論 説

快削純チタンと快削チタン合金の被削性

中村貞行*

Machinability of Free-Machining Pure Titaniums and Free-Machining Titanium Alloys

Sadayuki Nakamura

Synopsis

Free-machining pure titaniums and free-machining titanium alloys which contain both sulfur and rare earth metals were developed, and the machinability and the mechanism of machinability improvement were studied. The addition of sulfur and rare earth metals produces sulfide inclusions and accelerates the concentrated slip in chip formation which reduces cutting forces and tool wear rates, and improves chip breakability.

1. 緒 言

純チタンとチタン合金は優れた耐食性と高い比強度を有しており、発電や化学プラント、航空機、ロケットなど従来の用途以外に、自動車やOA機器、レジャー用品などの部品にも適用されるようになってきた。この新しい用途は従来に比べて生産ロットが大きく、大量生産工程で製造される部品が多い。純チタンやチタン合金は通常の鋼に比べて切削加工が困難であり、これらの材料の被削性改善は、大量生産工程で製造するための重要な鍵の一つになっている。

このような背景から、純チタンとチタン合金の被削性改善を試み、硫黄(S)と希土類金属(REM)の複合添加が有効であることを報告した¹⁾。Sだけを添加すると粒界に板状の硫化物が生成し、機械的性質や熱間加工性が低下するが、これに

REMを添加すると硫化物が球状になり、被削性と機械的性質が改善される。S含有量を増加させると切削抵抗が減少し、ドリル加工と超硬旋削加工における能率が向上する。また、SとREMを複合添加した快削純チタンと快削チタン合金は純チタンやチタン合金とほぼ同等の機械的性質や耐食性を有することが明らかになった。

引き続き、快削純チタンと快削チタン合金の被削性に関して、切削抵抗や切削温度など切削機構に関する実験を行ったので報告する。

2. 試 験 材 料

純チタン2種および純チタン4種と3Al-2V合金および6Al-4V合金に0.16~0.22%のSと0.46~0.88%のREMを添加した快削純チタンと快削チタン合金、合計4種類を製造した。比較のために各々のベース材も試験に供した。これらの材料の化学成分をTable 1に示す。本論説の中では、純チタン2種と4種をそれぞれT2、T4と呼び、3Al-2V合金と6Al-4V合金を3-2、6-4と呼ぶことにする。また、快削材料は材種名の末尾

1989年4月18日 受付

*大同特殊鋼㈱研究開発本部

Table 1. Chemical compositions and hardness of tested materials.

Grade	Chemical compositions (wt%)									Hardness (HB)
	Al	V	C	Fe	O	N	S	REM	Ti	
T2-F	—	—	0.010	0.03	0.12	0.012	0.20	0.56	bal.	152
T2	—	—	0.014	0.05	0.12	0.012	—	—	bal.	154
T4-F	—	—	0.016	0.09	0.31	0.017	0.22	0.86	bal.	235
T4	—	—	0.011	0.09	0.32	0.007	—	—	bal.	233
3-2-F	3.24	2.07	0.017	0.14	0.15	0.008	0.22	0.88	bal.	266
3-2	3.32	2.13	0.013	0.14	0.16	0.018	—	—	bal.	255
6-4-F	5.96	3.92	0.008	0.19	0.12	0.004	0.16	0.46	bal.	330
6-4	6.01	4.05	0.010	0.14	0.16	0.011	—	—	bal.	338

Photo.1. Sulfide inclusions of T2-F.

にFを付けて区別している。快削材料の製造において、REMの原料として、Ce含有量47%、La含有量27%、その他の希土類金属総含有量26%の合金であるミッシュメタルを用いたので、同表のREM含有量はこれらの元素の総量で示してある。

Table 1の成分が得られるようにあらかじめ調合した原料を用いて、溶解量100kgのプラズマ積層凝固炉にて一次溶解を行った。そのインゴットを消耗電極として、真空アーク炉により二次溶解を行った。このようにして製造した直径240mm

のインゴットを、約1100℃に加熱し、直径60mmの丸棒に鍛造した。その後、705℃で焼なまし処理を行った。焼なまし処理後の硬さをTable 1の右端に示した。純チタン2種が最も軟らかく、6Al-4V合金が最も硬い。純チタン4種と3Al-2V合金は近い値を示している。

Photo. 1に快削純チタンT2-Fの介在物の例を示す。これらの介在物はREMの硫化物であることをEPMAで確認している。硫化物の大きさは5μ以下であり、通常の硫黄快削鋼の硫化物に比べると微細である。

Table 2. Cutting conditions in machinability tests.

