研究

焼結鉄における空孔組織と機械的強さとの関係について*

紺 田 功**, 八 木 秀 次**, 田 畠 良 和***

Isao Konda, Hidetsugu Yagi, Yoshikazu Tabata: The Relationship between the Pore Structure and the Mechanical Properties of the Sintered Iron Compacts.

Sintered iron compacts have many pores, which seem to reduce the mechanical properties of them. The pore structure is very complex, and its influences on the mechanical properties are also complicated.

Then, authors analyzed the pore structure, particularly size, shape, and distribution, quantitatively, and its effects on the mechanical properties were investigated.

The following conclusions are obtained:

1) The size of pore becomes large in proportion as the porosity increases, and in a case of the same porosity, the pore size becomes large as the particle size of iron powder is large.

The shape of pore becomes irregular in proportion as the porosity increases.

2) Tensile strength decreases with increasing porosity, but in a case of the same porosity, the strength is not much influenced with particle size of iron powder.

On the other hand, fatigue strength varies not only with the porosity but also the particle size. This is considered to be caused by the characteristics of the mechanism of fatigue fracture.

(Received June 7, 1976)

I 結 言

これまで、焼結鉄の疲れ強さについて顕微鏡観察等によって調べ、空孔が焼結鉄の強さを大きく支配していることがわかった。すなわち、焼結鉄は、内部に空孔が存在することによる有効断面積の減少、ならびに内部切欠き効果による応力集中によって、強さが溶解材と比較してかなり低下している。

有効断面積の減少は多孔率によって決定されるが、内部切欠き効果は、各空孔の形状、大きさ、分布等によって決定されると考えられる。しかし、これらの因子を定量的に表わすのは困難であり、とくに形状に関しては、「丸味を帯びた」とか、「不定形な」といった定性的な表現をしてきたが、焼結鉄の空孔について検討するためには、これらのことを定量的に表わす必要がある。

そこで、焼結鉄の空孔組織にそれを試み、さらに得られた結果より、空孔の諸因子と疲れ強さ、および引張り強さとの関係を検討した。

II 方 法

II-1 試料作製

空孔の状態を観察するための試料としては、これまでに行なってきた疲れ強さの実験と対応させるために鉍石

還元鉄粉 NC-100-24 を原料とし、その粒径は 149~105 μ の粗いものと、53 μ の細かいものの 2 種類とし、多孔率 8, 15 および 22%, さらにその中間の 10, 12, 18 および 26% の試料を作製した。なお、成型方法、焼結条件はすべて疲れ試験用の試料作製の場合りと同一であるが、主な条件を記述すると、アンモニア分解ガスふん囲気中、温度 1140°C, 40 min である。

試料表面を鏡面仕上げする際に、空孔周辺がくずれて正確な空孔の顕微鏡写真が得られない恐れがあるので、空孔に試料埋込用ポリエステル樹脂を真空含浸させておいた。このようにして得られた試験の空孔組織を Photo. 1(a), (b) に示す。

II-2 形状値の定義および測定法

1) 形状値の定義

図形はその面積に対する図形周辺の長さの比が大きいほどおうとつの激しい複雑な形状をしているから、面積とその周辺の長さの比である程度形状を表わす²⁾ことができる。

そこで形状値というものを次のように定義する。

$$\text{形状値 } (C) = [\text{面積} / (\text{周囲の長さ})^2]$$

* 昭和51年6月7日受理

** 愛媛大学工学部機械工学教室 〒790 松山市文京町 3

*** 川崎重工業 〒673 神戸市垂水区壻谷町

Photo. 1. Pore structure of sintered iron compacts. (×200)

ここで分母を2乗したのは、形状値を無次元化するためである。

たとえば、円、正方形、および正三角形について形状値を計算すると、

$$\left[\begin{array}{l} \text{円} : C = \pi r^2 / (2\pi r)^2 = 1/4\pi = 0.0796 \\ \text{正方形} : C = l^2 / (4l)^2 = 1/16 = 0.0625 \\ \text{正三角形} : C = (\sqrt{3}/4)l^2 / 9l^2 = \sqrt{3}/36 = 0.0481 \end{array} \right.$$

となる。

しかし、このような値では比較しにくいので、すべての図形のうちで C が最大となる円の形状値 $C=1/4\pi$ に対する各図形の形状値の割合を百分率で表わしたものを C' とする。 C' は一種の球状化係数となる。すなわち、前述の例においては、円： $C'=100\%$ 、正方形： $C'=78.5\%$ 、および正三角形： $C'=60.5\%$ となる。

2) 形状値の測定法

形状値を得るには、空孔の平均面積と平均周囲長が必要である。

(a) 面積測定法

線分法によって面積を求めた。Fig. 1 に示すような図形において間隔 d で走査を行ない、図形との交線の長さ

Fig. 1 Measurement area by lineal analysis.

