超硬ホブの損傷*

相浦正人^{*1}, 桜木 功^{*1}

The Damage of Carbide Hobs

Masato AINOURA and Isao SAKURAGI

Carbide hobbing have been used widely because of the manufacturing the carbide hobbing machine and improvement in manufacturing the carbide hob. Nowadays annealed gear blanks which often used in mass production can be carbide-hobbed without trouble. And in addition to that, it becomes to be possible to hob the heat treated gear blanks or hardly to be cut gear blanks which were impossible to be cut with the high speed steel hob till now. However, in the case of carbide hobbing for the heat treated gear blanks or hard-cutted, the damage of chipping or thermal crack will occur before the life (increase of flank wear) is completed because of unsuitable cutting conditions. In this paper, the authors are investigated the cause and countermeasure of damage, after classified the shape of damage on cutting blade in carbide hobbing systematically.

Key Words: Cutting, Tool, Gear, Carbide Hob, Carbide Hobbing, Damage

1. 緒 言

超硬ホブ盤の開発および超硬ホブの改良に伴い, 超硬ホブ切りが急速に普及している。現在, 量産歯車用として多く使用されている浸炭鋼 (SCM 420 など) および機械構造用炭素鋼 (S 45 C など) の圧延材の超硬ホブ切りでは, 安定して欠けの心配はなくなった⁽¹⁾。さらに従来の高速度鋼ホブで切削しにくい調質材や難削材の分野まで, 超硬ホブ切りが採用されてきた⁽²⁾⁽³⁾。しかし調質材や難削材を超硬ホブ切りする場合, 切削条件の選定をあやまると, ホブの切れ刃の二番摩耗の増大で寿命となる前に, 欠けあるいは熱き裂による欠損が発生する。

本研究では超硬ホブを用いて, 実際にホブ切りし, そのときの損傷を系統的に分類して, 超硬ホブの主な損傷状態を明らかにした。さらにその原因を考察し, その対策を明らかにしたことを報告したい。

図1は主に実験に用いた合金鋼本体に, くし形超硬チップをろう付けしたモジュール1.25の超硬付刃ホブで, 端面キーで駆動するように設計したものであ

る。ホブ盤は久留米高専で開発したホブ軸を直接駆動する剛性の高い専用 KS-14 型超硬ホブ盤である⁽⁴⁾。切削油は有機モリブテン添加油を毎分 160 L 注いだ⁽⁵⁾。歯切法はコンベンショナルホブ切りである⁽⁶⁾。

2. 超硬ホブの二番摩耗

図2はモジュール1.25の超硬ホブを用いて, S 45 C (HB 180) 材を切削速度 250 m/min, 送り 5 mm/rev でホブ切りしたときの各刃の二番摩耗の進行およびそ

Module	m	1.25
Number of gash	N	12
Thread & hand		1RH
Outside diameter	D	90 mm
Bore diameter		40 mm
Rake angle		0°

図1 主に実験に用いたモジュール1.25の超硬付刃ホブ

* 昭和62年4月2日 第64期通常総会講演会において講演, 原稿受付 昭和61年10月1日。

** 正員, 久留米工業高等専門学校 (〒830 久留米市小森野町1232)。

のときの代表的な摩耗状態を示したものである。各刃の二番摩耗は凹凸が少なく、その進行は遅い。右上の写真は切削長さ $l=70\text{ m}$ ($l=Z \times b \times \sec \beta \times \text{歯切個数}$, Z : 歯数, b : 歯幅, β : 歯車のねじれ角) 切削後の1番切れ刃の摩耗状態である。超硬ホブの二番摩耗は高速度鋼ホブで発生する顕著な二番摩耗でなく、切削した切れ刃部が一様な摩耗となりやすい⁽⁷⁾。図3はS45C(HB180)材を送り5mm/revで、切削速度をそれぞれ140, 250, 320 m/minと変えて、ホブ切りしたときの最大二番摩耗の進行を比較したものである。最大二番摩耗は切削速度320 m/minと250 m/minの場合、大差がなく、140 m/minの場合は320 m/minに比べ、大きくなった。したがって、S45C(HB180)の場合、切削速度は速くするのが、ホブの二番摩耗に対して有利となる。図4はS45C(HB180)材を切削速度250 m/minで、送りをそれぞれ2, 3.5, 5 mm/revと変えて、ホブ切りしたときの最大二番摩耗の進行を比較したものである。二番摩耗は送りが大きいと小さくなる。したがって、送りは大きくするのが、ホブの二番摩耗に対して有利となる。図5はS45C(HB180, HB220, HB240, HB270, HB300)の硬さの異なる5種類の歯車材を、それぞれの硬さに応じた切削速度で、ホブ切りしたときの最大二番摩耗の進行を比較したものである。二番摩耗はS45C(HB180)の圧延材に比べ、S45C(HB220, HB240, HB270, HB300)の調質材をホブ切りしたとき、大きくなった。したがって、高速度鋼ホブで切削しにくい調質材⁽⁸⁾も、高能率で超硬ホブ切りできる。