Item	Drilling	Turning
Tool	Co-HSS (SKH56eq.) φ5mm	K10,(5,5,6,6,30,0,0.4) [tool life, chip br.] K10,(0,5,6,6,6,0,0) [force, temp.]
Feed (mm/rev)	0.07	0.15, var.[chip br.]
Depth of cut (mm)	15 (blind)	1.0, var.[chip br.]
Speed (m/min)	8~49	45~200, 60[chip br.]
Cutting fluid	non [pure Ti] water soluble oil [alloy]	non
Tool life criterion	Tool failure	Crater wear=0.05mm

3. 切削試験方法

材種間の被削性の違いを把握するために、高速度工具鋼ドリルによる穴加工と超硬工具による旋削加工における工具寿命および旋削加工における切りくず破砕性の評価を行った。また、REM 硫化物の被削性改善の機構を明らかにするために、超硬工具による旋削加工における切削力と切削温度の測定を行った。

これらの試験における切削条件を Table 2 に示す。ドリル寿命試験では、含コバルト高速度工具鋼製のストレートシャンクドリルを用いて加工を行い、工具が溶損または折損により切削不能となるまでに加工した穴深さの総計を求めた。旋削加工においては、チタン系の材料で最も一般的に使用されている超硬合金 K10 種のスローアウェイ工具を用いた。工具寿命はクレータ摩耗の深さが 0.05mm になる時間とした。切りくず破砕性の評価試験では、チップブレーカの無い工具を使用して数秒間切削加工を行い、得られた切りくずを破砕切りくずと連続切りくずに分類した²⁾。切削力は切削動力系を用いて測定し、切削温度は切りくず一工具熱電対法を用いて測定した。

4. 試験結果

ドリル加工における切削速度と工具寿命の関係を Fig. 1 と Fig. 2 に示す。Fig. 1 の純チタン系材料については、切削油剤を用いずに乾式切削で試

Fig. 1. Tool life curves of pure titaniums and free-machining pure titaniums in drilling.

Fig. 2. Tool life curves of titanium alloys and free-machining titanium alloys in drilling.

Fig. 3. Tool life curves in turning.

験を行ったが、Fig. 2 のチタン合金系材料については工具寿命が著しく短くなるので水溶性の切削油剤を使用した。各々の図において、T2 や 3-2 のように軟らかい材料の方が硬い材料より、当然ながら、工具寿命が長いという傾向がある。快削材料とベース材料を比較すると、快削材料の方が同じ切削速度でも工具寿命が長く、同じ工具寿命ではより高速で加工できることを示している。この傾向は純チタン系でもチタン合金系でも同様である。1000mm 工具寿命速度、すなわち工具寿命が1000mm になる切削速度を計算すると、純チタン系の場合、快削材料はベース材の約1.7倍であり、チタン合金系の場合は約1.5倍に高くなっている。

超硬工具による旋削加工における切削速度と工具寿命の関係を Fig. 3 に示す。この図においても、ドリル加工の場合と同様に、軟らかい材料の方が工具寿命が長いという傾向が認められる。20min の工具寿命に対応する切削速度で比較した場合、快削材料はベース材料に比べて1.2~1.5倍に改善されることを示している。

送りと切り込みを変化させて切削した場合の切りくずについて、破碎切りくずと連続切りくずの範囲の境界線を Fig. 4 に示す。同図において、実線あるいは破線の右上方が破碎切りくずの範囲であり、左下方が連続切りくずの範囲である。4種類のベース材料のうち、6-4 が最も優れた切りくず破碎性を有している。これは6-4 が鋸歯状の切りくずを生成しやすい^{3,4)}ということと関係している。快削材料はベース材料に比べて破碎切りくずの得られる範囲が広く、切りくず破碎性に優れ

Fig. 4. Comparison of chip breakability of various types of titaniums and titanium alloys.

Fig. 5. Cutting forces at various cutting speeds and 20min tool life speeds $V_{T=20}$.

