高圧内部給油による高硬度鋼のドリル加工*

新井 実** 大野鉄司*** 小川 誠† 佐藤 素††

Drilling of High Hardness Steels with the High Pressure Supply of Coolant

Minoru ARAI, Tetsushi OHNO, Makoto OGAWA and Sunao SATO

This paper deals with the effect of high pressure supply of coolant (7 MPa) on drilling of high hardness steels using twist drill with oil holes in its land. Work-materials are SKD 11 of HV 350-620 on hardness. The wear of drill with SKH 51 was measured, and the cutting conditions under which this supply method was advantageous on tool wear were revealed. In order to elucidate the causality, cutting forces and cutting temperature were measured. The results obtained are as follows: (1) High pressure supply of coolant is effective under cutting conditions over the critical temperature at which the hardness of tool-material decreases remarkably on drilling with conventional supply of coolant. (2) Under cutting conditions below the critical temperature, tool wear on drilling with conventional supply of coolant is smaller.

Key words: drilling, oil hole drill, tool failure, coolant, high pressure supply

1. 緒 言

切削油剤を工具の内部に設けた穴から刃先に吐出させる内部給油形の工具が穴加工などで普及している。油穴付きねじれ刃ドリルは小径用 ($\phi 5 \sim 15$ mm 程度) としてマシニングセンタなどでの高能率加工で使用が増えている。これに給油する切削油剤は水溶性化が進むとともに高圧化が試みられ、生産現場でも 7 MPa を越す高圧給油が検討されている。これは深穴加工などで内部に発生した切りくずをスムーズに穴外部へ排出させ、工作機械から排除することをねらったものである。穴加工の無人化という面からは極めて有効な方法であるが、工具損傷という面からみたときの効果は判然としていない。ガンドリルや BTA 工具等の内部給油形工具による穴加工についての研究¹⁾はあるが、高圧給油を用いた油穴付きねじれ刃ドリルの切削性能については、工具メーカ以外のデータは意外に少ない²⁾³⁾。高圧給油が有効な切削諸元(切削条件、給油圧力、被削材)やどの程度の効果があるかといったことについての検討が必要である。

本研究は油穴付きねじれ刃ドリルを用い、これに高圧で内部給油をしてドリル加工するときのドリルの損傷特性を明らかにし、ドリルの損傷からみたときにこの方法が有利な領域を見い出そうとするものである。予備的に行った標準的な炭素鋼(HV 180 程度)の場合は、通常の切削条件下では内部給油よりもむしろ外部給油の方が摩耗が少ないことが多く、高圧内部給油の有効性は認められなかった。そこでドリル先端の切削温度が上昇しやすい高硬度鋼(HV 350 以上)について、高圧内部給油が有利な領域を見い出すことを目的に以下の検討を行った。

2. 実験方法

機械本体は汎用の直立ボール盤であり、これに図 1 に示すような切削油剤の供給システムを取り付けた。切削後の切削油剤

はペーパーフィルタおよびフィルタユニットでろ過し、ペーンポンプで加圧(ゲージ圧 Max: 7 MPa, 16 l/min)してサイドスルータイプのツールホルダへ供給される。外部給油はこれとは別なポンプ(20 l/min)を用い、穴入口の斜め上方 50 mm 程度から給油した。内部給油の給油圧力は切削油剤の一部をバイパスさせる(流量も変わる)ことで変えることができるが、本実験ではおもに高圧内部給油(7 MPa)と外部給油の切削性能への相違を調べることを目的とし、圧力の詳細な検討は行わなかった。切削油剤はエマルジョン形で希釈倍率は 30 倍である。

汎用ボール盤を用いているために高速化に限界があり、超硬ドリルでは内部給油が有利な条件を見い出すことが難しい。そこで大部分のドリル摩耗実験には高速度工具鋼ドリル(SKH 51, 先端角 118° , 油穴 $\phi 1$ mm)を用いた。ただし、摩耗状況の比較と切削温度の測定のために一部で超硬(Z 20 相当, 先端角 140° , 油穴 $\phi 0.75$ mm)を用いた。ドリルはいずれも $\phi 6$ mm であり、チゼルには X 形シンニングが施されている。穴深さ L は 30 mm ($L/D=5$) で止まり穴であり、この深さは市販の油穴付きねじれ刃ドリルでは溝長から限界に近い。