図2 超硬ホブの各刃の二番摩耗

3. 超硬ホブのマイクロチップング

3.1 初期マイクロチップング 図6はS45C(HB240)材を切削速度200 m/min, 送り2 mm/revで、切削長さ2.3 m 切削後の各刃の欠けおよびそのときの代表的な損傷状態を示したものである。送りが小さいことから、0番付近の切れ刃に0.1 mm以下の小さな欠けが発生した。この欠けはエッジから切れ刃面に沿って長く、二番面に浅い小さな欠けである。ここではこの欠けが歯切個数の少ないときに発生したことから、初期マイクロチップングとした。図7はS45C(HB240)材を切削速度100~350 m/min, 送り1~5

図3 最大二番摩耗に対する切削速度の影響

図4 最大二番摩耗に対する送りの影響

図5 最大二番摩耗に対する調質材の影響

mm/rev の間で、ホブ径、超硬材種をそれぞれ変えて、切削長さ 2.3 m 切削したとき、初期マイクロチップングが発生したか否かの境界を調べたものである。境界線より上側は初期マイクロチップングが発生した範囲で、下側は発生しなかった範囲である。したがって、初期マイクロチップングはホブ径が小さく、切削速度が遅く、送りが大きいと発生しにくい。さらに超硬材種によって、この境界は異なってくる。ここではこのマイクロチップングに対しては、P 20 A の超硬材種より P 20 B が優れていた。図 8 はホブ径が 90 mm と 60 mm のホブを用いて、送りを変えてホブ切りするときの各刃の刃先の食付角 $\theta^{(9)}$ (切れ刃が歯車材に食い込むときの角度) を、理論的に計算したものである。ホブ径が大きいと、食付角 θ は小さくなり、さらに送りを小さくすると、小さくなる。特に 0 番付近の切れ刃は小さくなる。したがって、初期マイクロチップングは食付角 θ の小さい切れ刃に発生しやすい。図 9 は初期マイクロチップングに対するはすば歯車の歯切法の影響を調べたものである。同巻コンベンショナルホブ切りの場合、マイクロチップングが発生し、逆巻コンベンショナルホブ切りの場合、発生しない。同巻コンベンショナルホブ切りは逆巻コンベンショナルホブ切りに比べ、ホブの刃先の食付角が小さくなり、初期マイクロチップングが発生しやすい⁽¹⁰⁾。したがって、はすば歯車の超硬ホブ切りでは、食付角が大きくなる逆巻コンベンショナルホブ切りを選ぶことがたいせつである。図 10 は SCr 440 (HB 265, 鍛造) の難削材のはすば歯車を、ホブ切りしたときの初期マイクロチップングに対する切れ刃の面取りの影響を調べたものである。面取りすると、エッジ部の耐衝撃強度が高くなること^{(11)~(13)}およびエッジ内部の応力分布の変化⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾により、初期マイクロチップングを防ぐことができたものと考えられる。図 11 はモジュール 2.5 の超硬ホブ

を用いて、S 45 C (HB 180) を切削速度 320 m/min, 送り 3 mm/rev で、切削油の粘度をそれぞれ 8.6, 26, 56 cSt と変えて、ホブ切りしたときの初期マイクロチップングの発生を比較したものである。初期マイクロチップングは 56 cSt のときのみ発生した。切削油の粘

Hob: $m=1.25, N=12, 1RH, D=90\text{mm}, P20A, P20B$
 Gear: $Z=53, b=44\text{mm}, S45C(240\text{BHN}), \beta=0^\circ$
 Cutting condition: $\ell=2.3\text{m}$

