CBN 仕上げホブに関する基礎研究*

(第4報, 切れ刃ホーニング形状が仕上げ面粗さおよび摩耗に及ぼす影響)

中江道彦^{*1}, 日高一憲^{*1}, 有浦泰常^{*2}

Fundamental Research on CBN Finishing Hob

(4th Report, Influence of the Honing Form of the Cutting Edge on the Surface Roughness and Wear)

Masahiko NAKAE, Kazunori HIDAKA and Yasutsune ARIURA

The objective of this research is to develop a CBN (cubic boron nitride) hob that can finish medium to high hardness gears accurately and efficiently. The cutting performance of the CBN hob has been investigated by cutting tests using a fly tool. Fly tools with the chamfered cutting edges were used in previous experiments. The chamfer is effective to prevent chipping of the cutting edge. However, the chamfer has a tendency to accumulate dead metal and, as a result, the finished surface becomes rough. In this study cutting tests using fly tools with rounded cutting edges are carried out. The roughness of finished surfaces and the durability of cutting edges are compared with those obtained using the chamfered tools. A rounded tool with a radius of curvature of about 0.03 mm shows excellent cutting performance.

Key Words: Gear, CBN Hob, Surface Roughness, Rounded Cutting Edge, Dead Metal, Tool Wear, Chipping

1. 緒言

歯車装置の小型化・高出力化に伴い, 硬い歯車を高効率で高精度に加工しようとする要望が強い。本研究は中高硬度の歯車をホブ切りで高精度にしかも能率よく仕上げるのできるCBNホブを開発することを目的とするもので, 仕上げホブ切りをシミュレートした舞いツール切削実験により, 基礎的にCBN仕上げホブの切削性能を調べた。

これまでの一連の研究において, チッピング防止のために, 切れ刃にチャンファホーニングを施した舞いツールを用いた。ホーニング幅および角度の決定にあたっては, 工具摩耗と仕上げ面粗さの点から最適値を求めた¹⁾。しかし, このホーニング形状は, チッピング防止には有効であるが, 中硬度以下の材料の切削において, 切りくずが停留しやすく, ホーニング部に付着物が大きく成長するため, 仕上げ面を粗くする欠点があることを前報²⁾で明らかにした。また切削油

剤の使用などによって付着物の生成を抑制すれば, 仕上げ面粗さが改善されることも明らかにした。切りくずの停留が生じにくいホーニング形状として切れ刃に丸みをもつ丸ホーニングが考えられる。丸ホーニングは実用に供されているが, 主として工具のチッピング対策を目的としたもので, 工具寿命についての報告³⁾はあるが, 仕上げ面粗さへの影響については明らかにされたものは少ない。

本報では, 2種類の曲率半径の異なる丸ホーニングを施した工具を用いて切削実験を行い, それらの仕上げ面粗さや付着物生成状況などをチャンファホーニングの場合と比較し, 丸ホーニングの仕上げ面粗さ向上効果を明らかにした。さらに耐チッピング性や耐摩耗性などの耐久性とも総合的に判断して, 最適なホーニング形状を明らかにした。

2. 実験方法およびその条件

モジュール4, 歯数30, 歯幅20mmの平歯車をホブ送り2mm/revで仕上げホブ切りすることを想定し(表1に想定した歯車・ホブの諸元およびホブ切り条件を示す), そのとき切削量の多い切れ刃が削り出す長さ8mm,

* 原稿受付 1996年1月10日。

^{*1} 正員, 佐世保工業高等専門学校(〒857 11 佐世保市沖新町1-1)。^{*2} 正員, 九州大学工学部(〒812 81 福岡市東区箱崎6-10-1)。

