切削工具材料の押込み試験における 破壊の発生挙動*

柴 坂 敏 郎** 橋 本 英 文***

Experimental Simulation of Brittle Failure Initiation
by Indentation Test for Cutting Tool Materials

Toshiro Shibasaka and Hidefumi Hasimoto

The behavior of crack initiation, which results in the brittle failure during the cutting, was simulated experimentally by indentation test techniques for cemented carbide cutting tool materials. In indentation test the cracks were observed at a short distance from indenter-specimen contact zone, and at the center of that contact zone. For the former crack path was grain boundary of carbides and interface of carbide particle and cobalt binder, and the latter propagated in carbide particles mainly. Indenting load at which crack occurred decreased with a increase in the number of indenting cycles, and was affected by tool materials and surface preparations. From the comparison of indentation test with transverse rupture test about fracture source and stress distribution, it was considered that in case of stress concentration such as indentation test fracture originated in carbide grain boundaries and carbide particle-binder interfaces, in the other case such as transverse rupture test fracture initiated from a pore or a coarse grain. The appearance of fracture surface and the stress distribution of the brittle failure of cutting tools is similar to those of indentation test, then it is seemed that the crack, which results in brittle failure, occurs at grain boundaries and interfaces, and grows.

Key words: brittle failure, cutting tool, indentation test, crack initiation, transverse rupture test, cemented carbide

1. 緒 言

切削工具材料として主要な材料である超硬合金の強度についてはこれまでに多くの研究がなされているとともに、最近では、切削加工の信頼性向上や自動化で特に問題となるぜい性損傷に対して多くの検討がなされ、加工条件や工具材料の選定あるいは材料の改良、開発に対して有益な知見が得られている。特に、強度評価によく用いられる曲げ強さは材料内の粗大ボアや粗大粒子などの先在欠陥の大きさ、位置などに依存することが明らかにされ¹⁾、線形破壊力学の手法を適用して強度の定量的検討がなされるとともに²⁾、欠陥を

小さくするよう製造上の改善がなされている。

しかしながら、破壊の発生機構については十分解明されていない。すなわち、ぜい性損傷では切削中の工具にき裂が観察されているものの、破面観察³⁾によるとボアなどの明らかな欠陥が観察されないことが多く、破壊発生の起点が曲げ試験時とは異なる場合がある。また、欠陥を起点とする破壊でも小さな欠陥では曲げ強さがその大きさに依存しなくなることが指摘されており²⁾、ぜい性損傷や工具材料の強度を考える場合、破壊の発生機構を明らかにすることが重要となる。

そこで、本研究ではぜい性損傷時における破壊の発生機構を明らかにすることを目的として、まず工具材料への押込み試験時に発生するき裂に着目し、その発生機構について検討する。すなわち、ぜい性損傷は過渡的切削過程で発生することから工具境界条件が刻々変化し、き裂発生時の力学的検討を行うことは容易ではない。また、切りくずの付着、摩耗などにより工具すくい面上での十分な観察は行えない。そこで、本報

* 原稿受付 昭和63年 5月26日。昭和58年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和58年10月15日）にて発表

** 正 会 員 福井大学工学部（福井市文京3-9-1）

*** 正 会 員 久留米工業大学（久留米市上津町）

Fig.1 Schematic illustration of indentation test

告では工具材料への押込み試験によりき裂を発生させ、破面解析、押込み荷重、工具材料などの点からき裂の発生挙動について検討した結果を報告する。

2. 押込み試験方法

切削工具材料におけるき裂の発生挙動についてはビッカース圧痕コーナからのき裂⁴⁾、球の押付け時における放射状あるいはリング状き裂⁵⁾などに基づいて検討されている。前者は圧子の角部からのき裂であり、切削場では圧子に相当するものは考えられない。また、き裂の伝播過程を観察しているのであって、発生時を観察しているのではない。球の押付けではき裂形状がリング状であること、また、工具材料はガラスなどのように透明ではないことからき裂深さ（長さ）の測定も容易ではなく、微視的検討をする場合その形状から破面解析は困難となる。

そこで、ここでは図1に示す円柱状圧子の被試験工具への押込み試験を行った。これは先端が円柱状の圧子を用いることから発生するき裂は二次元的であり、切削時の工具一切りくずのすくい面上での接触状態により近いものとして想定した。この方法では試料側面の研削・研磨によりき裂長さの測定および長さ方向の微視的観察が容易に行えたとともに、押込み時に発生したき裂が先在欠陥より大きい場合、三点曲げを行うとこのき裂を起点として破断し、押込み時に発生したき裂の破面観察も行える。

