研削砥石のクラッシングに関する研究 (第1報)*

—クラッシングの目直し効果について—

松井正己** 田牧純一**

Study on Crush Dressing of Grinding Wheel (1st Report)
—Dressing Effect of Crushing on the Wheel Surface Topography—

Seiki MATSUI and Jun'ichi TAMAKI

The crushing mechanism is investigated experimentally by measuring crushing force, crush roll actual infeed, surface topography and roundness of grinding wheel, and finished surface roughness. Experiments are carried out by using cylindrical grinding machine and by driving crush roll with workpiece spindle. Results are as follows: (1) In crushing operation, two states exist, one is transient state in which only dressing effect appears and a reduction in grinding wheel diameter caused by bond and grain fractures does not occur, and another is stable state in which grinding wheel is crushed with the crush roll infeed rate set up. The transient crushing is caused by an elastic behaviour between crush roll and grinding wheel, and the stable crushing start time can be derived theoretically. (2) In stable crushing, cutting edge shape becomes sharper than that of grinding wheel dressed by diamond tool, and the positional distribution pattern takes uniform one. The distribution density decreases rapidly with an increase in crush roll infeed Δ per one revolution of grinding wheel, although the decreasing rate is limited by Δ . (3) Crushing out contributes to the improvement in grinding wheel roundness and surface topography, and the degree of improvement depends on Δ .

Key words: crush dressing, grinding wheel, wheel surface topography, elastic behaviour in crushing, grinding wheel roundness, crushing out, crushing force, cutting edge density

1. 緒 言

総型研削用砥石の目直し工具にクラッシュロールを用いる方法は古くから行われているが、ロール形状精度の劣化、研削仕上面粗さの悪化などクラッシングの持つ欠点¹⁾のために、その普及は一般化するにいたっていない。特に多量生産分野ではロータリダイヤモンド工具がその主流を占めつつあるのが現状である。しかしながら、クラッシングの持つ低コスト性、形状に対する多様性は見逃せない利点であり、また最近では、ダイヤモンド、CBN 砥石の成形にクラッシュロールを用いる方法²⁾も報告されている。したがって、クラッシング機構に対するより一層の解明がなされクラッシング条件の選定基準が確立されるならば、総型研削に対するクラッシングの適用範囲は現在よりも広がるであろう。

さてクラッシングに関する研究はこれまでにいくつ

か報告されている。例えば Helfrich³⁾ はクラッシング圧力の概念を提案し、鈴木ら⁴⁾ はクラッシング実用化のための実験的検討を行っている。また佐々木ら⁵⁾ は砥石形直し効果の点からクラッシング機構を議論し、Gindy ら⁶⁾ は最適クラッシング条件の選定を試みている。

これらの報告はそれぞれ有意義な結果を提供しているが、クラッシングの目直し効果について砥石表面トポグラフィと定量的に対応させて議論したものは見あたらない。本研究は、この点に注目し、最適クラッシング条件の選定基準を求めべく、クラッシング条件と実質クラッシング量、砥粒切れ刃密度、切れ刃形状、砥石真円度の関係について実験的な検討を行い、クラッシングにおける弾性的挙動とあわせて、目直し効果に及ぼすクラッシング条件の影響について議論したものである。

2. 実験方法

実験装置の概略を図1に示す。実験に使用した研削盤は静圧軸受型の円筒研削盤であり、クラッシング方

* 原稿受付 昭和59年6月4日、昭和59年度精機学会春季大会学術講演会(昭和59年3月26日)にて発表

** 正会員 東北大学工学部(仙台市荒巻字青葉)

Fig. 1 Schematic drawing of experimental device

式としてロール駆動方式を用いた。すなわち工作物支持センタ間にクラッシュロールを取り付け、工作物回転用モータでクラッシュロールを回転させながら砥石を一定速度で押し込むことによりクラッシングを行った。

なお本研究の主点は目直し効果にあるため、クラッシュロール形状として単純円筒形のものを用いた。また砥石駆動用モータには無段階連続可変型のものを用い、クラッシング前に砥石とロール間のすべり速度が零になるように砥石回転数を調整することにより、ロールの初期すべり摩耗⁴⁾を極力抑えた。

