研 究

研削砥石の高温摩耗特性*

——鉄鋼材料の研削性に及ぼす被削材温度の影響(第2報)——

松尾哲夫** 黒木紳一郎*** 清沢研作† 長野 豊††

High Temperature Wear of Grinding Wheel

——Effect of Workpiece Temperature on the Grindability of Steels (2nd Report)——

Tetsuo MATSUO, Shinichiro KUROKI, Kensaku KIYOSAWA, Yutaka NAGANO

There are few reports about the wear of grinding wheel when grinding hot steels. In the present study the constant pressure plunge grinding tests have been performed with carbon steels, SUS 24 and SUS 27 stainless steels at the workpiece temperature range of room temperature to 600°C under the loads of 1.0, 2.0, and 3.0 kg/cm². With increasing the workpiece temperature the wear of wheel increased on grinding SUS 24 stainless steel, but a completely different result were seen on grinding SUS 27 steel, while the wheel wear was shown to take a maximum value in the temperature range of 150 to 450°C. According to microscopic observations, a distinct difference was found in the workpiece temperature dependence of the wear mechanism of wheel.

1. 緒 論

近年連続鋳造法の発達に伴い鋼塊鋼片の表面きず取り研削加工の能率化が重要な課題となっているが、高温研削加工が能率化の有効な手段として注目されている。特に熱間圧延工場においては、赤熱状態にある鋼塊や鋼片を室温に冷却することなく、そのまま表面を研削して直ちに圧延作業に移ることが望まれている。したがって種々の代表的な鋼について、その高温研削性を十分に認識し、また適正な高温研削条件についても調べておくことが必要である。しかしながら、前報にも述べたように一般に高温研削に関する研究報告は少なく^{1)~4)}、いまだ不明な点が少ない。特に被削材温度によって砥石の摩耗・目づまり状態がどのように変化するか、またその変化の状況が被削材の金属組織とどのような関係があるかなどについてはまだ十分に解明されていない。

S 55 C 鋼の高温平面研削性を調べた前報³⁾の結果によれば、被削材温度 150~300°C のいわゆる鋼の青熱ぜい性域で砥石摩耗が多くなることが知られた。本研究で

は、被削材温度と砥石摩耗の関係をさらに詳しく追究し、かつ砥石目づまりと被削材温度の関係についても明らかにするため、砥石作業面上の砥粒のへき開破砕の少ない定圧研削方式によって、炭素量の異なる種々の普通鋼ならびに 2 種類のステンレス鋼について常温~600°C の研削実験を行なった。

2. 実験装置および方法

本研削実験には万能研削盤(池貝)本体を利用し、研削盤のテーブル上に図 1 のような定荷重負荷装置を取付け、レバー先端におもりをかけることにより被削材の研削面(10×10 mm²)を砥石中心に向かって押付ける。被削材の加熱は本図に示されるような位置に電気炉を設置して行なった。被削材設定温度の決定は研削面中心部に接触させた熱電対によって行なわれた。研削中被削材先

図1 高温定圧研削実験装置

* 原稿受付 昭和48年1月12日。昭和46年度精機学会春季大会学術講演会(昭和46年4月7日)および昭和47年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和47年10月30日)にて発表。

** 正会員 熊本大学工学部(熊本市黒髪町2丁目)

*** 正会員 石川島播磨重工業(株)(東京都江東区豊洲2丁目)

† 学生会員 熊本大学工学部大学院

†† 正会員 カーボンセラム(株)(横浜市神奈川区神奈川通9)

図2 研削時間と砥石損耗量の関係

端はわずかながら炉外に出て温度が下がるので研削時間は短く取り、10秒おきに18回、計3分間研削を行なった。なお、必要に応じ砥石上部に設置された砥石アナライザ(TW-1型)により、砥石作業面の切れ刃の個数、逃げ面摩耗面積率を測定した。

本研削実験の条件は次のようであった。

研削盤：定圧研削盤（池貝万能研削盤を利用）

砥石：WA 46 KmV (205×25×76)

砥石周速：1650 m/min

押付荷重：1, 2, 3 kg/cm²

ドレッシング条件：送り 0.6 m/min, 切込み 20 μm/回

被削材：S 25 C (H_V 130), S 55 C (H_V 215), SK 3 (H_V 225), SKS 31 (H_V 243), SUS 24 (H_V 195), SUS 27 (H_V 215)

