研 究

ホーニング加工における砥粒の切削機構

——ホーニング加工に関する研究 (第 1 報)*——

研 井 堅** 津 和 秀 夫***

Cutting Mechanism of Abrasive Grain

——Study on the Honing (Report 1)——

Hisashi TOGII, Hideo TSUWA

Most studies on the honing relate mainly to its practical phase, and even such fundamental matters as the mechanism of abrasive grain wear and that of chip formation are not clear. Report 1 describes the cutting mechanism of abrasive grains that has been corroborated experimentally on a horizontal honing machine. The following matters have been clarified;

1. The cutting edge of the abrasive grain, which undergoes considerable thermal effect in the process of wear, seems to have the following life cycle; New cutting points→wear→chipping off, nicking off, flaking off→disappearing.
2. As chips formed by the honing there are two types; continuous chip and discontinuous chip. The latter is frequently mass-like, and interference of the swell-up plays a large part in its formation.
3. The honed surface is a surface made brittle by repeated plastic deformations.

1. は じ め に

ホーニング加工の研究は古くから実用面を主体に研究されてきたが、その砥粒の切削機構について研究したものはきわめて少ない¹⁾。一方、研削加工における砥粒の切削機構は、現在かなり明らかにされてきている。ホーニング加工も研削加工も固定砥粒を用いるのであるが、後者は高速で砥石の接触面積が小さいのに対し、前者は低速で接触面積も大きい。さらに、研削加工においては砥粒の摩耗に対して熱的影響が大きいことが見出されている²⁾けれども、ホーニング加工の場合はどうなのかわかっていない。また、ホーニング加工における切りくずの生成機構についてもはっきりとわかっていない。

以上の状況を加味して筆者らは、定切込方式および定圧方式の両者を包含したホーニング加工における幾何学的精度と定寸精度の向上を目的とする研究を行なうことにした。そして、その研究の中には、砥粒の切削機構の研究とその結果の実際ホーニング条件への応用研究も含むものである。

2. 実 験 方 法

実験に使用した機械は 150 型マイクロホーナである。

*原稿受付 昭和43年 4 月 5 日。昭和43年度春季大会学術講演会(昭和43年 4 月 5 日)にて発表。

**正 会 員 東洋工業(広島市府中町字新地)

***正 会 員 大阪大学工学部

切込み装置は油圧機械式であるが、ばねにより砥石の定圧拡張もできる。図 1 は実験装置で、(a)に主要部の全景、(b)に取付具を示す。実験条件および工作物の成分分析結果を表 1、表 2 に示す。

図 1(a) 実験装置主要部全景

図 1(b) 取 付 部

表 1 実験条件

砥石	砥粒の種類	WA
	粒度	#36, #60, #180, #400
	結合剤	ビトリファイド
工作物	外形寸法	31.75mm×4.75mm こっ配 4°, 1バンク4個装着
	材質	S55C (焼入れ焼もどし) HRc 40
工作条件	材 寸	58.9mmφ×18.8mmφ×23.5mm
	円周速度	20m/min, 37m/min
	往復速度	4.3m/min, 4m/min
	砥石拡張速度	0.1mm/min(直径にて)
加工油		ユシロンカット(4)+DTE
		オイルライト(1), 120cc/min

表 2 工作物の成分分析結果 (%)

C	Si	Mn	P	S
0.58	0.26	0.69	0.016	0.013

3. 実験結果

3.1 砥石の摩耗面

3.1.1 結合剤切れ刃と砥粒切れ刃

WA60L を使用して、ホーニング砥石の切れ刃の状況を観察した。砥石切れ刃には、結合剤切れ刃と砥粒切れ刃の二種がある³⁾。図 2(a)(b)は砥粒切れ刃と結合剤切れ刃を示す。(1)は摩耗面の溶着物を除去するために酸洗い(硝酸を使用)した後の、また(2)は結合剤を除去するために、さらに非化水素酸で洗った後の写真である。(b)(1)の摩耗面のピッカースかたさは 500~800 であった。図 3(a)(b)は結合剤の電子顕微鏡写真である。(a)は切削に関与しなかった部分、(b)は切削に関与した部分で非常に平滑である。ビトリファイド結合剤の軟化熔融温度は1100℃~1300℃といわれているが、(b)の写真からみて、かなりの高温に達しているものと考えられる。図 4(a)(b)は砥粒切れ刃の電子顕微鏡写真である。(a)の x 部から z 部にかけて砥粒切れ刃面が変化している。x 部ではへき開摩耗面が明りょうに観察される。これは機械的および物理的作用によるものと考えられる。x 部から y 部にいたると、へき開が徐々にうね状に変化している。そして、へき開部はだんだん少なくなっている。さらに y 部から z 部に進むと、へき開はほとんど無くなり平滑な面となっている。これは、温度の影響で、塑性的挙動に支配されているものと考えられる。