最大厚さ0.05mmのアンカットチップと同一のものを横フライス盤上で削り出すために、送り0.73mm/rev、切込み0.28mmおよび切削速度55~113m/minの条件で1本刃のCBN舞いツールによる上向き切削を行った。用いたCBN工具はTiN系セラミックバインダで焼結した旋削用インサート四角チップ(SNGN)で、ダイヤモンドホーンを用いて、切れ刃に図1に示すような3種類のホーニング(チャンファホーニング、半径0.03および0.06mmの丸ホーニング)を施した後、フライス盤主軸に固定されたホルダーにすくい角 5° 、逃げ角 5° になるようにクランプした。なお、丸ホーニングの半径はそれぞれ最大切り取り厚さ0.05mmより小さいものと大きいものを採用した。したがって半径0.06mmの場合はホーニング部のみで切削が行われる。ホーニング加工は表面形状測定機を用いて形状を測定しながら行った。ホーニング後の切れ刃稜粗さはいずれも $Ry0.6\mu m$ 程度であった。図2に示す状態で乾式および湿式切削を行った。湿式では、前報⁽²⁾において仕上げ面粗さの改善に最も効果が高かった、粘度 $50mm^2/s$ 、塩素分3.6%、硫黄分2.5%の不水溶性切削油をすくい面側から $3.6\ell/min$ 注いだ。

まず前報⁽²⁾と同様、被削材離脱装置を用いて、図3に示すように切りくず1個の切削で得られる切削面を全長にわたって残した試料を得た。食い込み始めの位置から切削方向に位置を少しずつずらしながら横方向の粗さを測定し、切削の進行に伴う切削面粗さの変化を調べた。また切れ刃ホーニング部の付着物の生成

状況を調べるために、舞いツール急速離脱装置⁽²⁾を用いて切削の急停止を行い、切削点付近の断面を観察した。被削材は切削幅2.5mm、長さ40mmの被削部をもつSCM435材を硬さHB200~350に熱処理したものを用いた。

次に各工具の耐久性を調べるために、図4に示すような幅3mm、長さ250mmの被削部をもつ、くし状に加工したSCM435材をHB350に熱処理したものを被削材として切削長さ25mmまで切削を行った。一定量切削する毎に工具逃げ面摩耗幅、仕上げ面粗さおよび工具切れ刃稜粗さを測定し、切れ刃にチッピングの発生が認められた場合は切削を中止した。なお、削り出す切りくずの数から算定して切削長さ25mmは実験で想定した歯車を114個歯切りするのに相当する。またフライス主軸アーバに貼付したひずみゲージを用いて切れ刃がほとんど摩耗していない切削初期の切削抵抗(トルク)を求めた。

Fig. 2 Fly tool cutting

Fig. 3 Schematic view of specimen

Fig. 1 Honing forms of cutting edge

Fig. 4 Workpiece

3. 実験結果および考察

3・1 切削面粗さに及ぼすホーニング形状の影響

被削材離脱装置を用いて得た、1個の切りくずの切削開始から終了までの切削面粗さの変化を、ホーニング形状について比較して示したのが図5である。切削速度61および113m/minで硬さHB350の材料を乾式および湿式で切削したものである。乾式切削におけるチャンファホーニングでの61m/minの場合、切り込み始めから急激に粗くなり、ピークに達したのち、やや減少しているが全面にわたって非常に粗い。R0.03mmの丸ホーニングの場合は粗さのピークが小さく、切りくず長さ4mm以後は滑らかになっている。丸ホーニングの半径をR0.06mmに大きくすると、ピークは現れず、切削開始から終了まで $Ry 0.5 \mu m$ 程度の滑らかな面が得られている。切削速度113m/minの場合はホーニング形状の違いによる影響は少ないが、61m/minの場合と同様に丸ホーニングのほうが滑らかになる。湿式切削では、いずれの場合も乾式切削より粗さが減少し、特に丸ホーニングによる切削では全領域にわたって滑らかになることがわかる。前報²⁾で明らかにしたように切削

Fig.5 Variation of surface roughness

面の粗さはホーニング部に発生する付着物の大きさによって変化するものである。このことからホーニング形状を曲面にすると、付着物の生成が抑制されるものと予測される。

3・2 仕上げ面粗さの改善

1個の切りくずを削り出して得られる切削面のうち、仕上げ面として残るのは、上向き切削では切削始めからの1送り分だけである(図3参照)。

図6は切削速度113m/minで乾式および湿式切削したときの仕上げ面の横方向粗さ曲線をホーニング形状について比較したものである。乾式切削のチャンファホーニングでは全面がむしれ状を呈して粗い。R0.03mmの丸ホーニングでは部分的なむしれが見られるが、それ以外の部分は滑らかである。R0.06mmに大きくすると、全面が非常に滑らかになる。湿式切削では、いずれのホーニング形状の場合も粗さは小さく滑らかになるが、なおチャンファホーニングより丸ホーニングのほうがより滑らかになる傾向が見られる。