図 7 初期マイクロチップングの発生領域

Hob: $m=1.25, N=12, 1RH, D=60, 90\text{mm}$
 Gear: $Z=53, \beta=0^\circ$
 Cutting condition: Conventional hobbing

図 8 ホブ径、送りの違いによる食付角の変化

Hob: $m=1.25, N=12, 1RH, D=90\text{mm}, P20A$
 Gear: $Z=53, b=44\text{mm}, S45C(240\text{BHN}), \beta=0^\circ$
 Cutting condition: $V=200\text{m/min}, f=2\text{mm/rev}, \ell=2.3\text{m}$

図 9 初期マイクロチップング

Hob: $m=1.25, N=12, 1RH, D=90\text{mm}, P20A$
 Gear: $Z=53, b=44\text{mm}, S45C(240\text{BHN}), \beta=8^\circ (RH, LH)$
 Cutting condition: $V=180\text{m/min}, f=5\text{mm/rev}, \ell=2.4\text{m}$

図 10 初期マイクロチップングに対する歯切法の影響

度が高いと、初期マイクロチップングが発生しやすい。切削油の粘度が高いと、切れ刃が歯車材に食い付きにくくなるためである。

3.2 劣化に基づくマイクロチップング 図12はS45C(HB240)材を比較的遅い切削速度120m/minで、ホブ切りしたときの欠けの進行とそのときの代表的な損傷状態を示したものである。この欠けは食付角の小さい切れ刃に発生し、エッジに対し45°に面取りしたような形状をしている。ここではこの欠けが歯切個数を増したときに発生したことから、劣化に基づくマイクロチップングとした。図13は劣化に基づくマイクロチップングに対する切削速度の影響を調べたものである。初期マイクロチップングと同様に、切削速度をおとすと、劣化に基づくマイクロチップングの発生を遅くすることができた。図14は劣化に基づくマイクロチップングに対する送りの影響を調べたものである。初期マイクロチップングと同様、送りを大きくすると劣化に基づくマイクロチップングの発生を遅らすことができた。

3.3 ホブ盤に起因するマイクロチップング 図15はモジュール1.75の超硬ホブを用いて、切削速度200m/min、送り4mm/revで切削長さ23m切削後

の4番切れ刃の損傷状態を示したものである。この欠けはホブ盤の遊びが大きいために発生した。欠けの特徴は側面切れ刃の二番面からたたかれたような欠けである。ここではこの欠けをホブ盤に起因するマイクロチップングとした。この欠けはホブ盤の親ウォームおよびホブ軸回りの遊びを取り、テーブルブレーキ装置を付けると、この欠けを防ぐことができた。以上のことから、マイクロチップングを防ぐには、ホブ盤の遊びを取る、切削油の粘度をさげること、耐マイクロチップング性の超硬材種を選ぶこと、ホブ径を小さく