(b)は砥粒切れ刃が破碎した例で、多数の鋭い切れ刃が形成されている。

3.1.2 砥粒摩耗面

砥石面上の砥粒 8 個を選び、工作物を 50μ 削るごとに、その切れ刃面の変化状況を観察した。図 5(a)~(g)はその

(1) (2)
(a) 砥粒切れ刃

(1) (2)
(b) 結合剤切れ刃

(1)は酸洗い後の写真 (2)は非化水素酸で腐食後のものを示す

図 2 砥粒切れ刃と結合剤切れ刃

(a) (b)
図 3 結合剤切れ刃面の電子顕微鏡写真

代表例である。毎回ごとの砥粒の走行距離は 12m である。ホーニング加工においても、砥粒は「新出→摩耗→脱落、欠損、一部はく離→消滅」というサイクルを繰り返している。これらの現象は、WA180J の場合にも同様に見られた。砥石摩耗面には、交差角の方向にすじが入っている。(b),(c),(d),(f)の写真からみると、交差角と摩耗は密接な関係があると思われる。図には、各場合の砥粒摩耗面積を参考のために示してある。

以上の観察によって、ホーニング加工のように砥石が広い面積で接触して低速度加工をする場合でも、研削加工時の砥石摩耗とほぼ同じような現象が生じていることがわかる。さて、図 3(b)および図 4 の写真から、ホーニング加工で摩耗した切れ刃は、かなりの熱的影響を受けているものもあることがわかった。もしも、これが正しいならば、砥粒切れ刃摩耗面上に工作物の一部が溶着し

図 4(a) 砥粒切れ刃の電子顕微鏡写真

図 4(b) 砥粒切れ刃の電子顕微鏡写真(走査電子顕微鏡による)

表 3 砥粒表面の元素定性分析

砥石の状態	分析された元素
未使用砥石	Al, Si, K, Na, C, O
使用した砥石	Al, Si, Fe, Mg, Na, O
" 1)	Al, Si, Mg, Na, K, N, C, O
" 2)	Al, Si, S, K, Ca, Fe, C, O

- 1) 硝酸処理をしたもの
2) 硝酸処理後、弗酸処理をしたもの

図 5 砥粒摩耗面の追跡

ているはずである。これを確認するために、X線マイクロアナライザによる砥粒表面の元素定性分析を行なっ

た。分析結果を表 3 に、その記録を図 6(a)~(e)に示す。未使用砥石では、砥粒と結合剤の元素が交互に現われて

図6 X線マイクロアナライザによる砥粒表面の元素定性分析

おり、Fe は検出されていない。Al および Si に高低があるのは、X線ビームの焦点距離を固定したため、表面に高低があると弱く検出されることによる(図6(a))。使用後の砥石(図6(b))はFeが摩耗面上と砥石の気孔部分に見える。摩耗面のFeは顕微鏡観察面(図(e))と対照して観察したので溶着物である。硝酸処理したものは、Feが溶けてなくなっており、全体として未使用砥石より表面が平坦になっている(図(c))。硝酸処理後、弗化水素酸で洗ったものは、硝酸処理だけ行なったものとはほとんどかわらない(図(d))。ここで、表3の代表的な三元素(Al, Si, Fe)について若干考察を加える。以上の測定で問題となるのは砥粒、結合剤および溶着物の判別である。実験に使用した砥石はWA60Lであるが、この砥石の結合剤組成は表4のようである。一方、WA砥粒の組成は Al_2O_3 が主である。Alは砥粒と結合剤のいずれにも含まれているが、結合剤に含まれている Al_2O_3 は最高22%である(表4より)。この内、Alは $22 \times (54/102) = 11.6\%$ である。したがって、11.6%以上のAlが検出されれば、その部分は結合剤でなく、砥粒ということになる。以上から、図(b)のFeは溶着した切りくずである。

3.2 切りくず生成機構

3.2.1 連続形切りくず

連続形切りくずは、主として砥粒の進行方向前縁に発生するもので、長くてすぐいもの、カールしたものある

表4 結合剤の組成

化合物	%	化合物	%
SiO_2	62~67	Na_2O	2~3.5
Al_2O_3	15~22	Fe_2O_3	0.5~3.5
B_2O_3	5~6	MgO	0.2~2
CaO	3.5~4	TiO_2	0.3~0.4
K_2O	3~6		

いは変形させられたものがある、図7(a)はWA36の単粒でS55Cの表面を引っかいた場合を示すが、実際のホーニング加工の場合にも図7(b)のように(a)と同じような切りくずが出ている。なお、(b)の小さい切りくずも連続形切りくずが小さくちぎれたものであるから連続形と考えられる。(c)は実際のホーニング加工直後の砥石面を、走査電子顕微鏡で観察したものであるが、砥粒切れ刃に(a)(b)と同様な切りくずが付着している。

3.2.2 不連続形切りくず

ホーニング加工で生ずる切りくずの内、ほとんどの切りくずは塊状である。塊状切りくずは三種が観察された。不連続形切りくずを図8(a)に示す。塊状切りくずの一つは、図8(b)に示されるひげ状のもので、これは図8(c)における盛りりfが切れてできたものと考えられる。その二は、盛りりの干涉によるものである。ホーニング加工では工作物表面は、砥粒により多くの条こんをつけられるが、WA36単粒による実験結果を示すと図9のようである。砥粒の先端(数 μ)の形状が工作物表面にう

