超音波振動を援用した高アスペクト比微細深穴加工*

— 燃料噴射ノズルへの微細深穴加工 —

南部洋平** 落合一裕** 堀尾健一郎*** 金子順一*** 渡辺 武† 松田信一††

High-Aspect-Ratio Microdrilling Assisted by Ultrasonic Vibration
- High-Aspect-Ratio Microdrilling of Fuel Injection Nozzle -

Yohei NAMBU, Kazuhiro OCHIAI, Kenichiro HORIO, Junichi KANEKO, Takeshi WATANABE and Shinichi MATSUDA

This study aimed to achieve the high-aspect-ratio microdrilling in $L/D=20$ by the addition of ultrasonic vibration during drilling. In the experiment in $L/D=10$, the amplitude of ultrasonic vibration from viewpoints of tool wear and thrust force are determined. The high-aspect-ratio microdrilling in $L/D=20$ was examined based on the processing conditions in $L/D=10$. The following results are obtained. The decrease of the cutting rate and the use of the microdrill with thinning are necessary to apply the supersonic vibration for high-aspect-ratio microdrilling in $L/D=20$.

Key words: high-aspect-ratio, microdrill, ultrasonic vibration, thinning, stainless steel

1. 緒 言

近年、火力発電所では発電の効率を上げて燃料消費量を抑えるため、従来の蒸気タービン単独の方式からガスタービン等を組み合わせたコンバインドプラントとすることが主流となっている。このガスタービンでは、燃焼器出口温度を上げると効率上がるため、現在約 1350℃の温度を約 1700℃まで上昇させることが望まれている。しかし、燃焼温度が 1600℃を超えると、指数関数的に NO_x 排出量が増加してしまう。そのため、燃料と同時に水蒸気を噴射し、燃焼温度を下げる技術開発が不可欠である。この水蒸気を均一に噴射するためにはノズル穴径を現状の 0.8mm～1.0mm から、将来的には 0.2mm 以下にするという要求がある。そのため、ノズルの材料であるステンレス・ハステロイ等に対して直径 0.2mm、深さ 4mm 以上、つまりアスペクト比($L/D=20$)以上の微細深穴を加工する必要があるといわれている。

2. 加工の問題点

一般的に微細穴のドリル加工では、切削液のような冷却効果をもたらす媒体が加工点に到達することが難しく、深くなるほど加工点の冷却は困難となる。そのため、加工熱がこもりやすく高温になり易い。さらに、微細深穴の場合は切りくずの排出が難しくなるため、排出しきれなかった切りくずが高温となり、ドリル刃先への溶着が発生し易いという問題がある。また、ドリル先端の中心部分、いわゆるチゼルエッジには大きなスラスト力とトルクがかかる。微細径ドリルでは剛性が不足しているため、折損が多発し易いという問題もある。

これらの問題に対して、超音波振動を付加することで切削抵抗が低減し、ドリル刃先の溶着やドリルの折損が減少するという研究報告がされている^{1)~4)}。しかし、穴径 0.2mm 以下で L/D (アスペクト比)=20 以上となる微細深穴加工について検討されたものはない。そこで、本報ではそのような高アスペクト比の微細深穴加工に対する超音波振動付加の効果を検討することを目的としている。

アスペクト比(L/D)が大きくなることによって生じる問題はいくつか考えられる。冷却がより進みづらくなるため刃先温度が上がりやすくなることや、切りくずの排出がより困難になることである。そこで、通常の微細深穴である $L/D=10$ の加工実験を行い、超音波振動付加の効果を確認した。さらに、そのときの知見を基にして、 $L/D=20$ の高アスペクト比微細深穴加工について検討を行った。

3. 実験装置

3.1 超音波振動付加装置

図 1 に実験装置の概略を示す。工作機械には高速加工機 (ASV400, 東芝機械(株)製)、及び加工機主軸ボックスに取り付けた振動周波数 40kHz の超音波振動スピンドル (R2, (株)industria 製)を使用した。

また、被削材にはオーステナイト系ステンレス SUS304、工具には超微粒子超硬合金のノンコートドリルを用いた。主な工具緒元を表 1 に示す。評価は切削動力計 (9254, 日本キスラー(株))によるスラスト方向の切削動力測定と、電子顕微鏡(S-2150, 日立(株)製)による刃先摩耗の観察によって行った。

