ステンレス鋼の重研削の進行に伴う研削特性 および砥粒切れ刃状態の変動について*

松尾哲夫** 峠 陸** 左 敦隠*** 上田 昇†

Progressive Variation of Grinding Characteristic and Cutting-Edge Condition in Snag Grinding of 410 Stainless Steel

Tetsuo MATSUO, Mutsumi TOUGE, Dunwen ZUO and Noboru UEDA

In this research, a snag grinding was performed on a 410 stainless steel with two different alumina wheel types under constant load, using a specially made grinding machine. The variation of grinding characteristics such as metal removal rate and grinding force with the progress of grinding has been studied. On the other hand, the protrusion height and wear flat area of abrasive grains on the working surface of wheel were measured to discuss the results obtained on grinding characteristics. A close correlation was found among the variation of abrasive protrusion height, metal removal rate and tangential grinding force. Also, it was known that the wear area of grains increases with increasing grinding time. The attritious wear was accompanied with reductions of metal removal rate and tangential grinding force. Self-sharpening recovered the abrasive protrusion height and diminished the percent wear flat; this enhanced to improve the metal removal rate and a cutting action by an individual abrasive grain.

Key words : snagging, grinding mechanism, 410 stainless steel, attritious wear, self-sharpening, metal removal rate, grinding force

1. 緒 言

重研削は砥石の切込みあるいは被削材の送り速度を大きくし、単位時間あたりの被削材除去量を増大させることにより高能率研削を実現しようとするものであり、その典型的なものとしてスナグングがある。ここでは前報¹⁾で報告した定荷重方式によるトラバース形重研削装置により、410ステンレス鋼をZSおよびA砥石を用いて重研削を行った。これまでの研究^{1)~3)}により、研削特性に及ぼす荷重、送り速度および砥石（結合度、粒度）の影響が明らかにされ、削除率、接線抵抗は荷重の大きさに比例して増加する。しかし、

これらは比較的長い時間研削した間の平均値であり、より詳しく調べると砥粒摩耗の進行や自生発刃の周期的な発生により研削特性は激しく変動していることがわかった。このことを定量的に説明するためには、重研削の進行に伴う砥粒の摩耗や突出し量などの砥粒切れ刃の状態についても正確に調べる必要がある。

そこで、本研究では削除率や研削抵抗の測定と共に、自作の触針式粗さ計を用いて砥石作業面上の砥粒を詳しく調べ、砥粒先端の摩耗平坦率および砥粒突出し量を測定した。これらの値が研削時間の増加に伴ってどのように変化するかを明らかにし、同時に測定した削除率、研削抵抗などの変動と考え合わせ、定荷重方式の重研削の研削機構に考察を加えた。

2. 実験方法

使用した重研削実験装置ならびに実験方法は前報¹⁾と同一であり、荷重は砥石まわりの構成部品（砥石、砥石軸、増速装置およびフレーム材など）の自重をカンチレバーにより打ち消す形で作用するように設計さ

* 原稿受付 平成3年11月11日

** 正会員 熊本大学工学部（熊本市黒髪2丁目39-1）

*** 正会員 熊本大学大学院（現、南京航空学院機械系、中国南京市）

† 正会員 熊本大学地域共同研究センター（熊本県上益城郡益城町田原2081-7）

Table 1 Grinding conditions

Wheel type	ZS20W5B, A20W5B
size	450×25×127
Workpiece	Martensitic stainless steel SUS410 (13%Cr)
	Length 1000mm, Width 30mm
Wheel speed	$V = 70$ m/s
Work feed	$v = 60$ mm/s
Load	$P = 250 - 1000$ N
Coolant	not used

れている。表1に使用した砥石、被削材および研削条件を示す。用いた砥石はZS砥粒（25% $ZrO_2 + Al_2O_3$ ）およびA砥粒のものであり、粒度、結合度、組織および結合剤は両者とも同じである。重研削中の砥粒摩耗の程度および砥粒突出し量は先端丸味半径0.3mmの触針子（長さ20mm）を用い、任意の研削時間ごとに研削を中断し、砥石幅の中央について測定した。なお、研削初期における砥石作業面状態、すなわち砥粒の形状、摩耗量および突出し量を同一とするため、各実験に入る前に被削材を荷重750Nで3min間重研削し、砥石の目直しおよび形直しの代わりとした。

