高強度焼結鋼の被削性とその改善*

鳴瀧則彦** 山根八洲男** 臼杵 年** 島田兼成*** 武田義信†

Machinability and its Improvement of High Strength Sintered Alloy Steels

Norihiko NARUTAKI, Yasuo YAMANE, Hiroshi USUKI, Kensei SHIMADA and Yoshinobu TAKEDA

The machinability of high strength sintered alloy steel from different powder, partially alloyed and fully alloyed powder, was studied, and improvements of the machinability of the steel with free-machining additives, complex oxide ($2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$) and MnS , were tried. The steel tested had a chemical composition of $\text{Fe}\cdot 4\text{Ni}\cdot 0.5\text{Mo}\cdot 1.5\text{Cu}\cdot 0.5\text{C}$ and a density of 7.2 g/cm^3 . Carbide tool P 10 was used for the tests. The machinability of the steel depended on the powder to be sintered. The steel sintered from partially alloyed powder had a better machinability than that from fully alloyed powder. Chipping, however, was often observed on the cutting edge of the tool in machining the former. Since the chipping, the tool life was very unstable. Furthermore large crater wear and flank wear at the depth of cut were also observed under high cutting speeds. Addition of a complex oxide to the steel made the crater wear smaller, but as for the chipping, the oxide had no effect. While MnS in the steel suppressed the chipping, the flank wear became larger on the contrary. Only simultaneous addition of the oxide and MnS into the steel made chipping, flank wear and crater wear smaller.

Key words: machinability, sintered steel, free-machining additives

1. はじめに

焼結製品、特に機械部品に用いられる焼結品（焼結鉄あるいは焼結鋼）では、そのロット数が非常に大きいことからネットシェイプが原則であるが、ねじや穴あるいは寸法公差等のため、焼結後に機械加工が必要となる場合が多々ある。このため、加工時の被削性が大きな問題となっており、場合によっては後加工の製品コストに占める割合が数十%にも及ぶこともある。

焼結鉄/鋼の被削性に関しては古くから検討^{1)~8)}されているが、同一組成の溶解材に比べ一般的に被削性が劣ると言われている。このため快削化の試みも数多くなされており、 Se や Te ⁹⁾あるいは MnS ¹⁰⁾や BN ¹¹⁾、さらにはガラス等^{12)~14)}を焼結鉄/鋼中に添加し、これらが被削性に与える効果が調査されているが、実用化されているのは MnS の添加のみのようである。

ところでこれらの被削性試験は、焼結品の寸法が小さいこともあり、これまでは主としてHSS工具による加工を想定したドリル加工で行われており、この範囲では MnS の添加は優れた被削性改善効果を示している。しかしながら焼結品の大型化に伴う加工能率の向上を目的とした超硬工具あるいはその他の工具による高速切削の要求に対しては、硫黄快削鋼の超硬工具による高速切削の結果¹⁵⁾から考えて、 MnS の添加は工具摩耗の低減に対して効果があるかどうか疑問である。

また焼結部品に対する小型軽量化の要求から高強度材への移行、さらには機械的特性のばらつきを低減させることを目的として、原料を部分合金粉から完全合金粉へ転換することも指向されており、工具、材料の両方の変化を考慮に入れた焼結鋼の被削性の再検討が必要な時期に来ていると考えられる。

本研究では、部分合金粉および完全合金粉を原料とした高強

度焼結合金鋼の被削性を、超硬工具を用いて比較的高速で切削した場合について明らかにし、さらに部分合金粉を原料とした焼結合金鋼について、摩耗機構の検討からその快削化を試み、 MnS および複合酸化物の添加により快削化を行った。