$L_1, L_2, L_3, \dots$ を測定すると、

$$\begin{aligned} \text{全面積 } (\Phi) &= (L_1 + L_2 + L_3 + \dots)d \\ \text{平均面積 } (\phi) &= \Phi/N \quad (N: \text{図形の数}) \end{aligned}$$

で得られる。

このような作業を容易にするために、写真引伸しの際スリットを通し、Photo. 2 に示すような画像処理を行ない Photo. 2(b) の線の長さを測定するようにした。(実際の引伸しのサイズは、約 $240 \times 180 \text{ mm}$ である。)また走査間隔は、試料面上で約 3μ とした。

(b) 周囲長の測定方法

Poincaréの定理^{3,4)}を用いて周囲長を測定した。すなわち、Fig. 1 において走査線と図形周辺との交点の数を n とし、図形の数 N とすると、図形の平均周囲長(S)は、

$$S = \pi n d / 2N \quad (\text{脚注参照次頁})$$

Photo. 2. Image process.

Additional fig. 1

Additional fig. 2

で与えられる*. n の値は Photo. 2(b) に現われる線の数の2倍の値である.

実際の測定にあたっては, 各試料から5視野を無作為に撮影し, その写真から形状値および平均孔径を測定し, 5視野の平均値を求めた. なお1視野の測定域は約 $300 \times 200 \mu$ である.

測定に際して走査線が1本しか通過しない空孔については, Poincaré の定理が適用できないので除外した.

III 実験結果および考察

III-1 空孔の大きさについて

焼結鉄の内部に存在する空孔の径(等面積円の直径)を Fig. 2 に示す. 平均孔径は鉄粉の粒径が大きいほど大

* Poincaré (ポアンカレ) の定理

平面上の大きさ T の面積の図形の中に全長 L の曲線が含まれているとき, この面積 T の図形上に全長 L の図形を重ね合わせ, その角度および位置をかえてその図形を運動させるとき, 図形と曲線との交点数を n , その図形上のある固定した点を (x, y) , 固定した方向と X 軸とのなす角を θ とすると,

$$\iint_T n dx dy d\theta = 4LA \quad (1)$$

(1) 式において, 交点 n の母平均 (n の期待値) は,

$$E(n) = \frac{\iint_T n dx dy d\theta}{\iint_T dx dy d\theta} = 2LA/\pi T$$

$$\therefore \iint_T dx dy d\theta = 2\pi T$$

したがって, A の不偏推定値 $\hat{A}$ は,

$$\hat{A} = \bar{n}\pi T/2L \quad (2)$$

である.

そこで任意の間隔 d の平行線を使って, Additional fig. 1 のような曲線の平均長さを求めるには, (2)式において $L/T = 1/d$ であるから, (2)式は,

$$\hat{A} = \bar{n}\pi d/2$$

したがって

$$\bar{\lambda} = \hat{A}/N = \bar{n}\pi d/2N$$

ここに $\bar{\lambda}$ は曲線の平均長さ, N は曲線の数である.

同様の方法で, Additional fig. 2 のような図形の周囲の平均長さ $\bar{S}$ は,

$$\bar{S} = \pi n' d/2N$$

ここに n' は, 図形と平行線の交点数である.

Fig. 2 Effect of porosity of sintered iron compacts on the diameter of pore.

きくなっており, また多孔率が増加するに従って, 鉄粉粒径にかかわらず大きくなっている. とくに多孔率が20%以上になると急に孔径が大きくなっている. これは多孔率20%以上になると隣接する空孔がつながってくるためと思われ, Photo. 1(a), (b) を見てもこのことは, はっきりと認められる.