3. 実験結果および考察

図1は削除率と荷重の関係を示す一例であり、ここでの削除率は砥石作業面状態を同一とし、2min間連続して研削を行った時のものである。図より明らかなように、削除率と荷重の間には明確な直線関係が成立する。しかし、研削時間が長くなって砥粒摩耗が進行するとこの直線関係は成立しなくなる。このため、一定研削時間ごとに研削特性を調べると共に、砥石作業面の状態を詳しく調べた。以下、それぞれについて説明

Fig.1 Relation between metal removal rate and load

する。なお、削除率は250N付近より増加しはじめており、それ以下の荷重域では上すべり⁴⁾⁵⁾のみが起り、実質的な被削材の除去は起こっていない。従って、砥粒による除去作用が開始される荷重に対して、しきい値的な荷重が存在することがわかる。

3.1 研削特性の時間的变化

図2は研削時間の増加に伴う削除率の変化を、ZS砥石を用い各荷重について調べたものである。本重研削装置の場合、砥粒に激しい摩擦的な摩耗が起ると削除率は著しく減少する。図2中で最小の荷重500Nの場合、削除率は研削初期において大きな減少率を示した後、研削時間が18minを越える段階ではほぼゼロとなり、砥粒摩耗のため研削不能になっている。一方、600Nにおける削除率は500Nの場合と同様に研削初期において急激に減少し、14minでは2minにおける削除率の8.4%まで低下しているが、その後削除率は増加に転じ、30minの段階では2minの51%まで回復する。これは自生発刃により鋭利となった砥粒が活発な被削材除去を行うことに起因している。650Nにおいても研削初期における削除率の低下率は高く、その後4minを極小として回復しはじめ、15min付近で極大値を示した後再び減少する。更に研削を続行すれば自生発刃により再度削除率は回復し、以後これらのことが繰り返されると考えられる。このように、自生発刃が発生する研削時間は荷重が大きい程短くなる。700Nにおける削除率は研削初期において漸減するものの、10min以上ではほぼ一定値をとっている。これは荷重が700Nと比較的大きいため砥粒摩耗を伴うものの自生発刃が多く発生し、良好な研削状態が維持されていることを示している。

Fig.2 Variation of metal removal rate with grinding time for different loads

Fig.3 Variation of wheel wear rate with grinding time for different loads

図3、4および5に図2と同時に測定したZS砥石における砥石損耗率、仕上げ面粗さおよび接線抵抗の結果を示す。図3において、砥石損耗率は荷重が大きくなると増加するが、研削時間の増加と共に減少あるいは変動し、その変曲点が認められる研削時間は図2の削除率における研削時間とよく一致している。研削初期においては鋭利な砥粒が多く存在するため削除率は高くなるが、砥石損耗率は砥粒の初期摩耗や脱落が激しいため大きな値を示す。その後は砥粒摩耗の進行により削除率が低下すると共に砥石損耗率も減少する。荷重600N以上では自生発刃のため削除率は増加に転じ、

砥石損耗率も増加する。従って、砥石損耗率の一時的な増加は自生発刃の発生を裏付けている。また、図4の仕上げ面粗さの傾向も上記の結果とよく一致する。砥粒摩耗の進行により広がった砥粒先端の摩耗平坦部で被削材の除去が行われると、仕上げ面粗さは改善される。荷重が大きくなると、砥粒形状が鋭利であっても摩耗して鈍化していても、砥粒の実切込み量が大きくなるため仕上げ面粗さは悪化している。図5の接線抵抗において、650Nでの一時的な増加は自生発刃により鋭利な砥粒が被削材除去を行っていることに対応している。その後、24minにかけて漸減するのは砥粒摩耗が進行するためであり、研削中の接線抵抗の変化は上記の削除率、砥石損耗率および仕上げ面粗さの挙動とよく対応している。

本実験装置は定荷重方式であり、研削中は常に一定の法線抵抗が作用すると共に、機構上砥石は研削中でも上下に動くことができる。砥粒摩耗の進行により砥粒先端の摩耗面積が増加すると、そこに作用する垂直応力は減少する。そのため、一定の削除率を確保するにはより大きな応力が砥粒を被削材に押し込むため必要となる。しかし、法線抵抗が一定であるため実質的には砥粒の逃げが起こり、被削材への砥粒の食い込み量は減少することになる。すなわち、砥粒摩耗の進行による削除率の低下は避けられない。その場合、設定した荷重が大きいと、摩耗平坦部に作用する垂直応力ならびに砥粒が被削材に食い込んだ際に砥粒にかかる負荷は大きくなる。その値が砥粒固有のしきい値を越えると砥粒自体が破碎されて自生発刃が発生し、鋭利な形状の多くの砥粒による除去作用が活発になること

