難削材研削加工の実例*

Ti-6Al-4V, インコネル718について

Grinding of Difficult-to-cut Materials / Nobuo KUMAGAI

Key words: grinding, titanium alloys, nickel base heat resistant alloys, ground surface integrity, grinding characteristics, grindability, surface grinding, super-abrasive wheel, high-pressure coolant, residual stress

1. はじめに

チタン合金及びニッケル基耐熱合金は、優れた性質をもつ反面、研削加工が特に困難な材料で、一部の文献には「研削加工は疲れ強さを低下させるので、通常は行わない」と記されている¹⁾。しかし、これらの材料は、材料特性を理解して適正な加工条件を選定すれば、高品位に研削加工することが十分可能である。ここでは筆者らが Ti-6Al-4V 及びインコネル 718 合金を超砥粒砥石を使用して高圧力の注液のもとで平面ブランジ研削した結果の一部を紹介する。なお、「精密工学会誌」58 巻 4 号 (1992 年) に関連記事²⁾³⁾が掲載されているので参照されたい。

2. チタン合金及びニッケル基耐熱合金の 難研削性とその対策

これらの材料の被研削性を低下させる主な特性は、

- (1) 熱伝導率及び熱拡散率が特に小さい。
- (2) 化学的活性度が高く、砥石材料との親和力が大きい。
- (3) 加工硬化性が大きい (ニッケル基耐熱合金)。
- (4) 高温における強度が高い。
- (5) 縦弾性係数が小さい (チタン合金)。

などである。これらのうちで最も研削を困難にしているのは (1) と (2) で、研削温度が高温になりやすく、また砥石には工作物との化学反応⁴⁾を伴った異常摩擦を起こしやすいことである。これらの現象は、砥石の

損耗量を増加させるだけではなく、工作物仕上面の寸法や形状精度を低下させ、仕上面性状を悪化させる。それで研削の際には、研削温度を低くして砥石の損耗を少なくしなければならないが、現状における対策としては、研削熱の発生を少なくすることに重点を置く方法と、研削熱の冷却に重点を置く方法に分かれる。

前者は、砥石周速度を約 10 m/s の低速にして湿式研削する方法で、既に 1950 年代に発表され⁵⁾⁶⁾、Low stress grinding 法⁷⁾として今日でも推奨されている。これに対して後者は、砥石周速度を低くしないで研削し、研削点に高圧力の注液 (ジェット注液) を行って研削熱を冷却する方法である。両方法にはそれぞれ長短がある。砥石低周速度研削法の特色は、砥石軸回転数を変速できる研削盤があればほかに特別な設備を要せず、C 系や A 系等の普通砥石を使用して研削が可能なことである。これに対して、ジェット注液研削法の特色は、加工能率が前者より高く、研削抵抗が小さいことである。

3. Ti-6Al-4V 及びインコネル 718 の研削例

ここでは、表 1 に示す Ti-6Al-4V 及びインコネル 718 材 (幅 6 mm, 長さ 60 mm) を、ジェット液圧 $P_j=2$ MPa の注液を行いながら、砥石周速度 $V=32$ m/s で平面ブランジ研削 (上向き研削) した結果について述べる。

ジェット注液研削で重要なことは、ノズル形状と注液位置である。筆者らは、研削液を有効に利用するために、ノズルの出口形状を扁平な長方形 (幅 11.3 mm, 高さ 0.6 mm) とし、ノズルから出た液が拡散

* 原稿受付 平成 4 年 8 月 25 日

** 正会員 関西大学工学部 (吹田市山手町 3-3-35)

表1 供試工作物の物理的・機械的性質

	Ti-6Al-4V	インコネル 718	参考, S 45 C
引張強さ (kgf/mm ²)	90~100	142	58~61
降伏点 (kgf/mm ²)	85~90	116	35~36
縦弾性係数 (kgf/mm ²)	1.16×10^4	2.04×10^4	2.1×10^4
伸び (%)	>10	22	>20
硬さ HB (10/3 000)	330	415	167~229
熱伝導率 (cal/cm ² ・s・K)	0.018	0.027	0.106
比熱 (cal/gf・K)	0.134	0.103	0.11
備考	焼きなまし ($\alpha + \beta$)	溶体化+時効	JIS G 4051 焼きならし

図1 研削比に及ぼす砥石および実材料除去率の影響

したり、液中に気泡が入らないようにノズル形状を考慮した。ノズルはできるだけ研削点に接近させて取り付け、砥石後方から研削点に向けて注液している。なお、ノズルの出口近くにはエアスクレーパを取り付けている。

3.1 Ti-6Al-4V 合金の研削⁸⁾⁹⁾

Ti 合金の研削には、少しタフなダイヤモンド砥粒を使用した砥石が最も適し、ジェット液圧 P_1 は高压にする程良い。また、実材料除去率 Z' (単位砥石幅、単位時間当たりの実削除体積) を一定とした場合は、切込み Δ よりも工作物速度 v を大にした方が良い。以下、研削特性に及ぼすレジノイドボンドダイヤモンド砥石の粒度の影響について紹介する。

