



S. Wakayama

高強度金型の熱クラック防止に関する研究

若山 修一 *

1. まえがき

加工の高速化、高応力化に伴い、金型や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の利用が普及しているが、さらに被加工品の表面性状の向上を目指し、より表面平滑度の高いサーメット、さらにはセラミックスの使用が推進あるいは検討されている。しかしながら、これらの材料は塑性変形能が低い本質的な脆性材料であり、耐熱衝撃性が低いことが弱点になっている。

塑性加工中には、摩擦により金型が局部的に急加熱される場合や、加熱された金型の表面が潤滑油で急冷される場合に大きな熱応力が発生し、その繰り返し(熱疲労破壊)で熱クラックが発生することがある。また、押し出し金型を型枠に焼ばめで設置しようとした際に即時破断(熱衝撃破壊)を生じる例も知られている。これらの問題を解決するためには、熱応力を十分に考慮した金型設計技術や耐熱衝撃性に優れた材料の開発が不可欠であり、熱クラックの発生および進展、すなわち熱衝撃(疲労)破壊メカニズムの解明および評価法の確立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。

従来の熱衝撃破壊試験は、加熱した試験片を水中投下によって急冷し、その残留応力を測定する方法が用いられており、セラミックスの場合は JIS R 1648「ファインセラミックスの熱衝撃試験方法」に規格化され、サーメットにも利用されている。しかしながら、この試験では、評価できるのは臨界温度差のみであり、材料間の耐熱衝撃性の相対的な比較しかできない、などの問題点が指摘されている。熱衝撃破壊は、局所的な急冷や急加熱に起因する熱流束によって形成される温度場によって生じる遷移的な熱応力の下で、マイクロ損傷が発生・蓄積して巨視き裂(熱クラック)が生成される現象であり、熱衝撃の際の熱応力の評価、およびき裂の発生・進展などの破壊過程の評価、の2つを同時に行うことが不可欠である。

そこで本研究では、高強度金型における熱クラック発生防止技術の開発を目的とし、高強度金型に用いられる超硬合金、サーメットおよびセラミックスの熱クラック発生挙動の評価手法の開発を行った。特に、最も脆性的な破壊挙動を示すセラミックスを研究対象とし、後述のような著者らが開発したディスクオンロッド試験を改良して、種々の

熱応力比のもとでの熱クラック発生挙動を評価した。

2. 実験方法

2.1 試験片

試験片には代表的なエンジニアリングセラミックスであるアルミナセラミックスを用いた。

原料のアルミナ粉末(α - Al_2O_3)には大明化学工業(株)製タ イミクロン TM-D を使用し、4 MPa で一軸圧縮後、200 MPa で冷間等方加圧(Cold Isostatic Press, CIP)により成形体を得た。そして得られた円板状成形体を切削し任意の形状に加工した。その後、高温大気炉で焼結温度 1,500 °C、保持時間 2 時間、昇温・降温速度 5 °C/min. で焼結した。

得られた焼結体は両面を鏡面研磨し、厚さの調整と鏡面処理を施した。さらに、水分による応力腐食割れの影響を除去するため、真空中にて乾燥させ試験片とした。

なお、密度および開気孔率の測定は JIS1634 に従い行った。鏡面研磨後の試験片をリン酸でエッチング処理し SEM により微視構造を観察し、得られた画像から粒径の測定を行った。また、熱伝導率はレーザーフラッシュ法を用いて測定した。

2.2 ディスクオンロッド試験

前述のように、熱クラック発生挙動を理解するには、推移する熱応力場と、その下でのマイクロ損傷の発生・進展によって生じる熱クラックの発生過程の両方を同時に評価する必要がある。著者らは新たな熱衝撃破壊試験方法としてディスクオンロッド(Disc-on-Rod)試験法を開発してきた¹⁻³⁾。図1にディスクオンロッド試験の概要を示す。本試験では、予加熱したディスク状薄板試験片に低温に保持した金属ロッドを接触させ中央部のみを冷却することにより2軸引張熱応力を発生させて熱衝撃を与える。その際、金属ロッド下部に AE センサを取付け、金属ロッドを冷却媒体及び導波棒として用いることにより、AE センサを保護すると同時に微視割れなどの損傷に伴う AE 信号を検出し微視破壊過程を評価することが可能である。また、試験中の試験片表面の温度分布を赤外線カメラでモニタリングし、FEM 解析によって熱応力場の時間履歴を計測している。なお、試験片の板厚は直径に比べて十分小さいため、板厚方向の応力は無視でき、平面応力としての取り扱いが可能である。

