛鑄鉄、規格ではFC15、FC20の切粉が鑄鉄粉の原料として適しているといえる。最もありふれたFC材の切粉が数ある鑄鉄の中でも最も鑄鉄粉原料に向いている。鑄鉄粉の粉末冶金が意味するのは、このような鑄鉄のくずから、数々の高級な材料を作ることができる点であり、このことは再生利用という観点から見ると極めて重要である。

3. 鑄鉄切粉の粉碎法

切粉の粉碎方法は鑄鉄粉の特性を決定づけるので粉碎法の選択は極めて重要である。同じ切粉であっても粉碎方法が違えば鑄鉄粉はまったく違う性質を示す。ただ微粉にすれば良いというのではなく、粉碎した粉末が粉末冶金に適しているかどうかを良く吟味する必要がある。

江口⁵⁾は市販品のハンマーミルとボールミル、振動ミ

ルを使って鑄鉄切粉の粉碎特性と粉碎方法と粉砕粉の成形性を比較している。粒度分布はどの粉碎法を用いても -28+80 メッシュで、面圧 8.5 t/cm² で成形した場合の圧粉体密度も 6.1-6.2 g/cm³ で粉碎方法によって大差はない。しかし圧粉体強度は Fig.1 に示すように粉碎方法によって劇的な変化をしている。振動ミルの場合を見ると、粉砕時間が少し長くなるとほとんど成形不可能の粉末となる。ボールミルとハンマーミルは良好のようだがボールミルでは粉砕に要する時間が非常に長くなるので、切粉の再生利用には適さない。したがってハンマーミルが最も良い粉碎方法としている。

著者らはハンマーミルで各種鑄鉄の切粉を粉砕し、次の結果を得た。まず母材の組織によって粉砕のしやすさは大きく異なる。大まかにいえば、片状黒鉛鑄鉄や共晶状黒鉛鑄鉄の切粉は粉砕が容易で、スクリーンのないハンマーミルで一回粉砕するだけで -60+150 メッシュまで粉砕された。パーミキュラー状黒鉛鑄鉄や球状黒鉛鑄鉄の切粉はスクリーンを目の細かいものを使えば、微粉化は可能であるが、ハンマーミルのハンマーの消耗が激しく、さらに熱を持ってスクリーンをいためてしまうことが多い。効率的に粉砕できるのはせいぜい +60 メッシュまでである。またハンマーミルによる鑄鉄粉は流動度が約 30 s/50 g 程度で一般の鉄粉とほぼ同じである。成形性は鉄粉に比べてかなり劣るが面圧 6-8 t/cm² で加圧すれば手で扱える程度の圧粉体となる。この鑄鉄粉に適当な焼鈍を加えると成形性は飛躍的に上昇し、一般の鉄粉より多少悪い程度となる。振動ミルを使うとどのような鑄鉄であっても時間に多少の差はあるものの微粉化は可能である。ただし粉末は鱗片状で流動性がきわめて悪いものとなる。さらに圧粉成形は可能であるが成形体強度は非常に弱い。また、振動ミルで粉砕した鑄鉄粉

は風力分級では除炭がほとんどできない。また粉砕した粉末の色がハンマーミルの場合に比べて黒いが、これは粉砕中に母材から分離した黒鉛を粉末表面へすり付けてしまうためと思われる。以上を総合すると生産性・鑄鉄粉の性質からみてハンマーミルが鑄鉄切粉の粉砕に最も適していると言える。

4. 鑄鉄粉の焼鈍とその必要性

適当な鑄鉄切粉と粉碎法を選択すれば、粉砕後なんらの後処理なしに粉末冶金用鑄鉄粉として使用できる。しかし、場合によって鑄鉄粉の焼鈍は良質な鑄鉄粉を製造する上で極めて有効である。