被削材はおもに SKD 11 を用い、硬さの影響を調べるために熱処理によってその硬さを HV 350~620 に調整した。これら

Fig. 1 System of supplying coolant

* 原稿受付 平成 7 年 9 月 22 日

** 正 会 員 横浜国立大学工学部(横浜市保土ヶ谷区常盤台 156)

*** 横浜国立大学大学院(現,(株)オーテックジャパン; 茅ヶ崎市萩園 824)

† 正 会 員 芝浦工業大学工学部(大宮市深作 309)

†† 正 会 員 横浜国立大学工学部(現; 横浜市中区三之谷 109)

Table 1 Drilling conditions

	Standard
Work-materials	SKD 11 (HV 350-620), SUS 304
Spindle speed n	150, 415, 745, 1100 min^{-1}
Feed rate f	0.05-0.15 mm/rev
Depth L	30 mm ($L/D=5$)
Drill diameter D	6 mm
Drill materials	SKH 51, Z 20
Web thinning	X type

Fig. 2 Appearance of drill wear

Fig. 3 Change of flank wear
HV 350, $n=1100 \text{ min}^{-1}$

のほかに SUS 304 を一部で比較に用いた。工具諸元および切削諸元を表 1 に示す。

工具摩耗の一般的な形態は図 2 に示すように、ドリルの中心で小さく、外周部にむかって増大している。測定値としては切れ刃の中央付近の逃げ面摩耗幅を用いた。大部分の実験では同一条件で 3 本のドリルを用いて穴あけし、最も安定な場合を測定値とした。切削中に異常音が発生すると急速に摩耗が進むために、ここで切削を中止し寿命とした。工具摩耗の支配因子を明らかにするために切削抵抗（スラストおよびトルク）および切削温度を測定した。

3. 実験結果

3.1 逃げ面摩耗の変化

図 3 は 2 種類の送り量 f に対する穴個数による逃げ面摩耗の変化を内部給油 (7 MPa) と外部給油 (Conventional) について比較したものである。 $f=0.05 \text{ mm/rev}$ の場合は内部給油、外部給油ともに初期摩耗の後に漸増するが、明らかに内部給油の方が逃げ面摩耗が大きいことがわかる。

一方、 $f=0.15 \text{ mm/rev}$ の場合は、給油方法による影響が逆転する。すなわち、内部給油では逃げ面摩耗は穴数とともに漸増し、 $f=0.05 \text{ mm/rev}$ の場合よりも切削距離が短いために逃げ面摩耗が小さい。これに対して外部給油では逃げ面摩耗が大きく、6 個目で異常音が発生し、寿命 (図中で Failure と表

Fig. 4 Effect of feed rate on flank wear
HV 350, $N=5$, $n=1100 \text{ min}^{-1}$

Fig. 5 Effects of hardness of work-materials and feed rate on flank wear (Number of holes; 8)

示) になった。この時のドリルはコーナ部が異常摩耗しているとともに切れ刃およびマージン部にチッピングが見られた。なお、標準的な炭素鋼 (HV 180 程度) の場合は $f=0.15 \text{ mm/rev}$ でも高圧内部給油の方が逃げ面摩耗が大きかった。

3.2 送り量の影響

穴数 5 個の場合について送り量 f による逃げ面摩耗への影響を示したものが図 4 である。これから次のことがわかる。

- $f=0.05 \text{ mm/rev}$ では内部給油の方が摩耗が大きい。
- $f=0.10 \text{ mm/rev}$ では両者の摩耗はほぼ同じである。
- $f=0.15 \text{ mm/rev}$ では外部給油の方が摩耗が大きい。
- 内部給油の場合は送り量の増加とともに切削距離が減少することにより、逃げ面摩耗が減少する。

3.3 被削材の硬さの影響

上記は HV 350 の被削材に対する結果である。HV 350 でも標準的な鋼に比べれば十分に硬度が高いが、さらに硬さを増加させると高圧内部給油が有利な領域が拡大すると予想される。そこで被削材の硬さを増加させて内部給油 (7 MPa) と外部給油 (Conventional) との相違を調べた。その結果が図 5 である。 $f=0.05 \text{ mm/rev}$ では被削材の硬さが HV 520 まで外部給油の方が逃げ面摩耗が少なかった。送り量を $f=0.1 \text{ mm/rev}$ に増加すると HV 420 以上の硬さの被削材に対しては外部給油では 1 穴目で寿命になる。内部給油では HV 520 まで 10 穴まで穴あけ可能であるが、HV 620 では内部給油でも 2 穴目で寿命になった。

