研 究

インコネル718 切削における超硬合金の工具摩耗

和田 任弘, 廣 和樹

奈良工業高等専門学校機械工学科, 〒639-1080 大和郡山市矢田町 22.

Tool Wear of Cemented Carbide in Cutting of Inconel 718

Tadahiro Wada and Kazuki Hiro

Department of Mechanical Engineering, Nara National College of Technology, 22 Yata-cho, Yamatokoriyama 639-1080.

Received November 12, 2004

SYNOPSIS

The tool life in turning of Inconel 718 becomes shorter than that in turning of carbon steel. In order to clarify an effective tool material for the cutting of Inconel 718, the tool wear and the surface roughness were experimentally investigated. The Inconel 718 was turned with WC-Co cemented carbide tool and WC-Ni cemented carbide tool. The main results obtained are as follows: (1) In the WC-Co cemented carbide tools, the wear progress of WC-7%Co cemented carbide tool was slowest. (2) The wear progress of WC-7%Ni cemented carbide tool was slower than that of WC-7%Co cemented carbide tool. (3) In the WC-Ni cemented carbide tools, the wear progress of WC-7%Ni cemented carbide tool was slowest.

KEY WORDS

turning, machinability, tool wear, Inconel 718, WC-Ni cemented carbide tool

1 緒 言

超硬合金はWC粒子をCo, Ni, Feなどの鉄族金属で焼結結合した合金であり¹⁾, 切削工具材に超硬合金を使用する場合, WC-Co超硬合金が多く使用され, WC-Ni超硬合金は非強磁性が要求される被削材の切削以外にはほとんど使用されない。これは, WC-Ni超硬合金は靱性が高いが, 軟質であるためである²⁾。しかし, 同一WC粒度で比較すると, WC-Ni超硬合金はWC-Co超硬合金に比べ硬さは低いが, 靱性は高い³⁾と言う報告もある。

さて, ガスタービンや航空機エンジンの部品に使用されている超耐熱合金インコネル718は難削材として知られている⁴⁾。この原因として, インコネル718の熱伝導率が低いなどが考えられている⁵⁾。インコネル718の現状の高効率な切削条件は, cBN焼結体, Al₂O₃-TiCセラミックスで切削速度3 m/s, 送り0.15 mm/rev, 切込み1~2 mmである⁶⁾。しかし, インコネル718をドリルやエンドミルで切削する場合, cBN焼結体, Al₂O₃-TiCセラミックスに比べ, 高靱性の超硬合金が適した工具材と考えられる。従来から, 熱伝導性の悪い被削材を切削する場合, 切削速度を低くして, かつ熱伝導性の良好な工具

材を使用することが, 工具寿命の延長に有効な方法であることは良く知られている。しかも, 超硬合金によるインコネルの切削においては超硬合金K種などを用いて切りくずを薄く生成させるような切削が好ましいとされてきた⁷⁾。これは, 超硬合金K種, すなわちWC-Co超硬合金の熱伝導性が超硬合金P, M種に比べ良好であることが主因と考えられる。しかし, 上述のように, WC-Ni超硬合金はWC-Co超硬合金に比べ高靱性であること, さらに, 結合相金属の物性値を調べると, 高温下におけるNiの熱伝導率は, Coの熱伝導率に比べ大きいこと。これらのことを考慮すると, インコネルなど熱伝導性の悪い被削材の切削においては, WC-Ni基超硬合金も工具材として使用可能であると考えられるが, WC-Ni超硬合金の摩耗特性について体系的に調べた研究は見あたらない。

そこで本研究では, 先ず, WC-Co超硬合金工具でインコネル718の切削を行い, Co含有量が工具摩耗に及ぼす影響を調べ, 最適なCo含有量を見出した。つぎに, これと同じNi含有量を持つWC-Ni超硬合金工具でインコネル718の切削を行い, WC-Co超硬合金の工具摩耗と比較した。さらに, WC-Ni超硬合金のNi含有量を変化させた超硬合金工具でインコネル

718の切削を行い、最適なNi含有量を見出した。

以上の実験結果から、WC-Ni超硬合金がインコネル718切削に有効な工具材かどうかの検討を加えた。

2 実験方法

被削材として使用したインコネル718の主な化学成分および機械的性質をTable 1に示す。Table 1に示す化学成分以外に、P, S, Bが微量含まれている。Table 1に示すように、被削材インコネル718の引張り強さ1.4 GPa、硬度419 HBである。

使用工具材は、Table 2に示すように、WC-CoおよびWC-Ni超硬合金において、CoおよびNi含有量を変化させた8種類の超硬合金を用いた。すなわち、WC-Co超硬合金については、Co含有量を1～8 mass%まで、またWC-Ni超硬合金については、Ni含有量を7～11 mass%まで変化させた。なお、WC含有量とCo、あるいはNi含有量の合計が100 mass%にならないのは、微量の炭化物、あるいは酸化物が含まれているためである。Table 2には、使用工具材の機械的・熱的性質も示した。