III-2 空孔の分布について

Fig. 3 の(a)および(b)は, 粒径が $149 \sim 105 \mu$ および -53μ , それぞれの多孔率8%および22%の試料について, 空孔の大きさの分布を累積度数分布で示したものである. 粒径 $149 \sim 105 \mu$ 多孔率22%のものでは, 孔径 $10 \sim 13 \mu$ を中心に幅広く分布しており, 中には径が 60μ 近い空孔も存在する. 一方, 粒径 $149 \sim 105 \mu$ 多孔率8%, および粒径 -53μ 多孔率8%, 22%のものは, 比較的空孔径のバラツキが少なく, 粒径 -53μ 多孔率8%のものはとくに大きな空孔もなくかなり均質な組織であること

(a) particle size of powder used: -53μ .

(b) particle size of powder: $149 \sim 105 \mu$.

Fig. 3 Cumulative frequency distribution of diameter of pore.

Fig. 4 Effect of porosity of sintered iron compacts on the shape value.

がわかる。

Ⅲ-3 空孔の形状について

次に、形状値の測定結果を Fig. 4 に示す。粒径によって少し差はあるが、粗粒、細粒いずれの場合も多孔率が増加するに従って形状値は小さくなる、つまりおうとつの激しい複雑な形状となっている。また多孔率12%以下の高密度なものになると急激な形状値の増大が見られ、空孔が平滑な周辺をもつ単純な形状となっていることがわかる。

ところで、粒径 149~105 μ の方が粒径 -53 μ のものより形状値が大きくなっている点について検討してみる。さきほどの空孔径でも述べたように、空孔径は大小さまざまなものが分布しており、粒径 149~105 μ 多孔率22%のような試料では非常にバラツキの大きいことがわかった。すなわち、同一試料の中でも空孔の大きさは種々であり、その形状値もまた種々であると考えられる。そこで空孔の大きさを3段階に分類し、それぞれの大きさごとに形状値を調べた。なお空孔径を分類する場合、ある径の空孔が試料によって大きい空孔に分類されたり、小さい空孔に分類されたりすることになる。そこで空孔径の累積度数分布において、累積度数が0~0.1にあるものを小、0.45~0.55を中、0.9~1.0を大として各試料中の空孔を分類した。Table 1 に得られた結果を示す。多孔率22%のものについてみると、粒径 149~105 μ のものでは、大きい空孔の形状値は11.4%とかなり複雑な形状

Table 1. Shape value of large, middle, and small size pore.

particle size		149~105 μ		-53 μ	
porosity		8%	22%	8%	22%
shape value (%)	L	34.91	11.43	46.02	13.89
	M	52.01	29.01	50.74	18.87
	S	30.67	21.58	26.24	21.23

L: large size pore
M: middle size pore
S: small size pore

B: pore
particle size of powder used: -53 μ
porosity: 8%
Photo. 3. State of pore. ($\times 200$)

となっている。粒径 -53 μ のものでは空孔の形状値は、13.9%と複雑であるが、粒径 149~105 μ の場合と比較すると少し形状値は大きくなっている。しかし、中位の空孔では逆に粒径 -53 μ の方が形状値が小さくなっており、全体を平均した場合には、粒径 -53 μ の方が形状値が小さくなったものと考えられる。多孔率8%の場合も同様のことがいえる。

けっきょく、疲れ強さ等に対して強く影響すると思われる大きな空孔に関しては、粒径の大きい粉末を用いた方が形状も複雑になることがわかる。一方、微細な空孔も比較的形状値が小さい。このような空孔は Photo. 3 の矢印Bに見られるように細長い形状をしており、これは疑似粒界に含まれる空孔である場合が多い。したがって前報⁹⁾で特に中密度以下の焼結鉄になると、このような空孔からき裂が発生、伝ばすることを指摘したが、この種の空孔を定量的に表わすと、やはり形状値が小さいことがわかった。

Ⅲ-4 空孔の大きさ、形状、分布と機械的強さとの関係について

つぎに、以上得られた結果から焼結鉄の空孔組織と機械的強さとの関係について検討する。

Fig. 5 に焼結鉄の引張り強さと多孔率、Fig. 6 に疲れ強さと多孔率との関係⁹⁾を示す。引張り強さは多孔率が減少するにしたがってほぼ直線的に上昇している。また鉄粉粒径の違いによる引張り強さの差はわずかであり、細かい鉄粉を用いたものの方が1~2 kg/mm²程度強いようである。一方、疲れ強さも多孔率が減少するにした

Fig. 5 Effect of porosity of sintered iron compacts on the tensile strength.

Fig. 6 Effect of porosity of sintered iron compacts on the fatigue strength.

