

月刊 トライボロジー

THE TRIBOLOGY

2017 **3** No.355



特集

切削・研削加工技術

工作機械用精密転がり軸受 ULTAGE(アルテージ)シリーズ
NTN

高圧クーラントによる加工技術



超高压クーラント装置
(左：標準インバーター仕様、右：スマート仕様)

森合 勇介
(株)トクピ製作所

はじめに

近年、変化するニーズに対応する加工技術は高生産性、低コスト、高付加価値化の要求がますます高まっている。それぞれの企業がより踏み込んだ部分まで、各企業の状況に合った最適化を進めていく必要があり、加工点、設備だけに捉われず一つの製品を生み出すにあたり、様々な視点から改善の意識を持つことが重要であると考えられる。

ここでは加工データを含め高圧クーラントを利用した加工技術について紹介する。

1. 旋削加工時におけるクーラント吐出

1-1 既存技術による切りくず処理

一般的にクーラント(切削油)が必要とされる加工は、冷却性や潤滑性を高め被削材表面粗さの向上、工具摩耗の抑制を目的とする。

旋削加工のクーラント吐出は生成され

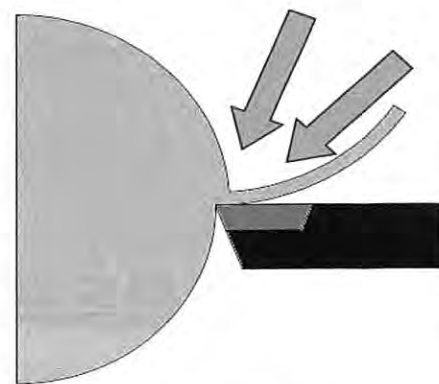


図1 外部供給

た切りくずを洗い流すようにかかっており、切削点近傍へは到達しにくい(図1)。1-2 高圧クーラントを利用した切りくず処理
高圧クーラントは高圧クーラント用工具を使用することでチップインサートと生成された切りくずの隙間に向けて吐出することで切りくずをリフトアップさせ曲率半径が小さくなることで分断することが知られている(図2)。

2. 切りくずのリフトアップ効果検証

高圧クーラントを利用した切りくずが、リフトアップ効果により曲率半径が

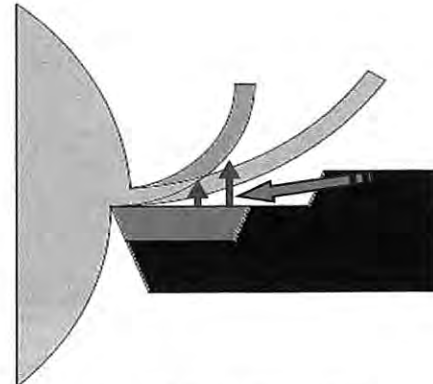


図2 刃先近傍ノズル付き工具

小さくなり分断することを確認するため、被削材φ50チタン合金Ti-6Al-4V、切削条件 $V_c=50\text{m/min}$ 、 $f=0.15\text{mm/rev}$ 、 $a_p=1.0\text{mm}$ で外径加工を行い、1MPaと14MPa時の切りくず形状を比較したところ、その差は顕著であった(図3)。また、工具寿命に影響のある逃げ面摩耗値についても1MPa時120 μm 、14MPa時65 μm と好変化がみられたことも付け加えておきたい。

3. 高圧クーラントの効果的活用

前項で述べたように高圧クーラントを効果的に活用するには、チップインサートと生成された切りくずの隙間にくさび

切削条件	$V_c=50\text{m/min}$ 、 $f=0.15\text{mm/rev}$ 、 $a_p=1.0\text{mm}$	
被削材	チタン合金	
圧力	1MPa	14MPa
切屑画像		

図3 チタン合金切りくず

切削条件	$V_c=200\text{m/min}$ 、 $f=0.2\text{mm/rev}$ 、 $a_p=0.2\text{mm}$	
被削材	SPHC	
圧力	7MPa	14MPa
切屑画像		

