焼結硬ぜい材料の加工損傷に関する研究 (第2報)*

——超硬合金工具材料の曲げ強さに及ぼす加工損傷の影響——

柴 坂 敏 郎** 豊 嶋 敏 雄**

Machining Damage of Sintered Brittle Materials(2nd Report)
-Effects of Machining Damage on Bending Strength
of Cemented Carbide Cutting Tools-

Toshiroh Shibasaka and Toshio Teshima

This investigation examines the surface crack and the residual stress caused by machining of cemented carbides used for cutting tool. These were evaluated from the bending strength, the microcrack length and the fracture toughness on the basis of fracture mechanics by using the transverse rupture test. Within tested materials, the surface crack length was 6 to 20 μm . This value was smaller than thickness of deformed layer acting compressive residual stress. It is found that the surface crack length decreases with decrease in grain size of grinding wheel, and with decrease in depth of cut in grinding operation. Therefore the bending strength increases with decreasing grain size and depth of cut.

Key words: machining damage, surface crack, fracture mechanics, cemented carbide, microcrack, bending strength

1. 緒 言

セラミックのような焼結成形される硬ぜい材料の強度設計においては機械的加工時に生じる表面き裂や残留応力などの加工損傷が重要な因子となり、加工法、加工条件あるいは材料特性などと加工損傷との関係を明らかにする必要がある。微小な欠陥を起点とする破壊では、試料が全破断する以前に欠陥から強度の低い粒界・界面で局所的な破壊を生じ¹⁾、この局所的な破壊を微小き裂として考慮することにより線形破壊力学に基づく破壊強度の評価が可能であることを前報²⁾において報告した。また、この微小き裂は加工損傷のように加工表面を起点とする破壊についても表面き裂が小さい場合には考慮する必要があることを示した。

そこで、硬ぜい材料の強度信頼性向上を目的として、本報告では工具材料として使用されている数種の超硬合金について研削加工条件の曲げ強さに及ぼす影響を明らかにするとともに、前報で得られた微小き裂の大

きさを用いて曲げ強さの破壊力学に基づく解析により加工損傷としての残留応力と表面き裂の大きさを明らかにする。また、それらと加工条件との関係について検討する。

2. 表面き裂の検討方法

加工時に生じた表面き裂から微小き裂を伝播した後試料の全破断に至ると考える²⁾と、加工による表面き裂長さ s と微小き裂長さ m の和が試料の破壊強度を決定するき裂長さとなる。このき裂に作用する応力 σ_n が求められると、表面き裂および微小き裂に基づく応力拡大係数 K_a は

$$K_a = \sigma_n \cdot Y \cdot \sqrt{(s + m)} \quad (1)$$

と表される。ここで、 Y はき裂および物体の形状で決定される定数である。一方、通常加工表面には残留応力が存在することから、破断時の式(1)による K_a は材料の破壊じん性値とは一致しないと考えられる。残留応力は表面から内部へ分布し、表面き裂にどのように作用しているかは明らかにされていない。ここでは残留応力に起因する負荷応力増分 σ_r による応力拡大係

* 原稿受付 平成 3 年 3 月 22 日、1989 年度精密工学会春季大会学術講演会(平成元年 3 月 22 日)にて発表

** 正 会 員 福井大学工学部(福井市文京3-9-1)

Table 1 Grinding condition

Grinding wheel	SDC140N 100B	SDC400N 125B	SDC600N 125B
Peripheral wheel speed m/min	1130		
Table speed m/min	4.4 (8.2)		
Depth of cut μm	2.5 (5.0)		
Number of spark out	3 (0)		

数Krを式(1)と同様に考えると、

$$Kr = \sigma_r \cdot Y \cdot \sqrt{(s + m)} \quad (2)$$

となる。材料の平面ひずみ破壊じん性値を K_{Ic} とすると、重ね合わせの原理によりKaは

$$Ka = K_{Ic} + Kr \quad (3)$$

となる。従って、対象とする材料の破壊じん性値、微小き裂長さおよび加工による残留応力がわかれば、例えば、曲げ試験から破壊起点に作用する応力を求めると、表面き裂長さが式(1)~(3)により次式のように推定できる。