2. 実験に使用した焼結鋼

表1に実験に使用した焼結合金の概略を示す。実験に使用した部分合金粉は、炭素を除く組成に相当する各金属粉をあらかじめ部分的に拡散接合したものであり、完全合金粉に比べ軟らかく成形が容易であるが、組織的な均一性が劣ると言われている。一方完全合金粉は、炭素を除く金属元素をいったん溶解、合金化した後、粉末化したもので、硬いため成形に難点はあるが組織的な均一性は部分合金に比べ優れている。実験では表中に示した組成に相当する部分合金粉あるいは完全合金粉を混合、所定の密度にプレス成形後、 1250°C 窒素雰囲気中で焼結した。なお、成形密度 7.2 g/cm^3 の材料については 800°C で仮焼結後、再プレス、本焼結を行い所定の密度を得た。なお、表中試料記号のPは部分合金、Fは完全合金を示し、数字はそれぞれ成形密度を表している。また、Mは MnS の添加を、Gは同じくゲレナイト($2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$)の添加を意味している。なおHはゲレナイトを多く添加したことを表している。試料はいずれも、外径80 mm、内径30 mm、厚さ40 mmのり

Table 1 Sintered steels tested ($\text{Fe}\cdot 4\text{Ni}\cdot 0.5\text{Mo}\cdot 1.5\text{Cu}\cdot 0.5\text{C}$)

Mark ^{*1)}	Density g/cm^3	Additives %	Hardness HRB
P 66	6.6	—	64.1
P 72	7.2	—	96.3
F 72	7.2	—	88.7
P 72 M	7.2	0.5MnS	90.7
P 72 G	7.2	0.02Ge. ^{*2)}	94.8
P 72 GH	7.2	0.1Ge.	90.8
P 72 GM	7.2	0.5MnS+0.1Ge.	93.5

^{*1)} P: Partially alloyed powder

F: Fully alloyed powder

^{*2)} Ge.: $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$

* 原稿受付 平成6年7月13日

** 正会員 広島大学工学部 (東広島市鏡山1-4-1)

*** 学生会員 広島大学大学院

† 住友電気工業(株) (伊丹市昆陽北1-1-1)

Fig. 1 Cumulative probabilities of transverse-rupture strength of sintered steels tested

ング状である。

快削添加材として使用した MnS は、焼結鋼用の快削添加材として市販されている Hoeganas 社製（純度 80～85%）を使用した。X 線回折によると MnS 以外に MnO が検出された。被削性の改善を目的とする場合、MnS は焼結鋼に対し通常 0.3～0.5% 程度添加されるが、0.5% の添加で S 量は 0.15%（85%MnS として計算）となり、硫黄快削鋼中の硫黄量（JIS 規格、SUM 42 で 0.08～0.13%）とほぼ同レベルである。

ゲレナイト（表中 Ge.）については組成に相当する各酸化物を混合、コールドプレス後 1500°C 以上に加熱し、半透明になったことを確認後、アルミナボールミルで粉碎、100 メッシュのふるいにかけて使用した。

ゲレナイトの添加量については、添加量 0.02% では 0.008%Ca となり、0.1% 添加では 0.04%Ca となる。これは、混合中のロス等を考慮に入れると、Ca 脱酸鋼中の Ca 量（通常 0.005～0.008% 程度検出される）とほぼ同レベルである。

なお、焼結鋼に添加する快削添加材としては、添加により焼結中および焼結後のいずれにおいても製品に悪影響を及ぼさない（寸法変化や強度低下がない）ことが前提条件となる。図 1 は、実験に用いた主な焼結鋼の抗折強度を示している。抗折力試験片は切削実験に用いた試料から、幅 12 mm、厚さ 8 mm に切りだし、支点間 25 mm の 3 点曲げとした。図より、快削添加材を加えた焼結鋼は P 72 M で若干の強度低下が見られるものの、P 72 GH では標準鋼 P 72 とほぼ同等、P 72 GM ではむしろ強度が増加していることがわかる。