クラッシング抵抗、すなわち砥石・ロール間接触力 F はロール支持センタに貼付したひずみゲージにより測定し、実質クラッシング量すなわちクラッシングによって生ずる砥石半径方向減耗量は、クラッシング直後の砥石で軟鋼薄板を研削し、その薄板に転写された砥石プロファイルの段差を触針式粗さ計で測定することにより求めた。砥石表面トポグラフィの測定には、0.2 rph で回転する砥石の作業面を円すい形ダイヤモンド触針で走査する方法と、円筒黄銅試片を砥石作業面に押しつけて引っかく方法⁷⁾の二つを用いた。砥石真円度の測定には、10 rph で回転する砥石作業面上に幅 4 mm、外径 15 mm の軸受用円筒ころを乗せてその変位を触針式粗さ計で測定する方法を用いた。なお触針の変位は逐次マイコンに取り込まれ処理されるようにした。

クラッシング条件を表 1 に示す。なおクラッシング前に単石ダイヤモンド工具で目直しを行い、砥石作業面性状を一定状態に設定してから実験を行った。

クラッシング幅については研削盤に過度の負荷が働かないよう 10 mm に限定した。

Table 1 Crushing conditions

Grinding wheel	WA 60 KmV, Diameter 350 mm
Crush roll	SK 3 (HRC=51), Diameter 70 mm
Roll infeed rate	$f = 0.1 - 0.5$ mm/min
Roll revolution	$N = 114 - 490$ rpm
Crushing width	$b = 10$ mm
Coolant	Solution type

Fig. 2 Variations of operational parameters in crushing with the lapse of crushing time under the conditions that $f = 0.5$ mm/min and $N = 303$ rpm

- (a) Variation of crushing force
(b) Variation of crush roll infeed
(c) and (d) Variation of grinding wheel surface topography

3. 実験結果

3.1 定常クラッシング開始時間

図 2 (a), (b) はクラッシング抵抗、実質クラッシング量のクラッシング時間の経過に伴う変化を追跡した結果の一例である。図より、クラッシュロール押込み開始後 t_e s (図では約 27 s) 間はクラッシング抵抗が増加するだけで砥石の破碎が行われず実質クラッシングによる砥石半径の減少はほとんど認められないこと、 t_e s を過ぎると砥石破碎が開始されてロール押込み速度 f とクラッシング速度が一致し、またクラッシング

Fig. 3 Explanation drawings of elastic behaviour in crushing
(a) An elastic deformation between grinding wheel and crush roll
(b) Effect of the elastic deformation on crush roll in-feed

抵抗も幾分減少した後一定値に落ちつくことがわかる。この結果は、クラッシュロール押込み開始後しばらくの間はロール押込み量が砥石・ロール間の弾性変形量として吸収され、その量がある値に達してから初めて実質クラッシングが行われるという弾性的挙動、いわゆるかつき現象の存在することを意味している。

図3はこの現象を単純ばね系でモデル化したものである。図3(a)に示すように、砥石・ロール間の接触力 F はばね定数 K と弾性変形量 X_e の積で与えられるものとする。さて実質クラッシングの開始される時間を定常クラッシング開始時間 t_e と呼ぶことにすると、定常クラッシング開始時間 t_e における弾性変形量 X_e は図3(b)に示すように t_e における設定ロール押込み量 $X_a(t_e)$ で与えられる。すなわち

$$X_e = X_a(t_e) = ft_e \quad (1)$$

ここで f はロール押込み速度である。

したがって砥石・ロール間の接触力 F は式(2)で与えられる。

$$F = KX_e = Kft_e \quad (2)$$

一方、クラッシング圧力 p_c を用いると、接触力 F はクラッシング圧力 p_c と砥石・ロール間接触面積の積として式(3)で与えられる⁴⁾。

$$F = p_c b \sqrt{\Delta \frac{Dd}{D+d}} \quad (3)$$

Fig. 4 Experimental results of crushing pressure

Fig. 5 An experimental relationship between elastic deformation and contact force

