

Tool Engineering & モノづくりの現場を伝える機械雑誌

ツールエンジニア

2014
8

高硬度材, 難削材の加工技術

◆難加工素材を加工するための工作機械の現状◆超高压クーラントによる難削材切削◆耐熱合金加工と焼入鋼加工における高信頼性・高生産性◆高硬度材, 難削材のねじ切削用プラネットカッタ◆コーティング超硬エンドミル◆リーマ加工が不要な高精度ドリル◆超高速20万 min^{-1} ルーター◆エアロメタル・ピトリファイド砥石
★続・海底探査機「江戸っ子1号」●機械要素技術展レポート/樹脂加工ドットコム/小径超硬ドリル/水溶性部品洗浄機/生活を支える金属 いろはにほへと/街角点描/絵本「えんじにあ」連載401回



超高压クーラントによる 難削材加工

航空宇宙構成部品材料と 加工効率の改善

トクビ製作所 関本 昌利

新型航空旅客機製造におけるわが国の生産協力比率は、米国航空機メーカーを例にあげてもエンジン・機体ともにその比率は大きい(図1, 図2)。その航空旅客機で欧州・米国メーカー問わず、主力となるのは、中長距離運用型であり、米国を例にあげると新型機について、従来の同型機に比較して20%の効率改善が目標となっていた。

燃費に対する要求仕様は高く、機体軽量化と高出力かつ低燃費な推進装置を持つことは必須であったといえよう。機体軽量化に大きな貢献を果たすのが、機体構成材料全体に対する、複合材とチタン合金の増加である(図3, 図4)。

構成重量比で見た場合、従来の機体と最新鋭の機体では比強度・比剛性の高い材料が増加している。複合材が1%から50%、チタン合金が4%から15%と大幅な増加である(両材料が並んで使用割合が増加した背景には複合材とチタンがガルバニック腐食を誘発しにくい点にあり、熱膨張率差において、複合材に対して、チタンがアルミニウム合金より適合性があることにもある)。

複合材、CFRP(炭素繊維強化複合材料)は、大型一体化成形が可能であることや、疲労強度が高く耐食性に優れているなどの特徴もあり、機体構成割合から軽量化の反映が大きい部位(主翼・胴体)に使用

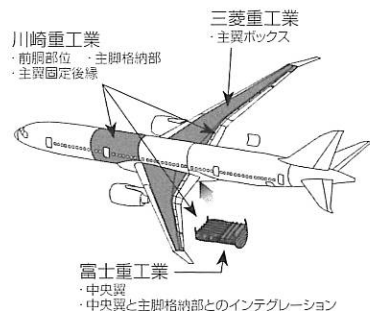


図1 米国航空機メーカーの機体における国内企業生産協力状況

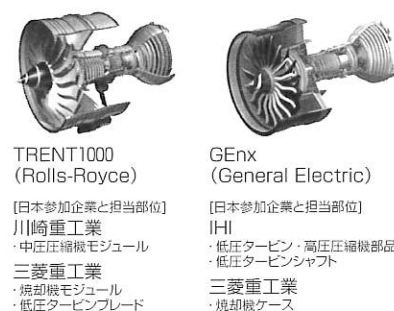


図2 米国航空機メーカーの最新エンジンにおける国内企業生産協力状況

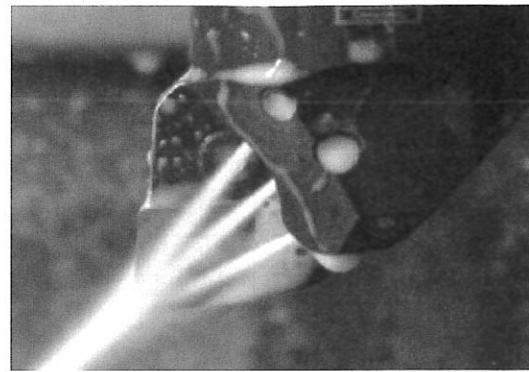


写真1 刃先近傍ノズルからクーラント吐出

されている。

高出力で低燃費な推進装置とは、燃料に使う空気重量に対して、ファンから吹出す空気重量が大きく(高バイパス)、タービン入口温度(燃焼ガス温度)および、圧縮機の圧力比を高めた熱効率の高いエンジンをいう。約1600℃にも至るタービン入口温度は、燃焼器・タービンノズルガイドベーン・タービンブレードに、耐用温度の高い超耐熱合金の使用とその遮熱コーティング技術・材料の向上が不可欠となっている(ニッケル基の超耐熱鋼は、熱伝導率が低いことが大きな特徴であり、難削材の代表ともいわれる)。