鑄鉄は切削油なしの乾式切削も可能なので、切削油で汚れていない切粉を入手するのは容易である。しかし量的には切削油で汚染された鑄鉄切粉の方が多い。この切粉を再生するには切粉に付着した油などの汚れをどう取り除くかが問題となる。油がついたまま成形・焼結すると、焼結中に油類は焼却されるが、焼結品の強度はあまり強くない。トリクレンなどの揮発性有機溶媒で洗って油をとっても、やはり焼結品の強度は乾式切削切粉に比べて劣る。またトリクレンなどで粉末を大量に洗うのは洗浄液の後処理などの第 2 次的問題が発生する。

一方、ハンマーミルで粉砕した場合には、他の方法で粉砕したのに比べて成形性が良い粉末が得られるが、それでも一般の鉄粉と比べるとかなり悪い。面圧 4 t/cm² で成形して、ラトラー試験で圧粉体の摩耗試験をすると完全に粉化するのに 3 分しかかからない。特に球状黒鉛鑄鉄の切粉を粉砕した鑄鉄粉は 8 t/cm² 以上かけないと成形しない場合もある。したがって粉砕した鑄鉄粉の成形性をある程度向上させることも必要である。

切削油などの汚れを取り除き、成形性を向上させるこ

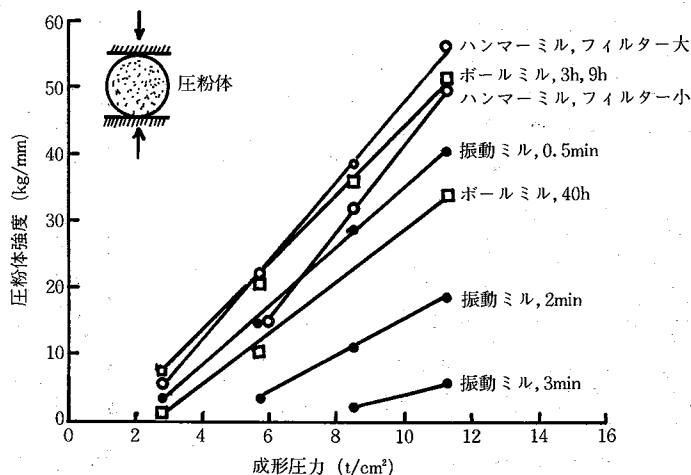


Fig.1 各種粉碎方法と圧粉体強度

とは、粉碎した鑄鉄粉を乾燥水素気流中で焼鈍することによってできる。粉末の性質は焼鈍温度に非常に敏感である。400°Cぐらゐから効果があらわれ、700°Cで最高の効果を示す。最適の焼鈍は700°C-30 minである。800°C以上にしてもこれ以上効果は上がらず、950°C以上だと逆効果となる。重要なことはこの焼鈍が成形性を改良するだけでなく、焼結後の強さにまで決定的に影響することである。おそらく粉末鍛造を加え、再焼結をした製品にまで鑄鉄粉を焼鈍したかどうかが大きく影響する。特に切削油がついているような切粉を用いるときには特に重要である。焼鈍していない鑄鉄粉を8t/cm²で成形して、1140°C-30 min 焼結しても10kgf/mm²程度の引張強さだったものが、700°C-30 min 焼鈍すると同じ成形・焼結で35kgf/mm²の引張強さが得られている例もある。また、焼鈍中に脱炭してやろうなどと欲ばって湿水素中で焼鈍することは絶対にさけるべきである。水素の純度は高ければ高いほど良い。酸素か水分が少しでも入ると鑄鉄粉中のSiが酸化されて表面にSiO₂の酸化被膜を作り焼結不可能の粉末となってしまう。あまり高純度水素を使うのは経済的に釣り合わないので99.9%程度の水素を用い、鑄鉄粉の表面を黒鉛で覆ってやるのが良い。水素中の酸素や水蒸気は黒鉛と反応して、鑄鉄粉の酸化を防ぐことができる。黒鉛の覆い方も工夫が必要である。ガッチリ蓋をしてしまうと、油類の気化を逆に防げてしまうし、粉末で覆うと鑄鉄粉に黒鉛がまぎってしまふ。たぐさんの小さなブロックを上にかぶせてやるのが良いようである。

