

低周波振動切削によるチタン合金のドライ加工の可能性について

中央大学 ○佐藤彰真, 藤田晴渡, 高橋幸男, 宋 小奇, ◎井原 透

要旨

近年, チタン合金のドライ加工の需要が高まっている. しかしながら, 熱伝導率が低いことから切削温度が上昇しやすく, 工具摩耗が進展してしまうことが問題になっている. そこで本報告では, 切りくずを断続的に排出することで切削温度の上昇を抑制する特徴を持つ低周波振動切削(LFV)を用いれば, 工具摩耗の進展を抑制できることを示す.

1. 緒言

チタン合金は比強度, 高温強度に優れているため, 自動車産業や航空宇宙分野など幅広い分野で活用されている. また, 近年, 切削油剤を使わないドライ加工への需要が高まっている. 切削油剤を使用しないことで, 環境問題やコスト削減, 作業負担軽減が期待できる. 一方で, チタン合金は熱伝導率が低いことから切削温度が上昇しやすく, 切削油剤を用いたとしても冷却効果は得られず摩耗が進展しやすい難削材として扱われている¹⁾. そのため熱を効率的に排出する切削方法が求められている.

そこで, 本研究では低周波振動切削技術に注目する. 同加工方法は, 切りくずを断続的に分断させ排出することで切削温度の上昇を抑制できる特徴がある²⁾. しかしながら, 低周波振動切削を用いたチタン合金のドライ切削において, 実験結果とともに工具振動に伴う工具摩耗の進展速度についての検討や報告はあまり見受けられない. 本報告では, 振動条件が工具摩耗の進展にどのように影響するのか検討する. さらに, 工具摩耗が抑制できる振動条件についても提示し, ドライ加工の可能性について報告する.

2. 切削条件が振動回数と切削時間に及ぼす影響

低周波振動切削は, サーボ軸を送り方向に振動させ, 主軸回転と同期しながら切削する加工方法である. 図1に低周波振動切削による工具軌跡を模式的に示す^{2), 3)}.

低周波振動切削は切削条件を決定する特有のパラメータ Q と D がある. Q は送り量 f に対する振動振幅の比であり, D は主軸1回転あたりの振動回数を示している. ワーク直径 $Dm16$ の時を例として, Q と D 値の違いによって時間経過に伴う切削厚さの変化を図2に示す. 被削材直径が同一の状態, Q と D を変えると最大切削時間と振動回数, 工具進入開始から最大切削厚さに到達するまでの時間は変化する. これらの変化は, 工具面に及ぼされる切削温度と応力に変化が生じることとなり, 逃げ面摩耗の進展に影響を及ぼすものと考えられる.

3. 逃げ面摩耗予測法の説明

振動条件によって逃げ面摩耗にどのように影響を及ぼすのか示すため, 切削抵抗値から工具軌跡に伴う温度と応力の変化を算出し, 白井の工具摩耗特性式⁴⁾

$$\frac{dw}{dL} = C\sigma \exp\left(\frac{-\lambda}{T}\right) \quad (1)$$

から, 次式にて逃げ面摩耗進展速度を算出する.

$$\frac{dV_B}{dt} = C\sigma_f \exp\left(\frac{-\lambda}{T_f}\right) \left(\frac{1}{\tan\gamma} - \tan\alpha\right) V \quad (2)$$

ここで, dV_B/dt は単位時間あたりの逃げ面摩耗幅, C と λ はそれぞれ応力依存係数と温度依存係数, α と γ はそれぞれすくい角と逃げ角, V は切削速度である. また, σ_f と T_f は逃げ面摩耗痕における垂直応力と平均温度である. なお, 文献より C は切削厚さにより可変し, $\lambda = 18769.9$ とした⁵⁾. また, 逃げ面における垂直応力 σ_f はWaldorfモデルからすくい面の垂直応力 σ_t とほぼ等しいとされていることから $\sigma_f = \sigma_t$ と近似する⁶⁾. 逃げ面における温度は第一塑性域における温度 T_{ps2} とほぼ等しいとされていることから $T_f = T_{ps2}$ とした⁷⁾.

4. 被削材及び実験方法

切削実験は, 低周波振動切削機(シチズンマシナリー(株)製, VC03)を用いて慣用切削(以下「CC」と表記)モード及び低周波振動切削(以下「LFV」と表記)モードにて外周切削をした. 被削材は直径約30mmのTi-6Al-4Vの丸棒である. 切削動力計(Kistler製, 9119AA2)を用いて切削抵抗を測定し, 共焦点レーザー顕微鏡(OLYMPUS製, OLS-4100)を用いて工具逃げ面の摩耗幅を測定した. また, サーモグラフィ (FLIR製, E40) を用いて切削中の加工点近傍を計測した.