図12 劣化に基づくマイクロチップング

図10 初期マイクロチップングに対する面取りの影響

図13 劣化に基づくマイクロチップングに対する切削速度の影響

図11 初期マイクロチップングに対する切削油の粘度の影響

図14 劣化に基づくマイクロチップングに対する送りの影響

くすること, 送りを大きくすること, 切削速度をおとすこと, 切れ刃の面取りを行うことなどがたいせつである。

4. 超硬ホブの劣化に基づく欠け

図 16 は S 45 C (HB 240) 材を, 切削速度 375 m/min, 送り 5 mm/rev のか酷な切削条件でホブ切りし, 歯切個数を増した後, 切削負担の大きい切れ刃の刃先に発生した欠けとその損傷状態を示したものである。この欠けはエッジから切れ刃面方向に浅く, 切れ刃面から切断したように, 二番面に沿った大きな欠けで, 超硬ホブ切りで最も危険な欠けである。ここではこの欠けを劣化に基づく欠けとした。図 17 は S 45 C (HB 240) 材を送り 5 mm/rev で, 切削速度をそれぞれ 350, 375, 400 m/min と変えてホブ切りしたとき, いつ劣化に基づく欠けが発生するかを調べたものである。切削速度が 400 m/min では切削長さ 18.4 m で, 切削速度 375 m/min では切削長さ 51 m で発生した。切削速度 350 m/min では切削長さ 70 m 切削しても発生しない。したがって, 切削速度をおとすと, 超硬材の劣化がおくれ, この欠けの発生を遅らすことができたものと考えられる。図 18 は S 45 C (HB 240) 材を切削速度 375 m/min で, 送りをそれぞれ 3, 5, 7 mm/rev と変えてホブ切りしたとき, いつ劣化に基づく欠けが発生するかを調べたものである。送りを 7 mm/rev にすると, 切削長さ 23 m で, 送りを 5 mm/rev にすると, 切削長さ 46 m で発生した。さらに送りを 3 mm/rev にすると, 切削長さ 70 m 切削しても発生しない。送りを小さくすると, 一刃にかかる切削負担は小さくなり, この欠けの発生を遅らすことができたものと考えられる。したがって, 劣化に基づく欠けを防ぐには, ホブ盤の剛性を高めること⁽¹⁶⁾, ホブの切れ刃みぞ数を増すこと, 切削速度をおとすこと, 送りを小

さくすることなどがたいせつである。図 19 はホブの各刃の刃先の切くず形状と切れ刃にかかる力をモデル化したものである。上図はモジュール 1.25 のホブを用いて, 平歯車を送り 5 mm/rev でホブ切りするとき, 各刃の刃先が削り出す切りくずの最大厚さ S , 長さ L , 切削断面積 A を理論的に計算したものである。0 番付近の切れ刃は薄くて, 長い切りくずを出す。さらに 0 番付近の切れ刃は食付角 θ が小さく, 切れ刃が食い込みみらずにすべるため, 局部的に P1 方向の大きな力

図 16 切削負担の大きい切れ刃に発生する劣化に基づく欠け

図 17 劣化に基づく欠けに対する切削速度の影響

図 18 劣化に基づく欠けに対する送りの影響

Hob: $m=1.75, N=10, 1RH, D=65mm, P20A$
 Gear: $Z=31, b=10mm, SCM420L (190BHN), \beta=0^\circ$
 Cutting condition: $V=200m/min, f=4mm/rev, l=23m$

図 15 ホブ盤に起因するマイクロチップング

を受けて、マイクロチッピングが発生するものと考えられる。一方、ホブ盤に遊びが大きいと、P2方向の力を受けて、側面二番からたたかれたようなマイクロチッピングが発生するものと考えられる。さらに20番付近の切れ刃は、切削負担量が最も大きく、歯切個数を増すと、超硬材の劣化が進み、P3方向の力に耐えきれなくなり、大きな欠けとなるものと考えられる。10番付近の切れ刃は、P1方向の力とP3方向の力が釣合って、欠けが発生しにくいもの⁽¹⁷⁾と考えられる。図20は超硬ホブの刃先に静的荷重を加えたときの欠けの状態を示したものである。(a)は刃先にP1方向の力を加えたときの欠けである。前に述べた初期マイクロチッピングの損傷状態とよく類似している(図6、図9参照)。(b)は刃先にP3方向の力を加えたときの欠けである。前に述べた劣化に基づく欠けとよく類似している(図16参照)。

図19 ホブの各刃の刃先の切りくず形状と切れ刃にかかる力

図20 静的荷重を加えたときの欠け

5. 超硬ホブの熱き裂

図21はモジュール6の超硬ホブを用いて、S45C (HB 180) 材を、切削速度 160 m/min, 送り 2 mm/rev で、ホブ切りしたときの各切れ刃の熱き裂の進行と切削長さ 25.5 m 切削後の7番切れ刃の刃先のクレータ部の損傷状態を示したものである。熱き裂は各切れ刃の切削負担の大きい切れ刃のクレータ摩耗の最も大きい部に、エッジに直角に発生し、その後、そのき裂がエッジに伸びて欠けとなろう。この熱き裂は厚い切くずがクレータ部を強くこすって、高温になり、発生するものと考えられる。したがって、この熱き裂を防ぐには、ホブの切れ刃みぞ数を増したり、送りを小さくすることなどにより、一刃にかかる切削負担を減ら

Blade No. 7 ($l=25.5m$)

Hob: $m=6, N=10, 1RH, D=150mm, P20C$
 Gear: $Z=34, b=50mm, S45C (180BHN), \beta=0^\circ$
 Cutting condition: $V=160m/min, f=2mm/rev$

