

微視割れの動的検出に基づいた高強度金型材料の

信頼性向上に関する研究

首都大学東京 大学院理工学研究科 機械工学専攻

教授 若山修一

(平成 18 年度一般研究開発助成 AF-2006019)

キーワード：超硬合金、サーメット、損傷の AE モニタリング

1. 研究の目的と背景

加工の高速化、高応力化に伴い、切削工具等の耐久性・耐磨耗性を向上させるために超硬合金、サーメットさらにはセラミックスなどのより高強度・高硬度の材料の利用が進められ、あるいは検討されている。本研究は、それら材料系の信頼性確保のための技術開発を最終目標とするものである。

上記のような高強度材の利用により、加工の高効率化・低コスト化が可能となる上、これらの材料は表面の平滑度はより低強度の材料よりも高くすることができ、製品の表面性状を向上させることで製品の付加価値を高くするという効果もある。しかしながら、超硬合金、サーメットさらにはセラミックスなどの高強度材料は塑性変形能が低いため本質的な脆性材料であり、材料の最終強度がポアや不純物などの材料組織の不均一性に起因するマイクロクラックなどの微視損傷に強く支配され、それらを起点とした最終破壊が生じることが多い。したがって、それらの微視損傷を的確に検出・制御することがこれらの材料の用途を広げるためのキーテクノロジーといっても過言ではない。

上記のような損傷と強度との相関はこれまでも多く研究されている¹⁻³が、それらは最終破断のみに着目したものである。しかしながら、最も脆性といえるセラミックスにおいても先在欠陥から直ちに最終破断に至る

のではなく、それらからマイクロクラックなどの微視損傷が生成・蓄積して主き裂を形成し、主き裂の進展によって破壊に至ることが著者らの研究により明らかになっている^{4,5}。

本研究では、信頼性確保の技術の確立のための最初の試みとして、超硬合金およびサーメットを対象として曲げ試験中の微視損傷の AE モニタリングを行った。また、曲げ破壊の際の引張面の表面観察結果と AE 計測結果を比較・検討し、微視破壊過程を評価した。特に、AE 信号の特徴的な周波数を抽出するために、WT(Wavelet Transform)解析の技術⁶を応用し、AE 信号の音源を同定する手法を開発し、今後の信頼性確保のための基礎的知見を明らかにした。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材には Ti (C, N) 基サーメット及び WC-Co 合金を用いた。放電加工により 4×3×40mm に加工し、曲げ試験中に引張面となる面に 0.1mm の面取りを施し、表面欠陥を除去するために引張面及び面取り面に鏡面研磨を施した。

2.2 4 点曲げ試験および AE 計測

本研究では 4 点曲げ試験を JIS R 1601「ファインセラミックスの曲げ強さ試験方法」に基づいて行った。実験

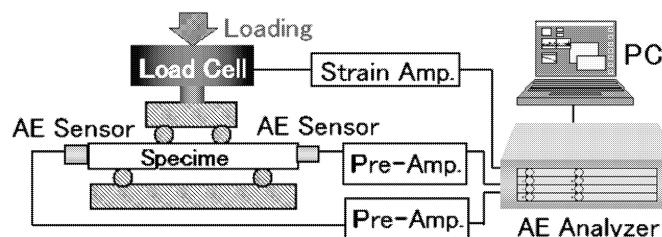


図 1 4 点曲げ試験および AE 計測システム

装置の概要を図1に示す。試験機には10kN変位制御万能試験機（島津製作所製）を用い、内スパン10mm、外スパン30mm、クロスヘッドスピードは0.1mm/minとした。AE計測条件は、ゲインがプリアンプ40dB、メインアンプ40dBのトータル80dB、計測しきい値はプリアンプ入力換算で18・V、測定周波数帯域100~500kHzとした。AEセンサは、試験片両端に瞬間接着剤で接着し、各chへのAE波到達時間差と材料の縦波音速を利用しAE発生源の一次元位置標定を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 4点曲げ試験におけるAE発生挙動

超硬合金における4点曲げ試験中のAE発生挙動の一例を図2に示す。図2(A)は応力とAE累積エネルギーの

履歴であり、AE累積エネルギーに関しては、データ収集後に後処理を施してしきい値 V_{th} を変化させた。図2(B)は各しきい値に対応したAE信号の位置標定結果であり図中の破線は最終破断位置である。図2(C)は応力とAE振幅の履歴で、各しきい値を破線で表した。図2から理解されるように、最終破断以前に高振幅AEが最終破断位置の近傍に検出され、AE累積エネルギーが急増する。これにより、超硬合金においてもセラミックスと同様に、最終破断以前に主き裂形成過程が存在する事が推察される。また、この急増点はしきい値によって変化しないことが確認され、さらに図2(C)から分かるように試験途中から低振幅AEが連続して検出された。なお、サーメットについての結果を図3に示すが、超硬合金と同様の傾向を示している。