研削比は砥粒径を減少 (粒度番号が増加) すると著しく低下する (図1)。これは、図2に示す砥石表面形状のアボットの負荷曲線からわかるように、砥粒径が減少すると、砥石表面のスペース (気孔) の大きさが減少して研削液が研削点に侵入しにくくなり、研削

Ti-6Al-4V, $Z_{th}=2$ (*2.45) mm³/mm²・s, $\Delta=20$ μm/pass, $V=32$ m/s, $v=0.1$ (*0.123) m/s, $P_1=2$ MPa, $W1-1 \times 10$, D =砥石直径 (mm), B =砥石幅 (mm), W =削除量 (mm³)

図2 砥石表面形状のアボットの負荷曲線

図3 仕上面粗さと砥石、ジェット液圧および実材料除去率との関係

熱の冷却が不十分になりやすいこと及びボンドの砥粒保持力が低下して砥石損耗量が増加するためである。

砥粒径が減少すると、工作物単位幅当たりの接線研削抵抗 F_t/B 、法線研削抵抗 F_n/B 及び比研削抵抗は増加し、研削抵抗比 F_t/F_n は減少する。また、SDC140R100B 砥石は GC80K8V 砥石より比研削抵抗が小さい (図略)。

仕上面粗さは、砥粒径の減少に伴って減少するが、細粒砥石は切れ刃の不ぞろいと形くずれが起こりやすく、粒度には最適値がある (図3)。また、細粒砥石の場合は、研削開始直後の粗さが小さくても、わずかな研削によって粗さが増加するから、ドレッシング間隔を短くしなければならない。粗さを向上させるため

図4 研削残留応力と砥石および理論材料除去率との関係

には、 Z' を小さくして P_j を高圧力にするのがよい。

SDC 砥石を使用して、 $P_j=2$ MPa の条件で研削した場合は、仕上面に研削焼けや割れが発生しない。また、研削表面の近傍は組織が微細化して加工硬化しているが、スエードメタルは全く認められない。いずれの砥石も P_j を増加すると表面性状は改善される（図略）。図4は研削仕上面の残留応力の例を示している。GC 80 K 砥石で研削した工作物は、表面及び内部に引張残留応力を生じ、応力の侵入深さ y_s も大きい。これに対して、SDC 140 R 砥石で研削した場合は、表面に引張残留応力がほとんど発生せず、残留応力の分布形態が圧縮タイプ¹⁰⁾ になり、疲れ強さの観点から好ましい。なお、この砥石を使用して理論材料除去率 $Z_{th}=1$ mm³/mm·s ($v=0.1$ m/s, $\Delta=10$ μm/pass) で研削した場合は、 $P_j=0.1$ MPa の低圧力でも仕上面の表面応力 S が引張応力にならない。また Z_{th} が小さい範囲では、 y_s は砥粒径の減少に伴って減少する（図略）。しかし、 Z_{th} を増加すると、 S とピーク応力 T が次第に引張応力側へ移行し、 y_s も増加する。高材料除去率の場合は、少し粗粒の砥石を使用した方が表面性状は良くなる。

3.2 インコネル 718 合金の研削¹¹⁾¹²⁾

ここでは、主としてレジノイドボンドのダイヤモンド砥石 SDC 140 R 100 B 及び CBN 砥石 BNC 140 R 100 B を使用して、 $P_j=2$ MPa の注液のもとでインコネル 718 を研削した例を紹介する。

図5は、定常研削状態における研削比と実材料除去率 Z' との関係を示している。破碎性の良いダイヤモンド砥粒（破碎性値約 60%）を使用したことも影響しているが、SDC 砥石の研削比は CBN 砥石よりも

小さい。この材料に対する砥粒の適性は明らかではないが、少なくとも前述のチタン合金の場合と異なっており、また、研削比の値から、この材料が難削であることがわかる。WA 80 M 砥石は、GC 80 K 砥石より優れているが、非常に低い研削比しか得られず、 P_j が低い場合は更に低くなる。超砥粒砥石の損耗は、切れ刃の摩滅摩耗が徐々に進行し、間欠的に切れ刃の微小破碎が発生する過程をとり、目づまりは起こらない。GC 80 K 砥石は目こぼれが著しく、WA 80 M 砥石は目つぶれから目こぼれへ移行しやすい。

超砥粒砥石の接線研削抵抗及び比研削抵抗は、普通砥石よりも小さく、SDC は CBN よりもわずかに小さい。しかし、法線研削抵抗は普通砥石よりも大きい（図略）。

仕上面の粗さは、図6に示すように SDC 砥石が比較的良好で、その値は前述のチタン合金の場合よ

図5 研削比に及ぼす砥石および実材料除去率の影響

図6 仕上面粗さに及ぼす砥石および実材料除去率の影響

インコネル 718, $Z_{th}=2 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$, $\Delta=20 \text{ }\mu\text{m/pass}$,
 $V=32 \text{ m/s}$, $v=0.1 \text{ m/s}$, $P_f=2 \text{ MPa}$, $W 1-1\times 20$

