研 究

粉末高速度鋼の研削特性*

—高切込み研削における砥石損耗と加工表面性状—

佐久間 敬三** 幸 島 和 彦** 迎 宏 好***

Grindability Characteristics of High Speed
Steel Produced by Powder Metallurgy
—Wear of Grinding Wheel and Surface Integrity
in High Depth of Cut Grinding—

Keizo SAKUMA, Kazuhiko KOSHIMA
and Hiroyoshi MUKAE

The present research aims to clarify the grindability of vanadium PM HSS by comparing with that of conventional HSS (produced by melting process). The effects of lowering peripheral wheel speed are also investigated on the grinding performances of HSS. Following results are obtained. (1) When grinding high vanadium PM HSS by wheel with low hardness, two types of wheel wear behavior are observed. Wheel wear rate is relatively small at low table speed and large at high

table speed. (2) In grinding PM HSS having high vanadium content, the wheel wear, the thermal affected layer and the deformation (concaveness) of ground surface are remarkably small comparing with those in grinding conventional HSS. (3) In PM HSS, grain size of vanadium carbide is very fine and the shape of grinding chips is thin and long. (4) In the case of low peripheral wheel speed, the grinding temperature and the deformation (concaveness) of ground surface are smaller than those in normal peripheral wheel speed. And in grinding PM HSS, the grinding ratio is twice as large as that measured in normal peripheral wheel speed.

Key words: high speed steel, powder metallurgy, grinding wheel wear, grindability, thermal affected layer, grinding temperature, deformation of ground surface.

1. 緒 言

一般に高速度鋼において、合金元素の一つであるバナジウム元素の含有量を増せば、耐摩耗性、じん性などが向上し、切削工具材として優れた性能を示す。その反面、砥粒 (Al_2O_3) 硬度と同等以上の硬さを有する MC 炭化物を多く含有するため、その被加工性、特に被研削性が著しく低下する傾向にある。したがって、従来の溶解法で製造された高バナジウム高速度鋼の使用は、特別の用途に限定されていた。

近年、開発、実用化された粉末冶金法によって製造される粉末高速度鋼は、バナジウムの含有量を増しても被加工性が良いために、精密切削加工用工具などに適用され優れた効果をあげている。しかし、その被研削性の詳細に関しては、いまだ十分な説明がなされていないのが現状である。

そこで本報では、高能率加工を目的とした高切込み条件での高バナジウム粉末高速度鋼の研削特性、

特に砥石損耗特性を実験により調べるとともに、溶解高速度鋼の研削結果と比較検討を行い、その被研削性の差異と特性を明らかにした。更に、砥石周速度が高速度鋼の研削における加工表面性状と研削比に及ぼす影響についても、実験の結果低砥石周速度の条件でかなりの効果が認められたので、あわせて以下に報告する。

2. 実験方法および装置

実験に使用した研削盤、砥石および実験条件を表 1、高速度鋼の化学成分および硬度を表 2 に示す。図 1 は高速度鋼の炭化物組織写真であり、溶解高速度鋼（以下、溶解材とする）より粉末高速度鋼（以下、粉末材とする）の方が炭化物は微細で、しかも均一に分布しているのが

Table 1 Experimental conditions

Machine	Horizontal surface grinding machine
Grinding wheel	SA 60 H 7 V, SA 60 J 7 V, SA 60 M 7 V (HA type) (ϕ : 300 mm, w : 38 mm)
Workpiece	PM-3, PM-5, M-3 (L; 100, W; 6, H; 50 mm)
Table speed	0.5, 1, 2, 6, 9, 12 m/min
Depth of cut	80 μ m/pass
Wheel speed	Normal W.S.; 26 m/s, Low W.S.; 13 m/s
Coolant	Emulsion type ($\times 20$, 13 l/min)
Dressing	$t=20 \mu$ m $\times 3$, $v=0.2$ m/min

* 原稿受付 昭和 57 年 2 月 9 日。昭和 55 年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和 55 年 9 月 30 日）にて発表。

** 正 会 員 九州大学工学部（福岡市東区箱崎 6-10-1）

*** 正 会 員 （株）迎鉄工所（長崎県彼杵郡波佐見町村木郷 1811-2）

Table 2 Chemical compositions (%) and hardness (H_{RC}) of HSS

		C	Cr	Mo	W	V	Co	H_{RC}
PM HSS	PM-3	1.25	4.0	5.0	6.0	3.0	8.5	64.1
	PM-5	1.50	4.0	—	12.0	5.0	5.0	65.5
Conv. HSS	M-3	1.0	4.2	5.5	6.1	2.5	—	64.4