Fig.4 Variation of surface roughness with grinding time for different loads

Fig.5 Variation of tangential force with grinding time for different loads

で削除率は回復する。図5において、500Nおよび600Nでの接線抵抗が8~20minにおいてほぼ同じ値を示すにもかかわらず600Nにのみ自生発刃が観察されるのは、摩耗平坦部での垂直応力が大きいことに起因している。また、このことは自生発刃には接線抵抗はあまり関係していないことを意味する。

以上の結果から、本実験のような定荷重方式による重研削はその研削過程でいかに砥粒の自生発刃を発生させて定常的な研削を行い得るかが重要であり、ここで示したZS砥石(結合度W)と410ステンレス鋼の組合せでは600Nが自生発刃を起こさせる最低の荷重 P_{s1} となる。もちろん、この P_{s1} 以上の大きな荷重に設定すればより大きな削除率による高効率研削が行われるのは当然であるが、同時に砥石損耗率も増加するため、適正な荷重の選定は生産コストと作業能率の両面から追求する必要がある。

図6は研削時間に対する削除率の変化をA砥石を用いて調べたものである。A砥粒はZS砥粒に比べて硬さは若干高い(ヌーブ硬さ⁶⁾……A砥粒 1950, ZS砥粒 1720)がじん性は劣っており、破碎しやすく鋭利な切れ刃がより多く得られる。図6より、600Nにおける削除率はZS砥石の700Nにおける結果より約28%高い値(20minでの比較)を示している。A砥石においても450Nあるいは500Nの削除率は研削時間の増加に伴って増減を繰り返しており、いずれも自生発刃に起因している。このことから、A砥石では450Nが自生発刃を起こさせる最小の荷重であることがわかる。ここでは割愛したが、接線抵抗は図5と同様な傾向を示し、値も60~160Nであり、両砥石間に大きな差異は認められ

Fig.6 Variation of metal removal rate with grinding time for different loads

なかった。

3. 2 砥石作業面性状の時間的变化

図7(a)は500NにおけるZS砥石の作業面を触針式粗さ計で測定した出力波形の一例であり、測定は砥石幅の中央について行っている。図において、A、BおよびCと記号した砥粒はいずれも研削時間の増加に伴って先端部に摩耗平坦部が生成されており、砥粒摩耗の進行が認められる。Dの砥粒は4.5minでは先端部が明瞭に摩耗しているが、12.5minではその存在が認められず、研削中に脱落したことがわかる。このように、500Nの荷重では砥粒摩耗の進行や一部砥粒の脱落が認められるのみであり、重研削中に自生発刃は起こっていない。一方、図7(b)の650Nでも4.5minまでは砥粒摩耗の進行が認められる。しかし、18.6minでは砥石作業面が大きく変化し、それまでの出力波形の特徴が認められないほど新しい砥粒に更新されている。その後、24minまでの間に再び砥粒摩耗が進行している。以上の砥石作業面の観察結果は、上記の砥粒摩耗の進行あるいは自生発刃の発生についての考察と矛盾しない。

図8に研削時間の増加による砥粒突出し量の変化を

Fig.7 Traced profile of abrasive grains measured on the same position of working surface of wheel at various grinding time
(a) Load 500N, (b) Load 650N

Fig.8 Variation of abrasive protrusion height with grinding time for different loads

示す。ここでの砥粒突出し量は、図7で示した出力波形において、ボンド面（出力波形上で谷の部分に相当）から砥石最外周までの距離であり、各砥粒について測定したものの平均値である。砥粒が摩耗すると、図7(a)の18.5minに顕著に認められるように、砥粒突出し量は減少する。図8において、研削時間の増加に伴い、砥粒突出し量は500Nでは減少し、600Nでは20minまでは同様に減少し、砥粒摩耗が進行して目つぶれを起こしていることがわかる。一方、600Nでは20min、650Nでは13min以降増加に転じ、自生発刃が発生したことを示している。700Nでは砥粒摩耗は進行するが適度な自

Fig.9 Variation of percent wear flat with grinding time for different loads

Fig.10 Traced profile of abrasive grains measured on the same position of working surface of wheel at various grinding time (Load 500N)