被削材寸法：10×10×100

被削材温度：常温, 150°C, 300°C, 450°C, 600°C

研削液：なし

砥石損耗量はプラスチック板による砥石面転写法によって測定した砥石半径減から算出した。ただし、半径減測定には小坂式あらさ計(SE 3型)を使用した(精度 1 μm)。

砥石作業面の観察はアセチルセルローズフィルムを介して行なわれた。すなわち、所定の研削実施の後アセチルセルローズフィルムにより砥石表面を写し取り、低倍率拡大で焼付けることにより砥石の目づまり状態を見ることができ、砥粒切れ刃先端の観察は位相差顕微鏡を用い比較的高倍率で行なった。なお、砥粒切れ刃摩耗部の定量的な評価を上述の砥石アナライザで行なった(しかし、SUS 27研削の場合をはじめ多くの場合において切りくず溶着による妨害によって測定が不可能であった)。

図3 研削時間と切れ刃個数、切れ刃面積率の関係

3. 実験結果

3.1 砥石損耗量と時間の関係

図2は3被削材に対して研削時間と砥石損耗量の関係を押付荷重 3 kg/cm² の場合を例にとって示したものである。S 25 C 研削の場合の砥石損耗が被削材温度によりほとんど差異が見られないのに対し、SUS 24 と SUS 27 ではかなりのへだたりが生じている(説明は後述)。いずれの場合も研削時間の経過につれ砥石損耗速度は始め高く、その後は徐々に低下し、しだいに一定に近づくように思われる。図3は砥石アナライザによる砥石作業面の解析結果の一例で、SUS 24 の研削において得られたものである。研削時間の経過とともに切れ刃個数、逃げ面摩耗面積率は最初は急激に、その後は徐々に増加することがわかる。常温研削の場合に比べ 300°C 研削のものは多少これらの値が大きい。600°C 研削のものについても調べたが、切りくずの砥粒摩耗面への溶着のため本方式による測定は不可能であった。しかし砥粒摩耗面がこの被削材温度で著しく大きいことは肉眼的に見ても明らかであった。いずれにせよ図2と図3の両曲線の形状より見て SUS 24 研削ではすくなくとも砥粒先端の摩滅的摩耗が砥石損耗をもたらす一因であり、かつこのさい被削材温度が高いほど砥粒先端の摩耗が進行しやすく、砥石もそれだけ多く損耗することは確かである。

3.2 研削量と時間の関係

図4は研削時間と研削量の関係を3被削材に対し参考までに示したものである。砥石損耗の被削材温度依存性は被削材により多様であったが、研削量は被削材温度の上昇に伴い、いずれの場合も著しく減少する(SUS 24 の場合は被削材温度の影響が比較的小さいが)ことがわか

図4 研削時間と接線研削抵抗の関係

図5 接線研削抵抗と研削時間の関係

る。また、S 25 C と SUS 24 研削の場合の曲線の形状には砥石損耗曲線と多分に似たところがあり、研削後 0.5～1 min の間に急激な砥石表面の目づまりのため研削除去速度は低下しその後は一定となる。ちょうどこの時期から砥石損耗速度もゆるやかになり、ほぼ一定になることがわかる。

3.3 研削抵抗の変化

接線研削抵抗を見ると（図5参照）S 25 C 鋼研削においては研削開始後 0.5～1 min ではげしい低下が認められ（目づまりによると解釈される）、また SUS 24 研削においても多少同じ傾向が見られるが、その後の研削抵抗値で見ると概して被削材温度に影響されない。つまり砥石損耗は接線研削抵抗にも直接深い関係があるとはいえない。これに対し SUS 27 鋼の場合は特徴ある抵抗変化が見られ、ここでは被削材温度の上昇によって接線研

削抵抗は著しく低下する。結局 SUS 27 鋼に関する限り被削材温度の上昇に伴い研削抵抗は低下し、研削量、砥石損耗も少なくなることが明白となった。この理由は後述するように高温で研削したものほど切りくずの砥粒切れ刃への溶着が多く、それだけ食込みが少なくなるためであると思われる。