□25 mm×25 mm バイトホルダに、TNGA160408型チップを取付け使用した。この場合の工具形状は、 $-6^\circ, -6^\circ, 6^\circ, 6^\circ, 30^\circ, 0^\circ, 0.8\text{ mm}$ となる。ここで、7つの数字は、前から順に前すくい角、横すくい角、前逃げ角、横逃げ角、前切刃角、横切刃角、ノーズ半径である⁸⁾。また、工具切れ刃は、いずれの工具材も市販のままの状態で使用した。

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of Inconel 718.

Chemical compositions (mass %)					
Ni	Cr	Fe	C	Mn	Si
52.4	18.1	19.6	0.03	0.22	0.07
Co	Mo	Cb+Ta	Ti	Al	Cu
0.3	2.92	4.98	0.96	0.39	0.01
Mechanical properties					
Tensile strength			1.4 GPa		
Elongation			18 %		
Hardness			419 HB		

Table 2 Chemical compositions and mechanical-thermal properties of cemented carbide.

Cutting tool	WC (mass %)	Co (mass %)	Ni (mass %)	Size of WC Particle (μm)	Hardness (HRA)	T.R.S. (GPa)	Thermal conductivity ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)
Co 1%	98	1	-	0.6	95.9	0.88	75
Co 2%	97	2	-	0.9	94.0	1.18	70
Co 5%	93	5	-	1.5	92.5	1.96	80
Co 7%	93	7	-	2.0	90.3	3.1	95
Co 8%	92	8	-	4.5	89.0	3.0	93
Ni 7%	92	-	7	1.5	91.0	3.0	98
Ni 9%	90	-	9	1.5	90.0	3.1	95
Ni 11%	88	-	11	1.5	89.0	3.5	92

T.R.S.: Transverse Rupture Strength

使用旋盤は、無段変速装置付き昌運工作所製ST5×1000型高速精密旋盤(7.5/11 kW, 8～2500 rpm)である。

切削条件をTable 3に示す。Table 3に示す切削条件でインコネル718の外周旋削を行い、表面粗さ、工具摩耗を調べた。なお、表面粗さの測定には、東京精密社製サーフコム1800A型触針式表面粗さ測定器を用い、送り方向の仕上げ面のプロフィールを記録するとともに、最大高さを測定した。

3 実験結果および考察

3.1 工具の摩耗状態

超硬合金工具でインコネル718を切削し、工具の摩耗状態を調べた。Fig.1にWC-8%Co超硬合金工具の場合を示す。工具すくい面には凝着物がみられる。さらに、前逃げ面、横逃げ面に溝状の大きな境界摩耗が見られ、これらの境界摩耗が主な工具損傷となっている。ここに示した以外の超硬合金工具によるインコネル718の切削においても前逃げ面、横逃げ面に生じた境界摩耗が主な工具損傷であったので、前逃げ面、横逃げ面における逃げ面摩耗幅VN, VN'を測定した。なお、工具寿命判定基準として、特殊鋼などの切削の場合、逃げ面摩耗幅が0.4 mm⁹⁾とされているので、本研究でも逃げ面摩耗幅の最大値VBmax (Fig.1に示したVNとVN'のいずれか大きい方)が0.4 mm程度まで切削を行った。

緒言でも述べたが、WC-Co超硬合金はWCを主成分とし、Coを結合材としているため、Table 2に示すようにCo含有量によって超硬合金の機械的性質が変化する。そこで、先ず、Co含有量を変化させたWC-Co超硬合金工具でインコネル718の切削を行い、工具摩耗を調べた。Fig.2に、WC-Co超硬合金工具でインコネル718を切削した場合における逃げ面摩耗幅の最大値と切削距離の関係を示す。なお、WC-1%Co超硬合金

Table 3 Cutting conditions of Inconel 718.

Cutting speed	12.6 m/min
Feed rate	0.25 mm/rev
Depth of cut	0.20 mm
Cutting method	Dry

 Fig.1 Tool wear ($L=0.5\text{km}$, WC-8%Co).

