解 説

UDC 669.245:669.295.5:669.255:621.91

難削材加工の現状と問題点

鳴瀧則彦*

Present-day Status and Problems in Machining of Difficult-to-Machine Materials.

Norihiro Narutaki

Synopsis

Difficult-to-machine materials were explained from the viewpoint of material properties and machining process. Factors and problems which should be considered in machining the above materials were discussed and, as examples, machining of titanium alloy, high manganese steel and super alloy were introduced with some countermeasures.

1. は じ め に

最近では日本でも航空機産業、原子力産業、宇宙開発関連の産業が活発化し、これにともなって各種超耐熱合金(Ni 基合金, Co 基合金など), Ti 合金, 非磁性材料(高 Mn 鋼など)の使用量が増大してきている。また一般の工業製品でも高品質の材料を用いて性能を向上させようという観点から、従来の材料より高級な素材たとえばステンレス鋼や各種高級鋳鉄、さらには新素材であるファインセラミックス、複合材料(FRP, FRM など)、高合金の軽金属(高 Si アルミニウム合金など)、各種アモルファス材料などが積極的に使用されはじめている。

上記の材料はほとんどが難削材料であるが、今のところ加工データも少なく、加工技術としても未確立のものが多く、難削材料はきびしい条件下

で使用される部品に用いられることが多いので、加工に対しても種々な要求が課せられるが、それらの要求を満足させながらなおかつ高能率に加工するための基礎技術を養っていくことが今後特に必要になると考えられる。

ここでは難削材加工の実例を紹介しながらその問題点を検討することとする。

2. 難削材の特性と加工上の問題点

一口に難削材といってもその種類は多種多様であり加工上も一律に扱うことは困難である。第1表は難削材料の特性と加工上の問題点を関連づけたものであるが、難削材は一般に第1表の特性をいくつか合せて持っているため、その組合せによって難削性の程度が異なり、加工時の対策も異ってくる。さらに材料の特性だけでなく、工具材料、工作機械、切削条件、切削油なども加工性に大きな影響を与える。

また切削加工には旋削、フライス削り、穴あけなど多くの種類があるが、これら加工方法によっ

昭和59年5月24日 受付

*広島大学工学部教授、工博

第1表 難削材料の特性と切削加工上の問題点との関連

〔材料特性〕	〔切削加工上の問題点〕
高 硬 度	工具寿命が短い
アブレシブ粒子含有	切削抵抗が大きい
加工硬化性：大	切削温度が高い
高 強 度	切削仕上面が悪い
熱 伝 導 率：小	切くず処理性が悪い
工具との反応性：大	
高靱性(展延性：大)	
工具との親和性：大	

第2表 加工方法による切削加工の難易

容 易	旋 削
	平削り、型削り
	穴あけ(浅穴)
	フライス削り
	ネジ切り
	中 ぐ り
	深 穴 加 工
	歯 切 り
	タップ立て
困 難	ブローチ加工

ても切削の難易が変化する。難削材ではこの加工方法の影響が特に大きく現れるようである。第2表は加工方法と切削加工の難易を関連づけて示した一例である。

3. 難削材加工に際して考慮すべき諸要因

3.1. 工具材料および工具形状

今世紀初頭以来、切削工具は着実に進歩してきたが特に1970年以後は工具の製造技術として超高压技術や真空技術がとり入れられたために、工具の第三次革命ともいべき数々の新素材工具が開発され実用化されてきた。その結果、従来は難削材であったものでも比較的容易に加工できる場合も出現し、これら新素材工具を有効に使うことが難削材の加工を進歩させる重要な鍵の一つとなっている。そのためには切削現象特に工具刃先部における物理的・化学的現象を十分に理解し、被削材に対して適切な工具および切削条件を組合せることが必要である。