Fig. 1 Metallurgical structure of HSS (etched)

わかる。

実験は平面プランジ研削法で行い、第1回目が上向き研削で始まるスパークアウトなしのストローク両端切込み方式である。研削抵抗は八角弾性リングタイプの動力計により測定した。なお実切込み量は研削前後における工作物高さをダイヤルゲージで比較測定して求めた。砥石表面状態(真円度、砥粒分布)は直径3 mmの超硬合金製接触子をもつ電気マイクロメータによる接触法、カーボン紙による転写法および顕微鏡で観察した。また研削温度は互いに絶縁されたクロメル線、アルメル線(直径0.32 mm)を工作物中央の貫通穴(直径1 mm)に挿入し、砥石がそれを切断するとき互いに接触して熱電対を構成する方法で測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 砥石損耗に及ぼすテーブル速度の影響

$t=80 \mu\text{m}$ の高切込み条件で高速度鋼を研削したとき、砥石損耗に及ぼすテーブル速度の影響を図2に示す。図より、製造方法が異なる粉末材と溶解材の研削における砥石損耗を比較すると、テーブル速度に関係なく溶解材よりバナジウム含有量(以下、V含有量)の多い粉末材の方が砥石損耗はかなり小さくなっている。一方、同一製法で製造されV含有量に差がある粉末材の研削の場合、テーブル速度が低い範囲では砥石損耗に目立った有意差は認められない。しかしテーブル速度が高くなると、砥石結合度が小さい砥石ほど、またPM-3に比べV含有量が多いPM-5研削の方が比較的低いテーブル速度から砥石損耗の増大がみられる。

このように、溶解材よりV含有量が2倍も多いのに

Fig. 2 Comparison of wear of grinding wheel **Fig. 3** Effect of table speed on wear of grinding wheel (PM-5)

もかわらず、良好な被研削性を示している粉末材PM-5の研削過程における砥石損耗の推移を図3に示す。

SA 60 H 砥石の砥石損耗はテーブル速度 $v=6 \text{ m/min}$ 以下にみられるような砥石損耗率が比較的小さい範囲(第1損耗形態)と、 $v=9 \text{ m/min}$ 以上の高速域での大きな範囲(第2損耗形態)とに分類できることが粉末材でも認められた。しかしSA 60 J, SA 60 M 砥石の場合、本実験条件範囲内($v=12 \text{ m/min}$ 以下)では砥石損耗が比較的小さく、第2損耗形態は認められない。更に結合度

Fig. 4 Type of wheel and deformation (concaveness) profile of ground surface
PM-5, $t=80\text{ }\mu\text{m}$

が高いSA 60 M 砥石の場合(図省略), $v=12\text{ m/min}$ でも砥石損耗は著しく小さく, 砥石損耗の面からのみ考えると非常に研削性が良好と思われるが, 反面, $v=12\text{ m/min}$ においても研削焼けが認められる. このことはSA 60 M 砥石における結合剤の砥粒保持力が強い, 摩擦した砥粒は容易に脱落せずに残留していることに起因しているものと考えられる. したがって本実験条件のもとでの高切込み研削では, 高い結合度のSA 60 M 砥石の使用は不適当と思われる.

この第1損耗形態において, $v=0.5\text{ m/min}$ でのSA 60 H, SA 60 J 砥石の損耗は $v=6\text{ m/min}$ に比べ約2倍大きくなっている. 一般に, テーブル速度が大きくなると砥石損耗は増加傾向にあると考えられるが, 上述のように逆の結果が得られた. そこでSA 60 H 砥石における $v=0.5\text{ m/min}$ での研削過程を詳細に検討すると, 研削長さ $L=0.8\text{ m}$ で研削焼けが発生し(図3のB. S. 矢印), $L=1.5\text{ m}$ で消滅(B. E. 矢印)しているのが観察される. しかもこの範囲内での砥石損耗率は研削焼けが発生する以前に比べ増大する傾向にあることがわかる. また転写法によって求めた砥石表面の平均砥粒逃げ面積率は, 研削焼けが発生しているところで約40%ほど増加しており, $\alpha(=\tan^{-1}F_V/F_H, F_V$: 研削抵抗法線分力, F_H : 研削抵抗接線分力)も 75° から 79° に増し, 更に比研削エネルギー, 研削表面の凹形状の程度についても約2

倍, 1.6倍と大きくなっている. このことから高い研削温度のため工作物の熱膨張が大きく, したがって砥粒はかなりの高温状態の接触域内で熱膨張した部分をも切削することとなる. そのため, 砥粒は高温摩耗(塑性変形²⁾)や熱衝撃による破壊, 脱落を生じ砥石損耗が大きくなったものと思われる.