3.2 超音波振動スピンドルの検討

スピンドルの動的な振れ量は主軸測定装置 (Jeycore, (株)ジェイネット製)を用いて測定し、5μm 以下となっていることを確認した。また、同装置で工具先端位置の測定、及び調整も行った。また、超音波振動の振幅測定は応答周波数 100kHz の静電容量型変位計(NANOMETRIC SENSOR 211, ナノ技研(株)製)を用いて行った。

* 原稿受付 平成 22 年 8 月 18 日

** 正 会 員 埼玉県産業技術総合センター (埼玉県川口市上青木 3-12-18)

*** 正 会 員 埼玉大学 (埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

† 日本ノズル精機(株) (埼玉県久喜市桜田 5-17-1)

†† 正 会 員 松田技術経営研究所 (埼玉県さいたま市大宮区三橋 4-326-4)

Table 1 Tool geometry

Drill diameter	mm	0.2
Point angle	deg	140
Flute length	mm	4.8
Material		Cemented carbide
Grain size	nm	600
Coating		Non-coating

Fig. 1 Experimental system

Table 2 Drilling conditions

Workpiece		SUS304
Spindle speed	min ⁻¹	5000
Feed speed	mm/min	12
Hole depth	mm	2 (Through)
Step feed	mm	0.025, 0.1, 0.25, 0.5
Feed per tooth	μm/tooth	1.0
Amplitude	μm (p-p)	0~6
Coolant		Water-soluble

Fig. 2 Thrust force (1st hole-10th hole)

4. 微細深穴加工(L/D=10)

4.1 超音波振動の適用(L/D=10)

通常の深さの微細深穴に対して超音波振動を付加することによる効果の確認、及び最適な振動振幅を検討するため、直径0.2mm、深さ2mm(L/D=10)の通り穴加工実験を行った。加工条件を表2に示す。振動振幅を変化させたときの切削動力(スラスト力)、10穴加工後の刃先後退量の比較を行った。また、振動を付加しない慣用加工、及び振動加工において、ステップ量を変化させたときのスラスト力、工具寿命の比較を行った。

4.2 実験結果

4.2.1 振動振幅

ステップ量0.025mmで振動振幅を最大6μmまで変化させ、ステップ送りによる加工を行った。振幅量を3μm以上とるため、超音波スピンドルの代わりに切削動力計の上に設置した超音波テーブル(エコー技研製)を使用した。

図2は加工開始から10穴目までのスラスト力の推移を示す。加工が進んでいくとスラスト力が増大する。切れ刃の摩耗が進行していくことによるものと考えられる。また、振幅を6μmまで大きくすると折損が発生した。これはドリルと材料の接触速度が大きくなるため、ドリルの逃げ面に損傷が生じたためと考えられる。

スラスト力の推移では振動振幅の比較が難しいため、10穴加工後のスラスト力や刃先の状態で比較を行った。図3に振動振幅と10穴加工時のスラスト力、及び外周刃先後退量を示す。振動振幅0は慣用加工を示す。振動振幅を大きくするほど平均スラスト力は減少することが分かる。振幅が大きいか方がドリルと材料が接触しない時間が長くなるため、刃先冷却効果をより発揮するためと考えられる。さらに、振動振幅が大きくなるにつ

Fig. 3 Relationships among amplitude, thrust force and tool wear [10th hole]

れて刃先後退量は減少していき、振幅3μmのときには慣用加工に比べて後退量が70%低減することが分かる。しかし、それ以上振幅を大きくしても後退量に大きな変化は無いため、振幅3μmを最適振幅量とした。

4.2.2 ステップ量

振動振幅3μmでステップ量を0.025~0.25mmまで変化させ加工を行った。図4にステップ量と10穴加工後のスラスト力を示す。慣用加工ではステップ量が大きくなるに従ってスラスト力も大きくなっていくが、振動加工ではステップ量を大きくしてもスラスト力はほとんど変わらなかった。ステップ量を大きくすると各ステップ毎のドリルと材料の接触時間が延びるため、慣用加工では刃先温度が上昇して刃先摩耗の進行が速くなると考えられる。これに対して、振動加工は冷却効果があるため刃先温度があまり上がらないと考えられる。

 Fig. 4 Relationship between step feed and thrust force [10th hole]

Fig. 5 Effect of vibration and step feed on tool life (L/D=10)