第1図 切削工具のすくい面の応力分布

第2図 切削工具表面の温度分布

金属を切削したときの工具すくい面上の応力分布は一般に第1図のようになる。図において垂直応力 σ は工具の切刃に近い程大きくなっているが、普通炭素鋼を切削したときでさえその平均垂直応力が $150 \sim 500 \text{ kg} \cdot \text{f}/\text{mm}^2$ (1.5～5万気圧)に達しているのであるから、難削材を切削する工具切刃にはきわめて大きな応力が作用するものと考えられる。

また第2図は切削時の工具表面温度の分布を示したものである。切削温度は工具切刃部より接触域後半の方が高くなり、一般的には工具すくい面の方がにげ面よりも高温となる。最近の高速重切削の条件下では θ は平均値でも 1000°C 以上となることが多く、最高温度はこの平均値のさらに1.3倍程度になるといわれている。

ダイヤモンドやCBNを合成するときの条件

第3表 切削工具損傷とその原因

工具損傷	破 損	初期破損：切削条件，工具形状，切削系の剛性などの不適切
		突発的破損：工具の内部欠陥，切削状態の急変
	摩 耗	終期破損：工具摩耗，工具の表面および内部亀裂の進展，表面の劣化
		掘り起し：工具表面の微小な凹凸の機械的破損
	機械的摩耗	摩 減：工具粒子のすり減り
		チップング：微小な欠けの集積
	熱的摩耗	塑性変形：熱による工具の軟化と切削力
		組織変化：工具の焼き戻り，工具成分の変化
		化学反応：酸化，切削油との反応
		電気化学的反應：熱起電力，熱電流
		溶着・凝着：工具と被削材との親和性
		拡 散：高温高压下での固体反応，工具成分の熱分解
		熱 亀 裂：工具表面での急激な温度勾配による熱応力

第4表 切削工具材料に要求される諸特性

望ましい特性	工 具 性 能
高硬度(常温および高温)	耐摩耗性
じん性(抗折力)が高い	耐チップング性，耐破損性，耐塑性変形性
耐熱性が高い	耐熱衝撃性，耐熱亀裂性
熱伝導性が良好	耐酸化性，耐拡散性
化学的安定性	耐溶着・凝着性
低親和性	工具製造上の高生産性，再研削性
被研削性が良好	切れ味が良好，仕上げ面品位が高い，微小切削が可能
切れ刃が鋭利である	

が，約5万気圧・1200℃以上であるから，工具刃先部はこの合成条件に匹敵するほどの超高压と高温にさらされていることになる。この点に関しては条件を整えて切削すると，実際に工具すくい面上に微粒のダイヤモンドが合成されたという報告もなされているぐらいである²⁾。

このように工具刃先は非常にきびしい環境下におかれているために，第3表に示すような種々の原因によって損傷を受ける。普通は表中のいくつかの損傷が関与して工具が寿命に達するのであるが，どの損傷が主体となるかは切削条件，工具と被削材との組合せ，切削方法などによって異ってくる。特に最近では化学反応，溶着，拡散などの熱的摩耗が工具損傷に対して重要な役割を果すことが多いため，これらに対して十分な対策を講ずることが必要である。

切削工具も従来は耐摩耗性と靱性を重要視して開発されてきたが，さらに耐熱性，耐反応性あるいは被削材との親和性が低いことや熱伝導率が高いことなどが重要となってくる。切削工具に要求される諸特性をまとめると第4表のようになる。

以下に，被削材の加工特性にマッチした工具材料を組合せて加工能率を向上させた例を述べる。

(a) チタン合金(Ti-6Al-4V)

チタン合金は化学的な活性が高く，熱伝導率も炭素鋼の約 $\frac{1}{5}$ で特に低いため，高速で切削すると切削温度が高くなって工具寿命が極端に短くなる。従って通常は超硬工具K種を用い，切削速度20～50m/minで加工されている。切削抵抗はTi-