●超耐熱鋼の特徴と加工への影響

超耐熱鋼は熱伝導率が低く、切削熱が速やかに切りくずに遷移しないため、切りくずによる切削加工熱の除去が速やかに行なわれない。では発生した切削熱はどうなるかというと、加工面と工具側に遷移・滞留することになる。その結果、高温に至る切削域が極度に被削材加工面および工具切削部に集中し、すくい面摩耗、逃げ面摩耗が進行しやすくなる。

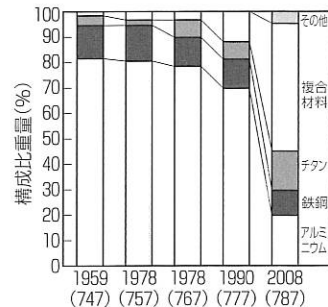


図3 米国航空機メーカーにおける民間旅客機 機体構成材料の変遷

(1) 切削熱による

工具摩耗
ニッケル基の超耐熱鋼は使用雰囲気温度が900~1000℃領域であることから、超硬工具での加工をおこなった場合、工具消耗が激しい。

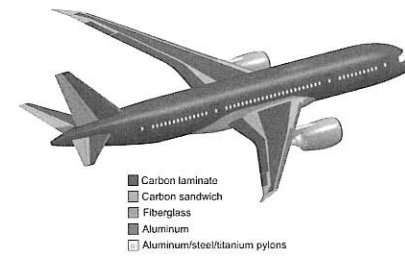


図4 米国航空機における機体構成材料の一例

加工効率の改善のため

に、条件を高速化することは、さらなる熱滞留によるバインダ部の熱変異(早期チッピング)、被削材と工具の化学的反応による溶着・構成刃先(切削加工面の仕上がりの悪化を伴う)の進行を促進することになる。

(2) 加工硬化による工具摩耗

高速での加工を行なった場合、切削域の温度上昇が急激であり、しかも高温となる。その結果、熱伝導性の悪さから、表面層のみ加工硬化を起し、高硬度な加工硬化層のみを切削することになり、加工硬化層への再突入を防ぐためには、送り量の確保できる高剛性の機械・工具が必要になる。

ステップフィードによる加工をおこなうとステップのたびに硬化層へ再突入することになり、結果として工具摩耗促進が起こる。

(3) 切りくずによる加工効率の低下

高温域での加工に適したセラミックス刃物ではチップブレイカ形状の多様性をとれないことから、処理しやすい切りくずが生成されにくく、被削材・工具への巻き付き・噛込みが発生し、切りくずの除去作業が、加工効率に影響を与える。

●加工点の潤滑・冷却

工具摩耗の低減を目的として、従来よりクーラント供給で加工点の潤滑・冷却が行なわれているが、超耐熱鋼について有効と思われる方法として研究・実践されているのが、旋削加工の際に刃先近傍のノズルからクーラント液の高圧吐出を行なうことによるものである(写真1, 図5)。

(1) クーラント供給の方法と相違点

従来との相違点は、超耐熱鋼特有の温度上昇の顕著な加工部位に対して、効果的な供給方向と距離を考慮している点であり、工具先端にクーラント吐出ノズルを持つものが出現することで、可能になった手法である。

工作機械の刃物台に、高耐圧のクーラント吐出用

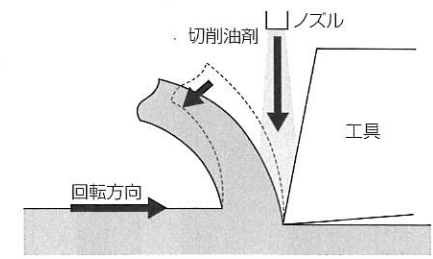


図5 高圧クーラントシステム模式図

パイプを固定する方法では、被削材がクーラント吐出方向もしくは、稼働中にパイプと干渉するなど、吐出点と供給点との距離を縮めることがむずかしかったが、本手法のように吐出ノズルが刃先に近接実装された工具(以下、刃先近接ノズル付き工具)を使用すれば、加工方向に影響されことなく切りくずの生成箇所と工具との間にクーラントを正確に供給することが実現される。