図7(a)(b)は切削速度61および113m/minでHB200、300および350の材料を乾式切削したときの仕上げ面粗さをホーニング形状について比較したものである。いずれの速度においても材料の硬さにかかわらず、丸ホーニングのほうが粗さは小さくなり、R0.06mmの場合は特に滑らかに仕上がる事がわかる。

図8は湿式切削における仕上げ面粗さを比較したものである。切削油を用いると、いずれのホーニングに

Fig.6 Surface profiles of finished workpiece

においても非常に滑らかになる。特にR0.03mmの丸ホーニングにおいて切削油の効果が高く、材料硬さや切削速度に関係なく切れ刃稜粗さと同程度の $Ry0.5\mu m$ の粗さが得られる。

次に各ホーニングを施したCBN工具を用いて切削している最中に工具を離脱し、切削を急停止した。得られた試料の断面を研磨後腐食し、その切削点付近を比較して示したのが図9である。左側は金属顕微鏡、右側は走査型電子顕微鏡を用いて観察したものである。なお、いずれもHB350の材料を切削速度55m/minで乾式切削し、切削開始点から約1.5mmの位置で停止した。図(a)のチャンファホーニングの場合は、ホーニング部に付着物が大きく生成して切れ刃より深く切り込んでいる。図(b)のR0.03mmのホーニングでは、付着物は見られるが、かなり小さい。図(c)のR0.06mmのホーニングでは付着物はほとんど見られないが、ホーニング形状に沿って仕上げ面に強い塑性流れが認められる。

図10は前図に示した試料の仕上げ面表層断面の走査電子顕微鏡写真を比較して示したものである。R0.06mmの丸ホーニングの場合、表面から約 $10\mu m$ の深さまで切削方向に塑性流れが見られる。R0.03mmのホーニングの場合にもわずかには見られるが、チャンファホーニングではほとんど認められない。このことから、丸ホーニングの場合は実すくい角が大きな負の角になる

ため、切れ刃が仕上げ面を強くこする、いわゆるバニシ作用を伴って切削が進行することがわかる。

Fig. 8 Effect of honing form on surface roughness (Wet cutting)

Fig. 7 Effect of honing form on surface roughness (Dry cutting)

Optical micrograph (a) Chamfer SEM micrograph (b) R0.03 (c) R0.06
SCM435(HB350), v55m/min, f0.73mm/rev, t0.28mm, Dry
Fig. 9 Micrographs of sections at the root of quick stop chip

図11は切削速度61~165m/minでHB350の材料を乾式および湿式切削したときの比切削抵抗を比較したものである。なお、比切削抵抗は最大切削抵抗を最大切り取り断面積で除して求めた。本実験では切り取り厚さが最大0.05mmと小さいため、チャンファホーニングの場合も比切削抵抗が寸法効果によって比較的大きいが、丸ホーニングの場合はさらに大きくなっている。特に仕上げ面に強い塑性ひずみを残すR0.06mmの場合は非常に大きくなることがわかる。切削速度による変化の傾向もホーニング形状によって異なる。チャンファホーニングの場合は切削速度の上昇につれ、付着物が減少し、実すくい角が小さくなるため、通常の切削とは異なり、比切削抵抗が増加する。これに対して、付着物がほとんど生成しないR0.06mmの場合は切削速度の上昇とともに比切削抵抗は減少する。R0.03mmでは両方の性質を併せもつため、速度による切削抵抗の変化はほとんど生じない。その結果として、高速側ではホーニング形状の違いによる比切削抵抗の差が小さくなっている。

以上のことから、切れ刃に丸ホーニングを施すと付着物の生成が抑制されるため、仕上げ面粗さに及ぼす

付着物の影響が減少し、加えて強いバニシ作用が働くため、切れ刃稜粗さに近い良好な仕上げ面が得られる。ホーニング半径は大きいほうがこれらの効果はより高い。切削油を併用すると、さらに付着物の生成が抑制されるため、非常に滑らかな仕上げ面が得られる。

3・3 切れ刃の耐久性 上記のように仕上げ面粗さおよび付着物生成状況の調査によって、丸ホーニングは粗さ改善に効果が高いことがわかった。そこで次に各ホーニング形状をもつ工具の耐久性と仕上げ面粗さの変化について調べた。