生発刃を伴うため砥粒突出し量はほとんど変化せず、定常的な研削が行われている。

図9は図7に例示した出力波形より、各砥粒について先端部の摩耗平坦長さを合算し、測定全長に対する割合を砥粒摩耗平坦率（以下、平坦率）とし、研削時間に対して整理したものである。500Nにおける平坦率は単調に増加し、砥粒摩耗が進行している。600Nおよび650Nにおいては一時的に減少し、図8の砥粒突出し量の結果と考え合わせると、自生発刃により鋭利な形状を持つ多くの砥粒となることで平坦率が減少したと考えることができる。700Nでは4minまでは増加するがその後ほぼ一定値を示しており、値も他の荷重に比べて小さくなっている。このことから、自生発刃の発生は平坦率を低下させると共に、削除率、研削抵抗は増加し、仕上げ面粗さは悪化することがわかる。

図10はA砥石の砥石作業面を測定した結果の一例である。A砥石の場合にはじん性が低いため破碎しやすいが、荷重が小さい場合には摩滅摩耗が顕著に進行する。図10は荷重400Nの場合であり、30min研削すると砥粒先端の摩耗平坦部の生成が顕著であり、砥粒突出し量も小さくなっている。

図11は図9と同様に、A砥石の平坦率を研削時間に対して整理したものであり、400Nにおける平坦率が極端に大きな値を示している。ZS砥石の場合の平坦率は500Nの場合で最大32%であったのに比べて約2.3倍大きくなっている。これは同じ荷重で研削すると研削域での温度上昇がA砥石の方が高く測定されることに起因すると考えられ、例えば500Nの場合、A砥石では約870Kであるのに対してZS砥石では560Kと測定された。このため、A砥石では機械的な損耗に加えて温度上昇による拡散摩耗が重畳され、砥粒摩耗がより激しく進行したと推察される。このように大きな平坦率

Fig.11 Variation of percent wear flat with grinding time for different loads

となると、砥粒摩耗面における垂直応力は小さくなり、自生発刃の発生は期待できなくなる。

4. 結 言

Z SおよびA砥石を用いて410ステンレス鋼を定荷重方式により重研削し、砥粒摩耗平坦率および砥粒突出量を測定して研削中の砥粒切れ刃の挙動を明らかにし、同時に測定した削除率などの研削特性との関係を調べた。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 定荷重トラバース重研削の場合、研削の進行と共に砥粒摩耗が増大し、これに伴い削除率、砥石損耗率および接線抵抗の減少と仕上げ面粗さの向上が観察される。
- (2) 低荷重域では削除率は低下し続け、最終的に研削不能となる。Z S砥石で650 N、A砥石で450 N

以上の荷重の場合、研削過程で自生発刃が発生し、削除率は増加すると共に、砥石損耗率などはそれまでと逆の傾向を示す。

- (3) 自生発刃は砥粒先端の摩耗平坦部に作用する垂直応力および砥粒が被削材に食い込んだ際に砥粒にかかる負荷が砥粒固有のしきい値を越えると発生するが、砥粒のじん性が低く破砕性の高いA砥石の方がより軽い荷重で観察される。
- (4) 粗さ計による砥石作業面の観察結果より、砥粒摩耗が進行すると摩耗平坦率は増大し突出量は減少するが、自生発刃によりそれまでの傾向は逆転し、削除率の増大をもたらす。

最後に、本研究を進めるにあたり、砥石を御提供いただいたクレノートン（株）ならびに熱心に御協力いただいた当時熊本大学工学部学生 豊福洋介ならびに橋本博士君に対して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 松尾哲夫, 松原欣二, 森田健敬, 北村福男, 安井平司: 鋼材の重研削加工に関する研究, 精密工学会誌, 52, 3(1986) 540.
- 2) T.Matsuo, K.Matsubara and T.Morita: Influence of Working Parameters in Constant-Load Heavy Grinding, Ann. CIRP, 32, 1 (1983) 233.
- 3) D.Zuo, T.Matsuo, N.Ueda and J.Iwashima: Study on Constant-Load Heavy Grinding of Steels, Proc. 11th ICPR (1991) 13.
- 4) S.Malkin: Selection of Operating Parameters in Surface Grinding of Steels, Trans. ASME, Ser.B, 98, 1(1976) 56.
- 5) 長谷川嘉雄, 花崎伸作, 峠 睦, 山本立春: 高送り電解研削に関する研究, 精密工学会誌, 52, 7(1986) 1236.
- 6) 精密工学会編: 研削工学, オーム社, (1987) 103