(2) 工具摩耗への影響

超耐熱鋼(インコネル718)の旋削加工において切削点に従来のクーラント供給した場合と、刃先近接ノズル付き工具で高圧クーラントを供給した場合を図6に示す。

従来のクーラント供給に比較して、刃先近接ノズル付き工具の方が、刃先温度が低いことが分かる。これは、高圧クーラント液の刃先への到達率が高くなることで、加工熱が効果的に除去されていることを表わし、熱滞留が軽減され工具寿命の延長に貢献する。

さらに注目する点として、ここでは、同様の刃先近接ノズル付き工具で最大30MPa(300bar)でのクーラント供給も実験されている。従来に比較して、30MPaでは約160℃(30%)の工具刃先温度低下が見られている。

(3) クーラント供給圧力と工具摩耗抑制

図7は、0.6~30MPaまでの供給圧力と逃げ面摩耗の関係を表しているが、圧力上昇とともに逃げ面摩耗が減少していくようすがわかる。写真2では、クーラント供給圧力が0.6MPaと10MPa、30MPaでの、工具すくい面、および逃げ面摩耗状態変化を画像で確認できる。すくい面、逃げ面ともにクーラント供給圧力上昇に従い、摩耗が減少していることがわかる。

超耐熱鋼(インコネル718)の加工において、海外における文献からではあるが、刃先近接ノズル付き工具を使用して、クーラント供給圧力を上昇させる

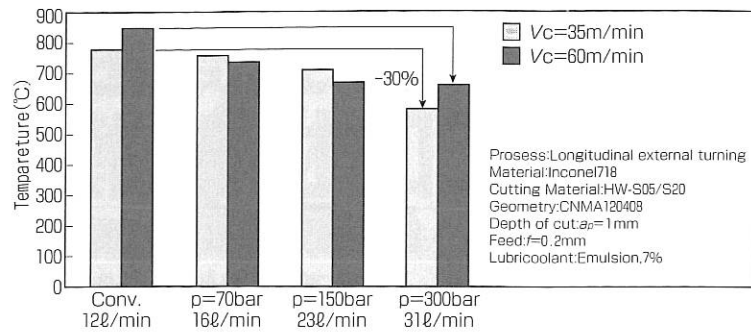


図6 従来のクーラント供給方式(Conv.)とノズル付き工具からの高圧クーラント供給方式での刃先温度の違い

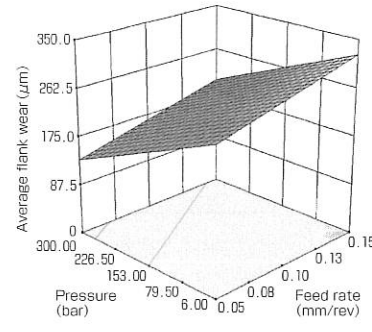


図7 クーラント供給圧力と逃げ面摩耗

実験を数例紹介した。この実験により、超硬工具の限界温度近くに達する超耐熱鋼の工具温度の低減には、高圧クーラントの被削点近傍ノズルでの供給は、工具摩耗抑制に効果的であるといえる。

●高圧クーラント供給と切りくず分断

高圧クーラントの被削点近傍ノズルでの供給は切りくず生成状態に影響をあたえ、分断を促進することが知られている。被削点温度の低減は、切りくずの生成時温度を急速に除去し、切りくずをすくいあげる効果(ウェッジ効果)が顕著に作用しているため、分断が促進される(写真3)。