また、部分合金 P 72 と完全合金 F 72 を比較すると、F 72 の方が強度も高く、しかもばらつきも少なくなっており、完全合金の特長が良く表れている。

3. 実験方法および条件

被削性試験は旋盤による乾式長手旋削で、切削速度は 100 および 200 m/min、切込みは 0.5 mm、送りは 0.2 mm/rev とした。実験では試料が 40 mm と短いため試料の中心穴を利用し、4 個重ねて $\phi 80 \times 160$ mm とシンドレルを用いて固定した。

なお、焼結鋼については被削性のばらつきが予想されるため繰り返し実験を行った。実験方法は、同材種の試料を 12～16 個用意し、その中からランダムに 4 個一組として選び出し、それぞれを同一条件で切削し工具摩耗を測定する。測定後、組合せをいったんばらばらにし再度ランダムに組合せを行う。これ

$v=200\text{m/min}$, $d=0.5\text{mm}$, $f=0.2\text{mm/rev}$, $t=1\text{min}$

Fig. 2 Effects of the powder to be sintered on the wear of the carbide tool P 10

を必要回数繰り返した後、得られた摩耗をワイブル確率紙に摩耗の累積確率として整理した。

工具は市販の SNPN 120408 の超硬 P 10 および K 10 を（-5, -6, 5, 6, 15, 15, 0.8）で用いたが、実験を行った範囲では P 10 の方が優れた結果となったため、P 10 の結果のみを示す。

4. 実験結果

4.1 快削添加材を含まない焼結鋼の被削性

図 2 に工具刃先の摩耗状況を示す。同図は F 72 および P 72 を切削した工具について、8～10 回の繰返し中、それぞれ最も摩耗の少なかったものおよび、最も摩耗が大きくなったものを示している。図から明らかなように、完全合金粉を原料とした焼結鋼の切削では、摩耗は比較的均一で目立ったチッピングや境界摩耗は認められず、摩耗量も最小 0.127 mm、最大 0.169 mm と大きなばらつきは見られない。一方、部分合金粉の切削では境界摩耗が顕著に表れ、また逃げ面には多くの場合チッピングが見られた。このため逃げ面の摩耗量も境界摩耗を除くと、8 回の繰返し中、最小が 0.066 mm、最大が 0.210 mm と 3 倍以上の開きがあることが特徴となっている。

図 3 に、境界摩耗を除いた逃げ面の最大摩耗幅の累積確率を示す。なお、同図には比較として P 66 および B 1112（AISI 規格、低炭素硫黄快削鋼、溶解材）の結果も示した。図より、B 1112 が最もばらつきが少なく（傾き $m=30$ ）、次いで F 72 ($m=13$)、P 66 ($m=6.7$) となり、P 72 ($m=2.2$) が最も大きくばらついていた。P 72 は累積確率を表す直線が折れ曲がっているが、傾きの大きな部分はチッピングがほとんど生じなかった場合であり、傾きの小さい部分 ($m=2.2$) はチッピングが生じた場合である。なお、切削時間が 1 min と比較的短時間では

$d=0.5\text{mm}$, $f=0.2\text{mm/rev}$, $t=1\text{min}$

Fig. 3 Cumulative probabilities of flank wear width of carbide tool P 10 after machining sintered steels at a cutting speed of 200 m/min

$d=0.5\text{mm}$, $f=0.2\text{mm/rev}$, $t=2\text{min}$

Fig. 4 Cumulative probabilities of flank wear width of carbide tool P 10 after machining sintered steels at a cutting speed of 100 m/min

あるが、P 72 の切削ではチッピングの発生を抑えることができれば、硫黄快削鋼とそれ程変わらない工具摩耗となる可能性があることが分かる。

図 4 に切削速度 100 m/min で 2 min 切削した場合の摩耗累積確率を示す。100 m/min では F 72 が最も摩耗が大きくなるが、ばらつきは最も少なく、 $m=13$ という傾きは $v=200\text{ m/min}$ の場合と同じ値である。P 66, P 72 については 200 m/min の場合よりも摩耗量、ばらつきとも減少している。なお、P 72 については 200 m/min と同様、直線が折れ曲がる傾向が見られるがチッピングの発生自体は少なくなった。