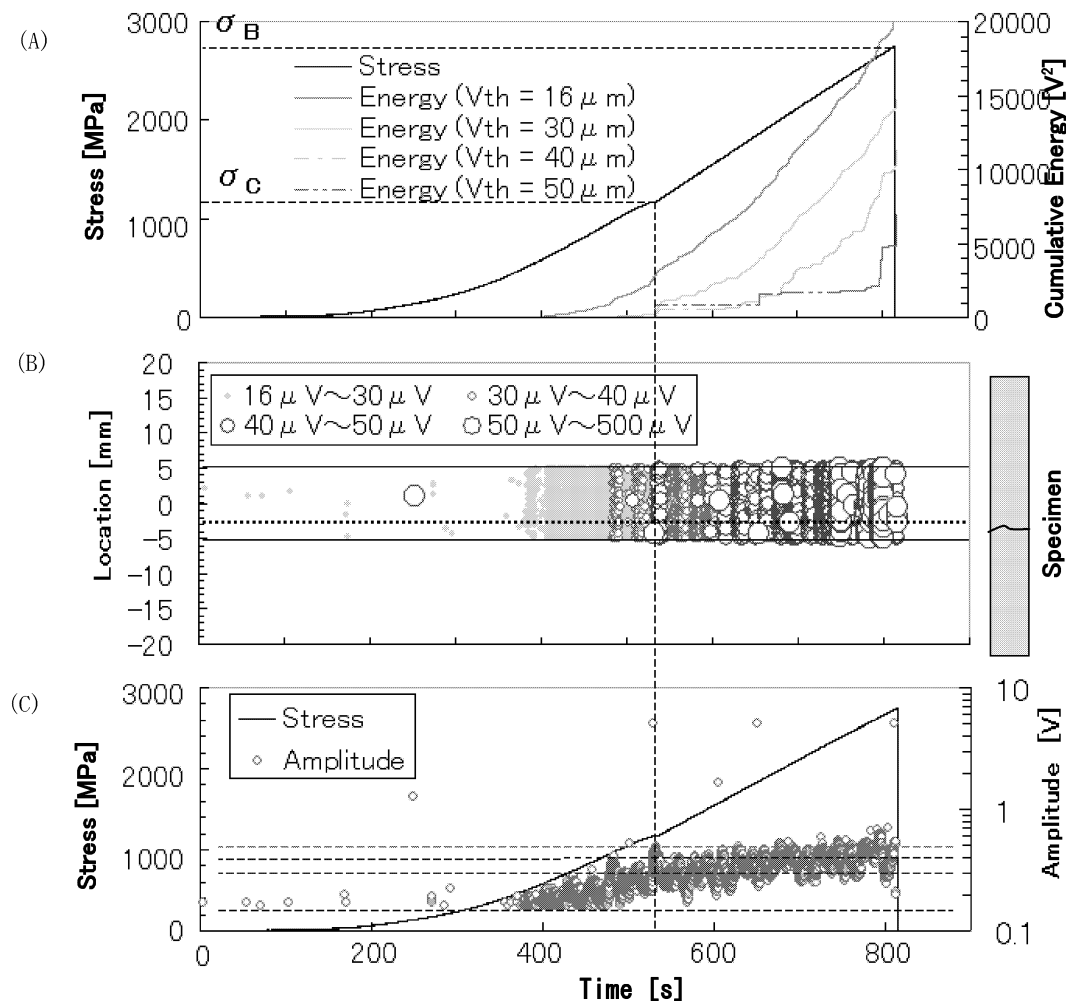


図2 超硬合金の曲げ破壊におけるAE発生挙動

(A) 曲げ応力および累積AEエネルギー (B) AE位置評定 (C) 曲げ応力およびAE振幅

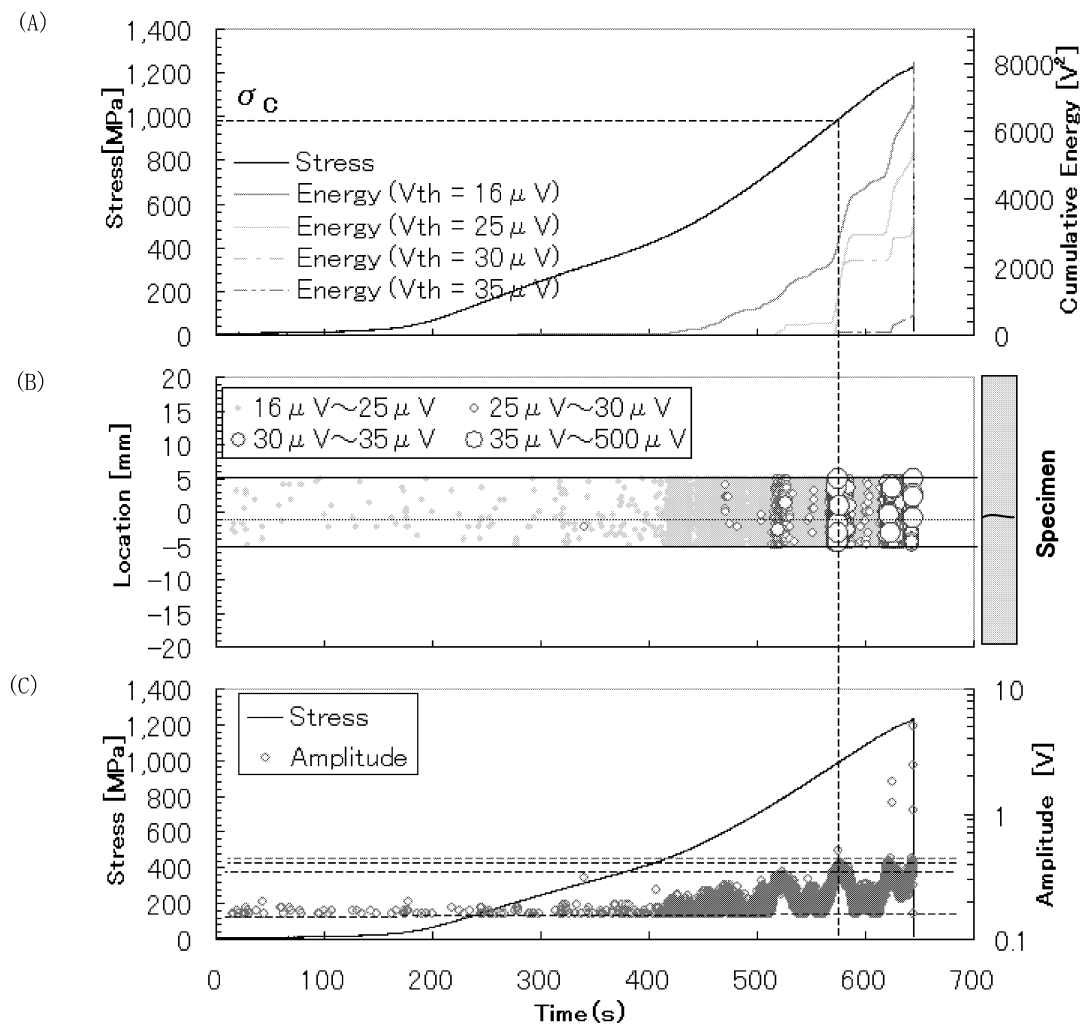


図3 サーメットの曲げ破壊におけるAE発生挙動

(A) 曲げ応力および累積AEエネルギー (B) AE位置評定 (C) 曲げ応力およびAE振幅