5. 低炭素鑄鉄粉のための除炭方法

このようにして粉碎された鑄鉄粉は多量の黒鉛粉を含んだまま、あるいは目的によってはさらに黒鉛粉を添加して使用する。しかし安定した高強度を得るためには鑄鉄粉の炭素量を下げる必要がある、またどこまで下げられるかが問題となる。つまり鑄鉄粉の炭素量を1.5%以下まで下げると焼結品中の黒鉛を球状化させることができ、^{9)~10)}非常に強力な材料を得ることができる。新しい特別な工程を追加することなく鑄鉄粉中の炭素量を簡単に下げ得ることが鑄鉄粉を他の原料粉と比較して経済的に有利にしている。

切削時に鑄鉄母材は黒鉛の部分で破断分離しているのが普通である。さらに粉碎工程でも黒鉛の部分で割れるから、黒鉛が粒子の表面に露出することが多い。したがって粒径より大きい黒鉛は基本的に粒子から離脱していると考えられる。このため、たとえばFig.2に示すように下から風を吹き上げ、上から鑄鉄粉を落とすことによって比重の小さい黒鉛粉だけを飛ばし、鑄鉄粉中の炭素量を落とすことができる。実生産では粉碎機か分級機にサイクロン等の集塵機を接続させておけば良い。また風力

分級を使えば工程をふやすことなく炭素量を低下させるのが可能である。このように鑄鉄粉中の炭素量を減らすには切粉の再生利用プロセスの中に風力分級を組み込むことが最も簡単である。ただし、この方法では粉末粒子内部にある黒鉛とパーライト中のセメントタイトに含まれている炭素は除去不可能であるから炭素量をおとせる下限が高い。さらに母材組織と粉碎方法によって除炭可能量が異なってくるので、炭素量をコントロールするのがむずかしい。

以上のような簡単な除炭法でどのくらいまで炭素量を下げられるかは、どれだけの量の黒鉛をマトリックスから分離できるかによって決まる。マトリックスから分離できる黒鉛の量は母材鑄鉄の組織(特に黒鉛の形状)からある程度予想できる。

以下に、母材鑄鉄の組織と炭素量との関係を示す。

片状黒鉛——炭素量1.4%Cまで除炭可能

共晶状黒鉛——炭素量2.5%Cまで除炭可能

球状黒鉛——炭素量1.0%Cまで除炭可能

粒径が0.1~0.2mmとすると黒鉛がそれより大きい片状黒鉛鑄鉄ではマトリックスがフェライト地でもパーライト地でも1.4%程度まで炭素量を落とすことができる。しかし共晶黒鉛のような数 μ mの黒鉛が多く含まれる鑄鉄からの鑄鉄粉は風力分級ではほとんど炭素量を下げられない。片状黒鉛は大きいものほど落ちやすく、片状であっても黒鉛の大きさが数十 μ m程度だとあまり炭素量が下がらない。球状黒鉛鑄鉄の場合には黒鉛が塊状であり、脱落しやすいし、粉碎中に押しつぶされて押し出されるようにして脱落する場合も多いので除炭される黒鉛の量は多い。そのため球状黒鉛鑄鉄では150メッシュ近くまで粉碎すれば風力分級で1.0%まで低下させる