6Al-4V(H_B 292)の場合炭素鋼S 45Cの約 $\frac{1}{2}$ と小さく，この点では問題はない。しかし切削温度は切削速度50～200m/minの範囲内でS 45Cより約300℃も高くなり，約750～1100℃に達する。このためサーメット工具，コーテッド工具，超硬P種(いずれも工具成分としてTi化合物を含有する)，セラミック工具およびCBN工具では被削材と工具とが反応を起し，短時間で大きな工具摩耗が発生する³⁾。従ってチタン合金を高効率で切削するためには被削材に対して反応しにくい工具を選ぶことと切削温度を下げる必要がある。

第3図は2種類のダイヤモンド工具でチタン合金を切削したときの工具摩耗進行曲線である。図より，天然ダイヤモンド工具を用いると乾式切削では切削速度を100m/minに上げて30分間切削しても工具はほとんど摩耗しないことがわかる。

第3図 チタン合金 Ti-6Al-4V を切削したときのダイヤモンド工具の摩耗進行曲線
切込み：0.5mm，送り：0.1mm/rev
N.D.：天然ダイヤモンド工具
S.D.：焼結ダイヤモンド工具

これは天然ダイヤモンド工具の熱伝導率がきわめて高い（約 5.0 Cal/cm・s・°C）ことと、被削材と工具との親和性が低く工具切刃が鋭いことが原因であると考えられる。さらに、冷却性能の高い切削液（この場合はソルブルタイプのネオクール G 2 を 50 倍に希釈し、毎分 3 l の割合で工具すくい面側から供給した）を用いて湿式切削すると切削速度を 200m/min にまで高くしても順調に切削することができた。焼結ダイヤモンド工具は熱伝導性の点で劣るため、湿式切削しても切削速度は 100m/min までしか上げられず、超硬工具 K10 とほぼ同程度の性能であったが、摩耗進行速度は超硬工具よりやや遅いので長時間の切削では超硬工具よりは優れていると思われる。

また、第3図で天然ダイヤモンド工具を用いて切削速度 200m/min で湿式切削した場合、30分切削後も工具にけ面摩耗量は 0.02mm 程度できわめて少なかったが、工具とホルダー間のろう付部が高温となって溶融したため切削を続行することができなくなった。そこで工具ホルダーの熱伝導性を高めるため、第4図のような改善を行った。すなわち工具と工具ホルダーの間に大きな銅プレート挿入した所、同条件で30分間切削後も異常は認められなかった。このように天然ダイヤモンド

第4図 チタン合金切削用に改善した工具ホルダー

工具を用い、切削液や工具ホルダーを工夫すればチタン合金の加工能率を飛躍的に向上させることができる。

(b) 高マンガン鋼 (14Mn-2Cr 鋼)

高マンガン鋼の難削性の原因としては①強度が高い（引張強さ 80～90kgf/mm²），②加工硬化性が高い，③熱伝導性が悪い（SUS 304 と同程度）などである。この材料を切削加工する時の問題点は、切削抵抗が低速域できわめて高くなることと、切削温度が高いこと（切削速度 100m/min で約 1050°C，300m/min で約 1200°C となり、S 45C よりもそれぞれ 200～100°C 高くなっている）である。このため超硬工具で切削する場合には切削速度 60m/min 以下の低速域でなければ実用的な工具寿命が得られなかった。

第5図は 14Mn-2Cr 鋼を各種工具で旋削したときの工具寿命線図である。図のように、テストした工具中では耐熱性の高いセラミック工具が最もすぐれた性能を示し、工具寿命は切削速度 200m/min のときに 8 分、150m/min のときは 25 分となっている。これ位の切削速度になると、切削抵抗も S 45C とほぼ同程度となる。一方、セラミック以外の工具ではいずれも工具すくい面にクレータ摩耗が発達し、工具はこれによって寿命に達する。耐熱性の点では CBN 工具もセラミックと同じ位高いのであるが、この工具は Mn と反応を起すため鋼中の Mn 含有量が多くなると工具摩耗が激しくなる傾向がある。たとえば 25Mn-5Cr-1Ni 鋼の場合には 14Mn-2Cr 鋼に比べて工具寿命は約半分となる⁹⁾。ただし高 Mn 鋼でも高硬度

