

微視損傷の AE モニタリングを利用した 高強度金型の信頼性保証技術の開発

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 21 年度一般研究開発助成 AF-2009023)

キーワード：高強度金型、脆性材料、信頼性、保証試験、微視損傷の 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高強度・高硬度の材料の利用が進められている。このような高強度材料の利用により、加工の高効率化・低コスト化が可能となる上、表面の平滑度をより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最終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、セラミックスなどの高強度材料は塑性変形能が低い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。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および金型等の信頼性を確保するためのキーテクノロジーといっても過言ではない。

材料の信頼性確保の手段としては、従来から超音波探傷法や放射線透過法などの非破壊検査による損傷の検出、および供用前に過大負荷を与え低強度の(すなわち危険な損傷の含まれる)製品を除去する保証試験、が利用されてきた。しかしながら、脆性材料では最終破断の起点となる欠陥の大きさ、すなわち許容欠陥寸法は数 10～数 100 μm であり金属材料に比べて極めて小さい。

また、超硬合金やサーメットのような多相材料では非破壊検査による微小な欠陥の検出は容易でない。一方、保証試験では、過大な負荷のために損傷が発生・蓄積し強度が低下した材料が生存品に含まれることが指摘されている^{1),2)}。

このような問題を踏まえ、著者らはセラミックス³⁾ および超硬合金・サーメット^{4),5)}の微視破壊過程をアコースティック・エミッション(AE)法により評価し、最終破断以前にその起点となる主き裂の形成が形成されることを明らかにするとともに、AE 発生挙動を解析することでその臨界応力が評価できることを示してきた。

本研究では、従来の研究成果を応用し、高強度金型材料に使用される脆性材料の信頼性を向上する技術の開発を目的とし、保証試験の際の損傷の発生・蓄積を AE 法で監視し、生存品の中の損傷による強度劣化した製品を排除するハイブリッド保証試験を提案する。さらに、典型的な脆性材料のセラミックスに対して実証試験を行い、ハイブリッド保証試験の信頼性確保に及ぼす効果について検証した。