以上、切削速度 200 m/min, 100 m/min のいずれについても、完全合金粉は部分合金粉に比べ摩耗のばらつきは少ないものの、摩耗量自体は大きくなることが分かる。ところで、図 3 および 4 を比較すると（切削速度は異なるが切削距離は同じ）F 72 については切削速度 100 m/min と 200 m/min で摩耗の累積確率を示す直線がほとんど重なるのに対し、P 66 や P 72 はそれぞれ 200 m/min の方が摩耗が大きくなっている。

4.2 快削焼結鋼の被削性

図 5 に P 72, P 72 M, P 72 GH および P 72 GM を超硬 P 10 種で切削した場合の摩耗形態を示す。摩耗の特徴としては、標

$v=200\text{m/min}$, $d=0.5\text{mm}$, $f=0.2\text{mm/rev}$

Fig. 5 Effects of free-machining additives in sintered steel on the tool wear of carbide tool P 10

準材 P 72 に比べ MnS 添加材 P 72 M では境界摩耗、チッピングのいずれも認められないが、逃げ面の摩耗量はかなり大きい。なお、すくい面摩耗は減少が認められる。ゲレナイトの単独添加材 P 72 GH では境界摩耗とチッピングの発生は P 72 同様認められるものの、すくい面摩耗はかなり少ない。一方、ゲレナイト+MnS の P 72 GM ではチッピングの発生もほとんど見られず、逃げ面の摩耗量も切削時間（他の材料はいずれも 3~7 min であるが、P 72 GM は 14 min）を考えると非常に少なくなっている。またすくい面摩耗もほとんど認められず、鉄とは異なる付着物がかなりの量見受けられる。

図 6 にこれらの材料を切削した場合の逃げ面摩耗の累積確率を示す。P 72 M の切削では摩耗のばらつきはほとんどないが、摩耗自体は非常に大きく、被削性が改善されているとはいえない。また、P 72 GH では、逃げ面摩耗については P 72 とほぼ同程度の累積確率となっており、やはり改善効果は少ないと言える。一方 P 72 GM では P 72 M に比べ摩耗が大きく減少しており、そのばらつきもかなり小さい。

なお、図 6 の切削時間は 1 min と比較的短い時間であるが、長時間切削した場合の摩耗進行線図の例を図 7 に示す。摩耗のばらつきを考慮に入れると、逃げ面に関しては P 72, P 72 G および P 72 GH を切削した場合の摩耗はほとんど同程度であると言って差し支えない。一方 P 72 M は、図 6 と同様、P 72 に比べ摩耗が大きくなる傾向がうかがえる。また P 72 GM については初期摩耗発生後ほとんど摩耗が進行せず、非常に優れた被削性を示すことがわかる。

すくい面摩耗については、P 72 M では切削時間が短いため判断は困難であるが、P 72 G および同 GH, GM では明らかにすくい面摩耗が減少していると言え、特に P 72 GH および GM については 7 min および 14 min 間の切削でもすくい面摩

Fig. 6 Cumulative probabilities of flank wear width of the carbide tool P 10 after machining sintered steels with free-machining additives at the cutting speed of 200 m/min

Fig. 7 Wear progress curves of the carbide tool P 10 when machining sintered steels with free-machining additives

耗はほとんど0であった。

図8に、逃げ面およびすくい面の双方について被削性改善効果が顕著であったP 72 GMについて、逃げ面をEPMAにより線分析を行った結果を示す。分析元素としてはCa, Al, Si, Mn, S, FeおよびOについて行ったが、図中にはMn, S, CaおよびSiの結果を示している。図から明らかなように、付着物中にはMnSとゲレナイトの各成分が検出され、これらが硫化物や酸化物として付着、被削材と工具との反応を防止しているものと思われる。

Fig. 8 SEM image and line analysis of the flank wear part of the carbide tool P 10 after machining P 72 GM