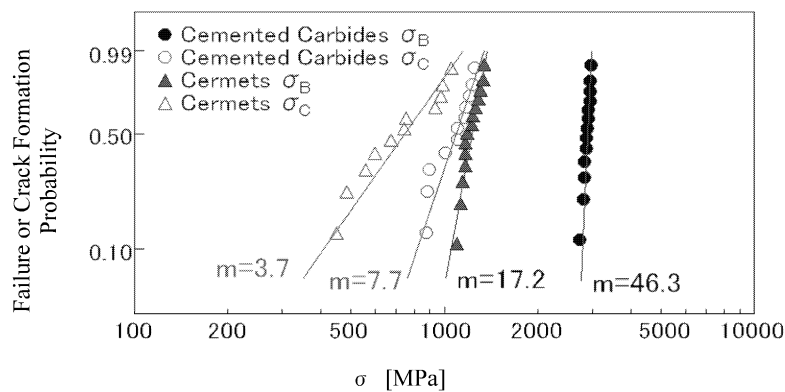


図4 抗折力 σ_B および臨界応力 σ_C のワイブルプロット

3.2 抗折力 σ_B と臨界応力 σ_C

今回観測されたAE急増点における応力を主き裂形成臨界応力 σ_C とし、抗折力 σ_B 及び臨界応力 σ_C のワイブルプロットを図4に示す。両材料ともに σ_C の方が σ_B に比