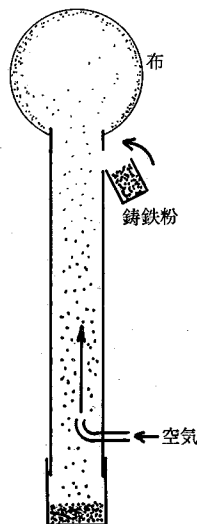


Fig.2 風力除炭操置

ことが可能である。

炭素量を下げうる下限のみに目を向ければ球状黒鉛鑄鉄は一番有望である。しかし同じ化学組成でありながら、球状黒鉛鑄鉄の切粉は延性が高いため片状黒鉛鑄鉄の切粉に比べてきわめて粉碎が困難である。したがって炭素量を下げうるということだけで球状黒鉛鑄鉄の切粉を使うのは賢明ではない。もし共晶状黒鉛のような細かい黒鉛を含まないねずみ鑄鉄だけを集めることができれば風力分級による除炭法により容易に炭素量 1.4% 程度の鑄鉄粉を得ることができる。しかしながら、きわめて多量に存在するシリンダーブロックの切粉など一般のねずみ鑄鉄切粉は風力分級で 1.4% 近くまで炭素量を低下させることができないことが多い。ただし、十分除炭できなく炭素量が 2.0~2.8% 程度であっても引張強さが 80 kgf/mm² 程度の粉末鍛造品を得ることは可能である。また強度をさらに上げたい場合は純鉄粉を添加すれば良いので、¹¹⁾ 風力分級で十分除炭にできないような鑄鉄粉も工夫しだいで使用可能である。

田辺らは、¹²⁾ 同じ方法で再生した鑄鉄粉について水分と雰囲気中の酸素によって鑄鉄粉の表面に“さび”を発生させたのち、真空炉内で加熱してさびに含まれる酸素で脱炭する方法について検討している。炭素量を目標値まで落とすのは可能なようだが、操作は相当めんどうである。さらに酸化物が表面に残ってしまう可能性があり、その場合は粉末冶金用鉄粉として使用不可能な粉末になってしまう。したがって実際に採用するには経済性を含めて問題があろう。また低炭素鋼の脱炭ではよく湿水素処理が行われる。ところが鑄鉄粉を湿水素中で焼鈍すると、C より先に Si が酸化され表面に酸化被膜を作ってしまうことが多いので、湿水素処理は逆効果となり、脱炭工程としては使えない。

6. 分級による粗粉の除去

粉碎した鑄鉄粉をそのまま使うと、粉碎不十分の粗い粉末が混入して欠陥となるので、分級した後に適当な粒度分布を持つように混合するのが良い。焼結の分野では一般に微粉ほど焼結性が良いと信じられているが、鑄鉄粉の場合 60 メッシュより細かければ、焼結品の強度は粒度にあまり依存しない。したがって分級は +60 メッシュを除くだけで、粉碎されたままの粒度分布の鑄鉄粉を用いても強度という意味ではあまり問題はない。ただし、-60+100 メッシュあたりに集中しているようだと表面が荒れてしまうので -200+250, -250+325 メッシュの微粉が 5%~10% 程度混っている方が良い。

7. 成形性と成形方法

成形工程は一般の鉄系粉末冶金の場合とまったく同じで良い。Fig.3 にミシンケースの切粉をハンマーミルで

粉碎した鑄鉄粉を 2~7 t/cm² で成形した場合のラトラ一試験結果を示す。焼鈍していない鑄鉄粉の成形性はかなり悪いが、焼鈍すれば鉄粉より多少劣る程度になっている。成形圧力と成形体の密度の関係を Fig.4 に示す。緻密な鑄鉄の密度は、組織によって変化するので、決めにくい。炭素量が 2% 程度なら約 7.4 g/cm³ である。6 t/cm² で成形して成形体の密度は 6.3 g/cm³ であるから、85% の密度比が得られている。

8. 焼 結

鑄鉄粉を焼結する場合雰囲気ガスの露点をできるだけ下げる必要がある。鉄系の焼結に良く使われる炭化水素の分解ガスでは純度が悪いので、Si が酸化されるため鑄鉄粉は焼結できない。水素ガスかアンモニア分解ガスまたは真空中で焼結できる。純度が良ければ窒素ガスでも大丈夫である。炉心管に酸化物が付いているとそれが還元されて露点を上げたり、炉心管の栓から空気ももっていきたりすることもあるので、炉に送り込むガスだけでなく炉の構造・炉材もすべて含めて焼結雰囲気調整が必要がある。連続式の真空炉も近年できているので、真空中で焼結するのも検討に値すると思われる。