$$s = \frac{K_{Ic}^2}{(\sigma_n - \sigma_r)^2 Y^2} - m \quad (4)$$

あるいは、残留応力を考慮したKaが得られる場合には式(1)から直接求められる。

3. 実験方法

破壊試験は三点曲げ試験とし、試料寸法は $2 \times 4 \times 25$ mmで支点間距離を16mmとした。負荷には万能引張圧縮試験機または立フライス盤のテーブル上下駆動を利用し、負荷変位速度は7mm/minと設定し、荷重測定には圧電型動力計を使用した。試験材料は超硬合金工具材料P20, K10種を対象とし、それぞれ組織の異なる2種類²⁾を用い、材種名にA, Bを付した。試料表面はダイヤモンド砥石で平面研削盤を用い加工を行い、使用した砥石粒度および研削条件を表1に示す。標準条件としては切込み $d=2.5$ で、 $5.0 \mu\text{m}$ の場合については表中()内の条件を使用した。また、負荷応力方向と研削方向の関係も重要な要因であり、本実験では試験時の引張応力方向と研削方向が一致する試料長手方向に研削を行った場合を対象とした。

研削による加工損傷の影響を検討するため、研削加工後ダイヤモンド砥粒によるラッピングを施し、研削条件およびラッピングによる加工表面除去量の曲げ強さに及ぼす影響を検討した。次に、加工損傷としてま

(a) P20A, #140, $d=2.5 \mu\text{m}$

(b) P20B, #140, $d=2.5 \mu\text{m}$

Fig.1 Effect of thickness of deformed layer removed by polishing on bending strength

ず、研削加工による残留応力についてはビッカース圧子押し込み時に発生する圧痕コーナからのき裂長さに基づいた簡便な方法による検討を行った²⁾。さらに、表面き裂についてはこの残留応力の評価結果と前報で得られた微小き裂長さから前項の方法により算出した。残留応力の検出や精度には問題があるが、ここでは微小き裂を考慮した表面き裂の評価方法の妥当性について検討した。

4. 実験結果および考察

4.1 曲げ強さに及ぼす研削条件の影響

図1は研削加工後のラッピングによる表面除去量が

Fig.2 Effect of grinding condition on bending strength

曲げ強さに及ぼす影響を検討した一例で、曲げ強さをワイブル確率紙にプロットした。同図(a), (b)は材料がそれぞれP20A, P20Bの場合である。これらの図から実験範囲内の加工表面除去量で曲げ強さが変化すること、また、(b)では除去量とともに曲げ強さは低下するのにに対し、(a)では除去量 $3\mu\text{m}$ の強度が最大となり除去量の曲げ強さに及ぼす影響が材料により異なること、すなわち、除去量に対して単調には変化していないこと、およびP20Bの曲げ強さがP20Aより大きいことなどがわかる。さらに、確率紙上では破壊確率99%以上のところでそれぞれの除去量の直線が交差する傾向のあることがわかる。曲げ強さの変化に対しては加工による残留応力や表面き裂の大きさが除去量によって変化することが一因と考えられる。また、直線の交差は欠陥の大きさの分布やその密度と試験時の応力分布に依存するものと考えられる。

Fig.3 Crack length as a function of indentation load P20B

次に、図2は研削加工条件の曲げ強さに及ぼす影響を検討した結果の一例で、同図(a), (b)は材料がそれぞれK10B, P20Bである。研削条件としては切込みおよび砥石粒度を変化させている。同図から、まず、砥石粒度に関しては粒径の大きいほど曲げ強さが大きいことがわかる。切込みについては図2(b)では切込みが大きい場合に曲げ強さが大きくなっているのに対し、図2(a)では逆に小さくなっている。図2では図1のような直線の交差傾向がみられないのは加工条件が異なることによる欠陥の分布および残留応力の差異に起因するものと考えられる。

4.2 研削条件と残留応力

図3, 4は研削加工後の各材料の残留応力について、ビッカース圧子押し込み時に発生する圧痕コーナからのき裂長さに基づいて検討した結果である。図3は砥石粒度および切込みの異なるものについて押し込み荷重とき裂長さの関係を求めたもので、同図からそれらの関係はほぼ直線的で、き裂を発生する荷重（直線をき裂長さ零まで延長したときの荷重、ここではき裂発生限界荷重と呼ぶ）が研削条件により異なることがわかる。すなわち、粗い砥石あるいは切込みが大きい場合にはき裂発生限界荷重が大きく、残留応力の大きいことが推定される¹⁾³⁾。砥石粒度による残留応力の差異と曲げ強さとの間には対応、すなわち残留応力が大きい場合に同材料の図2(b)のように曲げ強さが大きくなっているが、切込みに関しては残留応力のみでは説明ができない。

