研究速報

樹脂を含浸した鉄系焼結体のリング圧縮試験による摩擦係数について

沖本 邦郎^{☆1}, 小路 和弘^{☆2}^{☆1} 摂南大学, 〒 572-8508 寝屋川市池田中町 17-8.^{☆2} 摂南大学大学院, 〒 572-8508 寝屋川市池田中町 17-8, [(現)アイダエンジニアリング].

Friction Coefficient of Resin Impregnated Sintered Iron by Ring Compression Test

Kunio Okimoto^{☆1} and Kazuhiro Kohji^{☆2}^{☆1} Setsunan University, 17-8 Ikeda-nakamachi, Neyagawa 572-8508, Japan.^{☆2} Setsunan University, 17-8 Ikeda-nakamachi, Neyagawa 572-8508, Japan, [Present Address: Aida Engineering Co.].

Received May 8, 2008

SYNOPSIS

It is well known that the resin impregnation improves the machinability of sintered iron. The generally accepted view of this improvement is that the resin impregnation changes the cutting status of sintered iron from interrupted cutting to continuous cutting. According to other reports, resin impregnation is considered not only to reduce the friction between tool and material, but also to induce the material embrittlement. However, further research is still required to determine the reasons for improved machinability by resin impregnation. In this study, the influence of resin impregnation on the friction coefficient of sintered iron was investigated using ring compression tests. The friction coefficient was decreased by resin impregnation. However, the decrease was small compared to using a commercially available lubricant. Therefore, the reduction of friction by resin impregnation is unlikely to be the main cause for improved machinability.

KEY WORDS

impregnation, coefficient of friction, sintered iron, ring compression, machinability

1 緒 言

国内における焼結機械部品の生産量は粉末冶金製品の約60%を占めており、焼結機械部品の90%以上が自動車部品用として用いられている¹⁾。これは、粉末成形プロセスが複雑形状部品をニヤネットシェイプで製造でき、部品形状によっては他の素形材加工プロセスに比べてコスト低減を図ることができるという特徴によるものである。しかしながら、近年の素形材部品における形状の一層の複雑化と高精度化に伴って、焼結機械部品においても焼結後の後加工として機械(除去)加工が避けられない場合もある。そのため鉄系焼結体においても切削加工性は重要である²⁾。鉄系焼結体の被削性を改善するため一般的には粉末にMnSなどの添加材²⁻⁵⁾を混合する方法があるが、防錆を兼ねて焼結体の開放気孔部に樹脂含浸^{2,5-7)}を行うこともある。

樹脂含浸により被削性が向上する原因として、焼結体の切削状態は断続切削であるが樹脂含浸によって連続切削に変化するという解釈が定説²⁾となっている。また樹脂含浸による工具-被削材間の摩擦摩耗の低減⁶⁾や材料の脆性化⁷⁾などが

原因であるとする説もある。しかし、切削加工性には含浸の有無による切削力、摩擦、切削温度などの変化が複雑に作用していると考えられ、切削加工性が向上する主因に関してはまだ検討の余地があると思われる。そこで、著者らはその主因を解明するために、二次元・三次元切削だけでなく、要因とみなされる事柄を個別に抽出して検討を行ってきた⁸⁾。本報告はその研究の一環として、鉄系焼結体への樹脂含浸による摩擦係数の変化をリング圧縮試験によって調べたもので、摩擦係数の観点からの検討を行った。

2 多孔質体のリング圧縮試験

田端⁹⁾は多孔質(圧縮性材料)円板の軸対称圧縮成形の解析を基にして、多孔質リングの軸対称圧縮における摩擦係数とリング形状との関係を求めている。この多孔質リング圧縮の解析によれば、Fig.1に示すように密度比 ρ をパラメータとして圧縮率 $\Delta H/H_0$ と内直径変化率 $\Delta d/d_0$ との関係から試験片と耐圧盤との間の摩擦係数を求めることができ、荷重測定が不要であるという特徴がある。ここで、 $\Delta H = H_0 - H$, $\Delta d = d_0 - d$

で, H_0 と d_0 は高さ と 内直径 の初期寸法, H と d は変形後の寸法である. 同一の圧縮率 $\Delta H/H_0$ に対して摩擦係数 μ が小さいほど試験片の内直径 d が大きくなり, 逆に μ が大きいほど d が小さくなる.