5. 考 察

これまでに示したように、部分合金粉を原料とするP 72の切削では、逃げ面摩耗は、チッピングを含む摩耗であったのに対し、完全合金粉のF 72ではチッピングはほとんど見られなかった。また、P 72の切削では切削距離を一定にした場合、切削速度の増加により摩耗が増大したのに対し、F 72の切削では100および200 m/minの速度ではほとんど摩耗量に差は見られなかった。

これらのチッピングや摩耗がどのような原因で生じているかを特定することは困難であるが、F 72切削時の摩耗に関しては切削温度にあまり関係が認められないことから機械的すりへり摩耗の割合が大きいものと思われる。

一方P 72切削時のチッピングを含む摩耗については、切削温度に依存していることを考えると、被削材中の硬質粒子や切削中の振動といった機械的原因というよりむしろ、被削材の工具への溶着剥離等、熱的な損傷に起因すると考えられる。

ところで、快削物質の添加では、MnSを添加したP 72 Mの切削ではチッピングは見られなかったものの、逃げ面摩耗が非常に大きく発達した。MnSは1次せん断領域で切りくず生成過程をぜい性化させる¹⁶⁾と同時に潤滑効果¹⁷⁾も持つと言われており、切りくずあるいは被削材の工具への溶着あるいは凝着を抑える効果は期待できる。チッピングの減少はこのMnSの潤滑効果が原因と思われるが、摩耗が増大した原因については現在のところ不明である。

ゲレナイトについては、単独添加では、すくい面に対しては優れた摩耗抑制効果が見られたものの、逃げ面についてはほと

んど効果は認められなかった。一方 MnS との複合添加では逃げ面についても摩耗は大きく減少した。

これについては基本的にはすくい面と逃げ面の温度差が原因と考えられる。すなわち、ゲレナイトの単独添加の場合、ゲレナイトが比較的高融点であることから、工具摩耗面への付着に必要な可塑性が、すくい面内（切削温度が高い）では得られなかったのに対し、逃げ面では得られなかった可能性が考えられる。

一方 MnS との複合添加では MnS 中に混入している MnO がゲレナイトの融点を低下させることから、逃げ面での温度でも可塑性が付与されたと考えることができる。さらに、Ca 脱酸鋼中の硫黄含有量を高めることにより、厚い酸化物が安定して付着しやすくなるという実験結果も報告¹⁸⁾されており、また酸化物の工具摩耗面への付着機構¹⁹⁾から言っても自由エネルギーの小さい MnO はゲレナイトのような保護膜となる酸化物を工具面に付着させやすくと考えられることから、MnS との複合添加によりゲレナイトの工具への付着性が向上した結果、工具摩耗が減少したものと考えられる。

なお、焼結鋼中にガラスその他を 4~5% 添加することにより被削性の大幅な向上が可能であるとの報告がなされているが、添加物質の量が非常に多いことおよび、ガラス添加では K 種の工具でも摩耗低減効果が認められるなどから、これはいわゆるベラーク以外の効果を（例えば潤滑効果など）をねらった試みと言えよう。

6. 結 論

完全合金粉と部分合金粉を原料とした焼結鋼 (Fe-4Ni-0.5Mo-1.5Cu-0.5C) を超硬工具 P 10 を用いて被削性を調べるとともに、部分合金粉を原料とする焼結合金について MnS およびゲレナイトを添加し被削性の改善を試みた。その結果以下の結論が得られた。

- (1) 部分合金粉の焼結鋼の切削では逃げ面摩耗はチップングを含む摩耗であるのに対し、完全合金粉のそれではすりへり摩耗と思われる摩耗が主体である。また、境界摩耗は部分合金粉の焼結鋼では大きく発達するのに対し、完全合金粉の切削ではほとんど 0 である。
- (2) 部分合金粉に MnS を添加した焼結鋼ではチップングの発生は認められなかったが、逃げ面には大きな摩耗が発達した。従って MnS の添加は超硬工具による高速切削では被削性改善効果は疑問である。なお、すくい面摩耗は減少傾向が認められた。