ているが、その改善の程度は、ベース材料の切りくず破碎性が劣る T2 や 3-2 で顕著である。

超硬工具による旋削加工時に測定した切削力のうち、主分力 (Tangential force) と切削速度の関係を Fig. 5 に示す。この図は両対数グラフであるが、どの材料も切削速度の上昇に伴い切削力がほぼ直線的に低下している。ベース材料間の比較をすると、T2 の切削力が最も小さく、T4 が最も高い。硬さの高い 6-4 は T4 より切削力が低く、切削力は被削材の硬さと必ずしも対応していない。快削材料とベース材料の切削力を比較すると、快削材料の方が 7~10% 低くなっている。

切削力の測定の場合と同じ条件下で測定した切削温度と切削速度の関係を Fig. 6 に示す。切削温

Fig. 6. Cutting temperature at various cutting speeds and 20min tool life speeds $V_{T=20}$.

度は切削速度の上昇に伴い両対数グラフ上ではほぼ直線的に高くなる。ベース材料のなかではT2の切削温度が最も低く、6-4が最も高い。これは被削材の硬さとはほぼ対応している。快削材料はベース材に比べて切削温度が低く、その低下率は5～10%の範囲である。

5. 考 察

以下の考察においては、旋削加工における被削性を表す値として、20分工具寿命速度を用いることにする。これは工具寿命が20minになる切削速度であり、加工能率という観点から被削性を表現している。

Fig. 3のデータから各々の材料の20分工具寿命速度を計算して、Fig. 5の切削速度-切削力の関係を示す直線上にプロットした。8種類の試験材料について20分工具寿命速度の点をつなぐと図中の破線のようになり、純チタンとチタン合金の2種類に別れ、各々は直線になる。快削材料とベース材料は同じ直線上にある。このことは、純チタンあるいはチタン合金のなかでは、合金元素の工具寿命速度に及ぼす影響は切削力と関係しており、快削元素(SとREM)の影響も切削力の低下と対応していることを示している。しかし、純チタンとチタン合金の工具寿命速度の違いは切削力では説明できず、これ以外の要因のあることを示唆している。

Fig. 6の切削速度-切削温度の関係図にも、同様に、20分工具寿命速度をプロットした。この場

Fig. 7. Ratios of cutting temperature and tangential force at various cutting speeds.

合には、全ての材料のデータが同じ直線上に乗っている。しかも、20分工具寿命速度に対応する切削温度は700～760℃の範囲に入っている。一般に、切削工具の摩耗速度は切削温度のべき関数で表されることが知られている⁵⁾。Fig. 6において、種々の材料の20分工具寿命速度と切削温度がほぼ一定になっていることは、チタン系材料においてもこの関係が成り立つことを示している。

同図において、快削材料とベース材料の20分工具寿命速度のデータが同じ直線上にあることから、SとREMの複合添加による工具寿命速度の上昇は、切削温度の低下によっていることを示している。Fig. 5とFig. 6の両方を考慮すると、快削元素の添加により切削抵抗が低下し、その結果、切削温度が低下して工具摩耗速度が低下するという機構が考えられる。

Fig. 5において純チタンとチタン合金の2本に分かれていた関係が、Fig. 6では一本の直線になっていることから、純チタンとチタン合金は切削力が同じであっても切削温度が異なることがわかる。

切削温度 θ は、次元解析と実験データの解析の結果、次の式で表されることが知られている⁵⁾。

$$\theta/F = C_0 V^{2n} A^{n-1} / (K^{2n} h^{1-2n}) \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 F は主分力、 C_0 は定数、 V は切削速度、 A は切削面積(切り込み×送り)、 K は熱伝導率、 h は体積比熱(比重×比熱)、 n は指数である。Fig. 5とFig. 6に示した切削温度と切削力の比を求め、この比と切削速度の関係をFig. 7に示した。同図において、両対数グラフ上で直線関係にある

Table 3. Calculation of $K^{2n} h^{1-2n}$ in equation (1).

Grade	K cal/cm/s/K	h cal/cm ³ /K	$1/(K^{2n} h^{1-2n})$	[ratio to T2]
T2	0.041	0.56	3.71	[1.0]
T4	0.042	0.58	3.60	[0.97]
3-2	0.025	0.58	4.16	[1.12]
6-4	0.017	0.58	4.63	[1.25]