(a) WA36 単粒による引っかきで生じたもの

(b) 実際のホーニング加工で生じたもの (加工液中より採取)

(c) 実際のホーニング加工直後の砥石面 (走査電子顕微鏡による)

図 7 連続形切りくず

(a) 塊状切りくず

(b) ひげ状塊状切りくず

図 8 不連続形切りくず

(c) ひげ状塊状切りくずの生成

図 9 砥粒切れ刃形状と条こん形状の関係 (WA36) (砥粒切れ刃を丸印で示す)

つされているが、盛り上りをともなっている。このような盛り上りをともなった条こんが交差したり、きわめて接近して平行して条こんが走る場合、盛り上り部分はどのようなかを示す。図10(a)(b)に示す。(a)は交差角が 2α で条こんが交差した場合である。実験は便宜上、同一砥粒で条

図 10(a) 条こんと仕上面あらさの関係

図 10(b) 条こんの干渉による盛り上りの変化

(a) ホーニング仕上面

(a)の説明図

 (b) 仕上面あらさ
 GE: 砥粒の運動方向
 2α: 交差角
 A: 谷と谷の相貫線
 H: 仕上面あらさ測定方向

図 11 ホーニング仕上面 (WA60LV)

んを交差させた(条こん断面形状が同じである)。交差付近の盛上りの状況を調べるために(1),(2),(3),(4)の位置でタリサーフにより断面形状を記録した。(2)付近では、2本の条こんは明りょうに区別できるが、(3)では盛上りの干渉が生じはじめており、さらに(4)では2本あるべき中央部の盛上りが1本になっており、しかも(3)の断面積よりも小さくなっている。すなわち、切りくずとして取り去られたのである。(b)は二つの条こんが平行してしかもきわめて接近してある場合の盛上り部分の干渉状態を示すものである。(1)は左端のような条こんが干渉により、切りくずとなるかわりにかえって大きく盛上った例であるが、これは仕上面あらさの記録からみてもひん度は少ない。(2)は干渉により盛上りが欠如した場合であるが、ホーニング加工ではこのような例が多い。すなわちこの場合も切りくずとして取去られたのである。

不連続形切りくずのその三は、盛上りが削りとられた場合である。図11はホーニング仕上面であるが、塑性変形の状態がよくわかる。さて、図の交差線をよくみると、仕上面の谷と谷の相貫線が明りょうに観察される。すなわち、盛上り箇所を砥粒がある角度で走ると、図のように切り口を残して、塊状切りくずとして取去られるのである。

以上は切りくずの生成に関して実験的に考察したものであるが、筆者らの基本的な考えは明らかにされたと思う。先の記述の中では説明を加えなかったが、盛上り部には図11の写真でもわかるような空隙があるから、見掛け上、みぞ断面積よりも盛上り部の断面積が大きくなることもある。したがって实际的に考えると、前述の塊状切りくずの生成機構の3種のケースが、加工面が塑性変形を受けるたびに混在して発生していると考えられるのである。さらに、工作物に生ずる条こんは仕上面あらさの形成に対して、密接な関係にあることもよくわかる。

(付記) 以上の事項は単粒内面ホーニング実験においても確認された。

4. ま と め

S55C (HRC40) のホーニング加工に関する諸実験を通じて次のことがわかった。

(1) 砥粒切れ刃および結合剤切れ刃は摩耗過程でかなりの熱的影響を受けているものがある。これは切れ刃摩耗面に溶着物が付着していることから明らかである。砥粒の摩耗はほぼ平らに進行し、「新出→摩耗→脱落、欠損、一部はく離→消滅」という寿命サイクルを行なう。これは WA60L, WA180J でも同様である。なお、図7(c)のように自生作用により、微小な切れ刃を数多く生ずる場合もある。

(2) ホーニング加工における切りくずは連続形、不連続形の2種がある。連続形切りくずは、砥粒切れ刃前縁に発生する。不連続形切りくずは条こんの盛上りの干渉により盛上りが除去された場合、盛上りの一部が切れた場合、および盛上りが砥粒前縁で突切られた場合に発生する。

(3) ホーニング仕上面は塑性流動面であり、切りくずは加工面が塑性変形のくり返しによりぜい化して、出やすくなったものである。

最後に、本研究を進めるにあたり、種々ご鞭達、ご援助賜った東洋工業株式会社村尾専務、樟本常務、篠原取締役役に感謝致します。また、種々のご援助とご討論を賜った当社技術顧問田中博士、工機研究課長寺谷博士、および実験を熱心に遂行された堀尾、熊野両研究員その他の諸氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 佐々木外喜雄、岡村健二郎：ホーニングの切削機構について、日本機械学会論文集，24，142 (1958) 372.
- 2) 田中義信、津和秀夫、河村末久：研削加工の諸条件が研削砥石の性能に及ぼす影響について(第4報)一砥粒の摩耗機構一，精密機械，31，5 (1965) 397.
- 3) 田中義信、津和秀夫、河村末久：研削加工の諸条件が研削砥石の性能に及ぼす影響について(第3報)一結合剤切れ刃一，精密機械，31，3 (1965) 227.