図12はHB350の材料を切削速度113m/minで乾式および湿式切削したときの各工具の最大逃げ面摩耗幅を比較したものである。乾式切削でのチャンファホーニングの場合、切削初期の摩耗は小さいが、切削長さ14m付近で切れ刃に小さなチップングが生じ、以後摩耗が急増した。同一条件での2度の再実験においても、ほぼ同程度の切削長さにおいてチップングを生じた。これは、脱落した付着物が構成刃先の場合と同様切れ刃と切削面との間にかみ込まれ、繰り返し衝撃力が作用することが原因であると考えられ、切削油を用いて付着物の生成を抑制した場合はチップングの発生もなく、切削長さ25m（歯車114個分に相当）まで安定した切削が行えた。R0.06mmの場合は乾式および湿式切削のいずれにおいても短い切削長さでチップングが発生し、切削を中止した。R0.06mmのホーニングの場合は付着物がほとんど発生しないことと湿式切削を行ってもチップングを防止できないことから、切削時のバニシ作用による切削抵抗の増大のためにチップングが発生するものと考えられる。R0.03mmホーニングの場合は乾式切削では切削長さ20mでチップングが生じたため切削を中止した。この場合、ホーニング丸みが小さいため、バニシ作用による切削抵抗の増加は少なく、チャ

Fig.10 Scanning electron micrographs of sections of finished surface

Fig.11 Effect of honing form on specific cutting force

Fig.12 Effect of honing form on flank wear

Fig. 13 Micrographs of cutting edge after cutting

ンファホーニングと同様に付着物の脱落がチップングの原因と考えられる。このため切削油を用いて付着物の生成を抑制すれば、チップングの発生を防止できる。

図13は切削後の各切れ刃の状態を示したものである。湿式切削を行ったチャンファおよびR0.03mmホーニングの工具は歯車114個分相当の切削をしたにもかかわらず、チップングの発生もなく、また摩耗も非常に小さいことがわかる。しかし他の場合はいずれもチップングが発生している。

図14は上記実験で得られた仕上げ面粗さの変化を比較したものである。乾式切削では、いずれの場合も切削長さが増すとともにしだいに粗くなる。特にR0.06mmでは切削開始直後は非常に滑らかな面が得られるが、チップングの発生とともに急激に粗くなる。湿式切削では、R0.06mmを除いて切削開始から終了まで $Ry 1 \mu m$ 以下の粗さが得られ、特にR0.03mmホーニングの場合には非常に滑らかである。工具摩耗も十分小さいため、さらに長時間の仕上げ切削が可能であると判断できる。

Fig. 14 Variation of surface roughness

4. 結 言

CBN工具による中硬度材の仕上げ面粗さの改善を目的として、切れ刃ホーニング形状の影響を調べた結果、次のようなことがわかった。

(1)切れ刃に丸ホーニングを施すと、付着物が生成しにくくなるとともに、切れ刃によるバニシ作用によって仕上げ面粗さが向上する。ホーニング半径を大きくするほど、また湿式切削を行うほうがより効果が高い。

(2)ホーニングの半径が0.06mmのように大きい場合は比較的短い切削時間でチップングが発生する。これはバニシ作用によって切れ刃に大きな力が作用するためと考えられる。

(3)チャンファホーニングおよび半径0.03mmの丸ホーニングの場合、乾式切削ではある程度の切削長さで、付着物の脱着が原因と考えられるチップングが発生する。しかし湿式切削を行うと切削長さ25mまでチップングの発生もなく、良好な仕上げ面が得られる。

(4)半径0.03mmの丸ホーニングを施した工具を用いた湿式切削では工具摩耗は小さく、仕上げ面粗さも $Ry 0.8 \mu m$ 程度で、切れ刃稜粗さ($Ry 0.6 \mu m$ 程度)に近い非常に滑らかな仕上げ面が得られ、本研究の中では最も優れたホーニング形状である。

最後に工具および切削油剤を提供していただいたダイジェット工業社ならびにユシロ化学工業社に感謝の意を表す。

文 献

- (1) 中江・日高, 機論, **53**-493, C (1987), 2000.
- (2) 中江・他2名, 機論, **62** 594, C (1996), 741.
- (3) 新谷・藤村, 精密機械, **51**, 5 (1985), 1053.