図4は、図3と同様な押し込み荷重とき裂長さの関係

Fig. 4 Indentation load vs. thickness of deformed layer removed by polishing #140, $d=2.5\mu\text{m}$

からき裂発生限界荷重を研削加工後のラッピングによる加工表面除去量の異なるものについて求め、き裂発生限界荷重と表面除去量との関係を検討した結果で、図中に示す各材料についてその関係を求めている。同図から加工表面除去量の増加とともにき裂発生限界荷重が減少しており、このことから除去量の増加とともに残留応力が小さくなることが推定される。各材料についてみると、P20Bではき裂発生限界荷重が表面近傍で大きくかつ除去量とともに急激に減少していることから、表面での残留応力は大きい、表面近傍に限定され、約 $20\mu\text{m}$ の加工表面層の除去により小さくなることがわかる。P20AおよびK10Bでは約 $30\mu\text{m}$ の表面除去により残留応力は小さくなり、K10Aでは $40\mu\text{m}$ でも残留していることなどがわかる。

図3、4から加工後の表面近傍に残留応力が存在することは推定されるが、表面き裂長さを求める場合には残留応力の大きさが必要である。そこで、ここでは、ビッカース圧子押込み時に発生する圧痕コーナからのき裂長さから破壊じん性値 K_{IC} をNiihara⁴⁾の次式により求め、

$$K_{\text{IC}} = 0.012 \left(\frac{E}{H} \right)^{2/5} \left(\frac{HP}{L} \right)^{1/2} \quad (5)$$

この値が残留応力の影響を含む式(3)の K_{a} に等しいと考えた。ここで、 E はヤング率、 H はビッカース硬さ、 P は押込み荷重、 L はき裂長さである。図5はその一例であり、図4のP20Aで、残留応力の影響すると考えられる表面から約 $20\mu\text{m}$ を除去すると一定の破壊じん

Fig. 5 Fracture toughness as a function of thickness of deformed layer removed by polishing P20B, #140, $d=2.5\mu\text{m}$

性値になることがわかり、この値は同材料の K_{IC} とほぼ等しい。従って、ここでは表面から約 $20\mu\text{m}$ 以下の除去量の時の破壊じん性値は残留応力の影響を受けているものと考えられ、 K_{c} の値が K_{IC} より大きいことから圧縮の残留応力と推定される。このことは曲げ強さが増加することと対応する。

4.3 研削条件と表面き裂長さ

表面き裂長さおよび残留応力を各工具材料について求めた結果を図6に示す。表面き裂長さを求めるには式(4)に示したように前述の残留応力とともに微小き裂長さが必要で、同図中には前報²⁾で求めた同一材料でのそれぞれの微小き裂長さの平均値も示している。その大きさは12から $27\mu\text{m}$ で、K10Aが一番小さくなっている。また、残留応力については図5で述べたように式(5)の破壊じん性値が残留応力の影響を含む、すなわち、式(3)の K_{a} と考え、加工状態では表面粗さなどによりき裂長さが測定し難いことから表面から約 $3\mu\text{m}$ 除去後の K_{a} 値を使用した。これらの値を用いて求めた表面き裂は図6から $6\sim 20\mu\text{m}$ であり、本実験での加工条件では残留応力が存在する加工表面層より小さいことがわかる。P20AとP20Bでは残留応力の大きさおよび微小き裂長さはほぼ同じであるが、表面き裂はP20BがP20Aの約 $1/3$ と小さくなっている。また、残留応力は得られた表面き裂を用いて式(2)より求めたものでその値は $490\sim 740\text{MPa}$ であり、X線により測定さ

Fig.6 Surface crack length and residual stress for various materials
#140, $d=2.5\mu\text{m}$

Fig.8 Effect of grinding condition on surface crack length P20B

Fig.7 Bending strength for various materials
#140, $d=2.5\mu\text{m}$

れている値³⁾に近い結果となっている。

式(1)に示すように破壊起点の応力は表面き裂と微小き裂の大きさおよび破壊じん性値で決定され、破壊起点の位置を考慮して三点曲げ試験時における最大引張応力が曲げ強さとなる。破壊起点が最大応力引張位置近傍であれば、曲げ強さが表面き裂、微小き裂および破壊じん性値の違いによって検討できる。図7は図6に対応する条件での各材料の曲げ強さを示す。同図からP20AとP20BではP20Bの曲げ強さが大きく、一方、図中に示したように材料の破壊じん性値もP20Bが大きい、この場合その差は小さいことから曲げ強さの違いは表面き裂の大きさの影響を大きく受けていると説明できる。K10AとK10Bでは表面き裂の大きさに差はみられないが、K10Bの残留応力が大きいのにに対し、図中