がって強度が上昇し、しかも鉄粉粒径によってかなりの差がみられる。また多孔率10%以下になると急激に疲れ強さが上昇している。

これらのことから引張り強さに対しては、空孔は有効断面積の減少という形で強さに影響していると考えられる。当然、空孔による応力集中の影響もあると思われるが、空孔の大きさ、形状、分布等の相違による影響の差異は少ないようである。

一方、疲れ強さに対しては、空孔は有効断面積の減少はもちろん、さらに空孔による応力集中がかなり影響していると考えられる。疲れ破壊の場合、局所的な応力集中があると、その部分で疲れが進行し、き裂が発生それが空孔を結ぶように伝ばし破断にいたるために、空孔による切欠き効果の影響が強く出てくるものと考えられる。このように疲れ強さに対しては切欠き効果の影響が強いので、多孔率すなわち空孔の量ばかりでなく、空孔の大きさ、分布等の影響が、Fig. 6のような鉄粉粒径の違いによる疲れ強さの差異として表われたものと思われる。

前述したように、粗い鉄粉を用いた試料に存在する空孔は、細かい鉄粉を用いた試料の空孔よりも全体に大きく、またとくに形状値の小さい、すなわち形状の複雑な径の大きいものであった。粗い鉄粉を用いた試料の空孔組織は、そのような空孔の散在する不均一な組織であり、細かい鉄粉を用いたものは、比較的均質な組織であった。疲れ強さは、焼結鉄の組織に含まれる比較的大きな空孔の形状値に左右されるから、粗い鉄粉のものは、局所的な応力集中がおこりやすいために、細かい鉄粉のものよりも疲れ強さが低下したものと思われる。

多孔率10%以下の高密度の焼結鉄では、多孔率の減少にしたがって急激に疲れ強さは上昇する。これは Fig. 2 からわかるように、多孔率10%以下では、空孔形状も急

に周辺の滑らかな応力集中の比較的小さい⁶⁾と思われる形状になることもあわせて、疲れ強さが上昇したものと考えられる。

また、焼結鉄のように空孔すなわち応力集中源が多数存在する場合、切欠き効果の干渉⁷⁾が生じ、その結果、切欠き効果が強められたり逆に弱められたりすることも考えられるが、これは空孔の配列などが関係し、今の段階では、はっきりしたことは言えないので今後の課題としたい。

IV 結 論

焼結鉄の空孔組織すなわち空孔の大きさ、形状、分布を定量的に調べ、さらに機械的強さとの関係を検討し、次のようなことがわかった。

1) 空孔の大きさは多孔率が増加するにしたがって大きくなるが、同一多孔率でも粗い鉄粉を用いた方が全体に大きく、分布もバラツキが大となる。

形状は、多孔率の大きいものは尖端部を持った複雑な形状となり、多孔率が減少するにつれて周辺の滑らかな単純な形状となる。

2) 焼結鉄の引張り強さは多孔率が減少するにつれてほぼ直線的に上昇するが、多孔率が同じなら鉄粉粒径が異なっても、すなわち空孔の大きさ等が異なっても引張り強さはあまり変化しない。

一方、疲れ強さは多孔率だけでなく鉄粉粒径によっても変化し、細かい鉄粉を用いた方が疲れ強さが上昇する。これは疲れ破壊のように局所的な応力集中で初期き裂が発生し、これが成長して破断にいたるような場合には、空孔の大きさ、形状、分布等の影響が強く、そのため細かい鉄粉を用いた方が全体に空孔が小さく、均質な組織となるため強さは上昇するものと考えられる。また高密度となると空孔が急に丸味を帯びてくるため、疲れ強さも急激に上昇する。

文 献

- 1) 紺田, 大北: 粉体および粉末冶金, **21** (1974), 38.
- 2) 宮田, 菊地: 鋳物, **45** (1973), 563.
- 3) 宮田, 菊地: 鋳物, **45** (1973), 571.
- 4) 栗田: 積分幾何学, 共立出版, (1956), 24.
- 5) 紺田, 大北: 粉体および粉末冶金, **18** (1972), 304.
- 6) 西田: 応力集中, 森北出版, (1967), 34.
- 7) 瀧戸口ら: 材料力学 (下), 裳華房, (1974), 373.
- 8) 紺田, 大北, 田畠: 粉体および粉末冶金, **22** (1975), 137.