表1に切削条件を示す. D 値はワークの直径によって変動するため一振動あたりの切削長(CL)を調整することで, D を変えさせる.

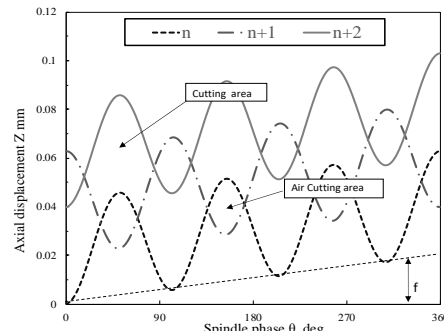


Fig.1 Schematic of Low Frequency Vibration cutting (LFV)

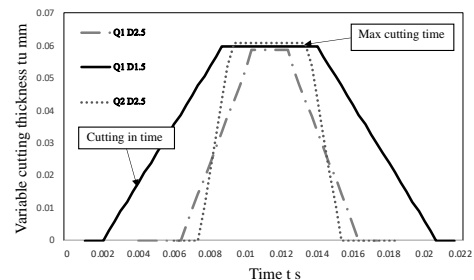


Fig.2 Change Cutting due to the difference Q and D

Table1 Cutting conditions

	LFV	CC
Cutting tool	DCGT11T302R-F K10	
Cutting speed V (m/min)	100	
Feed rate f (mm/rev)	0.03	
Depth of cut a_p (mm)	1	
Amplitude per feed rate Q	1.0,2.0	-
Vibration times per revolution D	2.5~4.5, 1.5~2.5	-
Cutting length L (m)	1200	
Lubrication	Dry	

5. 実験結果及び考察

5.1 平均切削温度

図3に各条件における切削平均温度の測定結果を示す. LFVの平均切削温度は, CCと比べて30%ほどに抑えられていることから, 熱が効率的に排出することができ, 切削温度を低下させる効果が認められる.

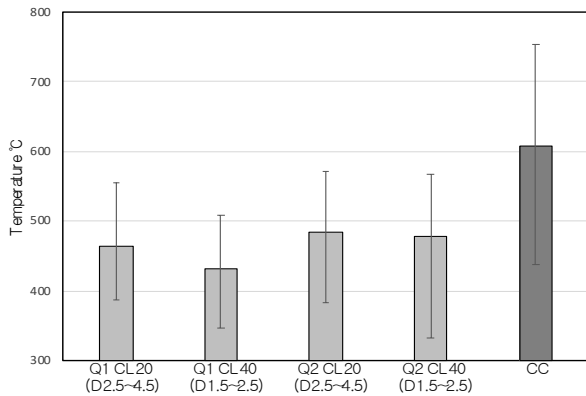


Fig.3 Cutting Temperature

5.2 逃げ面摩耗幅

図4に工具逃げ面の摩耗幅の結果を示す。全体的な傾向としては、Q1がもっとも摩耗幅が小さいのがわかる。Q2はCCよりも摩耗が進んでいた。また、CL20(D2.5~4.5)とCL40(D1.5~2.5)を比較するとDの値が平均的に小さいCL40の方が摩耗抑制されている。

5.3 工具軌跡に伴う逃げ面摩耗進展速度

表2に逃げ面摩耗幅の計算値と実測値を比較した結果を示すが、計算値と実測値は概ね一致するのがわかる。

図5に時間に伴う逃げ面垂直応力と平均逃げ面温度の計算結果を示す。同図で得られた計算値を用いて、工具軌跡に伴う逃げ面摩耗幅の進展速度を図6に示す。これらのグラフを比較すると、工具進入から最大切削厚さに至るまでの垂直応力の変化が緩やかなとき、切削温度の上昇も穏やかになっているのがわかる。このときの摩耗進展速度の変化は遅くなっており、その摩耗幅も小さくなっていることがわかる。また、最大切削厚さ0.06mmに相当する期間における摩耗進展速度がもっとも速いことがわかる。

表3に切削厚さが最大である時間と主成分の変化速度の違いによる摩耗幅の違いを示す。Q1かつCL40(D1.5~2.5)のときが最も摩耗が抑制されていたことから、切削厚さが最大である時間が短いことと、主成分の変化速度が緩やかである条件がどちらも満たされる条件が良いことがわかった。

6. 結言

本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1) チタン合金のドライ加工において、LFVを用いることで平均切削温度を30%程度抑制することができる。
- (2) 切削速度100m/minにおける摩耗が最も抑制された振動条件はQ1CL40(D1.5~2.5)であった。
- (3) LFV切削において、切削厚さが最大である時間を短くすること、主成分の変化速度を緩やかにすることで、チタン合金のドライ加工において工具寿命をさらに長くすることにつながる可能性が示された。