第5図 高マンガン鋼 14Mn-2Cr (HB 210) を旋削したときの各種工具の寿命線図
 工具寿命基準: $KT=50\mu m$
 (セラミック工具のみ $VB=0.3mm$)
 C1: 純アルミナ系セラミック工具
 C2, C3: TiC 添加セラミック工具
 工具形状 (-5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.8)

第6図 難削材加工用 S 形切刃工具

のものでは CBN 工具が最も高い性能を示す。

このように高 Mn 鋼は耐熱性の高い工具を用いて比較的高速で切削すれば良いことがわかったが、セラミック工具の中では靱性および熱伝導性のすぐれた TiC 添加セラミックが高性能を示した。

つぎに工具形状に関しては、工具すくい角や切刃角など一般的な工具角度の他に切刃チャンファの形状や大きさが切削加工に大きな影響を与える。従ってこれらを適正な状態に整えることは当然必要であるが、ここではさらに切刃形状について検討した例を述べる。

(C) 超耐熱合金 (Ni 基合金) の切削

Ni 基合金は熱伝導性が悪く、工具とも凝着しやすいことから切削加工は困難なものが多いが、中でもインコネルやワスバロイは特に難削性が高く、通常は超硬工具 K 種を用いて切削速度 30m/min 前後で切削されている。最近では CBN 工具、セラミック工具、 Si_3N_4 工具などの新材種工具が場合によっては高性能を示すとされているが、工具材質としては未だ最適のものが得られていないのが現状である。

Ni 基合金を切削する時の最大の難点は切削速度を高くすると写真 1 のように工具に大きな境界摩耗が生じることである。そこでこの境界摩耗を抑制できるような工具切刃形状について種々検討した。その結果、第 6 図に示すような S 形の切刃

写真 1 ワスバロイを切削したときのセラミック工具の摩耗形態
 切削速度: 90m/min, 切込み: 0.5mm,
 送り: 0.1mm/rev, 切削時間: 15 sec.

形状が好ましいことがわかった。切刃をこのような形状にすると丁度横切刃の境界摩耗部で横切刃角が非常に大きくなり、この部分での切くず厚さが減少して機械的原因による摩耗が生じにくくなるものと考えられる。通常の工具で横切刃角を大きくしても同様の効果が得られるが、その場合には切刃長さが大きくなりびびりが発生しやすいなどの欠点がある。

写真 2 は超硬工具 K10 に S 形切刃を施し、さらにすくい角を 15° にしてワスバロイを切削したときの工具摩耗形態を、普通形状の工具と比較したものである。普通形状 (SNP432) の工具では (a) のように 5 分間の切削で大きな横切刃部境界摩耗

(a) 通常工具 (-5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.8)
切削時間: 5 min

(b) S形切刃工具, すくい角: 15°
切削時間: 10min

写真2 ワスパロイを切削した超硬工具
K10の摩耗形態
切削速度: 45m/min, 切込み: 0.8mm,
送り: 0.1mm/rev.

が生じているが, S形切刃の工具では同条件で10分間切削しても境界摩耗は全く発生していない〔b〕。〔b〕で工具先端部の異常摩耗は工具研削時の不手際によるものである。〕

このように, 工具の損傷原因によっては切刃形状を工夫することが有効な解決策となる。穴あけ加工におけるホソイドドリルやニューポイントドリルなども切刃形状を工夫した一例である。

3.2 工 作 機 械

難削材がうまく加工できない原因の一つは工作機械が不適切なことである。特に高硬度材料や高強度材料の加工では切削力が非常に大きくなるがあるので, 従来の工作機械では寸法精度が悪くなったり振動が発生してしまう。第7図は超硬ロールをCBN工具および焼結ダイヤモンド工具(MD)で切削したときの切削抵抗を測定した結果である。図のように高硬度材料の切削では特に背分力が高くなるので, 普通の旋盤などでは工具

第7図 超硬ロール(WC-15% Co, Hv=1000)を旋削したときの切削抵抗
切削速度: 10m/min, 切込み: 0.3mm, 送り: 0.05mm/rev