図21 クレータ部より発生する熱き裂

Blade No. 11 ($l=60m$)

Hob: $m=2.5, N=14, 3RH, D=110mm, P20C$
 Gear: $Z=57, b=22mm, SCM420 (160BHN, forged), \beta=31^\circ (LH)$
 Cutting condition: $V=250m/min, f=5mm/rev, l=60m$

図22 二番面より発生する熱き裂

すこと、切削速度をおとすこと、切りくずの流れをよくすること⁽¹⁸⁾、早めに再研削することであろう。図 22 はモジュール 2.5 の 3 条の超硬ホブで、SCM 420 (HB 160) 材を切削速度 250 m/min, 送り 5 mm/rev のか酷な切削条件で、切削長さ 60 m 切削後の側面切れ刃の熱き裂である。この熱き裂はエッジに対し直角に、二番面より発生する。この熱き裂はホブの二番面と歯車材が強くこすって、高温になり、発生するものと考えられる。したがって、この熱き裂を防ぐには、ホブの二番角を大きくすること、切削速度をおとすこと、早めに再研削することであろう。

6. 結 言

現在、実用化されている各モジュールの超硬ホブを用いて、各歯車材を実際にホブ切りし、超硬ホブの損傷を系統的に分類した結果、次のことが明らかとなった。

(1) 機械構造用炭素鋼 (S 45 C) の場合、超硬ホブの二番摩耗を小さくするには欠けおよび熱き裂が発生しない範囲で、切削速度を速く、送りを大きくするとよい。

(2) 超硬ホブの二番摩耗は高速度鋼ホブで発生する顕著なかど摩耗でなく、一様な摩耗となりやすい。

(3) 超硬ホブの主な欠けは、食付角の小さい切れ刃に発生するマイクロチップングと歯切個数を増したときに切削負担の大きい切れ刃に発生する劣化に基づく欠けに分類できる。マイクロチップングの特徴は、二番面に小さく、その進行は遅く、二番摩耗幅より小さくなりやすい。劣化に基づく欠けの特徴は、エッジから切れ刃面方向に浅く、切れ刃面から切断したように、二番面に沿った大きな欠けとなる。

(4) マイクロチップングを防ぐには、切削油の粘

度をさげること、ホブ径を小さくすること、送りを大きくすること、切削速度をおこすこと、切れ刃の面取りを行うことなどである。

(5) 劣化に基づく欠けを防ぐには、切削速度をおとすこと、送りを小さくすることなどである。

(6) 超硬ホブの熱き裂はクレータ部から発生する熱き裂と二番面から発生する熱き裂に分類できる。熱き裂を防ぐには、早めに再研削することなどである。

本研究にご助力いただいたアズミ (株)、三菱重工京都精機製作所、住友電工伊丹製作所および (株) 榎藤鉄工所に、厚くお礼を申し述べたい。また本研究には文部省科学研究費補助金をいただき、感謝の意を表したい。

文 献

- (1) 相浦・ほか 3 名, *Trans. ASME*, **100** (1978), 470.
- (2) 相浦・ほか 2 名, 機講論, No. 810-4 (昭 56-4), 173.
- (3) 相浦・桜木, 機講論, No. 830-5 (昭 58-4), 164.
- (4) Ainoura, M. and Yonekura, M., *World Congress on Gearing*, **2** (1977), 907.
- (5) Sakuragi, I. and Ainoura, M., *ASME*, 80-C 2/DET-56, (1981).
- (6) 相浦・ほか 3 名, 機講論, No. 780-2 (昭 53-2), 25.
- (7) 相浦・ほか 2 名, 機講論, No. 810-4 (昭 56-4), 122.
- (8) Nagano, K. and Ainoura, M., *International Symposium on Gearing & Power Transmissions*, Tokyo, (1981), 175.
- (9) Ainoura, M. and Sakuragi, I., *Journe'es d' Etudes Lyon*, TOME 1, (1982).
- (10) 相浦・ほか 2 名, 機講論, No. 775-2 (昭 52-2), 283.
- (11) 星 (光)・星 (鐵), 改訂 金属切削技術, (昭 56), 121.
- (12) 浅井, 学位論文, (昭 54-11), 44.
- (13) 青木・根岸, 昭和 54 年精機学会春期大会, (昭 54-10), 33.
- (14) 井川・安木, 精密機械, **42-6** (昭 51), 438.
- (15) 臼井・ほか 2 名, 精密機械, **46-8** (昭 55), 63.
- (16) 相浦・桜木, 機講論, No. 820-6 (昭 56-3), 48.
- (17) 浅井・ほか 2 名, 精密機械, **44-2** (昭 53), 9.
- (18) 相浦・ほか 3 名, 機論, **49-440, C**, (昭 58), 676.