べばらつきが大きい。サーメットと超硬合金を比較すると、超硬合金のばらつきが小さく、破壊靱性が高い方が強度のばらつきが小さいという傾向がよく現れている。また、それぞれの材料の σ_B 及び σ_C の平均値を表1に示

表 1 抗折力 σ_B および臨界応力 σ_C の平均値

| Material | σ_B [MPa] | σ_C [MPa] |
|------------------|------------------|------------------|
| Cermet | 1210 | 750 |
| Cemented Carbide | 2890 | 1080 |

す。サーメットにおいて σ_B は σ_C に対して約 1.6 倍であるのに対して超硬合金においては約 2.7 倍にまで達する。これは、超硬合金の方がサーメットと比較してき裂進展に対する抵抗力が高いことに起因すると考えられる。

3・3 4点曲げ途中止めによる引張面の観察

サーメット及び超硬合金の破壊過程を直接観察するために4点曲げ試験を途中止めし、途中まで負荷を与えた試験片の引張面の観察を行った。それぞれの材料のSEM写真を図5及び図6に示す。サーメットにおいて主き裂形成臨界応力以下の800MPaまで負荷した試験片には、多数の微視き裂が確認された。これらの微視き裂は特にポアが集中している箇所で見られ、先在欠陥である引張面上のポアからき裂が発生したことや、また表面には現れてはいないものの表面付近に存在するポアからき裂が発生したことが推察される。また、炭化物粒間のバインダ相に微視的な塑性変形も観察されている。一方、臨界応力付近の1000MPaまで負荷した試験片には、さらに多くの微視き裂が確認されポアから発生したき裂が進展及び合体している。超硬合金において臨界応力以上の1500MPa負荷した試験片には、バインダ相やWC-WC粒界に多数の微視き裂が確認された。さらに、抗折力付近の2500MPaに至るまで負荷した試験片には、さらに多くの微視き裂が内スパン全体に確認された。

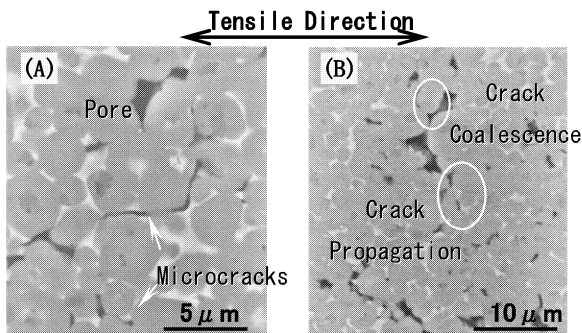


図5 サーメットの引張面のSEM写真
(A) 800MPa. (B) 1000MPa.

3・4 AE信号の発生源の同定と微視破壊過程

前掲の表1より、サーメットはより脆性であり、主き裂形成から最終破断までの寿命が短いことが示唆される。そこで、サーメットの曲げ試験中にAE信号の波形を記録し、それらに対してWT解析⁶を行って特徴的な周波数を抽出し、音源の同定を行うとともに微視破壊過程を検討した。ここでは、センサには広帯域型を用い、測定周波数帯域は95~850kHzとした。試験中に検出した2つの典型的な信号を図7に示す。図7(a)は300MPaまでの負荷で観測され、100~200kHz付近に周波数ピークが存在し、その波形は連続型である。同様の信号は領域IVにおいても検出された。(b)はAE急増点で検出され、300~500kHz付近にピークを有し、その波形は突発型である。また、急増点以降においては、(a)(b)の信号を重ね合わせたような信号が検出された。以上の引張面観察結果および波形解析結果より前者の連続型の信号がバインダ相の塑性変形に対応し、後者の突発型の信号は微視き裂の生成・成長に対応することが理解される。

以上のことから、サーメットの微視破壊過程は以下のように推察される。

- (1) 炭化物粒とバインダはともに弾性変形し、炭化物粒界などに応力集中が生じることにより粒界破壊を生じる。
- (2) バインダ相が降伏し塑性変形。また、これに起因して低周波数の連続型AEが検出される。
- (3) ポアなどの先在欠陥から安定き裂進展を開始し、最終破壊の起点となる主き裂が形成される。累積AEエネルギーが急増する。
- (4) 主き裂の成長過程であり、突発型AEが最終破断の近傍で検出される。

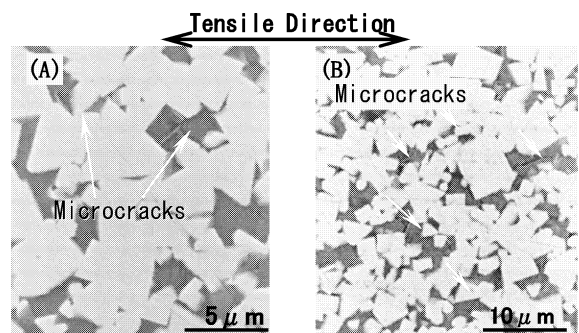


図6 超硬合金の引張面のSEM写真
(A) 1500MPa. (B) 2500MPa.