- (3) 同じくゲレナイトの添加では、逃げ面摩耗には効果は認められない。すくい面摩耗に対しては摩耗の減少効果が認められる。

- (4) ゲレナイトと MnS の複合添加では逃げ面、すくい面共に大幅に摩耗が減少した。

参 考 文 献

- 1) 林 悦雄, 南谷有司: 多穴質焼結材料の旋削加工 (第 1 報), ハイス工具による旋削, 名古屋工業技術試験所報告, 2 (1956) 11.
- 2) 田中義信, 津和秀夫, 大森義市: 鉄系焼結金属の切削加工の研究 (第 1 報), 精密機械, 31, 1 (1965) 100.
- 3) 田中義信, 津和秀夫, 大森義市: 鉄系焼結金属の切削加工の研究 (第 2 報), 精密機械, 32, 10 (1966) 33.
- 4) S. A. Kvist: Turning and Drilling of Some Typical Sintered Steels, Powder Met., 12, 24, (1969) 538.
- 5) A. Adler: Machinability of Sintered Steels, Prec. Met., 29, 6, (1971) 49.
- 6) 宇根 篤, 大森義一, 田中義信: 鉄系焼結金属の材料特性と切削現象との相関性, 精密機械, 40, 12 (1974) 31.
- 7) 田中三義, 三橋靖郎: 鉄系焼結金属のフライス切削による表面変質層, 精密機械, 41, 8 (1975) 64.
- 8) 杉田忠彰, 田中三義: 鉄系焼結材の軽切削, 粉体および粉末冶金, 23, 5 (1976) 22.
- 9) U. Engstrom: Machinability of Sintered Steels, Powder Met., 26, 3, (1983) 137.
- 10) P. J. James: The Machinability of Sintered Steels, PMI, 22, 6, (1990) 19.
- 11) J. P. Poirer and M. Gagne: A New Approach to Improve Machinability of High Strength PM Parts, Met. Powder Rep., 45, 3, (1990) 184.
- 12) 山口勝美, 中本 剛, 水野哲哉, 大道重樹: 非金属物質添加快削焼結材の開発研究 (第 1 報, 純鉄粉焼結材), 日本機械学会論文集 (C 編), 53, 485 (1987) 235.
- 13) 山口勝美, 中本 剛, 西島義明: 非金属物質添加快削焼結材の開発研究 (第 2 報, ステンレス粉焼結材), 日本機械学会論文集 (C 編), 53, 485 (1987) 243.
- 14) 山口勝美, 中本 剛, 木村篤良: 非金属物質添加快削焼結材の開発研究 (第 3 報, 添加材の作用), 日本機械学会論文集 (C 編), 53, 491 (1987) 1581.
- 15) 鳴瀧則彦, 山根八洲男, 臼杵 年, 顔 華, 桑名 隆: 高速切削における硫黄快削鋼の被削性, 精密工学会誌, 53, 3 (1987) 455.
- 16) 例えば, 臼井英治ほか: 快削添加物粒子のぜい性効果 (その 1) —— 粒子まわりの塑性変形と空洞合体のモデル解析, 精密機械, 46, 7 (1980) 849.
- 17) 例えば, E. M. Trent: Cutting Steel and Iron with Cemented Carbide Tools, Part III, The Influence of Metallurgical Factors in the Flow Zone, J. Iron and Steel Inst., 12, (1963) 1001.
- 18) 精密工学会切削加工専門委員会: S 45 C カルシウム脱酸鋼の被削性におよぼす硫黄含有量の影響, 被削性小委員会研究報告, (1979).
- 19) Y. Yamane, H. Usuki, B. Yan and N. Narutaki: The Formation of a Protective Oxide Layer in Machining Resulphurized Free-cutting Steels and Cast Irons, Wear, 139, (1990) 195.