図5 低炭素鋼の切りくず

状に吐出させ、切りくずのリフトアップ効果を得るための高圧クーラント用工具を使用する必要がある。

近年高圧クーラントに対応した工具が海外メーカーをはじめ国内メーカーでも市販されている(図4)。

刃先近接にノズルが装着されており、銅管や自在ノズルのようにヒューマンエラーや切りくず衝突によりノズル角度が変わるなどのトラブルが起こりにくい設計になっているため、切削ポイントに正確かつ近い位置の吐出が可能となりノズルを小径穴に絞ることで効果が表れる。

4. 高圧クーラント用工具を利用した加工事例

4-1 低炭素鋼

自動車産業の盛んな日本では、熱処理前やプレス材など炭素含有量の少ない素材が多く使われている。背景として工程削減のいわゆる「ニアネットシェイプ」といわれるプレス成型技術の進歩により、自動車部品の軽量・高剛性化、量産目的による加工コスト削減のため、完成形に近い部品生産を可能とした。低炭素鋼の加工は、航空機部品などに使用される超耐熱合金である難削材とは違い、加工熱

が刃先に滞留しにくく工具摩耗の進行は大きくない。しかし、切りくず延性の高いプレス材の仕上げ加工では、プレスによる加工コスト削減とは裏腹に、被削材の延性の高さによりチップブレーカーだけでは切りくずを処理しきれない。コントロールできずに生成された伸びた切りくずは被削材、工具、銅管クーラントノズルなどに巻き付き、加工面を傷つけてしまうなど仕上げ面精度の不安定要素となることが少なくない。

加工部位によってはステップ送りなどで物理的に切りくずが途切れるような加工を行うこともあるが、サイクルタイムの短縮・工具寿命延命とは相反する。

加工機を並べロボットやガントリーローダーを導入し自動無人化ラインを構築したにも関わらず、切りくずの巻き付きなどの理由により、ワーク着脱ミスなどで機械を停止せざるを得ない。

機械停止を解除するための人員や、機械停止を防止するための切りくず除去人員が必要になり、本来目的とした無人化が難しいとされている。

当社では被削材SPHC(熱間圧延軟鋼板)、 $V_c=200\text{m/min}$ 、 $f=0.2\text{mm/rev}$ 、 $a_p=0.2\text{mm}$ の条件で内径加工を行い

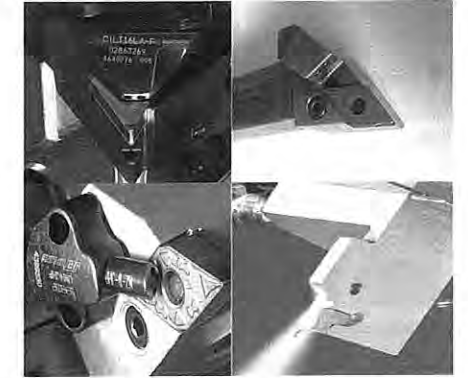


図4 高圧クーラント対応工具

7MPaと15MPa時の切りくずを比較した(図5)。

切りくず分断が不可能と思われていたプレス材でも前項の高圧クーラント対応工具を使用し、加工条件やチップブレーカーの組み合わせにより巻き付きを起こさないのである長さまで分断できた。

4-2 超耐熱合金

超耐熱合金の主な使用として航空宇宙産業が挙げられる。近年はエネルギー資源節約、CO₂削減、地球温暖化防止の観点からジェットエンジンやガスタービン部品のさらなる高効率化が求められている。国産民間旅客機の試験飛行、国産ロケットの性能向上で国産宇宙産業での商業参加が採算ベースに近づいたことが話題になり、高効率化にますます拍車がかかる。航空宇宙産業以外にもエネルギー・医療・自動車産業などの産業では、高機能部品の需要に伴い難削材加工が増加している。国内の自動車産業ではハイブリッドが先行しているが、海外の交通環境ではダウンサイジングターボの需要が高く、国内自動車メーカーもそれに対応せざるを得ない状況である。

超耐熱合金の加工工程では、熱伝導率の低さから切りくずが切削熱を吸収せず刃先に滞留してしまい、工具摩耗が進行しやすくなる。また延性も高いため切りくず処理性も悪く、溶着・構成刃先を生じやすく刃先の欠損に繋がることもある。