図4は結合度が異なる砥石における砥石損耗状態と研削表面の凹形状について調べたものである. 第1損耗形態(両砥石での $v=2\text{ m/min}$, SA 60 J 砥石の $v=12\text{ m/min}$)では, 砥石損耗は矩形状の正常摩耗を呈しており, しかも $v=12\text{ m/min}$ でのSA 60 J 砥石の表面状態は真円度が若干悪くなる程度で, 切れ刃分布も比較的密である. したがってこの形態における砥石損耗の主な要因として, 砥粒の摩滅, 破碎が考えられる. また工作物表面は幅, 長手方向とも中凹の形状となっている. 一方, 第2損耗形態に属するSA 60 H 砥石の $v=12\text{ m/min}$ の場合, 砥石は中央部分が激しく摩耗した中凹凹状摩耗を示している. このときの砥石表面状態は研削初回から切れ刃分布が粗くなっており, 採集した切りくずの中に#60の砥粒平均径(約 0.37 mm)に相当する多数の砥材が認められたことから, 結合剤からの砥粒の著しい脱落が発生したものと考えられる. この砥粒脱落の結果, 砥粒間隔が増して砥粒に対し結合剤の砥粒保持力以上の力が作用することとなり, 砥石損耗が急激に増大したものと考え

Fig. 5 Effect of table speed on grinding force
SA 60 H, PM-5, $t=80 \mu\text{m}$

Fig. 6 Comparison of grinding ratio

えられる。したがって砥石真円度も悪化し、その形状は楕円形状を示している。

図5にSA 60 H 砥石による粉末材PM-5の研削における研削抵抗 F の代表例を示す。研削抵抗についても砥石損耗の場合と同様に分類できることがわかった。すなわち、第1損耗形態において研削抵抗は研削初期が小さく、研削の進行につれ漸増しほぼ定常状態となる(図5(b))。また研削途中で研削焼けが発生する条件($v=0.5$ m/min)では図5(a)のような傾向を示している。一方、第2損耗形態では、研削抵抗は研削初期の方が大きく、研削の進行に伴って減少する傾向がある(図5(c))。

図6は工作物の被研削性および砥石性能を評価するために利用されている研削比 G と実削除率 Z' の関係を示したものである。本実験条件のもとでは、実削除率 Z' が $2.6 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ ($v=2$ m/minに相当)のところで粉末材、溶解材とも最高値を示しており、PM-3では研削比は15以上と高い。また砥石損耗が小さい第1損耗形態域では実削除率と理論削除率とがほぼ等しく、研削比は高くなっている。しかし第2損耗形態に属する範囲では実削除率と理論削除率とはかなりの差がみられ、その差は溶解材ほど大きく、研削比の低下は著しい。

次に、切りくず形状を観察すると(図7)、粉末材の場合、切りくずは全般的に細長い形状の連続型であるが、溶解材では比較的太くて短い形状のものがほとんどである。更に研削熱によって切りくず片が熔融、急冷されてできる球状型切りくずについては、粉末材では小径のものがまれにみられる程