工具でインコネル718の切削を数回行った結果、いずれも切削距離0.1km付近で欠損が生じた。Fig.2に示すように、WC-2%Co超硬合金工具の場合も、切削距離が0.5kmをこえると工具に欠損が生じた。このように、Co含有量の少ない工具は欠損が生じやすい。これには、次の理由が考えられる。すなわち、超硬合金の機械的性質に影響を与える因子としては、WCの含有量、WCの粒子径があげられる。一般に、超硬合金では、WCの含有量が多いと硬く、またWCの粒子径が小さいほど硬くなるが、抗析力は低くなる¹⁰⁾とされている。超硬合金の機械的性質を調べたTable 2に示したように、Co1%、2%、5%、7%の4種類のWC-Co超硬合金においては、WCの含有量が多いと硬く、抗析力は低くなっている。しかし、Co7%、Co8%のWC-Co超硬合金を比較すると、WCの含有量が多く、しかもWCの平均粒径が小さいWC-7%Co超硬合金の抗析力は、WC-8%Co超硬合金に比べ高い。この理由として、抗析力に大きな影響を及ぼす超硬合金中の欠陥の大きさの違いが考えられる。すなわち、鈴木¹¹⁾は、超硬合金のマトリックス強度には、最大値となるWCの平均粒径が存在し、欠陥の発生を抑えると平均抗析力の最大値も、ほぼこの粒径(マトリックス強度が最大となるWCの平均粒径)で得られるとしている。このことから、Co7%、Co8%のWC-Co超硬合金において、それぞれの超硬合金内に同一寸法の欠陥が存在していたため、WC-7%Co超硬合金の抗析力が高くなったと考えられる。このことから、Co含有量が1%、2%と少ないWC-Co超硬合金で

Fig.2 Relation between cutting distance and flank wear width.

Fig.3 Relation between cutting distance and flank wear width.

は、抗析力が低いいため欠損が生じやすかったと考えられる。WC-7%Co超硬合金工具の場合、工具摩耗の進行が最も遅い。しかし、Co含有量を8%に増加させると摩耗進行は速くなる。これは、Co7%、Co8%の超硬合金を比較すると、硬さ、抗析力ともにWC-8%Co超硬合金の方が低く、さらにWC-8%Co超硬合金の熱伝導率 $93\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ は、WC-7%Co超硬合金の熱伝導率 $95\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ に比べやや低い。これらのため、WC-8%Co超硬合金工具の摩耗進行が速くなったと考えられる。なお、WC-8%Co超硬合金では、WC粒子が大きいいため、WC粒子の脱落が生じやすくなり、摩耗進行を速くしたと推察されるが、このことについては今後検討する予定である。

以上のことから、WC-Co超硬合金工具でインコネル718を切削すると、WC-Co超硬合金においてはCo7%が適した工具材であることが分かったので、つぎに、WC-Ni超硬合金についても、Ni7%のWC-Ni超硬合金工具を用いてインコネル718の切削を行い、WC-Co超硬合金工具の場合と比較した。Fig.3に、逃げ面摩耗幅の最大値と切削距離の関係を示す。WC-7%CoとWC-7%Ni超硬合金工具の摩耗進行を比較すると、WC-7%Ni超硬合金工具の摩耗進行がやや遅い。このことから、インコネルの切削には、WC-Ni超硬合金が適した工具材と考えられる。

つぎに, WC-Ni超硬合金工具においてもNi含有量を変化させた工具でインコネル718の切削を行った。Fig.4に逃げ面摩耗幅の最大値と切削距離の関係を示す。Ni7%のWC-Ni超硬合金工具の摩耗進行は, Ni9%, Ni11%のWC-Ni基超硬合金工具に比べやや遅い。この理由として, Table 2に示したように, WC-Ni超硬合金では, Ni含有量の減少に連れ, 抗析力は低下するが, 硬さ, および熱伝導率は上昇する。このことから, WC-7%Ni超硬合金工具の摩耗進行が, 最も遅かったと考えられる。

Fig.4 Relation between cutting distance and flank wear width.

3.2 工具の摩耗機構

前節の結果より, インコネル718の切削には, Ni含有量7%のWC-Ni超硬合金が有効な工具材であることが分かった。そこで, WC-Ni超硬合金工具の摩耗状態をより詳細に調べるために, 工具摩耗面のSEM観察を行った。Fig.5に, SEM観察結果を示す。なお, (b)は, (a)に示す摩耗面A部を拡大したものである。まず, (i)に示すWC-7%Ni超硬合金工具の場合について述べる。(a)に示すように, すくい面および逃げ面いずれにも, 凝着物や欠損がほとんど見られない。(b)に示す逃げ面の摩耗面において, 微細な条こんが摩耗面全面にわたって生じており, また凝着物もほとんど見られない。このため, WC-7%Ni超硬合金工具の摩耗は, アブレーション摩耗と考えられる。(ii)にWC-11%Ni超硬合金工具の場合を示す。(a)に示すようにWC-11%Ni超硬合金の場合, すくい面および逃げ面の一部に凝着物が見られる。これは, 工具に含まれるNiとインコネル718に含まれるNiの親和性のため, 凝着物が生成されやすくなったと考えられる。(b)に示すように, 凝着物が付着していない逃げ面の摩耗面において, 条こんが摩耗面全面にわたって生じている。しかし, (i)に示したWC-7%Ni超硬合金工具の場合に比べ, やや粗い条こんが見られる。

Fig.5 SEM observation of tool wear.