当社では超耐熱合金の高圧クーラントを活用した加工を試みた。被削材インコネル713、切削条件 $V_c=30\text{m/min}$ (1MPa)、

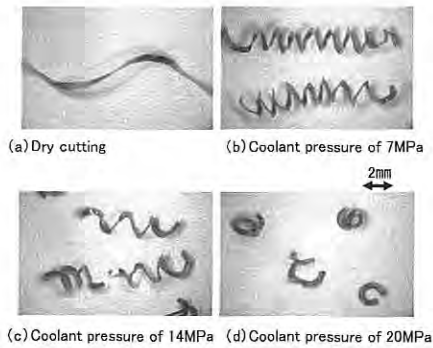


図6 cBN工具による乾式・7・14・20MPa時の切りくず

$V_c = 60 \text{ m/min}$ (20MPa), $f = 0.15 \text{ mm/rev}$, $a_p = 0.1 \text{ mm}$ で外径加工を行い、圧力違いで刃先摩耗を比較したが、切削速度を $V_c = 30 \text{ m/min}$ から $V_c = 60 \text{ m/min}$ へ上昇させても逃げ面摩耗値は比例せず同じ $400 \mu\text{m}$ であった。

また、耐熱合金インコネル718を、cBN焼結体工具で $V_c = 300 \text{ m/min}$, $f = 0.1 \text{ mm/rev}$, $a_p = 0.2 \text{ mm}$ の切削条件で外径旋削を行った。cBN焼結体工具にはチップブレーカーが付与していないため切りくずは曲げられることなく連続した切りくずが生成される。cBN焼結体工具を3種類用い乾式切削・20MPa ($V_c = 300 \text{ m/min}$)・20MPa ($V_c = 600 \text{ m/min}$)の3通り行った。乾式切削では逃げ面・すくい面共に摩耗が大きくみられた(図7)。また、図6に示すように切りくずは分断されず長く伸びた切りくずが生成された。それに対し、20MPaの高圧クーラントで同加工した場合、切りくずは細かく分断された。工具摩耗においては、切削速度を倍の $V_c = 600 \text{ m/min}$ まで上昇させたにも関わらず、工具摩耗は反比例し減少した(図8下段)。しかし、乾式切削時と同じ切削速度で加工した場合においては工具摩耗が減少しなかった(図8上段)。以上の結果から高圧クーラントを使用することで、刃先熱が低減することにより工具摩耗が抑制されると考えられるが、切削工具には適した切削温度が存在することが推察される。

5. 工具摩耗

超耐熱合金の加工が困難とされている

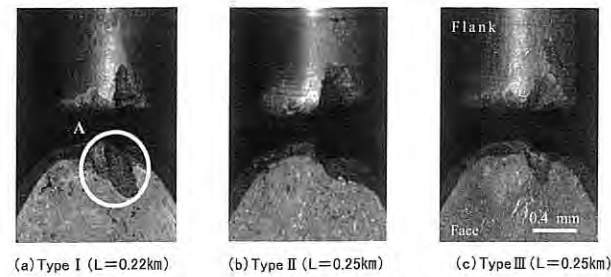
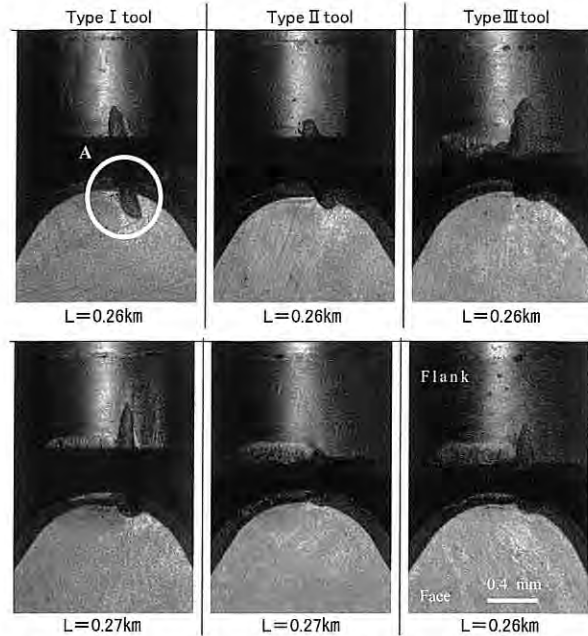