3.4 切削速度の影響

高圧内部給油方式は高速切削で効果的だと考えられるが、用いたボール盤では高速化に限界がある。そこで、標準切削条件 ($n=1100 \text{ min}^{-1}$, $f=0.05 \text{ mm/rev}$) の場合に外部給

Fig. 6 Effect of cutting speed on flank wear
 $f=0.10$ mm/rev, HV 470

Table 2 Effect of pressure of coolant on flank wear

Conventional	Failure ($N=1$)
1 MPa	$VB=0.084$ mm
7 MPa	$VB=0.080$ mm
(HV 470, $f=0.10$ mm/rev, $N=1$)

Fig. 7 Flank wear in drilling with sintered carbide drill
HV 470, $f=0.10$ mm/rev, $n=1$ 100 min^{-1}

油で1穴目で寿命になったHV 470の被削材を用いて標準切削速度以下の領域で切削速度の影響を外部給油の場合について調べた。その結果が図6である。

$n=1$ 100 min^{-1} および 745 min^{-1} の場合は1穴目で寿命になるが、 $n=415$ min^{-1} の場合は5穴目まで、さらに 150 min^{-1} の場合は10穴目まで穴あけができた。ただし、150 min^{-1} の場合でも逃げ面摩耗は内部給油 ($n=1$ 100 min^{-1}) の場合よりも大きい。

3.5 切削油剤の供給圧力の影響

本高圧給油方式では圧力や供給量の影響を単独で調べることはできないから、供給圧力の詳細な検討は行わなかったが、1条件について1穴目の逃げ面摩耗への供給圧力の影響を比較した。その結果が表2である。外部給油の場合は1穴でドリルが寿命になったが、1 MPaと7 MPaでは大きな相違は認められなかった。

3.6 超硬ドリルの場合

以上の実験は高速度工具鋼ドリルを用いたものである。比較のために超硬ドリルについても1条件について切削試験を行った。その結果が図7である。この条件 (HV 470, $n=1$ 100 min^{-1} , $f=0.1$ mm/rev) では高速度工具鋼ドリルの場合の外部給油では1穴目で寿命になった。超硬ドリルの場合には外部給油 (Conventional) でも10穴目まで可能であり、しかも内部給油 (7 MPa) より逃げ面摩耗が小さい。

Fig. 8 Effect of feed rate on cutting forces
HV 350, $N=1$, $n=1$ 100 min^{-1}

Fig. 9 Profiles of surface roughness of machined holes
HV 350, $f=0.05$ mm/rev, $n=1$ 100 min^{-1}

4. ドリルの摩耗の支配因子

上記の結果の因果関係を明らかにするために、切削抵抗と切削温度の測定および構成刃先の観察を行った。

4.1 切削抵抗

ドリルが摩耗すると切削抵抗が増加する。そこで1穴目の穴底付近の比較的安定した領域での値を測定結果とした。図8は送り量 f と切削抵抗の関係である。スラスト、トルクともに $f=0.05$ mm/rev および 0.1 mm/rev では内部給油の方が大きく、 $f=0.15$ mm/rev では内部給油の方が若干小さい。とくに送り量が小さい領域でスラストの相違の割合が大きい。

切りくず排出状況が切削抵抗に影響すると思われるが、概して両者の形の相違は少なかった。 $f=0.05$ mm/rev では円すいらせん形、 $f=0.15$ mm/rev では扇形である。ただし $f=0.15$ mm/rev の外部給油の場合にはドリルのすくい面に切りくずが付着していることが多かった。 $f=0.15$ mm/rev で切りくずの溶着が切削抵抗を大きくしたものと思われる。しかし、この場合でも切りくず排出不良という状況ではなかった。

被削材の硬さの切削抵抗への影響も調べたが、 $f=0.05$ mm/rev ではすべての硬さについて外部給油の方が切削抵抗が小さかった。外部給油の方が摩耗が少ない条件下では切削抵抗も外部給油の方が小さい。硬さを増すと両者の相違が少なくなる。