図7 研削仕上面の残留応力分布に及ぼす砥石の影響

り小さい。仕上面は、砥粒のパンシユ作用が多く、加工硬化が認められる。超砥粒砥石で研削した仕上面には研削焼けや割れは発生せず、断面組織を観察してもスメアドメタルは認められない。これに対して、WA砥石で研削した面は、表面の加工硬化が著しく、内部の表面近くで研削熱による軟化を生じる。

仕上面の研削残留応力の例を図7に示す。SDC砥石の場合は、表面残留応力は圧縮応力で、わずかに内側に大きい圧縮応力のピークをもつ圧縮タイプになる。また引張り側のピーク値も圧縮応力で、疲れ強さの観点から好ましい応力分布である。これに対して、CBN砥石の場合は、研削表面及び内部に引張応力が生じており、表面性状がSDC砥石の場合より少し劣ることがわかる。これはダイヤモンド砥粒の高熱伝導率、低研削抵抗、パンシユ作用などに基因するものであろう。しかし、SDC砥石を使用した $P_f=2 \text{ MPa}$ のジェット注液研削でも、 Z_{th} が増加すると表面性状は次第に低下し、表面応力が圧縮応力でありながら、表面から数十 μm 内側で引張応力が発生するようになる。この引張応力には、表面近傍の圧縮応力とバランスをとる形で内部に生成された応力も含まれている。従って、表面応力のみで仕上面性状の良否を判断するのではなく、断面の応力分布状態を調べる必要がある。WA砥石で $P_f=0.1 \text{ MPa}$, $Z_{th}=2 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ の場合は、研削表面及び内部に大きい引張残留応力(σ_1 が $+400 \text{ MPa}$ 以上になる。図略)を生じ、応力侵入深さ y_s はSDC砥石($P_f=2 \text{ MPa}$)の約3倍になる。硬さ分布から求めた変質層の深さ h_s と y_s とはほぼ近い値となり、変質層の深さは、研削熱の影響が少ない範囲では、 F_n/B にほぼ比例する。

4. おわりに

難削材研削加工の例としてTi-6Al-4V合金とインコネル718のジェット注液研削例を紹介した。まだ解明されていない点も多いが、超砥粒砥石を使用したジェット注液研削法は、難削材の被研削性を向上させる一手段となるものと思われる。本稿がいささかの参考になり、難削材の高品位、高能率、低コスト化を目指した研究及び実用化に役立てば幸いである。

参考文献

- 1) ハンドブック編集委員会編：新素材/新金属最新製造・加工ハンドブック，工業資料センター，(1991) 191.
- 2) 田中秀穂，熊谷信男：難削材の研削——チタン合金，ステンレス鋼について，精密工学会誌，58，4 (1992) 601.
- 3) 石川忠幸，K. V. Kumar：超砥粒ホイールによるNi基耐熱合金の高能率研削，精密工学会誌，58，4 (1992) 597.
- 4) N. Kumagai & K. Kamei：Grinding of Titanium with Jet Infusion of Grinding Fluid, Titanium Science and Technology, 5th Int. Conf. on Titanium, 2, (1985) 1015.
- 5) L. P. Tarasov：How to Grind Titanium, Am. Machinist, 10, Nov. (1952) 135.
- 6) C. T. Yang & M. C. Shaw：The Grinding of Titanium Alloys, Trans. ASME, 77, 6, (1955) 645.
- 7) G. Bellows：Low Stress Grinding for Quality Production, Machinability Data Center, (1978).
- 8) 熊谷信男，亀井 清，三宅輝明，山中啓市：チタン合金のジェット注液研削（第3報）——仕上面性状について，1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，G 08 (1990) 235.
- 9) N. Kumagai, K. Kamei & Y. Tanaka：Effect of Diamond Wheel Grain Size on the Grindability of Ti-6Al-4V, Proc. 7th World Conf. on Titanium, (1992).
- 10) 岡村健二郎，中島利勝，井上陽一，宇野義幸：過渡的切削過程における表面特性の研究（第2報）——ブランチ研削における残留応力，精密機械，39，8 (1973) 22.
- 11) 熊谷信男，亀井 清，田中行雄：インコネル718の被研削性，精密工学会中国四国・九州支部合同1991年度講演会講演論文集，(1991) 17.
- 12) 熊谷信男，亀井 清，田中行雄，吉村哲郎：Ni基超耐熱合金のジェット注液研削（第1報）——インコネル718の研削仕上面について，1992年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，G 39, (1992) 577.

著者紹介

立命館大学理工学部機械工学科
 卒。大阪大学工学博士。難削材の
 研削加工，難削材の精密研磨