切りくずを切削域より速やかに離脱(除去)させることで、切りくずの接触を原因とする工具の摩耗改善につながる。

●高圧クーラントによる加工効率改善

高圧クーラントの被削点近傍ノズルでの供給での加工効率改善について次にまとめる。

(1) 実加工以外の作業時間短縮

工具摩耗の低減は、従来と同条件の加工においては、工具寿命の延長となるため、工具摩耗による交換回数が減少し、交換調整停止時間の短縮につながる。

表1 ノズル孔径と圧力別吐出量参考表

噴射孔詳細	吐出圧力					
	7MPa	10MPa	15MPa	20MPa	25MPa	30MPa
孔径(φ)						
0.3	0.28	0.33	0.41	0.47	0.52	0.57
0.4	0.49	0.59	0.72	0.83	0.93	1.02
0.5	0.77	0.92	1.12	1.29	1.45	1.59
0.6	1.11	1.32	1.62	1.86	2.09	2.29
0.7	1.51	1.80	2.20	2.54	2.84	3.11
0.8	1.97	2.35	2.88	3.31	3.71	4.06
0.9	2.49	2.98	3.64	4.19	4.70	5.14
1.0	3.07	3.68	4.50	5.17	5.80	6.35
1.1	3.72	4.45	5.44	6.26	7.02	7.68
1.2	4.43	5.29	6.48	7.45	8.35	9.14

単位: L/min

る。切りくずの分断は、工具への巻付きや加工品への傷を防止する切りくず排出機能が円滑に働くこととなり、切りくず除去作業を減少させ、効率的かつ良好な加工を継続することが可能になる。

(2) 加工条件の高速化

工具摩耗の低減により、より高速な条件での加工が可能となり、除去量の多い加工などの時間を短縮できる。なお、通常の高圧域といわれる7MPaに比較して、超高压域でのクーラント供給は吐出流量の大きなポンプが必要との一般論もあるが、同じ流量でも吐出ノズル径を変化させることで超高压を得ることは可能である(表1)。

加工室内の切りくず流しのように低圧クーラント供給でよい場合と、被削点近傍ノズルによる超高压が効果的な場合を、うまく使い分ける必要がある。

●超高压クーラント装置

当社は、上記のクーラントの供給方法を踏襲したうえで10~30MPaの超高压域を効果的に刃先近接ノズル付き工具ホルダに適用できれば、いわゆるチップブレーカでの切りくずコントロールに加えて、さらに飛躍的に効果を高めると考える。

吐出ノズルを超高压で通過するクーラント液は、従来より流速・流量ともに確保されることから、被削点の熱滞留抑制が速やかに働き、ブレーカの負担の軽減と超硬刃の母材の劣化抑制が期待される。同時に、その流速・流量は近傍点にアタックすることによって運動エネルギーとなり、切りくず生成に影響をあたえ、これまでの圧力域では分断不可能な切りくずに対しても好影響を生じると考え、検証を続けている。

超高压クーラント装置としては、単なるポンプとモータセットにとどまらず、超高

圧クーラントを利用した切削に必要な環境を一式で提供できることを目標としている。

動作概略の解説をすると、まず工作機械のダーティタンクの供給ポンプから圧送されるクーラント液が、サイクロンセパレータにより15μmの精度で濾過されたのち、装置内の大容量クリーンタンクへ供給される(クリーンタンクは独自フローにより、上限下限の液面管理されるため、下限時に先の工作機械側の供給ポンプに対して、供給圧送用の接点信号を出力することが可能)。

まずこの工程でメンテナンスフリー(作業者を煩雑なフィルタ掃除作業から開放することが目的)と、クリーンなクーラント液の確保の両立をはかっている(ユーザー希望オプションでサイクロンセパレータからクリーンタンクの間カートリッジフィルタの追加仕様も可能)。

大容量クリーンタンクより超高压ポンプからのクーラント液が工作機械の工具ホルダに供給されるが(工作機械からの信号制御により吐出可能)、それにも特徴を持った工夫が施されており、クーラントホール径がツールにより変化しても、設定圧力に応じて最適化されたポンプ流量を自動制御する仕組みとなっている。この制御を行なうことで、非制御の場合と比較した場合、むだな運転を抑制するだけでなく、装置内のクリーンタンクの液温上昇防止に作用し加工精度改善に貢献する。

* * *

ここでは、新型航空旅客機に使用される新素材の概要とそのなかでも超耐熱鋼の特徴とその難削性についての解説、および刃先近接ノズル付き工具での高圧クーラント供給による潤滑性向上と摩擦改善による被加工性の向上について述べた。