本研究では鉄系焼結体(以後, 非含浸体と略記)と含浸処理鉄系焼結体(以後, 含浸処理体と略記)のリング圧縮試験を行い, 田端の解析結果を基にして含浸の有無が摩擦係数に及ぼす影響について調べた. ここで, 非含浸体に関しては田端の解析結果がそのまま適用できるが, 含浸処理体にはそのまま適用することは妥当でない. 何故ならば, 圧縮変形(端面拘束圧縮試験)ではFig.2に示すように非含浸体(Non-impregnatedで示した)は密度増加するのに対して, 含浸処理体(Impregnatedで示した)は密度変化がほとんどなく, 近似的に非圧縮性とみなせるからである. また, 田端の解析結果を適用するに際しては, 非含浸体と含浸処理体の変形抵抗に差が無いことが前提となるが, Fig.3にも示すように端面拘束圧縮試験における変形抵抗(公称応力)は非含浸体と含浸処理体ではほぼ同様であった. これらのことを考慮して, 非含浸体には初期密度比 ρ で解析した田端のリング圧縮試験による摩擦係数の式を適用し, 含浸処理体に関しては $\rho \approx 1.0$ (溶解材) のものを適用して摩擦係数を推定した. なお, Fig.2 と Fig.3 の端面拘束圧縮試験は, 凹凸のある圧縮用工具を用いることによって試験片と工具間の摩擦を最大限に大きくした状態での圧縮試験法である.

3 実験方法

3.1 摩擦係数に及ぼす樹脂含浸実験(熱間試験)

実験に用いた鉄系粉末の化学組成はFe-2.0Cu-0.8C-0.3MnXで, これに0.8%のステアリン酸亜鉛が添加されている. 含

Fig.1 Relationship between change in inner diameter and reduction in height in ring compression test.

浸は開放気孔に対して行うものであるので, Fig.4⁸⁾を参考にして密度比が $\rho \approx 0.78$ の焼結体を作製した. ここで, Fig.4は全気孔に対する開放気孔の割合を密度比 ρ との関係で示したもので, ρ が0.80程度までは全気孔に対して開放気孔の占める割合が多いが, それ以上になると急激に減少する. 焼結条件は真空雰囲気中で $1383\text{ K} \times 2.7\text{ ks}$ とした.

Fig.1で示した田端による多孔質体のリング圧縮解析は, 試験片の初期形状が外直径 D_0 : 内直径 d_0 : 高さ $H_0 = 6.0:1.5:1.0$ であるので, この寸法比となるように焼結体試験片を作製した. 具体的には直径11.00 mmの金型を用いて高さ1.83 mmになるように圧縮成形し, 内直径の加工は焼結後に試験片を旋盤に固定して直径2.7 mmのTiNコーティングドリルで穴加工した. 加工後の内直径は平均2.72 mmであった(目標値は2.75 mm). 試験片の高さはマイクロメータで, 内直径は万能投影

Fig.2 Effect of resin impregnation on the sintered density in compression test with grooved dies.

Fig.3 Effect of resin impregnation on the nominal stress-strain curves of sintered iron compact in compression test with grooved dies.

Fig.4 Dependence of ratio of open pore to total pore on the density ratio for P/M SUS316L stainless steel.