度であるのに対し、溶解材の場合は大径のものがかなり混在している。これらの切りくず形状、大きさの違いからも粉末材の被研削性の良さがうかがえる。

一般に高速度鋼における合金元素V, W, Moなどは炭化物(MC, M_6C など)を形成することによって、高速度鋼の工具の切削性能を向上させる重要な元素であるが、これらの元素のなかで、砥粒硬度にも相当する最も硬い炭化物(MC)を構成するVの含有量を増せば、MCも増加する³⁾ために砥石損耗が増大することが知られている⁴⁾。粉末材においても同様な傾向があり、研削条件が厳しくなると、その被研削性は含有するV量の影響を受けることが以上の実験よりわかった。しかし前述したように、粉末材PM-3と溶解材M-3の研削実験では逆の結果が得られたことから、V含有量のほかに製造方法の違いによる金属組織の差異の影響があることが考えられる。そこでPM-3とM-3の研削後の加工表面層を検討してみると、両工作物とも炭化物は切断されているが、大きな炭化物をもつM-3の場合、炭化物の破断面に凹凸や、研削面から炭化物が若干突き出ている箇所などがみとめられる⁵⁾(図8)。これは炭化物が Al_2O_3 硬度に比べ同等以上の硬さを有するため、容易には切断されず、微細な炭化物を持つ粉末材より、大きな炭化物を含有する溶解材の方が炭化物切断などに要するエネルギーは大きく、したがって砥粒は損傷を受ける割合も高く、砥石損耗が増大したものと考えられる。更に、炭化物の大きさは切りくず形状に対しても影響を及ぼしているものと

Fig. 7 Comparison of type of chips in grinding HSS

Fig. 8 Comparison of photomicrograph of HSS specimen
SA 60 J, $t=20\ \mu\text{m}$, $v=12\ \text{m/min}$

Fig. 9 Influence of peripheral wheel speed
 $t=80\ \mu\text{m}$

思われる。すなわち、炭化物の大きさに比べ砥粒切込み深さが小さいため、溶解材研削の場合大きな炭化物が存在しているところで切りくずは分断される割合が高く、したがって短い形状となる。一方、粉末材においては炭化物が微細なために炭化物の影響は比較的少なく、連続形の細長い切りくずとして排出されるものと考えられる。

3.2 研削比と加工表面性状に及ぼす低砥石周速度の影響

難削材の研削において、常用砥石周速度より低速で研削した場合、砥石損耗や工作物表面性状などが改善されるという報告例⁷⁾があるが、粉末材に関するものは見当たらない。そこで本研究のテーブル速度範囲内で砥石周速度を常用砥石周速度 $26\ \text{m/s}$ から $13\ \text{m/s}$ に半減して実験を行った。図 9 (a) は常用砥石周速度に対する低砥石周速度の効果について調べた研削比改善率 G_{LWS}/G_{NWS} である。この結果、 $v=2\ \text{m/min}$ 以下のテーブル速度での粉末材 PM-3 の研削において、低い結合度の SA 60 H 砥石では低砥石周速度にした効果はあまりみられないが、結合度が高い砥石ほどその効果は現れており、 G_{LWS}/G_{NWS} は 2 倍以上と高く、優れた研削性を示している。そこで、低砥石周速度における SA 60 J 砥石での PM-3 研削の場合の研削特性を常用砥石周速度の場

Fig. 10 Grinding temperatures with SA 60 J wheel

Fig. 11 Deformation (concaveness) of ground surface
SA 60 J, PM-3, $t=80\ \mu\text{m}$, $v=2\ \text{m/min}$

合と比較してみる (図 9 (b)). 低砥石周速度研削では砥粒切込み深さは約 2 倍程度に増加するが、低テーブル速度域では研削抵抗の法線分力 F_v の減少がみられ、その割合はかなり大きく、また比研削エネルギー U もほぼ半減していることなどから、砥粒切込み深さの増加が研削性向上の一要因になっているものと思われる。しかし被研削性の悪い M-3 研削や、結合剤の砥粒保持力に劣る SA 60 H 砥石に関して、この砥粒切込み深さの増加は砥石損耗を増大させる原因となり、その結果研削比改善率は小さくなっている。

次に、切削工具および金型などに使用される高速度鋼にとって、研削時の工作物加工表面特性は適用寿命を左右する致命的な要因となることがあるので、その特性を知ることは重要と考えられる。そこで SA 60 J 砥石での研削温度および研削表面の凹形状に及ぼす砥石周速度の影響を図 10、図 11 に示す。また図 12 は加工変質層であり、加工表面からの深さに対する硬度分布状態 (ビッカース硬度、荷重 $100\ \text{g}$) を調べたものである。図より、砥石周速度を半減することによって研削温度は約 25% 程度の減少がみられ、しかも研削表面の凹形状の程度もかなり小さくなっていることがわかる。一方、加工変質層は常用砥石周速度の場合、溶解材ではかなりの深さまで影響を受け硬度の低下がみられるが、粉末材では若干硬度が低下しているにすぎない。これに対し低砥石周速