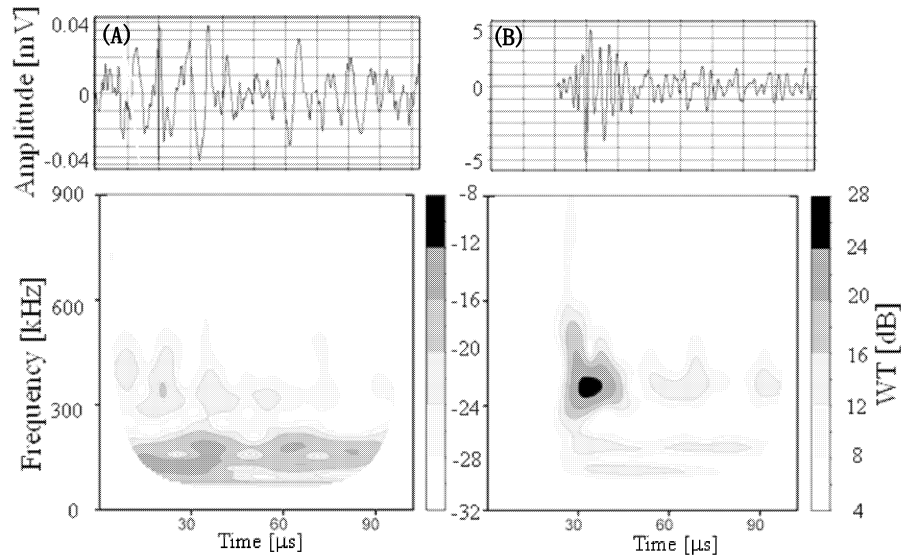


図7 サーメットの曲げ破壊で検出されたAE波形とWT解析結果
(A) ~300MPa (B) AE急増点

(5) 応力拡大係数が不安定破壊を生じる臨界値 K_c に達し、最終破断に至る。

4. 結言

本研究では、金型や工具用の高強度材料として利用が進められている超硬合金およびサーメットの曲げ試験を行い、曲げ破壊中に発生する微視損傷をAE法でモニタリングした。

従来著者らがセラミックスに対して得た研究成果と同様に、両材料の曲げ破壊の際に、主き裂形成に対応するAE急増点が観察され、その際の曲げ応力を主き裂形成臨界応力 σ_c として評価できた。両材料を比較すると超硬合金では抗折力 σ_B および臨界応力 σ_c ともばらつきは小さく、主き裂形成後の余寿命も十分に大きいため、この材料の信頼性は高いことが微視的な観点からも確認できたといえる。一方、サーメットの場合は強度のばらつき及び主き裂形成後の余寿命の観点から、その使用に関しては、税制に対する十分な配慮が必要であることが示された。

本研究では、特にサーメットに対してAE信号の詳細な解析を行い、粒子間のバインダ相の塑性変形および粒子界面のマイクロクラックからの信号を判別できることを明らかにするとともに、微視破壊過程を検討した。これらは、材料開発への指針となるとともに、製品の健全性検査など使用技術の確立への基礎的な知見となる

ものであろう。

今後は、サーメットのみならず、より高強度・脆性なセラミックスに対しても研究範囲を拡張し、高強度金型の信頼性を確保する技術の開発を進める所存である。

謝辞

本研究の遂行に対し、天田金属加工機械技術振興財団から研究助成金によってご支援いただいたことを記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) E. A. Almond and B. Roebuck, *Met. Sci.*, (1977), 11, 458
- 2) J. Xiong, Z. Guo, B. Shen, and D. Cao, *Int. J. Ref. Met. Hard Mater.*, 25, (2007) 256-262
- 3) H. Suzuki, H. Matsubara and T. Saitoh, *J. Japan Inst. Metals*, 48(1984), 1011-1016
- 4) S. Wakayama, Y. Suzuki, T. Oshima and S. Kobayashi, *JSME International Journal, Ser. A*, Vol. 49, No. 1, pp. 11-14 (2006)
- 5) S. Wakayama and K. Ishiwata, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 96-105 (2009)
- 6) T. Hayashi and S. Wakayama, *J. Acoustic Emission*, 26(2008), 160-171