※「LFV」はシチズン時計株式会社の登録商標です。

参考文献

- 1) 竹山彦彦, 飯島昇, 耐熱合金の何難削特性と工具材の適応性に関する研究, 精密機械学会誌 1989年 55巻 8号., 2) 三宅ら, 旋削加工における送り方向への低周波振動の効果, 2015年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文, (2015) 421., 3) 高橋ら: 低周波振動切削における構成刃先及び工具摩耗への影響, 2020年度精密工学会春季大会, (2020)770., 4) T. Matsumura1, T. Shirakashi2, E. Usui1, Identification of Wear Characteristics in Tool Wear Model of Cutting Process (2008)555-558., 5) F.Zanger,V.schulze, Investigations on Mechanisms of Tool Wear in Machining of Ti-6Al-4V using FEM simulation (2013)158-163., 6) Daniel J W Shiv Gkapoor,Richard E DeVor, Worn Tool Forces Based on Ploughing Stresses(1999),7) Ozel et al., A Methodology to Determine Work Material Flow Stress and Tool-Chip Interfacial Friction of Machining, Journal of Manufacturing Science and Engineering Copyright, Vol.128, 2006.

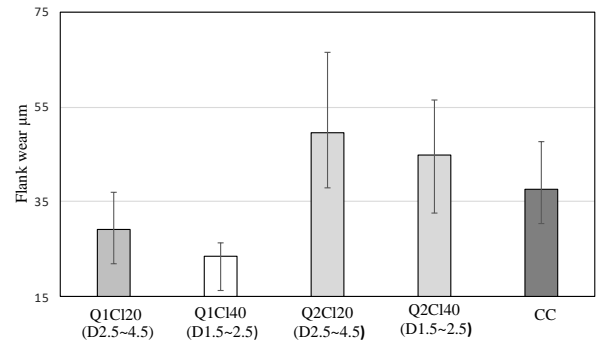


Fig.4 Flank Wear

Table.2 Comparison of Calculated and Measured values

	Q1CL20 (D2.5~4.5)	Q1CL40 (D1.5~2.5)	Q2CL20 (D2.5~4.5)	Q2CL40 (D1.5~2.5)
Cutting length 1200m	D2.5~4.5	D1.5~2.5	D2.5~4.5	D1.5~2.5
Flank wear (Measured values) (μm)	29.29	23.47	49.51	44.93
Flank wear (Calculated values)(μm)	23.92	19.60	67.711	47.46

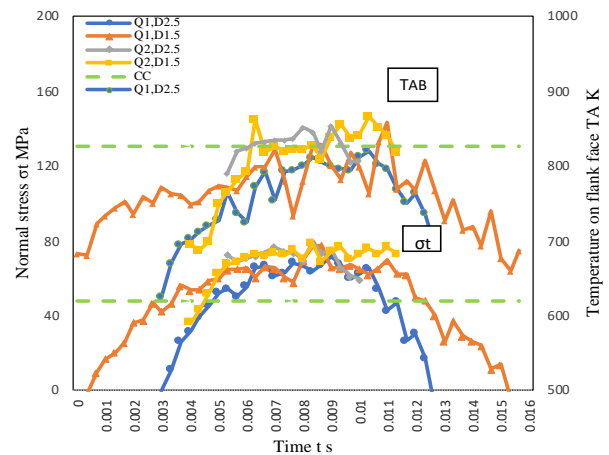


Fig.5 Calculated values of stress and Temperature in time

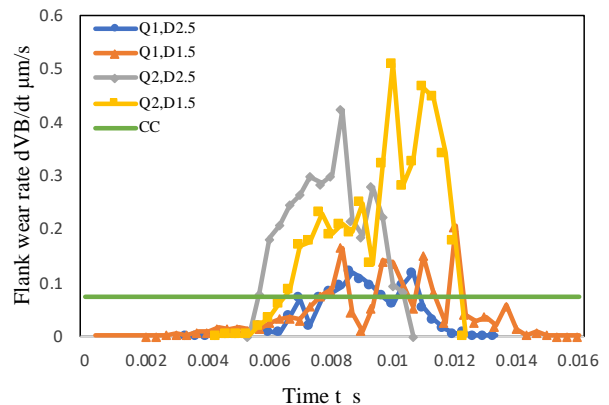


Fig.6 Calculated value of Flank wear width

Table.3 Comparison of Maximum cut time and principal force change speed

	Q1CL20 (D2.5~4.5)	Q1CL40 (D1.5~2.5)	Q2CL20 (D2.5~4.5)	Q2CL40 (D1.5~2.5)
Cutting length 1200m	D2.5~4.5	D1.5~2.5	D2.5~4.5	D1.5~2.5
Max cutting time(s)	118.93	154.62	248.89	256.27
Principal force change speed(kN/s)	18.56	10.51	47.09	19.74
Flank wear(μm)	29.290	23.468	49.508	44.935