Fig.6 Surface profile curve.

3.3 切削仕上げ面

最後に、WC-7%CoおよびWC-7%Ni超硬合金工具でインコネル718を切削し、切削仕上げ面を調べた。Fig.6に送り方向における切削仕上げ面の断面曲線を示す。(i)にWC-7%Co超硬合金の場合を、(ii)にWC-7%Ni超硬合金の場合を示す。また、(a)に工具摩耗が比較的少ない切削初期の場合を、(b)に切削距離1.6kmの場合を示す。なお、断面曲線より下の部分が被削材インコネル718である。(i)に示すWC-7%Co超硬合金と(ii)に示すWC-7%Ni超硬合金の仕上げ面粗さを比較すると、切削初期の仕上げ面粗さに大差ない。しかし、切削の進行に連れ工具摩耗が大きくなると、WC-7%Ni超硬合金の仕上げ面粗さは、WC-7%Co超硬合金に比べ小さい。これは、WC-7%Ni超硬合金の工具摩耗が小さいため、仕上げ面粗さも小さくなったと考えられる。

4 結 言

インコネル718切削に有効な超硬合金を見出すために、Co含有量を変化させたWC-Co超硬合金、およびNi含有量を変化させたWC-Ni超硬合金で切削を行い、工具摩耗を調べた。

得られた主な結果は次の通りである。

- (1) WC-Co、およびWC-Ni超硬合金の主な工具損傷は、前逃げ面および横逃げ面の境界摩耗であった。
- (2) WC-Co超硬合金工具でインコネル718を切削する場合、Co

含有量が少ないと工具に欠損が生じやすくなり、Co含有量が多過ぎると工具の摩耗進行が速くなった。WC-7%Co超硬合金の摩耗進行が最も遅かった。

- (3) WC-Ni超硬合金工具でインコネル718を切削する場合、WC-7%Ni超硬合金の摩耗進行が最も遅かった。しかも、この工具の摩耗進行は、WC-7%Co超硬合金工具の摩耗進行に比べ遅かった。
- (4) 工具摩耗が比較的少ない切削初期の場合、WC-Co、およびWC-Ni超硬合金工具の仕上げ面粗さに大差なかった。しかし、切削の進行に連れ工具摩耗が大きくなると、WC-Ni超硬合金工具の仕上げ面粗さの方が小さかった。

謝 辞

WC-Ni超硬合金は、株式会社タンガロイ(旧東芝タンガロイ株式会社)からご提供いただいたことを付記し謝意を表します。

文 献

- 1) Japan Society of Powder and Powder Metallurgy: Powder and Powder Metallurgy Term Encyclopedia, NIKKAN KOGYO SHIMBUN, LTD., (2001)349.
- 2) H.Suzuki and T.Yamamoto: "Effects of Carbon Content on Some Properties of WC-10%(Co-Ni) Cemented Carbides", J. Jpn. Soc. Powder and Powder Metallurgy, 15(1968)68-71.
- 3) T.Sadahiho, T.Mitsuda and S.Takatsu: "Fracture Toughness of Ni-Bonded WC Base Cemented Carbides", J. Jpn. Soc. Powder and Powder Metallurgy, 29(1982)222-226.
- 4) K.Itakura, M.Kuroda, H.Omokawa, H.Itani, K.Yamamoto and Y.Ariura: "Wear Mechanism of Coated Cemented Carbide Tool in Cutting of Super Heat Resisting Alloy Inconel", Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 65(1999)976-981.
- 5) K.Itakura, M.Kuroda, T.myouji, H.Itani, H.Tsukamoto and Y.Ariura: "More Efficient Cutting Difficult-to-Machine Materials by Rotary Tool", Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 66(2000)886-890.
- 6) N.Narutaki: Cutting of Difficult-to-Cut Material, Nikkan Kogyo Shimbun Co., Ltd., (1989)76-80.
- 7) K.Shintani, H.Kato et al.: "Cutting Performance of CBN Tools in Machining of Nickel Based Superalloy", Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 58(1992)1685-1690.
- 8) E.Sentoku, M.Kito and T.Nakagawa: "Research on the Surface Roughness and Friction Coefficient in Cutting of Cast Iron", J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, 49(2002)290-293.
- 9) JISB4011.
- 10) H.Suzuki: Cemented Carbide and Sintered Hardmaterial -Basics and Application-, Maruzen Co., Ltd., (1986)119-121.
- 11) H.Suzuki: Cemented Carbide and Sintered Hardmaterial -Basics and Application-, Maruzen Co., Ltd., (1986)152.