2. 実験方法

2.1 試験片

供試材には、密度 3.97 g/cm³ (相対密度>99.9%)、平均粒径 1.4 μm 、ヤング率 400 GPa の高純度アルミナを用

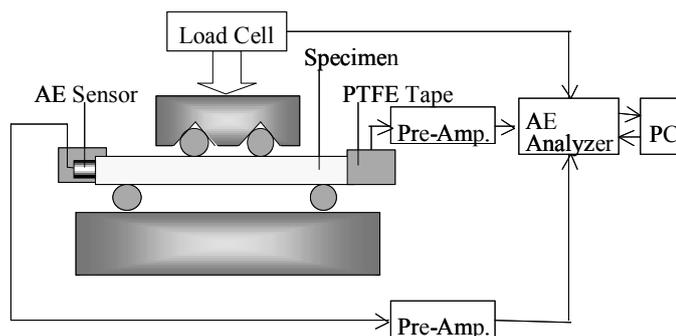


図 1 曲げ試験および AE 計測システムの模式図

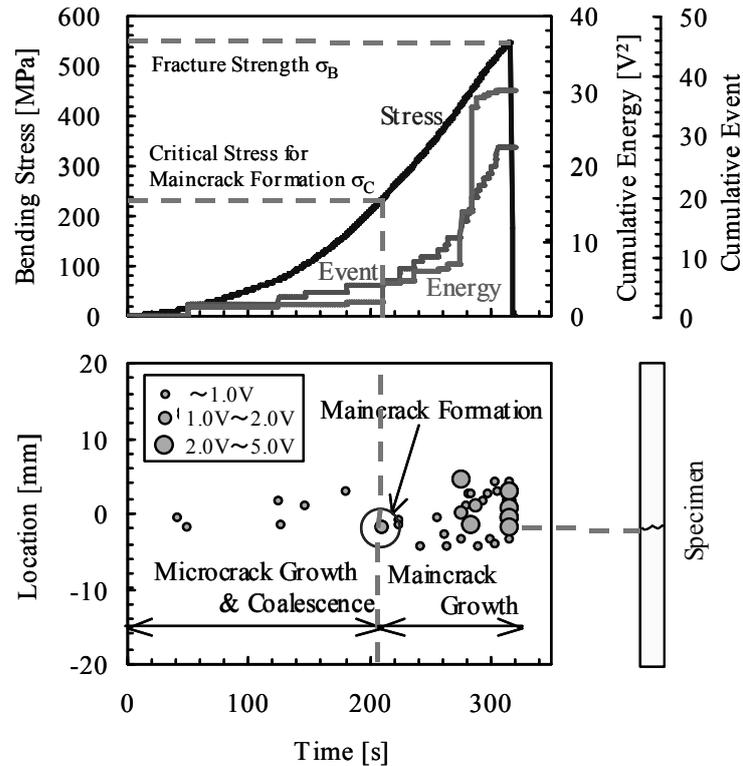


図2 4点曲げ試験およびAE計測結果

いた。引張面及び面取り面には、3、1 μ mのダイヤモンドスラリーを用い鏡面研磨を施した。また、試験片中の水分による応力腐食割れの影響を抑制するため、真空中、温度150 $^{\circ}$ C、保持時間2hで水分除去を行った。

2.2 曲げ試験およびAE計測

保証応力を決定するため、大気中において、内スパン10mm、外スパン30mm、クロスヘッドスピード0.1mm/minで4点曲げ試験を行った。試験システムの模式図を図1に示す。曲げ試験中の破壊過程はAE計測によって評価した。試験片両端に接着したAEセンサー(共振周波数200kHz)から得られたAE信号は、プリアンプを介して増幅しAEアナライザーへと転送した。AE計測条件は、ゲインはプリアンプ40dB、メインアンプ40dBのトータル80dB、計測しきい値18 μ V、測定周波数範囲100~500kHzとした。

2.3 保証試験および残留強度

保証試験は、4点曲げ試験と同様の方法で行った。クロスヘッドスピード0.2mm/minで保証応力まで負荷し、10分間保持した後、0.1mm/minで除荷した。

保証試験を通過した全ての試験片を、AEエネルギー急増点の有無で分類した。その後、分類したそれぞれの試験片に対し、4点曲げ試験と同様の方法により残留強度測定を行った。

3. 結果および考察

3.1 曲げ試験中のAE発生挙動と主き裂形成臨界応力の評価

図2に4点曲げ試験中の典型的なAE発生挙動、すなわち累積AE事象数と累積AEエネルギーの履歴を示す。これより、最終破断以前にAEエネルギー急増点が認められる。図より、曲げ試験の初期ではエネルギーの小さい信号が発生し、その後AE急増点において大きな信号が検出されたことが確認できる。また、2chセンサーへのAE信号の到達時間差と試験片中の縦波の伝播速度からAE発生源の一次元位置標定を行った結果、AE急増点以後は大きな信号の発生位置が、図の右方に示した試験片の最終破断位置付近に集中していることから、セラミックスの破壊は、微視的な損傷の蓄積による主き裂の形成、主き裂の進展によって生じることが理解される。

図のように、最終破壊時の応力から破壊強度 σ_B を、またAE急増点の曲げ応力から主き裂形成臨界応力 σ_C を決定した。ワイブル統計に従って平均値を算出したところ、 σ_B 、 σ_C の平均値はそれぞれ501MPa、238MPaであった。これらの結果から、後述の保証試験における保証応力は破壊強度 σ_B より十分小さく、試験片の5割に主き裂が形成されると予想される応力200MPaに設定した。