図7 乾式切削時の逃げ面・すくい面摩耗

図8 高圧クーラント20MPa時の逃げ面・すくい面摩耗 (上段 $V_c = 300 \text{ m/min}$ 、下段 $V_c = 600 \text{ m/min}$)



最大の理由は刃先温度の上昇で、これまでの実験で高圧クーラントを使用することで刃先温度が低下する可能性が高いことが分かった。被削材インコネル718を通常クーラント圧力で加工した場合と、高圧クーラントを用いて加工した場合の刃先温度の変化を図9に示す。通常クーラント圧力(Conv.)に対して圧力を上昇させるに伴い、刃先温度が反比例していることが分かる。切削速度 35 m/min で通常クーラント圧力に対して、 30 MPa 時の刃先温度は 800°C 弱から 600°C 弱へ 200°C 程減少している。即ち切削点のより近接部までクーラント液が行き届いたことで刃先温度が低下したと考えられる。

図10では工具刃先逃げ面に吐出する工具を使用して、逃げ面摩耗に影響のあるといわれている図11の「Film boiling area (膜沸騰領域)」が圧力によってどのように変化したかを表している。高圧領域ではないが、クーラントを 0.1 MPa から 0.3 MPa にわずかに圧力を上げることで膜沸騰領域が減少していることが分かる。刃先温度の上昇に伴い膜沸騰領域へのクーラント到達は困難になり、到達前に蒸発してしまうため、圧力・流速が必要である可能性が高い。そこで高圧クーラントを使用すれば切削速度の増加など、さらなる効果が予想される。図12では逃げ面・すくい面摩耗とクーラント圧力の関係を示す。図9と同様にすくい面摩耗も同様の現象が起こっていると考える。 0.6 MPa 時 $401.23 \mu\text{m}$ 、 10 MPa 時 $307.74 \mu\text{m}$ 、 30 MPa 時 $168.79 \mu\text{m}$ とクーラント圧力を上昇させるに伴い、すくい面

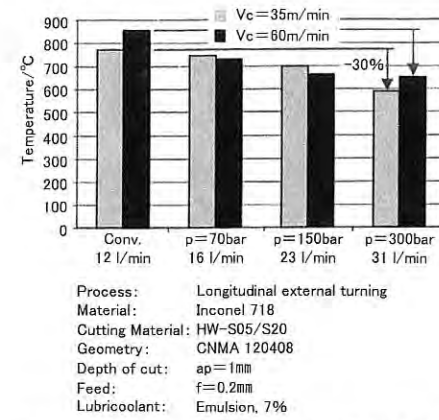


図9 通常圧力と高圧クーラント使用時の刃先温度

摩耗の領域が減少していることが分かる。逃げ面と違い、すくい面は切りくずが生成されるため、切りくずと刃先の隙間にクーラントが到達するには切りくずをリフトアップさせるだけの高圧での打力が必要になり、刃先との摩耗面積を低減させることで、より真の刃先にクーラント液が到達できると考える。

6. 高圧クーラント装置

7 MPa から 30 MPa までの超高圧域のクーラント装置を、当社では標準機として取り扱っている。

ポンプメーカーならではの圧力バリエーションで、指定があればどの圧力レンジでも対応が可能である。装置の基本仕様は、工作機械から圧送されたクーラント液を $15 \mu\text{m}$ の精度で遠心分離し、クリーンタンクへ貯水されたクリーンなクーラント液だけが加工点へ吐出される。

遠心分離で発生したコンタミはクリーンタンクのオーバーフローとともに工作機械ダートータンクへ戻るため、ノンフィルターで産業廃棄物を出さないメンテナンスフリーになっている。