に示す微小き裂 m も大きいことから、曲げ強さに大きな差はなく、平均値としてはK10Aの曲げ強さが大きくなっている。K10Aではばらつきも大きい、破壊じん性値が小さいにもかかわらず曲げ強さが明らかに大きい場合があることから、曲げ強さに対する微小き裂の影響が大きいことがわかる。

また、P20とK10のそれぞれの材種での比較から微小き裂と表面き裂の間に関係、すなわち、微小き裂が大きい材料が明らかに大きな表面き裂を生じやすいといった傾向がみられないことからそれらの生成要因が異なると考えられる。微小き裂は局所的な粒界・界面

の強度に支配されるのに対し、図4と図6を比較すると同一材種間では残留応力層が深い場合に表面き裂が大きく、加工により残留応力層が生成されていることから、表面き裂には加工時の変形域の大きさが重要な要因になると推定される。詳細には材料の粒度とその分布、界面強度、研削条件、加工機構などの点からさらに検討が必要である。

次に、図8は研削条件の表面き裂長さに及ぼす影響を検討した結果である。同図の条件に対応する曲げ強さが図2(b)である。図8から本実験での研削加工時には数 μm から20 μm 程度の表面き裂が存在し、砥石粒度#140, $d=2.5\mu\text{m}$ の研削条件の場合に表面き裂長さが小さくなっているが、砥石粒径および切込みが小さくなると表面き裂長さおよび残留応力が基本的には小

Fig.9 Effect of grinding condition on surface crack length K10B

さくることが理解できる。図2(b)で#140, 2.5μmの研削条件のときの曲げ強さが大きいのは残留応力の大きさに対して表面き裂長さが小さいことにより説明できる。

同様にK10Bについて研削条件の表面き裂長さに及ぼす影響を検討した結果および各条件に対応する曲げ強さがそれぞれ図9、図2(a)である。前述と同様に砥石粒度および切込みが小さくなると表面き裂長さおよび残留応力は小さくなることが理解できる。表面き裂長さとともに残留応力も低下するが、図2(a)との比較から曲げ強さへは残留応力の大きさが大きく影響することがわかる。

以上のことから、曲げ強さに及ぼす微小き裂および表面き裂の大きさの影響が説明できるが、ここでの研削条件については砥石の状態、研削抵抗などの評価は行っておらず、また、残留応力の実験的検討に課題を残すことから、表面き裂の大きさおよびその決定要因についてはさらに検討する必要がある。

5. 結 言

硬ぜい材料の強度信頼性向上を目的として、研削加

工条件の曲げ強さに及ぼす影響および、微小き裂を考慮した曲げ強さの破壊力学に基づく解析から加工条件と表面き裂および残留応力との関係について検討し、限定された材料、加工条件ではあるが次のことがわかった。

- (1) 微小き裂を考慮した表面き裂の評価方法を提案し、曲げ試験などによる破壊強度から表面き裂長さを推定できることがわかった。
- (2) 研削条件として切込みおよび砥石粒度の影響を検討し、粒径の大きい場合また切込みが大きい場合に曲げ強さが大きいことがわかった。また、加工表面除去量により曲げ強さが異なり、除去量の曲げ強さに及ぼす影響が材料により異なることがわかった。
- (3) 供試材料では 6~20μm の加工による表面き裂が算出され、本実験での研削条件では残留応力が存在する加工表面層より小さいことがわかった。
- (4) 砥石粒度および切込みが小さくなると表面き裂長さおよび残留応力が基本的には小さくなることがわかった。

終わりに、本実験の一部は姫路工業大学在籍中に行ったものであり、実験については大学院生として御協力頂いた河本憲二君の努力によるところが大きい。

参 考 文 献

- 1) T. Shibasaki and T. Sakamoto; Fracture Initiation in Transverse Rupture Test of Cutting Tool Materials, Proc. 6th ICPE, (1987) 412.
- 2) 柴坂敏郎; 焼結硬ぜい材料の加工損傷に関する研究(第1報), 精密工学会誌, 56, 3(1990)551.
- 3) H. E. Exner; The Influence of Sample Preparation on Palmqvist's Method for Toughness Testing of Cemented Carbides, Trans. AIME, 245, (1969)677.
- 4) 西田俊彦, 安田榮一; セラミックスの力学的特性評価, 日刊工業新聞社, (1986)83.