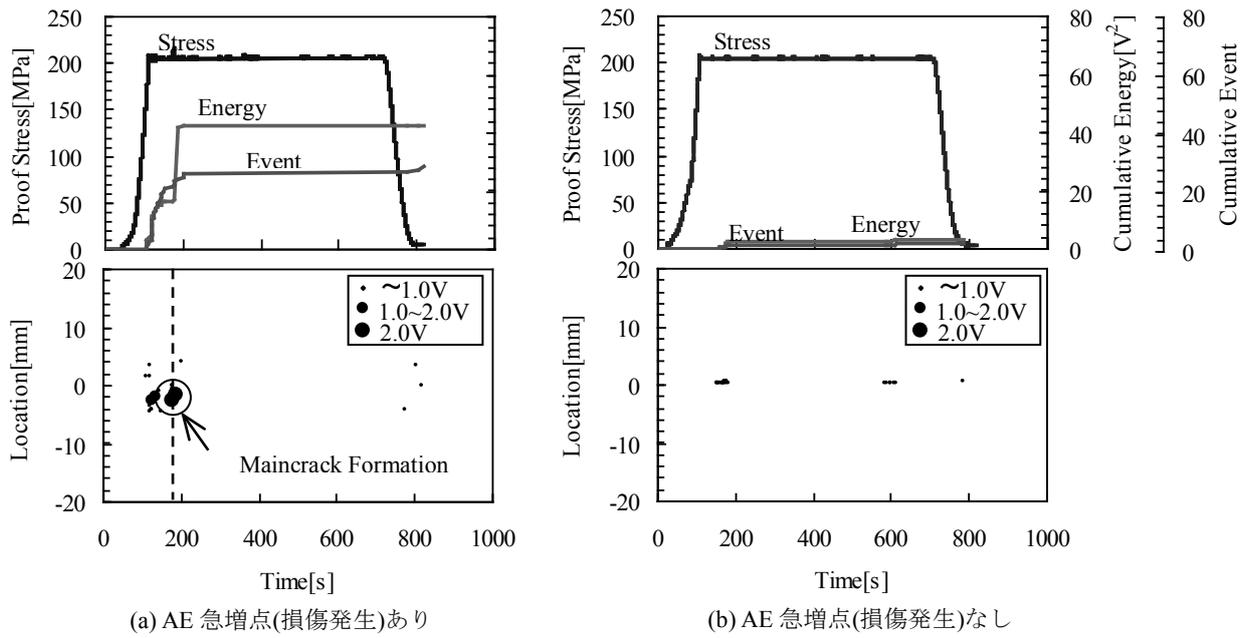


図3 保証試験中の AE 発生挙動

3.2 保証試験中の AE 発生挙動

大気中及びPS中における保証試験時の微視損傷過程をAE法により監視した。図3に保証試験中のAE発生挙動を示す。図3(a)では、試験中にAEエネルギー急増点を確認され、この点が主き裂の形成に対応することが示唆される。一方、図3(b)では、大きなAE信号は観察されなかった。これは、保証試験中にほとんど損傷を受けていないことを示唆している。

以上から、本研究では1V以上のAE信号が検出され

たものは主き裂が形成されたと見なし、保証試験を通過した全ての試験片を、AEエネルギー急増点の確認されたもの、確認されなかったものの2種類に分類した。また、前者を“損傷あり”、後者を“損傷なし”と定義した。なお、全部で39本の試験片に対して保証試験を行ったが、破断した試験片は0本であり、損傷なしと判別されたものは22本、損傷ありは17本であった。