上式で b はクラッシング幅、 Δ は砥石1回転あたりのロール押込み量、 D は砥石径、 d はロール径である。なお Δ は式(4)で与えられる。

$$\Delta = \frac{fD}{Nd} \quad (4)$$

ここで N はロール回転数である。

式(2)、(3)から F を消去すると、式(5)に示す定常クラッシング開始時間 t_e が得られる。

$$t_e = \frac{p_c b D}{K \sqrt{fN(D+d)}} \quad (5)$$

図4は、定常クラッシング開始時点のクラッシング抵抗測定値からクラッシング圧力 p_c を計算した結果である。図より、クラッシング圧力 p_c は本実験条件内では一定値とみなしてよいことがわかる。また、その値 92 MPa {9.4 kgf/mm²} は鈴木らによる WA 60 K 9 V 砥石の測定結果⁴⁾ (9 kgf/mm²) と大体一致している。

図5は、砥石・ロール間の弾性変形量 X_e と接触力 F の関係を測定した結果である。図より、砥石・ロール弾性系のばね定数として $K = 3.1 \text{ kN/mm}$ が得られる。

図6は、ロール押込み速度 f 、回転数 N をいろいろ変化させて定常クラッシング開始時間 t_e を測定した結果であり、図中の曲線は式(5)にクラッシング条件と p_c 、 K の測定値を代入して計算した t_e の値である。測定値と計算値は大体一致しており、式(5)を用いて測定結果を説明し得ることを示している。

さて、効率よくクラッシングを行うためには、この定常クラッシング開始時間をできるだけ短縮しクラッ

Fig. 6 Experimental results of stable crushing start time

Fig. 7 An experimental result of seized grain cutting edge density under the crushing conditions that $f=0.5$ mm/min, $N=303$ rpm, and $t=24$ s

シングに要する時間コストを減少させることが必要である。そのためには、式(5)からわかるように適正クラッシング条件 f, N を選定するほかに、砥石・ロール間のばね定数 K を高めるようクラッシング装置を設計することが重要である。一例としてクラッシュロール支持方法を玉軸受を用いた2点支持型に変更した場合、ばね定数 K は 4.8 kN/mm にまで向上し、定常クラッシング開始時間を約 35% 短縮することができた。

3.2 砥石表面トポグラフィの測定例

図7は、円すい形ダイヤモンド触針で砥石作業面を走査することにより捕捉された砥粒切れ刃数を砥石軸方向投影面単位面積あたりの個数 $N_p(Z)$ で表示した結果の一例である。さて、この測定結果から砥石表面トポグラフィ特性値を求めるために、砥石表面トポグラフィに関して次に示す仮定を設ける。

- (i) 砥粒切れ刃形状は頂角 2α の円すい形で近似できる。
- (ii) 砥粒切れ刃は砥石幅、円周方向には一様に分布しており、砥石深さ Z 近傍における砥粒切れ刃密度 $D_z(Z)$ は式(6)で与えられる。

$$D_z(Z) = \frac{1}{W_1} \left(\frac{Z}{Z_1} \right)^n \quad (6)$$

上式で、 Z_1 は単位砥石深さ、 W_1 は砥石深さ Z_1 近傍における砥粒切れ刃1個の占める平均体積、 n は砥粒

切れ刃分布状態指数である。

このとき、これら砥石表面トポグラフィ特性値と測定値 $N_p(Z)$ の間には、砥石表層部において次の近似式が成立する⁸⁾。

$$N_p(Z) \approx \frac{2 \tan \alpha Z^{n+1}}{(n+1) W_1 Z_1} \quad (7)$$

ここで $\tan \alpha$ は $\tan \alpha$ の平均値である。

したがって式(7)を図7の測定値に適用することにより $n, \tan \alpha / W_1$ の値を推定することができる。図7の場合、 $n=0.15$, $\tan \alpha / W_1 = 0.74 \times 10^{-6} \mu\text{m}^{-3}$ という値が得られる。

また、砥粒切れ刃先端半頂角の正接平均値 $\tan \alpha$ は引っかけ転写法⁷⁾によっても直接求めた。

3.3 砥石表面トポグラフィとクラッシング時間

図2(c), (d)は砥石表面トポグラフィ特性値のクラッシング時間の経過に伴う変化を追跡した例である。図より、クラッシュロールの押込み開始と同時に $n, \tan \alpha / W_1$ の値は減少していき、目直し効果の現れること、また、これらの値は定常クラッシング開始時点 t_e を経過すると一定値に落ちつくことがわかる。この結果はクラッシング機構を理解する上でクラッシング時間が重要な因子になることを示している。