超高压クーラント供給は、さらなる加工改善を期待できるが、その適用については、通常7MPa耐圧といわれる工作機械の高耐圧開発・普及に依存している。

当社では、その現状を鑑み、ユーザーの超高压クーラントによる加工実験要望に応えることのできる環境を自社旧型旋盤を一部改造する手段などで実現しているので、あくまで自己責任としての改造要望についてのご相談に助言させていただいているこ

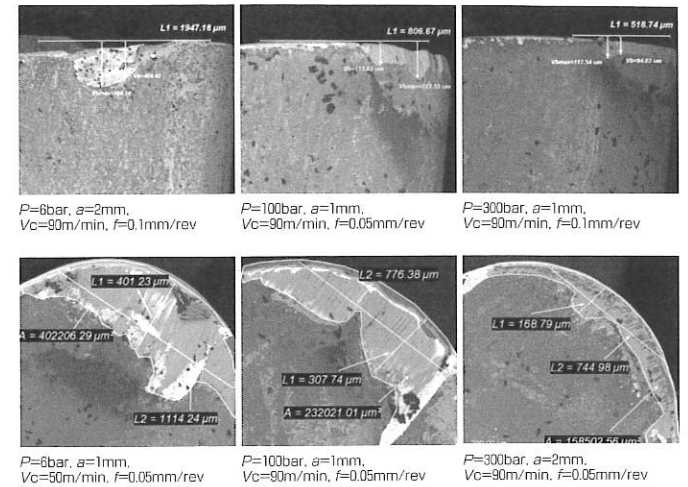


写真2 クーラント供給圧力と逃げ面摩耗

とを付け加える。

最後に、次世代航空機に使用される素材の開発・改良は著しく、現時点で斬新・効果的な加工手法であったとしても次の新しい手法を継続開発していくことが必要となる。生産協力国として、わが国が技術的に牽引することで、世界に必要不可欠な存在となることを期待したい。

<参考文献>

- ・図1, 図2 日本航空宇宙工業会: 日本企業の海外プロジェクトへの参画状況, 航空宇宙産業データベース, (2013) 28.
- ・図3 伊奈田: 航空機用構造材料の技術開発動向, 素材, 51, 11 (2010) 2.
- ・図4 Tim Nelson: Flight Operations Engineering Boeing Commercial Airplanes, http://www.smartcockpit.com/docs/B787_Systems_and_Performance.pdf#search=787+Systems+and+Performance
- ・図5, 図6 大森, 加藤, 前田, 上野: 高圧クーラントが旋削加工の切りくず処理性におよぼす影響, 明石工業高等専門学校研究紀要, 55 (2013) 7.
- ・図7 F. Klocke, H. Sangermann, A. Krämer, D. Luag: Influence of a High-Pressure Lubricant Supply on thermo-mechanical tool road and tool wear behaviour in the turning of aerospace material. Proceedings of Institution of MECHANICAL ENGINEERS part B, JOURNAL OF ENGINEERING MANUFACTURE, 225 (2011) 55-57.
- ・図8, 図9, 図10 Oguz Çolak: Investigation on Machining Performance of Inconel 718 under High Pressure Cooling Conditions, Journal of Mechanical Engineering 58(2012) 11, 683-690

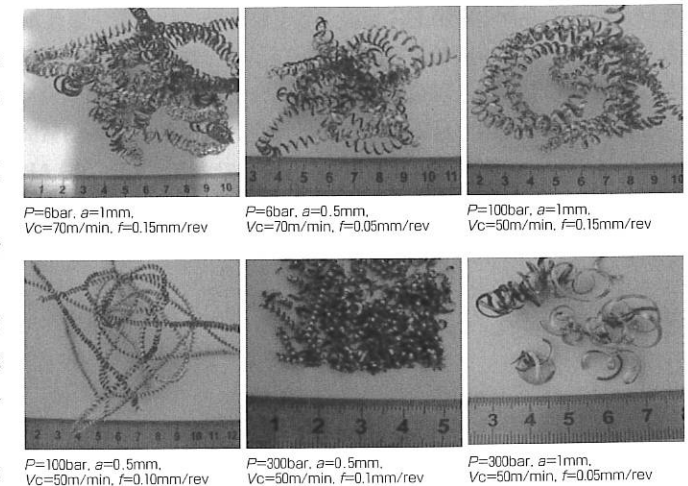


写真3 クーラント供給圧力と切りくず生成状態