Fig. 12 Microhardness distribution in subsurface layer of ground HSS
SA 60 J, $t=80 \mu\text{m}$, $v=1 \text{ m/min}$

度の場合, 粉末材ではほとんど影響を受けず, 更に被研削性が劣る溶解材でも影響を受ける範囲が常用砥石周速度の場合の約半分程度と小さくなっている。

以上の実験結果から, 常用砥石周速度の場合に比べ砥石周速度を半減することによって研削発熱量 ($F_H \cdot V$ に比例する, F_H : 研削抵抗接線分力, V : 砥石周速度) が減少し, 更に砥石円周表面に沿って生じる空気流速に差異⁸⁾が生じて研削液の効果が増加することなどによって研削温度が低下したものと考えられる。したがって工作物が受ける熱的影響 (熱膨張など) の程度も小さく, 加工表面性状はかなり改善されている。なお, 常用砥石周速度の場合の低テーブル速度範囲内でみられたような研削焼けは低砥石周速度にすることで防止できた。

4. 結 論

高切込み研削における粉末高速度鋼の研削特性を調べ, 更に従来の溶解高速度鋼の場合と比較検討を行った結果, 次の結論を得た。

- (1) 高バナジウム粉末高速度鋼の高切込みプランジ研削において, 砥石損耗の増加形態を次の二つに大別できる。
 - (a) 第1損耗形態: 砥石損耗率が比較的小さく, 砥石損耗形状は正常摩耗の矩形状で, 切れ刃分布は密である。また研削表面は中凹の形状となる。
 - (b) 第2損耗形態: 砥石損耗率が著しく大きく, 砥石損耗形状は砥石結合剤からの砥粒脱落によって中凹み状の異常摩耗を呈し, 切れ刃分布は著しく粗となる。研削表面幅方向形状は中凸となる。
- (2) バナジウム含有量が異なる粉末高速度鋼の研削において, 低テーブル速度域では砥石損耗に有意差は

認められない。しかしテーブル速度を増すとバナジウム含有量が多いほど比較的低いテーブル速度から砥石損耗の増大がみられる。なお高結合度の砥石ではバナジウム含有量に関係なく砥石損耗は少ないが, 高テーブル速度でも研削焼けが発生するので注意が必要である。

- (3) 粉末高速度鋼はバナジウム含有量が溶解高速度鋼より2倍も多い材種のもので, 溶解高速度鋼に比べ砥石損耗量は少なく, 加工表面性状についても優れている。

- (4) 低砥石周速度による実験では, 常用砥石周速度の場合と比較して研削温度がかなり低いことから, 高速度鋼の性能に影響を及ぼす加工変質層, 研削表面の凹形状はかなり小さく, また研削焼けも認められず優れた研削性を示す。しかし砥石損耗に関しては高結合度の砥石による粉末高速度鋼の研削の場合を除いて, 砥石損耗は多少増加する傾向にある。

おわりに, 本実験に協力された, 当時学生の肥前文博, 金子真二両君に謝意を表するとともに, 実験試料を提供いただいた(株)ノリタケカンパニー, (株)神戸製鋼所, (株)不二越に感謝する次第である。

文 献

- 1) S. Kannappan & S. Malkin: Effects of Grinding Size and Operating Parameters on the Mechanics of Grinding, Trans. ASME, B, **94**, 8, (1972) 833.
- 2) J. Verkerk: Characterization of Wheel Wear in Plunge Grinding, Ann. CIRP, **25**, 1, (1977) 27.
- 3) F. Kayser & M. Cohen: Carbide in High Speed Steel - Their Nature and Quantity, Metal Progress, **6**, (1952) 79.
- 4) 新井 透: 高速度鋼の被研削性, 不二越技報, **19**, 1(1963) 81.
- 5) 貴志浩三, 江田 弘, 大賀敏雄, 光賀賢介: 研削損傷と仕上面粗さ生成に対する各種炭化物と介在物の影響, 精密機械, **44**, 5 (1978) 627.
- 6) G. Bellows: Low Stress Grinding, Machinability Data Center, (1978) 19.
- 7) 島宗 勉, 餅田正秋, 小野浩二: 低砥石速度による研削法に関する研究 (第2報), 昭和55年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集 (1980) 319.
- 8) 網沢洋二, 青山藤詞郎, 稲崎一郎, 米津 栄: クリープフィード研削における研削液供給法の改善, 精密機械, **48**, 11 (1982) 1526.