鑄鉄粉を使う場合に一般の鉄粉よりも雰囲気ガスを付

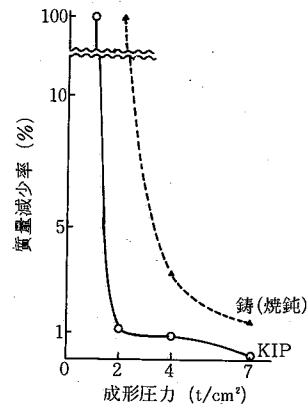


Fig. 3 鑄鉄粉と鉄粉のラトラ一試験結果

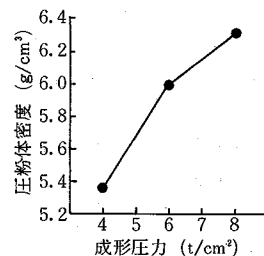


Fig. 4 鑄鉄粉の成形圧力と圧粉体密度の関係

なければならぬのは、鑄鉄中のSiが優先的に酸化されやすいためである。雰囲気中に水分が含まれるとSiの酸化と同時に脱炭も進む。しかし脱炭をねらって露点の高い雰囲気を使うことは絶対にさけるべきである。脱炭が起きているときはSiの酸化も進んでいるので焼結は進んでいないことが多い。

純度のできるだけ高い雰囲気焼結する必要があるにしてもポンベ水素の純度を99.9%から99.99%へ1桁あげると値段は3倍以上になる。したがって99.9%程度の純度の水素でなんとかうまく焼結する必要がある。成形体を黒鉛粉に埋めて焼結すると多少雰囲気の純度が悪くてもきれいに焼結できる。雰囲気中の酸素がまず黒鉛と反応してCOになるためと思われる。鉄粉を黒鉛に埋めると浸炭してしまう可能性があるが、鑄鉄粉の場合には固溶限近くまで炭素がはじめてから存在するので浸炭は気にする必要がない。鑄鉄粉・鉄粉混合粉の成形体を焼結するような場合で浸炭すると困るようなときは、黒鉛粉とアルミナ粉とを適当な割合で混ぜた混合粉に成形体を埋めれば良い。

鑄鉄粉を使ってみたがうまく焼結できなかったという場合、失敗の原因のほとんどが、雰囲気中の水分あるいは高温でそれが分解した酸素による鑄鉄粉の酸化である。それらは黒鉛粉に埋めるというような比較的簡単な対策で防ぐことができる。

鑄鉄粉圧粉体の焼結温度は1100°C-1150°Cの融点直下の温度に限られる。Fig. 5に焼結温度と引張強さの関係を示す。焼結品の引張強さは焼結温度にきわめて強く依存していることがわかる。したがって焼結温度のコントロールはきびしく行う必要がある。

まったく同じ組成の鑄鉄の切粉でも、びびり振動切削法¹³⁾を応用したびびり粉¹⁴⁾をもちいるとFig. 6に示すように950°Cでも十分焼結する。¹⁵⁾したがって切粉を粉碎した鑄鉄粉が焼結温度にきわめて敏感なのは鑄鉄粉の合金組成の影響ではなく、粉末粒子の表面性状の影響であると判断できる。鑄鉄粉の表面にある被膜が強固であるために、それを破るために融点直下の温度が必要であると考えられる。同じ鑄鉄粉でも水素中で700°C-30min焼鈍した粉末は、Fig. 6にも示したように、ずっと温度依存性が少なくなり、1050°Cでも十分焼結可能である。

粉末鍛造を行わず焼結だけで得た最高の引張強さは89 kgf/mm²である。これは1150°Cで20時間焼結した結果である。20時間という長時間は実用上採用するわけにはいかないが、鑄鉄粉という素材を使えば、焼結するだけで90 kgf/mm²程度の引張強さを得ることが可能であることを示している。びびり鑄鉄粉ならばFig. 6に示したように1140°C-30minの焼結で70 kgf/mm²の引張強さが得られている。びびり鑄鉄粉は高価であるので