図5に工具寿命の検討結果を示す。縦軸はドリルが折損するまでに加工した穴数である。まず、慣用加工でステップ量を0.025mm、及び0.1mmとしたときの比較を行うと、ステップ量0.025mmに比べ、ステップ量0.1mmのときには工具寿命が約1/2に低減する。慣用加工では、ステップ量を大きくするとスラスト力が大きくなる。つまり刃先摩耗の進行が速くなってしまうためと考えられる。続いて、ステップ量0.1mmで慣用加工と振動加工(振幅3 μ m)の比較を行った。振動加工では慣用加工と比べて工具寿命は約7倍となった。振動加工ではステップ量を大きくしても刃先摩耗が大きくなりたためと考えられる。これらのことより、L/D=10の微細深穴加工においては振動加工を行うことで、ステップ量を大きくして加工時間を短くしつつ工具寿命を延ばせることが確認された。

5. 高アスペクト比微細深穴加工(L/D=20)

5.1 L/D=10における最適加工条件の適用

アスペクト比のさらに大きい微細深穴に対する超音波振動切削の効果の確認を行った。L/D=10のときの最適条件であるステップ量0.1mm、振幅3 μ mで直径0.2mm、深さ4mm(L/D=20)の通り穴加工を行い、工具寿命の比較を行った。その他の加工条件は表2と同一である。

図6に慣用加工と振動加工の工具寿命の比較を示す。アスペクト比のより大きいL/D=20の微細深穴加工においては、振動加工は慣用加工に比べて工具寿命が約1/4と逆に短くなってしまった。

Fig. 6 Effect of vibration on tool life (L/D=20)

Fig. 7 Experimental method

Fig. 8 Effect of vibration on thrust force

5.2 穴深さによる超音波振動効果の検討

超音波振動を付加することが加工に悪影響を及ぼすことの原因を調べるため、穴深さ毎の超音波振動効果を検討した。そのために板厚6mmの試料を用意して、図7のように深さ毎に区間を区切り、それぞれの区間を別個のドリルで止まり穴加工した。各区間において慣用加工、及び振動加工を行ったときのスラスト力の比較を行った。

穴深さの区間を0~1mm (L/D=0~5)、1~2mm (L/D=5~10)、2~3mm (L/D=10~15)、3~4mm (L/D=15~20)としたときのスラスト力の推移を図8に示す。加工が進むにつれて刃先摩耗が進みスラスト力が大きくなっていくことや、穴深さが深くなるにつれてスラスト力が大きくなる傾向にあることが分かる。振動加工と慣用加工の比較が分かりやすくなるように、図9のように各区間における慣用加工に対する振動加工のスラスト力比を比較した。加工穴数に依らずスラスト力比の値はほぼ一定となっている。このことより、1穴目のスラスト力比を比較することで、穴深さの影響を検討することが可能であることが分かった。

Fig. 9 Thrust force ratio of vibration cutting to conventional cutting

図 10 に穴深さと 1 穴目のスラスト力比の関係を示す。穴深さの影響をより深い位置まで確認するため、4~4.8 mm ($L/D=20\sim24$) の深さについても検討を行った。横軸は各区間の最大値である。3mm ($L/D=15$) までの区間においては振動加工によってスラスト力は約 20% 以上低減しており、振動加工による効果がみられる。しかし、3mm ($L/D=15$) 以上では約 10% しか低減しておらず、振動加工によるスラスト力低減の効果が小さくなってしまふ。

原因としては、穴が深くなると切削油が供給困難になり、振動による冷却促進効果が薄れることや、振動によって切りくずは薄くなるが排出がより困難になることが挙げられる。まず、切りくず排出性を確認するため、切りくずの観察を行った。切りくずを図 11 に示す。穴深さが 3mm 以上となっても切りくず形状の変化は見られないことから、切りくず排出は正常に行われていると考えられる。よって、スラスト力低減の効果が小さくなる主原因は刃先温度上昇であると推定される。そこで、刃先温度を抑制する方法を検討し、その効果を検証した。

6. $L/D=20$ の加工へ超音波振動を適用するための切削条件

6.1 切削速度の検討

穴深さが 3mm ($L/D=15$) 以上となる微細深穴加工においても振動加工の効果を得るためには、刃先温度の抑制が必要と考えられる。そこで、刃先温度に影響が大きい切削速度の検討を行った。主軸回転数を 1000 min^{-1} から 5000 min^{-1} まで変化させ、1 刃当りの送り量 $1\mu\text{m/刃}$ 、ステップ量 0.1mm は固定して実験を行った。

図 12 に主軸回転数と工具寿命の関係を示す。慣用加工では工具寿命は切削速度に依存しないが、振動加工では切削速度を下げると工具寿命が大幅に増加することが分かった。