なお、内部給油の場合の給油圧力によるスラストの増加が考えられる。しかし、あけられた穴にドリルを挿入し、高圧給油 (7 MPa) したが、スラストの増加 (0.02 kN 程度) は少なかった。

4.2 構成刃先

図9に穴底付近の穴側面の仕上面粗さのプロファイルを示す。内部給油の場合は穴底まで仕上面が良好であるが、外部給

Fig. 10 Measuring method of cutting temperature

Fig. 11 Effects of feed rate (f) and hardness of work-material (HV) on cutting temperature

油の場合には凹凸が大きい。この条件では外部給油でも比較的に安定な円すいらせん形の切りくずが発生しており、切りくずによる擦過痕とは考えにくい。外部給油の場合は穴底にもむしろ痕が観察されるとともに、ドリルの切れ刃に付着物が残ることもあった。これらのことを総合してみると構成刃先が生成していたものと推察される。外部給油で送り量が小さい場合は安定な構成刃先が発生し、これが切削抵抗を小さくし、ドリルの逃げ面摩耗を抑制しているものと思われる。

送り量 f を増大させると外部給油の場合は構成刃先が不安定になるとともにすくい面への切りくずの溶着が顕著になる。これに対して高圧内部給油では送り量にかかわらず、構成刃先の発生や切りくずの溶着が少ない。その結果逃げ面摩耗が大きい、送り量にかかわらず安定な穴あけが可能になるものと思われる。

4.3 切削温度

工具・被削材熱起電力法で切削温度を測定した。穴が深くなるとドリルのマージン部と穴内壁が接触するために出力を低下させる。そこでこれを避けるために図10のように絶縁した同一材種の2枚の板に穴あけし、下部の板を切削するときの熱起電力を出力値として求めた。また高速度工具鋼ドリルは、外部給油で送り量が高い領域での穴あけが難しいこと、SKD材との熱起電力が小さいことなどのためにドリルには前述の超硬を用いた。先端角が大きいことからみて高速度工具鋼ドリルの場合の切削温度より若干高めに出力されると思われるが、各条件による相対的な相違や限界温度の概略値を知るには十分であると考えられる。

図11は送り量と材料の硬さの切削温度への影響を調べた結果である。内部給油の場合はいずれも550 K以下である。これに対して外部給油の場合は150 min⁻¹の場合を除けばいずれも600 K以上になる。HV 417の被削材の $f=0.1$ mm/revの

Fig. 12 Drilling conditions that coolant through type (7 MPa) is advantageous on tool failure ($n=1\ 100\ \text{min}^{-1}$)

- 7 MPa is advantageous
- Conv. is advantageous
- △ Both are on a level
- × Both are unable

場合はドリルが1穴で寿命になったが、この場合の切削温度は670 Kを越える。いずれの硬さの被削材でも、ドリルが1~2穴で寿命になる条件下では670 K以上である。

この切削温度は工具・切りくず接触面の平均値であり、コーナ部の温度はこれより高いと想像される。高速度工具鋼の硬さは870 K付近から急速に低下する⁴⁾から、これを越える切削温度になるとコーナ部から急速に摩耗が進み、寿命にいたるものと思われる。

低速(150 min⁻¹)切削の場合に逃げ面摩耗が大きく、また内部給油の場合でも送り量が多い方が同一切削距離で比較したときの逃げ面摩耗が大きい場合があった。切削温度が低い切削条件下で工具摩耗が大きくなることについては知られた事実であるが、超硬の場合⁵⁾も、高速度工具鋼の場合⁶⁾もその原因が構成刃先の脱落であることが指摘されている。しかし仕上面も良好な高圧内部給油の場合に構成刃先の生成脱落は考えにくく、また逃げ面に大きな欠損はない。低温あるいは低速切削域における工具摩耗原因については旋削を含めて詳細な検討が必要である。

4.4 内部給油が有利な領域

ドリルの摩耗という面からみたとときに内部給油(7 MPa)と外部給油とのどちらが有利かを被削材の硬さHVと送り量 f との範囲で示したものが図12である。送り量 f が大きくなるにつれ、また被削材の硬さが高くなるにつれて内部給油が有利になる。この分布は切削速度によっても著しく変化することは図6の実験結果からも明らかであり、低速切削域では外部給油の方が有利な領域が広い。