このまま高強度部品の原料として使うわけにはいかないが、これも鑄鉄粉という素材の可能性を示しているものと解釈できよう。したがって雰囲気に十分注意すればNi, Cu, Moなどの合金を添加して高強度を得ていた従来の鉄系焼結部品を強度的な面で鑄鉄粉の焼結部品でおきかえることは十分可能であると思われる。ただし、鑄鉄粉で高強度を得た場合かなりの寸法収縮が認められ、これが機械部品製作のネックになっていることに注意を要する。

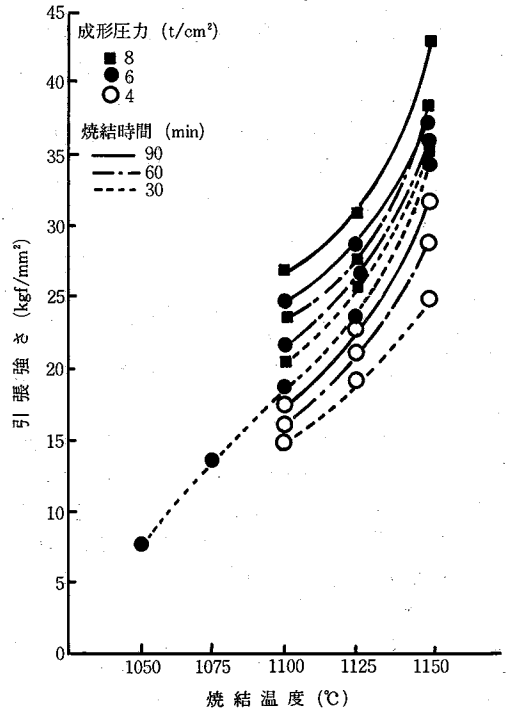


Fig. 5 鑄鉄粉の焼結体の引張強さと焼結温度・時間・成形圧力との関係

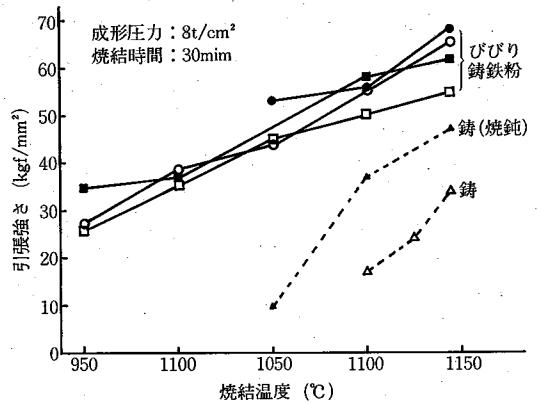


Fig. 6 各種鑄鉄粉の焼結温度と引張強さの関係

9. 粉 末 鍛 造 へ の 適 用

鑄鉄粉は焼結のままでは0.5~1.5%程度の収縮が生じ寸法精度的に問題があるので粉末鍛造用合金鋼粉として使うのが強度面ばかりでなくコスト面でも最も有利である。炭素量が1.4%程度ならば鑄鉄粉焼結品を粉末鍛造・再焼結すれば引張強さが100 kgf/mm²の粉末冶金部品となる。適当な熱処理を加えれば130 kgf/mm²程度まで可能¹⁶⁾である。また炭素量が2%を越えるときでも70~80 kgf/mm²の引張強さが得られる。¹⁷⁾したがって高価な合金元素を含んだ合金鋼粉のかわりに安価な鑄鉄粉を使うことが考えられている。

鍛造温度はできるだけ高い方が機械的性質は良好となる。気孔を完全につぶすためには10~12 t/cm²ぐらいの鍛造圧力が必要である。型の寿命を考慮するなるべく材料を流れさせない圧密方式の方が適しているが、機械的性質の面からみるとある程度材料が流れるように設計した方がよい。上記の引張強さ100 kgf/mm²は焼結品を密閉で押しつけて気孔をつぶすだけで材料の流れはほとんどない場合に得られたものである。