図1に示す試験装置において、圧子および試料は固定具を介してダイセットに組み込み、ダイセット上のロードセルにより荷重を測定した。負荷には油圧プレスを用いた。圧子材料には超硬合金 P20種を用い、先端半径は 1.2mmとした。

供試材料は超硬合金工具材料 K10種の2種類、およびP10, P20, P30種で、K10種の2種類(K10A, K10B)は図2に示すように粒度が異なる。試料寸法は高さ7mm、幅3mm、長さ30mmのもの、およびスローアウェイ型工具(□12.7×4.8 mm)を用いた。なお、試料の押込み面と

(a) K10A (b) K10B
Fig.2 Microstructures of K10

Fig.3 An example of observed crack in the indentation test
Tool material; P20

両側面の角は 0.5×0.5mm の面とりを施し、試料長手方向の割れを防いだ。また、発生するき裂の観察を容易にするため、押込む面はダイヤモンドペーストで鏡面に仕上げた。

3. 試験結果および考察

3.1 発生き裂の微視的形態

図3は押込み時に生じるき裂の試料表面からの観察例で、同図(a)は光学顕微鏡による巨視的観察、(b)は走査型電子顕微鏡による微視的観察結果である。図3(a)より試料側面近傍で三次元変形と考えられる様子も見られるが、圧子外側近傍でほぼ試料幅全体にわ

Fig. 4 Observation of a crack in cross section of the indented specimen
Tool material; P20

Fig. 5 Examples of fracture surface
(a) Fracture surface due to indentation test, (b) Fracture surface due to transverse test
Tool material; P20

たって一様なき裂を生じていることがわかる。き裂は巨視的には直線的であるが、微視的に見ると炭化物粒界に依存して波状となり、主に、炭化物粒界あるいは炭化物とCo相との界面を伝播していることがわかる。

次に、図4は試料側面から研削・研磨し、試料内部でのき裂を深さ方向に観察した例である。き裂は試料内部で、押込み方向から遠ざかる方向に伝播する傾向を示していることがわかる。同図では十数 μm のき裂が観察されている。

さらに、図5は押込み試験後、三点曲げにより試料を破断させ、押込みによるき裂の破面（同図(a)）および比較のためこの三点曲げ時に生じた破面（同図(b)）を観察した例である。同図(a)の破面では炭化物表面上にCoが観察され、き裂が炭化物粒界あるいは炭化物と結合相との界面を伝播したと考えられるのに対し、

(b)ではリバーパターンが観察され、き裂が炭化物粒内を主に伝播していることがわかる。これは押込みに

Fig. 6 An example of the surface observation of indenter-specimen contact zone
Tool material; P20

Fig. 7 A crack observed in the indenter-specimen contact zone (a), and its fracture surface (b)
Tool material; P20

よるき裂は速度が遅く粒界や界面を伝播するのに対し、曲げ試験時の不安定き裂の伝播速度が速く粒内を伝播するという伝播速度の変化が一因と考えられる。このことは疲労き裂が粒界を伝播し、疲労き裂からの不安定き裂の伝播経路が粒内になることと対応している³⁾。

一方、圧子と接触する試料表面においてもき裂が観察される。図6は圧子との接触領域の試料表面観察例であり、粒内割れあるいは粒界割れが観察される。この場合、割れは粒径程度の大きさであり、圧痕外側の図3に示したような特定方向の長いき裂は観察されない。しかし、繰返し負荷を与えると、図7(a)に示す粒径以上の明らかなき裂が観察された。同図の場合繰返し数は400回であり、前述と同様にこのき裂の破面について観察した例を図7(b)に示している。同図においてリバーパターンが観察されることから、き裂が粒内も伝播することがわかる。これは、前述の圧痕外側近傍とはき裂の微視的伝播経路が異なっており、圧痕下の圧縮応力場におけるき裂は表面近傍での粒界や粒内などの粒径程度の割れが繰返し負荷により合体し、

Fig. 8 The limit of crack occurrence in indenting test
Tool material; P20

これを起点としてより大きなき裂に成長したものと考えられる。

3.2 き裂発生限界

図8は押し込み荷重および押し込み繰返し数を任意に設定し、試験後の顕微鏡観察により圧痕外側でのき裂発生の有無を求めた結果である。同図中、●印がき裂が観察された場合であり、○印は観察されない場合で、荷重は単位幅当たりについて示している。ここで押し込み繰返し数の上限はぜい性損傷による工具寿命の検討を目的としていることから 10^3 回とした。同図より、同一繰返し数でき裂が観察される荷重にばらつきがあるが、平均的には図中に示す実線より大きい荷重でき裂が発生するといえる。また、このき裂の発生する荷重が繰返し数の増加とともに減少していることがわかる。ここではこのき裂の発生する荷重をき裂発生限界荷重と呼ぶ。き裂発生限界荷重のばらつきは超硬合金が微視的に不均質な組織であり、粒度分布や粒界などの局所的な組織の状態によるものと考えられる。また、繰返し数の増加による荷重の低下は軟質なCo相内で塑性変形を生じることが一因と考えられる。