高圧ポンプの運転信号、注意喚起、アラームなどの信号線インターフェイスは完備されており、コネクター接続すれば工作機械と連動できる。

インバータ搭載仕様においては、高圧ポンプ吐出量に必要な動力だけ消費し余分なエネルギー・発熱を最大限に抑制させ、消費電力を大幅に削減することが

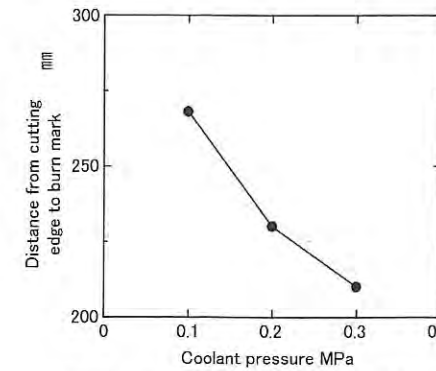


図10 クーラント圧力と膜沸騰領域

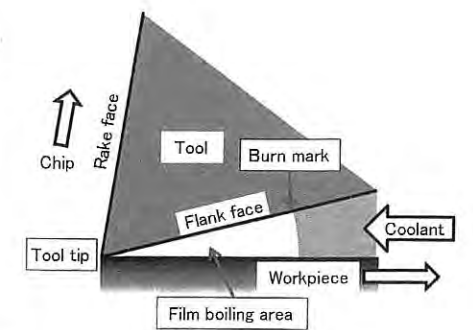


図11 Film boiling area

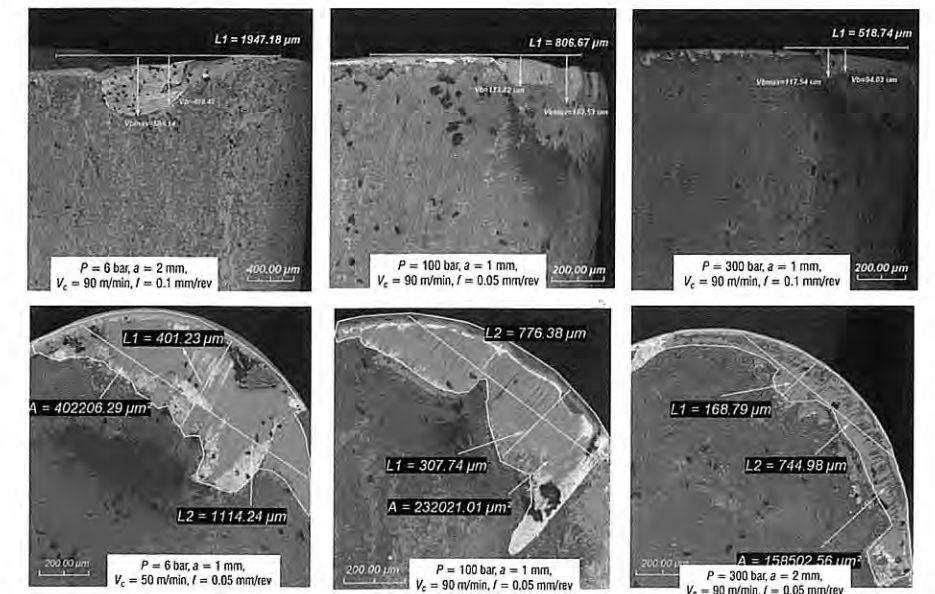


図12 クーラント圧力の違いによる逃げ面・すくい面摩耗

できる。また、工作機械Mコードにより圧力を数段階で可変させることもできる。

追記となるが、当社では既存旋盤で超高压対応の改造を実現しており、高圧クーラントによる加工実験、模擬テスト加工が可能である。

おわりに

高圧クーラントを用いた加工技術には未知な部分もあるが、加工改善の有力なアイテムの一つになる可能性を秘めている。今後ますます高まるグローバル競争の中、日本の先端技術に貢献できれば幸いである。

参考文献

- Oğuz Çolak : Investigation on Machining Performance of Inconel 718 under High Pressure Cooling Conditions, 2012 Journal of Mechanical Engineering.
- 帯川利之、ほか：高圧クーラントを用いた高速切削の動向と最新のトピックス、東京大学生産技術研究所、Vol.67、No.6、p.607-612(2015)。
- F. Klocke, H. Sangermann, A. Krämer, and D. Lung : Influence of high-pressure lubricoolant supply on thermo-mechanical load tool wear behavior in the turning of aerospace materials, Proc. ImechE, 225, B1 (2011) 52-61.
- Tadahiro WADA, Yusuke MORIGO, and Hiroaki TANAKA : Tool Wear of Sintered Cubic Boron Nitride Compact in Cutting High-Nickel Alloy with High-Pressure Coolant Supplied.