切削温度の実験結果からみたととき、この限界は工具の硬さが急速に低下する温度で決まりそうである。高速度工具鋼の場合は平均温度で670 K程度と考えられ、外部給油でこれを越える切削温度の領域になると内部給油が有利になる。この限界温度以下であれば、安定な構成刃先の発生によって外部給油の方が切削抵抗も小さく、逃げ面摩耗も少ない。外部給油ではこの限界温度を越えるとすくい面に切りくずが溶着することによる切削抵抗の増大とあいまってドリルが急速摩耗し寿命にいたるものと思われる。

4.5 SUS 304 の場合

耐熱合金の穴あけでは穴内部に熱が蓄積するから、高圧内部給油の効果が大きいと考えられるとともに鋼のような構成刃先の影響が少ないと考えられる。そこでSUS 304 (HV 206)に

Fig. 13 Flank wear in drilling SUS 304
 $n=1\ 100\ \text{min}^{-1}$

Fig. 14 Cutting temperature in drilling SUS 304
 $n=1\ 100\ \text{min}^{-1}$, $N=1$

についても前記の高硬度鋼と同様な検討を行った。図13は外部給油と内部給油の逃げ面摩耗への影響を3種の送り量について比較したものであり、これから

- (a) $f=0.05\ \text{mm/rev}$ では給油方法の相違は少ない。
- (b) $f=0.10\ \text{mm/rev}$ では内部給油の方が摩耗が少ない。
- (c) $f=0.15\ \text{mm/rev}$ の外部給油では1穴目で寿命になる。
- (d) 内部給油では送りが高いほど摩耗が少ない。

ことがわかる。

図14はSUS 304の場合の切削温度の測定結果である。いずれの送り量でも内部給油の場合は切削温度が低く、送り量による変化が少ない。 $f=0.15\ \text{mm/rev}$ の外部給油では1穴で寿命

になったが、このときの切削温度は670 Kを越える。

以上のようにSUS 304は高圧内部給油の効果が大きい。これは切削温度が高いことのほかに構成刃先がつきにくいこともその原因と思われる。

5. ま と め

高硬度鋼を、おもに高速度工具鋼ドリルを用いて高圧内部給油によるドリル加工を行い、ドリルの損傷の面からその有効性を検討し、以下の結論を得た。

- (1) 送り量が小さいと高圧内部給油の方が逃げ面摩耗が大きいことがある。
- (2) 被削材の硬さが高いほど、送り量が小さい領域でも高圧内部給油が有利になる。
- (3) 外部給油の場合は高速、高送り域で工具材の高温硬さが急速に低下する温度領域になり、ドリルの摩耗が急速に進行し寿命になる。
- (4) (3)の領域では高圧内部給油が明らかに有利になる。
- (5) 内部給油の場合、HV 520程度まで上記の限界温度以下であれば、逃げ面摩耗が大きい安定に穴あけできる。
- (6) 被削材の硬さが低く、送り量が低い領域では構成刃先の発生のために外部給油の方が逃げ面摩耗が少ない。

終わりに、本研究に用いた高速度工具鋼ドリルは不二越(株)から、切削油剤はユシロ化学工業(株)から提供いただいた。実験には柴田洋氏(現：松下精工(株))、大久保秀樹氏(現：YKK)にご協力いただいた。謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 例えば、佐久間敬三、田口紘一、甲木昭雄：ソリッドボーリング工具(BTA方式)による深穴加工の研究、精密機械、44, 9 (1978) 1111.
- 2) 松原十三生、山本久隆、岡村 進、山野 誠：高圧給油による小径深穴ドリル加工の研究、精密工学会誌、55, 3 (1989) 520.
- 3) 大関 浩、長谷川英雄、山口 正：高速穴加工における油穴付きドリルの効果、1994年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集、(1994) 819.
- 4) 例えば、精密工学会編：新版・精密工作便覧、コロナ社、(1992) 59.
- 5) 上原邦雄、仁科健治、竹下英夫、内田和弥：低速領域における超硬工具の摩耗機構、精密機械、38, 3 (1972) 261.
- 6) 大草喜太郎、高橋尚郎、西沢将敏：鉄および鋼の切削におけるホワイトレイヤの挙動、精密機械、41, 5 (1975) 405.