3.3 き裂発生限界荷重に及ぼす影響

まず、表面性状のき裂発生限界荷重に及ぼす影響を検討した結果が図9である。図は購入状態とその表面を0.1, 0.15mm研削したもの、および800℃、1h真空焼きなましした場合について比較したもので、研削はダイヤモンド砥石、切込み $2\mu\text{m}$ 、送り 2m/min 、砥石周速 1600m/min で行った。なお、いずれもき裂観察の容易さからダイヤモンドペーストで鏡面仕上を施しており、焼きなましについてはその後行っている。

Fig. 9 Effect of the surface preparation on the crack occurrence limit
Tool material; K10B

同図より、0.15mm研削あるいは焼きなましによりき裂発生限界荷重が購入状態に比べ明らかに低下していることがわかる。一般的には研削加工により表面に圧縮応力が残留すると考えられ⁶⁾、圧痕外側のき裂発生領域は引張応力場となることから、圧縮残留応力がある場合にはき裂を発生し難くなる⁴⁾。購入状態ではこの残留応力が存在するものと推定され、き裂発生限界荷重が焼きなましものに比べ高くなっているものと考えられる。一方、微小切込みによる研削により $150\mu\text{m}$ 程度表面を除去すると焼きなまし試料に近づくことから、研削条件によっては残留応力の影響が小さくなると考えられる。

次に、工具材料の影響について検討した結果が図10で、P10, P30種以外については繰返し荷重を与えている。まず、各工具材料間のき裂発生限界荷重の大きさに差があり、繰返し数1回の場合K10A, P20, K10B, P10, P30の順にき裂発生限界荷重が小さくなっている。また、P20種とK10種の比較から、材料により荷重繰返しの影響が異なり、P20種の方が繰返し数に対するき裂発生限界荷重の低下が大きいことがわかる。さらに、平均粒度が異なるK10A, K10B間では、粒径の小さいK10Aの場合のき裂発生限界荷重が大きいことがわかる。粒径が小さい場合破壊じん性値は小さい⁷⁾の対

Fig.10 The limits of crack occurrence for various tool materials

し、き裂発生限界荷重では逆に上昇している。他の工具材料を含め、き裂発生限界荷重と破壊じん性値との関係においても、例えば、破壊じん性値の大きい P30 のき裂発生限界荷重は小さく、前述の表面性状の影響も考えられるが、き裂発生限界荷重が巨視的な破壊じん性値とは異なる特性に基づくとも考えられる。以上のことから、本手法の押込み試験によりき裂発生に対する表面性状、工具材料などの影響を検出し得ることが理解される。

3.4 き裂の発生挙動

押込み試験時には曲げ試験時にみられるようなボアや粗大粒子などの欠陥は観察されない。押込み試験の場合の圧痕外側におけるき裂発生位置は圧痕極近傍の狭い領域に限定される。例えば K10 種の場合、圧痕から 0.1mm 以内にき裂が発生している。このことから、ボアなどの欠陥が観察されない理由として、第一には破壊の起点となるようなボアや粗大粒子の分布密度が低く、押込み試験時のように限定された狭いき裂発生領域に曲げ試験時の破壊に関与するような欠陥がある確率は小さいことが考えられる。また、超硬合金のような焼結材料では粒界や界面などの局所的強度が巨視的な強度や粒子そのものの強度より低く⁹⁾、これらが破壊の起点として関与することが第二の理由として考えられる。

破壊を伴わずにボアなどの欠陥を検出する適当な方法がないことから、破壊の発生位置が欠陥の分布に対応するものと考え、曲げ試験の場合について破壊の発生位置を整理した結果の一例が図11である。同図は三点曲げ試験時に欠陥が観察された位置を引張応力側表面上に示したものである。工具材料は K10A で、試験片

Fig.11 Crack initiation site in transverse test
Tool material; K10A

Fig.12 Distribution of principal stress along indented surface in indentation test

寸法は高さ 4mm、幅 2mm、長さ 25mm、支点間距離 16mm での結果である。図から曲げ試験での破壊発生位置の変化は押込み試験時の 0.1mm 以内に比べ 1 けた以上大きいことがわかり、このことから押込み試験時のき裂発生位置にボアや粗大粒子などの破壊に関与する欠陥がある確率は小さいと推定される。