3.4 砥石損耗と被削材温度

すべての被削材に対し 3 分後の砥石損耗量と被削材温度の関係をまとめると図6～11が得られる。図6は S 25 C および S 55 C 鋼の研削によって得られた結果である。これによると押付荷重にかかわらず砥石損耗は被削材温度によっては一般に大きく影響されず、150～450°C のどこかの被削材温度でわずかに高い値を示すことが明らかである。この傾向はA砥石によっても確認され（図7参照）、また、前報³⁾の S 55 C 鋼の平面研削の場合においても同様のことが見いだされた。図8はさらに炭素量が高い SK 3 と SKS 31 鋼について同様のことを検討した結果であるが、ここでも 300～450°C のいわゆる炭素鋼の青熱ぜい性温度域で砥石損耗が最大値を示すことが明らかである。

図9は SUS 24 研削における砥石損耗量と被削材温度の関係である。先の炭素鋼研削の場合と異なる被削材温度依存性が見られる。すなわち、450°C までは温度の上昇と共に砥石損耗量は初めは徐々にふえ、その後急激に増大する。図10は押付荷重に対し砥石損耗量をプロットしたものであるが、定圧プランジ研削の場合の多くがそうであるように一般に荷重には比例しない。

図11は SUS 27 において得られた被削材温度と砥石損耗量との関係である。SUS 24 研削の場合と正反対に被削材温度の上昇につれ砥石損耗量は急激に減少することがわかる。この原因は接線研削抵抗や研削量の低下からも理解できるように被削材温度の上昇による砥石作業面の目づまりと深い関係があると考えられるが、詳しくは次節で検討する。

4. 考 察

ここでは図9、11に示した結果について重点的に考察する。一般に砥石の損耗は砥粒そのものの摩耗（微細破壊も含む）、砥石表面の性状、ボンドの強さにより影響

図6 被削材温度と砥石損耗量の関係(1)

図7 被削材温度と砥石損耗量の関係(2)

図8 被削材温度と砥石損耗量の関係(3)

図9 被削材温度と砥石損耗量の関係(4)

図10 押付荷重と砥石損耗量の関係

図11 被削材温度と砥石損耗量の関係(5)

される。したがって、それぞれが温度によりいかにに変化するかを考えることによって砥石損耗の被削材温度依存性がある程度知られるであろう。

4.1 砥粒の摩耗と温度の関係について

砥粒の摩耗には機械的摩耗と熱的摩耗(化学摩耗も含む)とがあり、前者はさらに摩滅摩耗(attritious wear)と微細破壊摩耗(chipping wear)に分けられる。砥粒が高温になるにつれ軟化し⁵⁾、それだけ摩滅摩耗は増大すると考えられる(しかし、被削材にもより、SUS 27に対する単粒の摩耗実験結果によれば被削材温度の上昇につれて砥粒摩耗率は低下することが知られた⁶⁾)。一方、砥粒の微細破壊摩耗は温度の上昇に伴う砥粒じん性の増加によって被削材温度が高くなるほど減少すると考えられる。なお、この摩耗形態は接線研削抵抗とも深い関係があり、SUS 27研削の場合のように被削材温度が高くなるにつれ研削抵抗が著しく低下する場合(図5参照)

は、それだけこの種の摩耗は少なくなるものと考えられる。

次に熱的、化学的摩耗、すなわち研削時の高温・高圧によって生ずる砥粒-被削材間の化学反応に基づく砥粒の摩耗は、 Al_2O_3 系砥粒の場合は酸化鉄と砥粒の反応の結果生成される FeAl_2O_4 や $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ などの低融点化合物によって促進されるといわれている^{7), 8)}。これらの化学摩耗は被削材温度が高いほど顕著になることは当然であるが、砥粒摩擦面が相当高温(900°Cくらい)になるとはじめて反応が問題になる程度に起きるようである。研削時における砥粒切れ刃先端の摩擦面の温度は被削材温度より数百から500~600°C高いのが普通であるので^{8), 9)}、本実験においても特に高被削材温度の場合にこのような砥粒の化学摩耗が十分に考えられる(この点に関しては今後追究したい)。