3.4 砥石表面トポグラフィとロール押込み速度 Δ

図8は、定常クラッシング状態、すなわちロール押込み速度 f と実質クラッシング速度の一致する領域において、砥石1回転あたりのロール押込み量 Δ と砥石表面トポグラフィ特性値 $n, \tan \alpha, W_1$ の関係を求めた結果である。

なお図8において、 $\Delta=0 \mu\text{m}/\text{rev}$ における値はクラッシング前、すなわち単石ダイヤモンド工具で目直した砥石の表面トポグラフィ特性値を示している。図より、クラッシングによって、(i) 砥粒切れ刃形状は単石ダイヤモンド工具による目直し面に比べて幾分鋭利になること、(ii) 砥粒切れ刃分布状態は砥石深さに対して直線的に増加する三角分布 ($n=1$) から一様分布 ($n=0$) に移行すること、(iii) 砥粒切れ刃密度はロール押込み速度 Δ の増加に伴い急減するが、 $\Delta=8 \mu\text{m}/\text{rev}$ 付近を超えると一定値に落ちつくことがわかる。特に (iii) の結果は、クラッシング条件を変えることにより砥石表面トポグラフィを調整できる範囲には限界のあることを示している。

図9は、以上の結果を検討するために、クラッシング直後の砥石で外径 80 mm、幅 8 mm の S45C 材をブランチ研削し仕上面粗さを測定した結果である。なおブランチ研削条件は、砥石回転数 1500 rpm、工作物回転数 114 rpm、ブランチ速度 0.1 mm/min とした。

Fig. 8 Variations of characteristic values of grinding wheel surface topography with an increase in crush roll infeed per one revolution of grinding wheel under stable crushing
 (a) Variation of grain cutting edge half tip angle α
 (b) Variation of $\tan \alpha / W_1$ which characterizes grain cutting edge density and its shape
 (c) Variation of grain cutting edge distribution pattern

Fig. 9 Experimental results of ground surface roughness obtained from plunge cut with crushed grinding wheel (Workpiece is S45C material and 80 mm in dia.)

図9の結果は図8(b)の結果から推定できる仕上面粗さと定性的に一致しており、定常クラッシング領域においては、砥石表面トポグラフィは砥石1回転あたりのロール押込み量 Δ の値で決定されることがわかる。

3.5 クラッシングアウトの効果

クラッシングアウトの目的は砥石表面トポグラフィの調整のほかに、砥石形状を修正し真円度を向上させることにある。そこで、砥石の被クラッシングアウト

Fig. 10 An experimental result of grinding wheel profile after crushing under the conditions that $f=0.2 \text{ mm}/\text{min}$, $N=114 \text{ rpm}$, $t=188 \text{ s}$, and no crushing out

回数の増加に伴う砥石表面トポグラフィ、砥石真円度の変化を追跡した。

図10に砥石形状の測定結果例を示す。砥石真円度を求める場合には、全円周あたり50山程度のフィルタをかけて得られる形状について、その真円度を半径法で表示した。図10の場合、砥石真円度として33 μm が得られる。

図11(a)は、砥石の被クラッシングアウト回数に対する砥石真円度の変化を測定した結果である。なお、図中の一点鎖線は、砥石形状測定装置の測定精度を検討するためにアルミニウム円板を砥石軸に取り付けた状態で切削し、その形状を測定した結果であり、真円度として2 μm が得られた。また、図中の二点鎖線は、クラッシング前すなわち単石ダイヤモンド工具で目直した砥石の真円度3.5 μm を示す直線である。

図11(a)において、クラッシング直後、すなわちクラッシングアウト回数零回の時点の砥石真円度は、砥石1回転あたりのロール押込み量 Δ の大きいほど大きい値を示していることがわかる。

図11(b), (c)は、3.2節に示す方法により砥石表面トポグラフィを測定した結果である。

図11より、クラッシングアウトの効果として、(i) 砥石真円度は改善され減少していくが、砥石の被クラッシングアウト回数が20回付近を超えるとほぼ一定値に落ちつくこと、(ii) 砥粒切れ刃分布状態が大きく変化することはない、一様分布状態 ($n=0$) を維持すること、(iii) 砥粒切れ刃密度形状特性値 $\tan \alpha / W_1$ の値は砥石1回転あたりのロール押込み量 Δ が $\Delta=5$