ことは、本実験においても式(1)の成立することを示している。切削温度/切削力の比と切削温度の関係を示す直線が、純チタンとチタン合金で異なっていることの理由として、式(1)は熱伝導率と体積比熱の違いが影響していることを示唆している。切削加工による塑性変形領域の温度は位置により大きく異なるので、式(1)の熱伝導率や比熱の値として、どの温度の値を用いるべきかは明らかでないが、ここでは室温の値を用いて計算した。その結果を Table 3 に示す。指数の $2n$ の値は Fig. 7 の直線の傾きから求めた平均値 0.28 を用いた。式(1)の右辺の分子は定数と切削条件で決まるので、分母の計算を行った。T2 との比率も同表に示したが、これらの値は Fig. 7 の材種間の比にほぼ等しくなっており、純チタンとチタン合金の切削温度は材料の熱的性質の違いに起因していると考えられる。一方、S と REM を添加しても熱的性質はほとんど変化しないことを確認しているので、これらの快削元素の添加による被削性の改善は式(1)の切削力 F の減少に起因すると考えられる。

鋼に S や Pb などの快削元素を添加すると切削力が低下するが、その場合には、主分力と送り分力から計算される工具すくい面上の摩擦係数も低下することが知られている⁹⁾。ただし、S の場合には潤滑作用は無く、脆化作用が主たる機構であるという報告もある⁷⁾。本実験で得られたデータから、単一せん断面理論を用い、工具すくい面上の垂直力と摩擦力を計算して、両者の関係をプロットすると Fig. 8 のようになる。この図において、原点方向に引いた直線は摩擦係数一定でせん断応力が減少する場合の垂直力と摩擦力の変化を示している。一方、斜め左下方向の矢印はせん断応力一定で摩擦係数が減少する場合の変化である。快

Fig. 8. Relationship between normal force and friction force on tool rake face in turning.

削鋼の場合には、後者の方向に変化することが多い⁹⁾。純チタンやチタン合金に S と REM を添加しても、摩擦係数はほとんど変化せず、せん断応力の減少する方向に変化していることがわかる。

Photo. 2 に快削純チタンと純チタンの切りくずの断面を示す。どちらも鋸歯状の切りくずになっているが、快削純チタンの方がその程度が強く、切りくず生成の平均塑性変形量の少ないことを意味している⁹⁾。したがって、S と REM の添加により生成した介在物は、鋸歯状切りくずの集中すべり面の変形を容易にすることによって、切削抵抗を減少するという機構が考えられる。チタン合金の場合にも同様の傾向が認められる。また、快削材料が鋸歯状切りくず生成傾向の強いことは、前述の切りくず破碎性の優れていることの原因であると考えられる。

Photo. 2. Cross-section of typical chips.

6. 結 論

純チタン2種および4種と、3Al-2V合金および6Al-4V合金にSとREMを添加した快削純チタンと快削チタン合金に関して、その被削性の評価と、被削性改善の機構に関する検討を行い、次のことが明らかになった。

(1) 純チタンとチタン合金にSとREMを添加することにより、ドリル加工および超硬工具による旋削加工において工具寿命が改善される。

(2) 純チタンとチタン合金の工具寿命あるいは工具寿命速度は切削力と必ずしも対応しておらず、切削温度と対応している。純チタンとチタン合金の被削性の差は、その熱伝導率や体積比熱など熱的性質の差に起因している。

(3) SとREM添加により生成した硫化物は鋸歯状の切りくずの生成傾向を高める作用があり、このために快削材料はベース材料に比べて切削力が小さく、その結果、切削温度が低下し、工具寿命が改善されるという機構が考えられる。

(4) 快削純チタンと快削チタン合金はともにベース材より切りくずの破碎性に優れている。これ

も鋸歯状切りくずの発達に起因するものと考えられる。

(文 献)

- 1) 中村貞行：電気製鋼, 59 (1988) 2, 79
- 2) S. Nakamura, J. D. Christopher and G. J. Wuebbeling: Tech. Paper of SME, MR82-235 (1982)
- 3) R. Komanduri and B. F. von Turkovich: Wear, 69 (1981), 179
- 4) E. Usui, T. Obikawa and T. Shirakashi: Proc. 5th Int. Conf. Prod. Eng., Tokyo, JSPE, (1984), 233
- 5) M. Kronenberg: "Machining Science and Application", Pergamon Press, (1966)
- 6) 山口勝美：電気製鋼, 49 (1978) 3, 139
- 7) 臼井英治：機械試験所報告第43号, (1961)
- 8) 阿部山尚三, 木村篤良, 中村貞行：電気製鋼, 55 (1984) 3, 177
- 9) 上田 昇, 松尾哲夫：精密機械, 44 (1978) 9, 1085