振動加工において寿命が長かった主軸回転数 2000min^{-1} と寿命が短かった 5000min^{-1} における穴深さと 1 穴目のスラスト力比の関係を図 13 に示す。主軸回転数 2000min^{-1} では穴深さ 3mm ($L/D=15$) 以上となる区間においても振動加工によって切削動力が低減している。切削速度を下げることで刃先温度が低減したためと考えられる。

6.2 シンニングの検討

刃先温度を抑制するもう一つの手法として、図 14 のようなドリル先端のチゼルエッジに切り欠き状の溝を加工するシンニング⁵⁾に着目した。シンニングを施した微細径ドリルを用いることによって切削動力を低減させた実績を有している⁶⁾ため、本手法を振動加工に適用することを検討した。

 Fig. 10 Relationships between depth and thrust force ratio [1st hole]

Fig. 11 Chip form

Fig. 12 Effect of vibration and spindle speed on tool life

 Fig. 13 Relationships between depth and thrust force [1st hole]

Fig. 14 SEM photograph of drill with thinning

Fig. 15 Relationships between depth and thrust force [1st hole]

Fig. 16 Thrust force (1st hole-10th hole)

Fig. 17 Effect of vibration and thinning on tool life

シンニングの効果を確認するために、主軸回転数 5000 min^{-1} で加工を行った。図 15 に穴深さと 1 穴目のスラスト力比の関係を示す。シンニングを施したドリルを用いることで、穴深さ $3\text{mm}(L/D=15)$ 以上となる区間においても振動加工のスラスト力低減効果があることが分かる。シンニングによって刃先温度が抑制されたためと考えられる。

6.3 工具寿命の評価

シンニングドリルを用いて振動加工をしたときの工具寿命を検討した。加工条件は主軸回転数を 2000 min^{-1} 、ステップ量 0.1mm 、振動振幅 $3\mu\text{m}$ とした。また、主軸回転数を下げると生産性が落ちてしまうため、1 刃当たりの送り量を $1.5\mu\text{m}/\text{刃}$ と大きくした。

図 16 にスラスト力の推移を示す。シンニングドリルを用いることでスラスト力は約 50% 低減される。また、シンニングの有無にかかわらず慣用加工に対して振動加工ではスラスト力が約 30% 低減された。

図 17 に工具寿命を示す。シンニングドリルを用いていないときは、慣用加工に対して振動加工の工具寿命は約 3 倍となった。また、シンニングドリルを用いたときには振動加工によって工具寿命は約 4 倍となった。

これらのことより、 $L/D=10$ の加工条件に対して切削速度を下げたり、シンニングドリルを用いることで、刃先温度が低下し、 $L/D=20$ の高アスペクト比微細深穴加工でも超音波振動付加の効果を発揮できることが分かった。

7. 結 言

$L/D=20$ の高アスペクト比微細深穴加工を実現するため、超音波振動付加の効果を検討した。まず通常の微細深穴である $L/D=10$ の加工実験を行い、刃先摩耗や切削動力の評価によって最適な振動振幅を導出した。

さらに、そのときの知見を基にして $L/D=20$ の高アスペクト比微細深穴加工について検討を行った。 $L/D=10$ と同じ条件では切削油が供給困難になり、振動による冷却促進効果が薄れるため、超音波振動付加の効果が発揮できなかった。

これに対して、切削速度を落とすことやシンニングドリルを用いることで切削温度上昇の抑制を試みた。その結果、 $L/D=20$ の高アスペクト比微細深穴に対しても超音波振動を適用できることが分かった。

参 考 文 献

- 1) 鬼鞍宏猷, 大西修: 超音波振動小径穴加工における切削機構, 精密工学会誌, **64**, 11(1998)1633.
- 2) 岳義弘: 精密超音波スピンドルによるマイクロ穴明け加工, 型技術, **17**, 3(2002)41.
- 3) 原田圭, 笹原弘之: 超音波振動切削における切削機構に関する研究 (第 3 報), 精密工学会誌, **71**, 8(2005)1005.
- 4) Moriwiki T., Shamoto E: Ultrprecision Diamond Turning of Stainless Steel by Applying Ultrasonic Vibration, Annals of the CIRP, **40**(1991)559.
- 5) 佐久間敬三: ドリル・リーマ加工マニュアル, 大河出版, (1992)47.
- 6) 南部洋平, 落合一裕, 秋葉大輔, 永久保輝昭, 松田信一: Co 基超耐熱合金への微細深穴加工に関する研究, 精密工学会誌, **75**, (2009)1083.