10. 再 焼 結 の 効 果

鑄鉄粉の粉末鍛造品は鍛造中に黒鉛の析出が起こるので黒鉛が鍛造方向と直角の方向にそろって析出しており、鍛造したままだと引張強さはあまり高くなく50~60 kgf/mm²程度にとどまる。したがって鑄鉄粉の粉末鍛造品は鍛造後に再焼結をすることが不可欠である。再焼結とは、鍛造品を焼結温度の1140°Cにもどして30 minから2h焼鈍してやることである。再焼結によって試料がオーステナイト域へ入ると鍛造中に析出した黒鉛はオーステナイト地に再固溶し、黒鉛が存在した跡は気孔となる。再焼結の間にこの気孔は消滅するか、球状化する。冷却過程で黒鉛が析出しても、この球状化した気孔に析出するので、黒鉛の析出は強度の低下をもたらさないことになる。再焼結をせずに焼入れ、焼戻しやオーステンパーなどの熱処理をしても効果は期待できない。

再焼結をすれば空冷するだけで、炭素量が1.4%では100 kgf/mm²、炭素量が2%以上でも70 kgf/mm²の引張強さが得られる。これ以上の強度を望むときはオーステンパーなどの熱処理が必要となる。

11. お わ り に

鑄鉄の切粉を粉砕した鑄鉄粉を得、粉末冶金用鉄粉として再生利用するプロセスを概観した。実際に再生利用してみようと試みる人に役立つように具体的な方法を述べた。

鑄鉄粉の粉末冶金が持つ独特な性質はほとんどが、黒鉛を多量に含むことと鑄鉄粉の表面が鉄粉とはかなり異なる状態にあることに起因していることがわかつて思う。この特徴をよくつかんで扱わないと突然焼結できなくなったり、強度がバラついたり、手におえない材料になってしまう。

これらの現象はかなり複雑で実験的なノウハウだけを単に蓄積していっても対応しきれるものではないように思われる。鑄鉄粉の結合・構造・物性を常に頭に入れてうえて個別の問題に対処すべきであろう。

(1983年12月5日受理)

参 考 文 献

- 1) B. Lengyel, C. L. Tan, G. G. Teh: Powder Met., (1976), 134.
- 2) 柴田治郎, 田辺重則: 粉体・粉末冶金, 19(1972), 43.
- 3) 河野通: 粉体・粉末冶金, 25(1978), 4/25(1978), 28.
- 4) 森岡恭昭, 新田稔, 梶永剛啓, 榎田一男, 伊藤俊治: 粉体・粉末冶金協会秋期大会講演概要集, (1973), 110.
- 5) 江口勝男: TOKIO REVIEW, 19(1976), No. 3, 19.
- 6) 塙健三, 明智清明, 原善四郎, 中川威雄: 日本金属会誌, 44(1980), 943.
- 7) 塙健三, 原善四郎, 明智清明: 日本金属学会誌, 45(1981), 438.
- 8) 塙健三, 明智清明, 原善四郎, 中川威雄: 日本金属会誌, 46(1982), 551.
- 9) 塙健三, 明智清明: 金属, 52(1982), No. 1, 53.
- 10) 張博, 明智清明, 塙健三編著: 球状黒鉛鑄鉄, アグネ(1983, 4)
- 11) 塙健三, 明智清明, 中川威雄: 粉体・粉末冶金, 30(1983), 167.
- 12) 田辺重則, 柴田治郎, 宮野正晴: 粉体・粉末冶金, 29(1982), 217.
- 13) 中川威雄, 鈴木清, 植松哲太郎, 小山浩幸: 精密機械 47(1981), 1399.
- 14) 中川威雄, 鈴木清: 粉体・粉末冶金協会講演概要集, (1982, 11月), 18.
- 15) 塙健三, 鈴木清, 中川威雄: 粉体・粉末冶金協会講演概要集, (1983, 5), 68.
- 16) 塙健三, 戴豊樹, 中川威雄: 粉体・粉末冶金講演概要集, (1983, 11), 80.
- 17) 戴豊樹, 塙健三, 中川威雄: 粉体・粉末冶金講演概要集, (1983, 11), 88.