Fig. 11 Variations of grinding wheel roundness and surface topography with an increase in the number of grinding wheel revolutions during crushing out

(a) Variation of grinding wheel roundness

(b) Variation of grinding wheel surface topography

μm/rev の場合にだけ顕著な増加を示すことがわかる。

(iii) の結果は、図 8 に示したロール押込み速度 Δ と砥石表面トポグラフィの関係曲線を用いて説明できる。すなわち図 8 を見ると、ロール押込み速度 Δ が 5 μm/rev 付近になるとロール押込み速度の減少に伴う砥粒切れ刃密度形状特性値 $\tan \alpha / W_1$ の増加傾向が急激になっており、したがって、クラッシングアウト中の弾性変形量回復によって生ずるロール押込み量の変化が砥石表面トポグラフィの向上となって現れたものと考えられる。

クラッシングアウトの効果を考える場合には、このほかに、ロール押込み量と目直し効果層深さの関係についても検討を行う必要があるであろう。

4. 結 論

ロール駆動型のクラッシング装置を用いて、砥石・ロール間の弾性的挙動、砥石表面トポグラフィとク

ラッシング条件の関係について実験的検討を行った結果、次の点が明らかになった。

- (1) クラッシングには、目直し効果だけが現れ砥石破碎のほとんど進行しない過渡的なクラッシング状態と、その後続く、ロール押込み速度と実質クラッシング速度の一致する定常クラッシング状態が存在する。
- (2) 定常クラッシング開始時間は、クラッシング条件、砥石の固有値であるクラッシング圧力、クラッシング装置系の剛性を用いて計算できる。
- (3) 定常クラッシング状態における砥石表面トポグラフィに注目すると、砥粒切れ刃分布状態は砥石深さ方向に対して一様分布となる。また単石ダイヤモンド工具による目直し面に比べて砥粒切れ刃形状は幾分鋭利になり、砥粒切れ刃密度はかなり小さくなる。
- (4) 定常クラッシング状態における砥石表面トポグラフィを $\tan \alpha / W_1$ で特性化すると、 $\tan \alpha / W_1$ の値は砥石 1 回転あたりのロール押込み量の増加に伴い減少していくが、やがて一定値に落ちつく。ここで、 $\tan \alpha$ は砥粒切れ刃形状を円すい形で近似した場合の半頂角 α の正接平均値、 W_1 は砥石深さ 1 μm 近傍における砥粒切れ刃 1 個の占める平均砥石体積である。
- (5) クラッシングアウトは砥石真円度の向上に効果があるが、砥石表面トポグラフィに関しては、その効果度合は砥石 1 回転あたりのロール押込み量に左右される。

参 考 文 献

- 1) 竹中規雄, 佐藤久弥: 研削加工のドレッシング・ツーリング, 誠文堂新光社 (1971) 131.
- 2) J. Schwämmle & R. Lowin: Deep Form Grinding with Crush-formed Diamond and CBN Wheels, Ind. Diamond Rev., (1983) 20.
- 3) E. C. Helfrich: Theory and Practice of the Crush Dressing Operation, Trans. ASME, 11, (1948) 885.
- 4) 鈴木憲二, 鈴木 弘, 高橋邦夫: 円筒研削盤におけるクラッシングの研究, 精密機械, 32, 12 (1966) 837.
- 5) 佐々木外喜雄, 岡村健二郎, 豊島敏雄: 研削といひのクラッシュドレッシング, 日本機械学会論文集, 22, 114 (1956) 79.
- 6) N. N. Z. Gindy & T. J. Vickerstaff: The Significance of Crushing Roll Infeed Rate in the Grinding Wheel Crushing Operation, Proc. Int. MTDR Conf., 23, (1982) 219.
- 7) 松井正己, 田牧純一: 砥石表面トポグラフィの測定に関する研究 (第 2 報)——引っかけ転写法, 精密機械, 49, 11 (1983) 1522.
- 8) 松井正己, 田牧純一: 砥石表面トポグラフィの測定に関する研究 (第 4 報)——触針法, 精密機械, 50, 4 (1984) 672.