3.3 残留強度試験中の AE 発生挙動

保証試験中に AE モニタリングで損傷の有無を判別

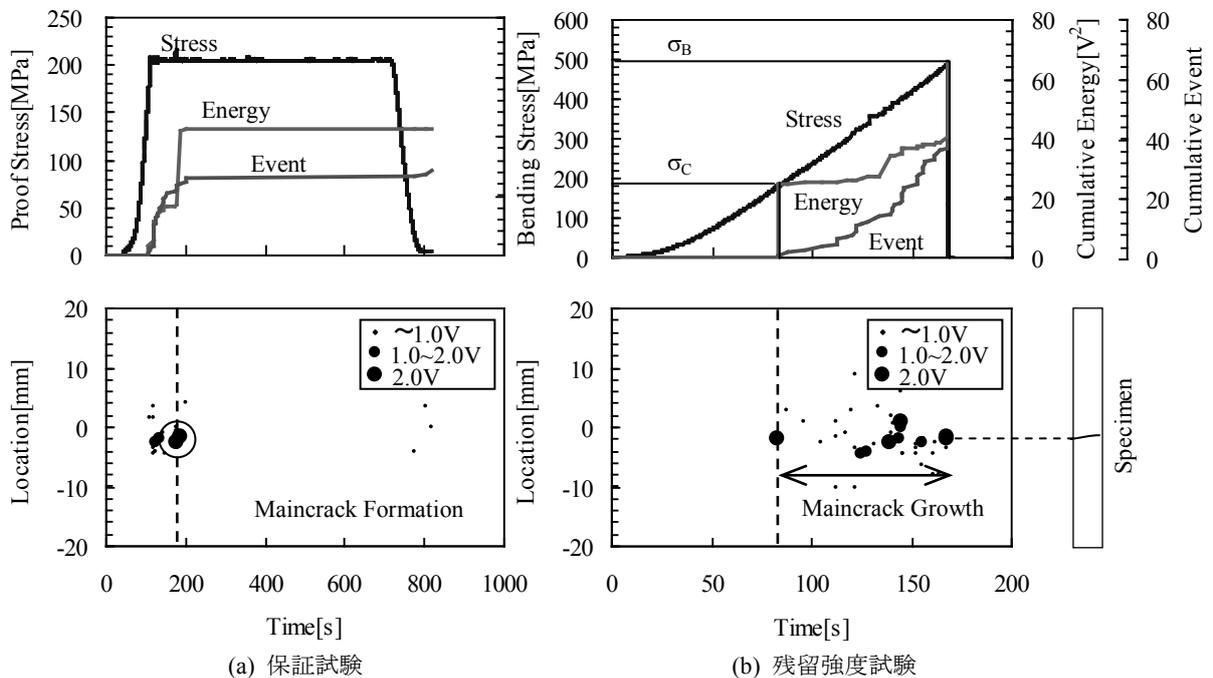


図4 同一試験片の保証試験および残留強度試験中の AE 発生挙動

した試験片に対し、残留強度測定を行った。図4に同一試験片の保証試験および残留強度試験中のAE発生挙動を示す。図4(a)は図3(a)と同一であり、200MPaの保証応力保持中に主き裂の形成に対応するAE信号の急増が認められる。一方図4(b)から同じ試験片の残留強度試験の際には、保証応力と同じ約200MPaまでAE信号は検出されず、200MPa以降に大振幅のAE信号が検出されている。また、残留強度試験中に検出された大振幅のAE源の位置は保証試験中とほぼ同じであり、図の右方に示した試験片の最終破断位置と一致している。以上から、残留強度試験では、その前の保証試験で荷重された最大応力(=保証応力)までは微視損傷の発生はなく、保証試験中に形成された主き裂がその応力で進展を開始し最終破断に至っていることが理解される。

3.4 ハイブリッド保証試験の効果

保証試験を行った39本の試験片すべてが生存したが、それらの残留強度を測定し、ワイブル統計に従って平均値を算出した。保証試験中に損傷ありと判別された試験片の平均残留強度は491MPaであり、損傷がなかったものでは569MPaであった。また、両者を合わせた平均値は損傷の有無を判別しない従来の保証試験の生存品の平均強度に対応するが、529MPaであった。

以上より、損傷の発生・蓄積をAE法で監視するハイブリッド保証試験により、従来の保証試験よりも高い残留強度を保証できることが示された。すなわち、本研究により、従来の保証試験の生存品に含まれている損傷により強度が低下した製品を、ハイブリッド保証試験では判別して排除できる可能性が明らかになったと結論できる。

4. 結び

本研究では、保証試験の際の損傷の発生・蓄積をAE法で監視し、生存品の中の損傷による強度劣化した製品を排除するハイブリッド保証試験を提案し、典型的な脆性材料であるアルミナセラミックスの曲げ試験に適用してその効果を実証した。すなわち、損傷の発生をAE検出することで、残留応力が向上することを明らかにできた。

今後、実製品に応用するための課題としては、保証応力の大きさや負荷時間の最適化、負荷方法、ノイズ対策や判別条件の決定法などが挙げられ、さらに研究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、心より謝意を表します。

参考文献

- 1) J. E. Ritter Jr, P. B. Oates, E. R. Fuller Jr and M. Wiederhorn: J. Mater. Sci., 15, (1980), 2275.
- 2) E. R. Fuller Jr and M. Wiederhorn: J. Mater. Sci., 15, (1980), 2282.
- 3) 若山修一, 小路孝志, 西村尚: 日本機械学会論文集, A57, (1991), 504.
- 4) K. YAMADA and S. WAKAYAMA: Proc. International Congress and Exhibition EURO PM 2009, (2009), 247.
- 5) 若山 修一: 天田金属加工機械技術振興財団 第22回研究概要報告書, (2010), 101.
- 6) W. Weibull: J. Appl. Mech., 18, (1951), 293