第8図 高マンガン鋼(14Mn-2Cr-2Ni)をドリル加工したときのトルクおよびスラスト
工具: $\phi 10$ ハイスドリル, 送り: 0.05mm/rev, ドリル周速: 6.6m/min, 穴深さ: 20mm

台が押し戻されて寸法精度が悪くなる。

また第8図は高マンガン鋼をドリル加工した場合のトルクおよびスラストを示したものである。ハイスドリルではドリルの周速をあまり高くできないので, 図のようにトルク, スラストともS45Cの3~4倍の値となっている。この場合にはドリルの剛性を高くすることももちろん必要であるが, 工作機械の方も剛性および出力を高くしなけ

ればならない。

従ってそれぞれの難削材を加工するに最適の特性を持つ(たとえば高剛性, 高出力, 高精度など)工作機械を開発して適用することが理想的である。現状の工作機械を用いる場合には少なくとも必要箇所に適正な補強や改善を施すことが不可欠であるといえる。

3.3 切 削 液

難削材加工用の切削液はすでに何種類か開発されているが、今後はさらにすぐれた切削液の必要性が高くなるものと考えられる。これも材料に応じて冷却性能, 化学的安定性, 潤滑性能などの重要性が異なるので切削現象に適合した特性のものを選択することが必要である。また液体のみに限らず固体潤滑剤や気体(雰囲気)なども含めて幅広く検討する必要がある。たとえば正面フライスなどの断続切削では工具すくい面に多数の亀裂が発生し, 工具が欠損や破損を起こすことがあるが, 無酸素雰囲気中で加工するとこの亀裂がほとんど発生せずまた工具表面への付着物も非常に少なかった例がある⁶⁾。

3.4 加工仕上面の品位

航空機やロケットなどの部品では, 精度はもちろんのこと強度, 耐食性, 耐摩耗性などがきびしく要求される。従って単に形状寸法だけが正しくても部品としては役に立たない場合があり, 加工変質層や残留応力が大きな問題となる。また軽量化も要求されるので薄肉の部品が多くなり, 表面品位の重要性はさらに高くなる。従って仕上加工では表面品位が高くなるような加工方法や条件を適用することが必要であるが, この点についてはまだほとんど解明されておらず今後の研究が必要である。

3.5 材料の組織・熱処理条件と被削性の関連

難削材料は高価なものが多いので, これまでに

行われたいくつかの研究では与えられた素材をそのままでテストしたものが多い。しかし材料は最も加工しやすい状態で加工するのが望ましいわけであるから, 組織や熱処理条件などによる材料特性の変化と被削性との関係を系統的に解明することが必要である。また大量に使用される材料については, その特性を犠牲にしない範囲で快削化を考えることも望まれる。これからについては大規模な総合的研究が必要であろう。

以上, 難削材加工の現状と問題点について述べてきたが, まだまだ今後解決しなければならない問題が数多く残されている。上記の項目以外にもたとえば加熱切削といった特殊な加工の適用も有効であろうし, 加工中の異常検出システムの開発なども必要と思われる。本稿が今後の難削材加工の研究の一助となれば幸である。

(文 献)

- 1) C.T.Sims, W.C.Hagel; "The Superalloys" 535
- 2) R.Komanduri, M.C.Shaw; "New Method of Nucleating Diamonds", Nature, 248 (1974), 582
- 3) N.Narutaki, A.Murakoshi; "Study on Machining of Titanium Alloys" Annals of the CIRP, 32-1 (1983), 65
- 4) 鳴瀧則彦, 村越昭男; 「焼結鋼の被削性」精密機械, 47 (1981) 12, 1516
- 5) 鳴瀧則彦, 村越昭男他; 「高マンガン鋼の被削性」昭和56年度精密機学会秋季大会講演論文集, 801
- 6) 山根八洲男, 鳴瀧則彦; 「正面フライス切削時の工具損傷に及ぼす雰囲気の影響」精密機械, 49 (1983) 4, 521