機により測定した。含浸用樹脂としてはメタアクリレートを主成分とする熱硬化型樹脂(旧日本ロックタイト(株)レジノール90C, 粘度8cP)を用い, 含浸作業は真空含浸方式で行った。

リング圧縮の試験温度は, 試験片と耐圧盤(SKD11)を393 K ~ 453 K に加熱した状態で行った。負荷は294 kN 油圧式万能試験機を用いて147 kN ~ 245 kN を作用させた。この場合, 含浸処理体は樹脂で耐圧盤をコーティングしていないものとコーティングしたものについて実験したが, 非含浸体に関してはコーティングしていない耐圧盤を用いた実験のみを行った。

3.2 潤滑剤の性能試験 (冷間試験)

3.1の熱間試験で求めた摩擦係数と比較検討するために, 市販の塑性加工用潤滑剤の性能を冷間リング圧縮試験で求めた。この場合, 試験片と耐圧盤に粘性の大きいペースト状ワックス潤滑剤(ジョンソン工業用ワックス No. 122)を塗布したもの, 固体潤滑剤として窒化ホウ素粉末(日本黒鉛工業(株)ルービーエヌ)を用いこれをペースト状ワックス潤滑剤と混合したものを塗布した2種類について調べた。なお, 窒化ホウ素粉末とペースト状ワックス潤滑剤との混合物を用いたのは, 粉末潤滑剤だけでは試験片への付着性に難点があるのでペースト状ワックス潤滑剤と混合してこれを解消し, その一方でペースト状ワックス潤滑剤単体では含浸の有無に伴う試験片気孔部の形態の相違が潤滑剤の閉込め作用に影響を及ぼして本来の摩擦よりも気孔形態の影響が現れることを危惧したためである。

4 実験結果および考察

Fig.5にリング圧縮試験における公称応力と圧縮率 $\Delta H/H_0$ の関係を示す。□印で示した非含浸体の公称応力は, 同一の圧縮率 $\Delta H/H_0$ に対して黒印(▲, ■)で示した含浸処理体よりも大きい。一方, 試験片と工具間の摩擦を最大限に大きくしたFig.3の端面拘束圧縮試験では含浸の有無による公称応力の差は少なく, 強いて言えば, 同一の圧縮率に対しては黒印の含浸ありの方がほんの少し大きい傾向にある。いずれにせよ,

Fig.5 Variation in nominal stress with reduction in height in ring compression test.

Fig.6 Coefficient of friction estimated from relationship between change in inner diameter and reduction in height in ring compression test.

Fig.3において含浸の有無による公称応力の差が少ないのは, 図中に+印で示した含浸用樹脂の変形抵抗が焼結体に比べて極めて小さいために樹脂の影響が現れにくいことによる。このようにFig.3とFig.5の結果を対比することより, Fig.5における□印の含浸処理体の公称応力が黒印の含浸処理体よりも大きいのは摩擦力(摩擦係数)が大きいためであることが分かる。

そこで, 次に摩擦係数をリング圧縮試験の圧縮率 $\Delta H/H_0$ と内径変化率 $\Delta d/d_0$ との関係から求めた具体例をFig.6に示

Table 1 List of coefficient of friction obtained from ring compression test.

Experimental conditions		Impregnated sintered iron	Non-impregnated sintered iron
Temperature	Lubricant		
Hot forming (393K ~ 453K)	No lubricant (coating)	0.13	0.20
	Pressure-dies: resin coating	0.13	
Cold forming	Lubricant for forging (Johnson wax No.122)	0.08	
	Lubricant for forging (Johnson wax No.122+BN powder)	0.07	0.06

す。非含浸体(□)の摩擦係数は $\mu \approx 0.20$ であるが、含浸処理体の摩擦係数は耐圧盤に樹脂をコーティングしない場合(■)とコーティングした場合(▲)の両方において $\mu \approx 0.13$ であり、含浸により摩擦係数が小さくなることが判明した。一方、比較検討のために行った含浸処理体の冷間での摩擦係数の結果を図中で▼印と◆印で示す。ここで▼は耐圧盤にワックス潤滑剤を塗布した場合の摩擦係数で約0.08、◆はワックス潤滑剤に窒化ホウ素粉末の混合物を塗布した場合で摩擦係数 μ は約0.07と推定される。田端は多孔質体のリング圧縮試験における粉末状固体潤滑剤の有効性を指摘しているが、田端の指摘は含浸処理焼結体においてもほぼ同様であることが分かった。