また、図12は押込み試験時における試料表面での応力分布について圧子と試料の接触領域の境界条件を図中に示すように三角形の分布として検討を行った一例である。超硬合金 P20 (ヤング率 548.8GPa、ポアソン比 0.225) を想定し、要素数 1193 で弾性平面ひずみ条件での有限要素法による解析結果である。なお、圧子と試料の接触幅は実験値を用いた。曲げ試験では周知のように両支点間で主応力は三角形分布となるが、押込み試験では図のように圧痕外側近傍で応力集中を示し、このことが破壊の発生位置が変化しない一因と考えられる。すなわち、大きな応力集中を示す場合、破壊の起点としてはボアや粗大粒子ではなく前述のように粒界や界面など局所的に強度の低い領域が考えられる。図12の場合圧痕近傍では 0.5mm 以上離れたところより約 3 倍の大きな応力値を示すことからボアなどの大きさの 1/9 程度の粒界の大きさがあれば破壊の起点とな

り得ることがわかる。この場合、境界条件や弾性変形を仮定しているなど問題はあなが応力集中により粒界や界面などの局所的な強度の低い領域でき裂を発生することが十分予測される。

一方、切削場においても工具一切りくず接触領域後方のすくい面上で引張りの応力集中を生じると考えられる。この応力集中によりき裂を発生するかどうかは押込み試験との応力値、応力状態の比較が必要であるが、欠損破面には多くの場合明らかな欠陥が観察されないことから工具一切りくず接触領域後方のすくい面上での応力集中により粒界や界面などの局所的な強度の低い領域が欠損の起点となることが推定される。

以上のことから欠陥の分布と応力分布状態が破壊発生の微視的起点に大きな影響を持つことがわかる。しかしながら、これは引張応力場での検討であり、圧縮応力場については図7で述べたように粒径程度の小さなき裂の発生と合体がみられることから、このことはさらに検討を要する。

4. 結 論

切削工具材料を対象として、押込み試験における破壊の発生挙動を検討し、次の結果を得た。

- (1) 押込み試験におけるき裂は圧痕外側において、炭化物粒界あるいは炭化物と結合相との界面を伝播し、圧子直下においては粒界と粒内で粒界程度の小さなき裂が観察され、繰返し負荷によりそれらが合体することがわかった。
- (2) 圧痕外側でのき裂発生限界荷重は工具材料、表面性状に依存するとともに、繰返し負荷によって減少することがわかった。
- (3) 押込み試験と曲げ試験時の破壊発生の起点および応力分布の比較から、応力分布状態により破壊の発生挙動が変化し、引張応力場において応力集

中を示す場合には強度の低い粒界や界面を、応力集中を示さない場合には粒径より大きいボアや粗大粒子などの欠陥を起点として破壊を生じる。

- (4) 切削時においても工具一切りくず接触領域後方のすくい面上で応力集中を生じることから、押込み試験時と同様の破壊発生機構が考えられ、界面や粒界などの局所的に強度の低いところで欠損に至るようなき裂を発生することが推定された。

終わりに、本研究は姫路工業大学在籍中に行ったものであり、当時学生であった故森田満君に実験の協力をいただいたことを記し、感謝とともに哀悼の意を表する。

参 考 文 献

- 1) P.B.Anderson ; Hartmetalle erhohter Zahigkeit, Planseeber. Pulvermet., 15, (1967)180.
- 2) 大槻悦夫, 増田良道; 超硬合金の限界強度に関する一考察, 日本金属学会誌, 47, 12(1983)1068.
- 3) 柴坂敏郎, 橋本英文, 上田完次, 岩田一明; 切削工具のぜい性損傷に関する破壊力学的研究 (第2報), 精密機械, 49, 10(1983)1435.
- 4) 例えば, 三次章義, 原 昭夫, 杉本良信; 超硬合金におけるビッカース硬度圧痕周辺の亀裂の検討, 日本金属学会誌, 31, 10(1967)1123.
- 5) T.R.Wilshaw ; The Hertzian Fracture Test, J. Phys. D: Appl. Phys., 4, (1971)1567.
- 6) H.E.Exner : The Influence of Sample Preparation on Palmqvist's Method for Toughness Testing of Cemented Carbides, Trans. AIME, 245, (1969)677.
- 7) J.L.Chermant and F.Osterstock : Fracture Toughness and Fracture of WC-Co Composites, J. Mater. Sci., 11, (1976)1939.
- 8) 大槻悦夫, 増田良道; WC-Co超硬合金のクラック伝播経路, 日本金属学会誌, 44, 2(1980)117.