4.2 砥石作業面の状態と被削材温度

図 12 SUS 27 研削後の砥石作業面のレプリカ観察

被削材の高温化に伴い被削材の塑性流動が容易となる結果、切りくずの砥石表面への溶着、つまり目づまりが生じやすくなると考えられる。

図 12 は SUS 27 研削後の砥石作業面を写し取り、低倍率で観察したものである（レプリカは研削終了直後—3 分後—の 1 回目写取りのものと、切りくずが完全に取除かれたと確認された 4 回目のものを比較した。両者の違いから目づまり状態が評価できる）。写真中黒い部分は気孔で白い部分が結合剤、また白い部分で囲まれた黒い部分が砥粒摩耗面である。上下段の違いから切りくずの溶着模様、目づまり状態が知られる。すなわち、被削材温度が高いほど溶着切りくずの量が多いことがわかる。もともと延性の大きい SUS 27 が高温になっていっそうその性質が顕著となるためと思われる。このような切りくずの凝着のために砥粒は切りくずでおおわれる結果となり、刃先が平たんに摩耗することが少なく、高温高圧下で摩擦しゅう動のみ行っている。

これに対し SUS 24 研削の場合はこのような目づまりは比較的少なく、概して被削材温度の高いほど溶着切りくず量は多いがその差は僅少であった。ここでは溶着切りくずが少ない結果砥粒の摩滅摩耗平坦面は切りくずにおおわれることなく露出されており、被削材温度の高いほど摩耗面積は大きく、特に 600°C では著しく拡大した面が見られる（図 13 参照）。したがって、本被削材の場合において、砥石損耗が被削材温度の上昇につれ多くなる一因は砥粒の摩滅摩耗にあると考えられる。

被削材温度: 600°C
図 13 SUS 24 研削後に見られる
砥粒の摩滅摩耗面

被削材温度: 600°C
図 14 SUS 24 研削時に見られる脱落砥粒

なお、S 25 C 研削後の砥石表面の観察も行なわれたが、被削材温度による目づまりの顕著な違いはなかった。

4.3 結合剤の強さと被削材温度

結合剤の性質の温度依存性についてはほとんど公表されていない。本研究においても十分に検討するに至らなかった。ただ、SUS 24 の被削材温度 600°C の場合において脱落砥粒が多くあることが判明した（図 14 参照）。

4.4 総合的な解釈

以上の諸点をまとめると次のように解釈できる。

1) SUS 24 研削においては被削材温度の上昇につれ砥粒の摩滅摩耗によって砥石損耗は増加する。特に 600°C 研削では著しく摩耗が多くなるが、ここには化学的（酸化を含む）摩耗も含まれていると思われる。また、この温度では結合剤の劣化による砥粒の脱落も砥石損耗の大きな原因である。

2) SUS 27 研削における砥粒の機械的摩耗のうち微細破壊摩耗は被削材温度の上昇につれ著しく減少する。このことは高温化に伴う目づまりの増大によっていっそう強められる。さらに砥粒の摩滅的摩耗あるいは化学摩耗は砥粒切れ刃への切りくず溶着によって被削材温度が高いほど少なくなる。

3) 炭素鋼研削では被削材温度による目づまりの差は概して少なく、かつ微細破壊摩耗も本来多くないものと

思われる。その結果、被削材の硬化の現われる青熱ぜい彦 (ジャンメシシ) 両氏に深く感謝いたします。

性域で多少砥粒の摩耗が多くなる。

5. 結 論

得られた結果の主なものをあげると次のようである。

- (1) 一般に炭素鋼研削における砥石損耗量は被削材温度によって概して変わらず $150 \sim 450^\circ\text{C}$ のいわゆる鋼のぜい性域のどこかで最大値を示す。このことは先の炭素鋼平面研削の結果と一致する。
- (2) SUS 24 研削では被削材温度の上昇につれ、砥石損耗は 450°C まではわずかに上昇し、 600°C になると急激に増大する。顕微鏡観察の結果この温度では砥粒先端の摩耗が著しく、かつ脱落砥粒が多いことがわかった。
- (3) SUS 27 研削では被削材温度の上昇に伴い砥石損耗は著しく低下する。高温では被削材切りくずが砥粒切れ刃に溶着し砥粒摩耗を抑制するためと思われる。