本研究で得られた摩擦係数の測定結果をまとめてTable 1に示す。試験温度 393 K ~ 453 K の場合、非含浸体の摩擦係数は約0.20、含浸処理体は約0.13であった。しかし、市販の塑性加工用潤滑剤を耐圧盤にコーティングすると摩擦係数は含浸の有無によらず0.06~0.08程度となった。このように樹脂含浸による摩擦係数の低下よりも潤滑剤の効果が明らかに大きいことが判明した。円板の軸対称圧縮における平均圧力は試験片高さが低く摩擦係数が大きいほど増大するが⁹⁾、これと同様にリング圧縮においては直径に比べて試験片の高さが低いために加工力に対して摩擦力の占める割合が大きい。しかし、摩擦係数 μ で判断した場合には、本研究を行う前に想定した含浸による μ の低下よりも少なかった。そのため、樹脂含浸による切削工具と被削材の摩擦の低減が、含浸体の切削加工性が顕著に向上する主因であると断定することには疑問があり、それ以外の要因に関しても検討する必要があると考える。

著者らは樹脂含浸鉄系焼結体の切削加工性が向上する主因を究明するための研究の一環として、以前、樹脂含浸による被削材の熱的性質の変化⁸⁾について検討した。切削温度の上昇を抑えるためには被削材の熱拡散率 α と $\lambda \cdot \rho \cdot c$ (λ は熱伝導率、 c は比熱容量、 ρ は密度)が共に大きいことが望ましいが、鉄系焼結体に樹脂を含浸するといずれもやや低下し、樹脂含浸は切削温度の低下に対して効果的ではないことが明らかになっている。

そこで、樹脂含浸による切削性向上の原因として摩擦や熱的性質による影響よりも、むしろ樹脂含浸の有無による切削

機構の相違そのものを考察することが重要であると考えており、この件に関しては別報に委ねたい。

5 結 言

切削加工における工具-被削材間の摩擦は切削加工性に影響を及ぼすことから、樹脂含浸が摩擦係数に及ぼす影響を調べるために含浸処理鉄系焼結体のリング圧縮試験を行った。その結果、含浸によって摩擦係数は低下したが、その低下度合いは市販の潤滑剤を用いたときよりもより相当小さく、樹脂含浸による切削性向上の原因として摩擦係数は主因ではないことが示唆された。

文 献

- 1) T. Sakurai and J. Asami: "5. Powder Metallurgy (in Japanese)", SOKEIZAI, 48(2007)50-55.
- 2) P.A. Christopher, C. Blais, and D. Maden: "Machining & Machinability of PM Components (A Collection of technical literature on Machining and Machinability in Powder Metallurgy)", APMI(2006)48-61.
- 3) P.A. Christopher, C. Blais, and D. Maden: "Machining & Machinability of PM Components (A Collection of technical literature on Machining and Machinability in Powder Metallurgy)", APMI(2006)428-442.
- 4) P.A. Christopher, C. Blais, and D. Maden: "Machining & Machinability of PM Components (A Collection of technical literature on Machining and Machinability in Powder Metallurgy)", APMI(2006)443-448.
- 5) P.A. Christopher, C. Blais, and D. Maden: "Machining & Machinability of PM Components (A Collection of technical literature on Machining and Machinability in Powder Metallurgy)", APMI(2006)62-80.
- 6) T. Ogasawara, K. Otani, K. Maki, and A. Ishibashi: "Effect of Acrylic Resin Impregnation on Machinability of Sintered Alloy Steel for Engine Valve Seat (in Japanese)", Trans. Japan Soc. Mech. Eng., Series C, 63(1997)2872-2877.
- 7) K. Oishi and T. Yasuda: "Machinability of Resin Impregnated Sintered Iron", Proc. 32 Int. MATADOR Conf., (1997)277-282.
- 8) K. Okimoto, K. Hohji, and Y. Isshiki: "Thermal Properties of

- Resin Impregnated Sintered Iron (in Japanese)", J. Japan Soc. Powder Powder Metallurgy, 52(2005)339-343.
- 9) T. Tabata, S. Saiji, and Y. Abe: "A Yield Criterion for Porous Materials and Analyses of Axi-Symmetric Compression of Porous Disks (in Japanese)", J. Japan Soc. Technol. Plasticity, 18(1977)373-380.