討 論

〔質問〕 有 浦 泰 常・梅 崎 洋 二

〔九州大学工学部〕

超硬ホブ切りに関して、広範囲にわたる研究に敬意を表す。以下の点について尋ねたい。

(1) 「劣化に基づく欠け」の本質的な原因は何か。この欠けと熱き裂あるいは機械的疲労との関連はどうなっているか。

(2) 図 7 における「P 20 A」と「P 20 B」の違いは何か。

〔回答〕 (1) 劣化に基づく欠けの原因は超硬合

金内にある多くの欠陥周りの組織が切削応力下で除々に塑性的な変形をし、超硬合金の一種の石垣構造がゆるみ、このため合金組織から初期き裂が発生する。〔付図 1 (2) 参照〕次にこのとき発生した初期き裂を基にして、そのき裂が左右方向および二番面方向に成長してゆく。〔付図 1 (3)～(5) 参照〕さらにそのき裂がある長さまで到達すると、切削力に耐えきれなくなり、刃先が欠けるものと考ええる。〔付図 1 (6) 参照〕

したがって劣化に基づく欠けは機械的疲労に大いに関係があると考ええる。一方熱き裂はエッジに対して直

付図 1 劣化に基づく欠けの成長過程

角に発生するので、この欠けに対してはあまり関係がないものとする。

(2) P20 A と P20 B は成分および製法とも異なる。2 種類ともホブ用として研究開発したものである。P20 A は粒塊が大・小混合されていて、 C_0 のはんがあり、Ti, Ta が添加されている。一方 P20 B は P20 A より粒塊が大きく、 C_0 が極めて多く、Ti が多く、Ta が少ない材種である。

〔質問〕 石 橋 彰 (佐賀大学理工学部)

(1) 貴研究の実験は、特別に設計された高級なホブ盤を用いて、モリブデン系化合物を添加した切削油を多量 (160 l/min) に注いで行われている。貴研究の結果は、どのように修正すれば、普通のホブ盤 (たとえば、K 社の KR1000 型) を用いて超硬ホブ切りを行う場合に適用できるのか。

付図 2 超硬ホブ盤

(2) 超硬ホブの「劣化」の内容をもう少し具体的に説明していただけないか。刃先に欠けが生じない前に、この劣化は確認できるか。

〔回答〕 (1) ホブ切りは切削力の変動が大き

く、振動が大きくなりやすい。特に高速切削になるほど衝撃的に切削力が働くことになる。したがって普通のホブ盤を超硬ホブ盤に改造するには次の点に注意する必要がある。

- (i) 切削中の振動を小さくすること
 - (ii) ホブ盤の剛性を高めること
 - (iii) 高速回転を可能にすること
 - (iv) 多量の切削油を注ぐことができるようにすること
- などである。

(i)は付図2に示す駆動系にすることが重要である。特にホブ軸を直接油圧モータで駆動し、その間に超硬ホブの衝撃的切削力の変動および回転振動を吸収し、緩和するための特殊な装置(カップリング)を入れることである。

(ii)はしゅう動面の遊び、ホブ軸まわりの遊び、親ウォームの遊び、駆動系のギヤトレーンのすきまなどを小さくすることである。

(iii)はギヤトレーンのすべり軸受をボールベアリングなどに替え、潤滑方法を強制潤滑とすることである。

(iv)は容量の大きい切削油ポンプに替え、補助タンクを取付けることなどを改善すれば適用できると考える。

(2) 劣化のメカニズムについては、有浦・梅崎氏への回答(1)に示す。劣化の確認に対してはホブ切りは一刃一刃にかかる切削量が異なるため、ある切れ刃で劣化が除々に進行するような切削条件を選ぶと、この劣化の進行を顕微鏡で観察することができる。(付図1参照)