おわりに本実験の遂行にあたり熱心に協力された本学大学院・木村直人君ならびに洪田登 (川崎重工), 長邦

参 考 文 献

- 1) J. A. Mueller: New Concepts in Stock Removal for the Steel Industry, Text Book of Carborundum Conf., Nov. 10 (1964).
- 2) L. Sanderson: Hot Grinding of Steels, Tooling, Oct. (1964) 41.
- 3) 松尾哲夫, 内川靖夫, 安井平司, 津和秀夫: $-196 \sim +600^\circ\text{C}$ における炭素鋼の平面研削, 精密機械, 37, 3 (1971) 190.
- 4) 貴志浩三, 江田 弘: ステンレス鋼の高温研削加工, 精密機械, 37, 7 (1971) 488.
- 5) 吉川弘之: 砥粒の機械的性質と切れ刃形成, 精密機械, 31, 11 (1965) 17.
- 6) 松尾哲夫, 木下和久, 黒木紳一郎: 砥粒の耐摩耗性に関する研究 (第2報), 昭和46年度精機学会秋季大会学術講演会前刷 (1971) 199.
- 7) 奥富 衛, 今中 治, 藤野誠二: 研削界面における化学現象, 昭和45年度精機学会春季大会学術講演会前刷 (1970) 363.
- 8) L. Coes: The Chemistry of Grinding, Abrasives, Springer-Verlag, Berlin (1971) 158.
- 9) 長野 豊, 松尾哲夫: 鉄鋼材料の研削性に及ぼす被削材温度の影響, 熊本大学工学部研究報告, 19, 2 (1970) 105.

情 報

工技院, 外国規格を抄録化

わが国が商品, 技術の国際交流をいっそう促進させるには, JIS (日本工業規格) と諸外国との規格の関連性調査や外国規格の内容調査活動が重要となる。この対策として工業技術院は 49 年度から, これら調査活動を円滑にするため, 外国規格の抄録やクロスインデックスの作成, 整備を5か年計画で推進していくことになった。計画では初年度は精密・工作機械関連 JIS 約 1000 件について, アメリカ, イギリスなど4か国の代表的な規格と対比させ, 外国規格の抄録化をはかり, 5か年間に約 7000 件の JIS に対応した外国規格の抄録作業を終わらせる考えである。この作業は日本規格協会に委託, 同協会も約 2000 名の専門家を投入するが, この作業が完成すれば, 産業界にとって外国規格も技術, 商品貿易の高度化に役立つ情報源として生かされるわけで, 工技院もその成果を期待している。

商品や技術の国際交流の促進は各国の課題となっているが, これが円滑に進められない原因の一つに各国の規格体系の相違が指摘されている。この原因を一掃するため, ガットでも各国が国際規格を採用するよう強調されているが, この提案は各国の事情もあって急テンポで浸透するものでもない。

わが国の場合, JIS の改正, 見直し時には, できるかぎり JIS 体系と主要各国の規格体系の整合性を考慮して

いるという (工技院標準課)。しかし, JIS 内容と他国の規格内容との対比は, 規格分類の相違もあってかなり困難な作業になっており, この面の対策が必要という。

一方, 産業界でも貿易面から外国規格の調査活動の重要性が増してきているが, 全部で約 30 万件もある規格の内容を調べることは困難で, 外国規格から必要な情報を完全に得ることは容易でないという。このため工技院は外国規格と JIS とを容易に対比できる情報管理体制の必要性を痛感, 49 年度から5か年計画で外国規格の抄録作業に着手することにしたものである。

ただ外国規格すべての抄録化はむりなので, 初年度は必要性の高い機械要素, 精密機械, 一般機械, 工作機械分野の JIS 約 1000 件を選び, これに対応した外国規格の抄録化をはかる考えである。

また外国規格としてはアメリカの ANSI, イギリスの BS, フランスの NF, 西独の DIN など世界的に知名度の高いものを対象とする。

さらに50年度から53年度までの4年間は6000件の JIS に対応した外国規格の抄録化をはかる計画である。これら作業は日本規格協会に委託するとしている。一方, 同協会もこの作業の推進にあたっては約 2000 名の専門家を動員する意向であり, 抄録化が完成すれば産業界が他国と技術交流する際の貴重なデータとして役立つものとみられる。

(服部 敏夫)