* 首都大学東京大学院理工学研究科機械工学専攻 教授

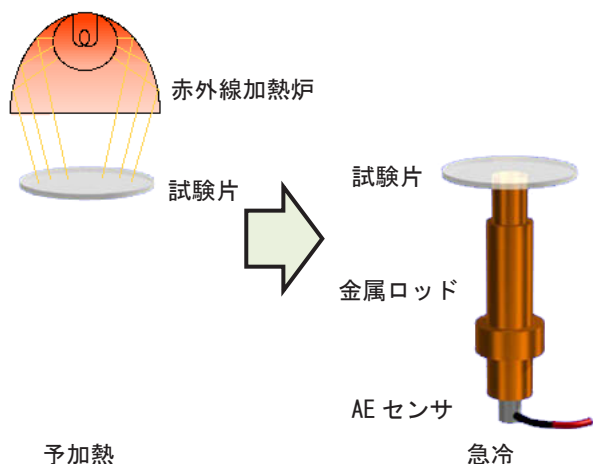


図1 ディスクオンロッド試験の概要

従来は円形薄板試験片を用いていたため、試験片中央部で得られる最大熱応力は等2軸であったが、本研究では、楕円形試験片とすることで任意の応力比が得られるように工夫した。

2.3 ディスクオンロッド試験システム

図2にディスクオンロッド試験システムの模式図を示す。円板もしくは楕円板試験片をIRランプで加熱し、ホルダごと回転・降下させて、冷却ロッドと接触させた。その際、降下速度をエアダンパで制御し、接触によるAE信号を抑制している。

試験中、IRカメラを用いて試験片表面の温度分布を約60 fpsで計測した。またビデオカメラによりき裂の発生を録画した。微視損傷の発生蓄積過程を明らかにするために、銅ロッド下部に取り付けられたAEセンサを用いてAE計測を行った。AEセンサには、共振周波数180kHzのアンプ内蔵の高感度センサを使用した。ゲイン55dB、しきい値6.9dB、計測周波数範囲25~2000kHzとした。

2.4 試験条件の決定(熱応力場のFEM解析)

実験に先立ち、所望の熱応力比の得られる試験片および

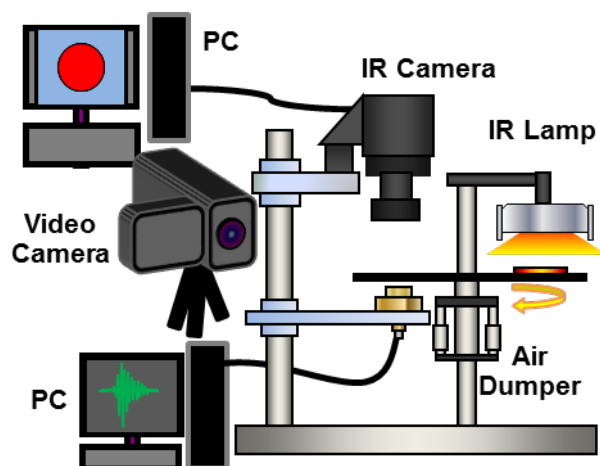


図2 ディスクオンロッド試験システム

冷却ロッドの形状を決定するため、熱応力解析を行った。試験片の1/4モデル(10接点アイソパラメトリック四面体要素)を作成し、ディスクオンロッド試験を伝熱解析と構造解析の連成問題として模擬した。

モデルは厚さを0.6mmとし、一般的なアルミナの物性値を与えた。所定の初期温度から、全体の表面を室温(25℃)に急冷した。その際、ロッドとの接触部以外には空気との熱伝達係数(5 W/m²・K)を与え、接触部の熱伝達係数hを大きくすることで中央部のみの急冷を再現した。

試験片とロッドの寸法のほか、初期加熱温度 T_0 、接触部の熱伝達係数 h を変えた解析を行い、中心で生じる最大熱応力及び熱応力比に着目し、最適な試験条件を検討した。

3. 結果および考察

3.1 熱応力解析による試験片・ロッドの形状の決定および試験片の作製

種々の条件で熱応力解析を行った結果、試験片中心部の熱応力比の挙動は試験片とロッドの形状に強く依存し、熱

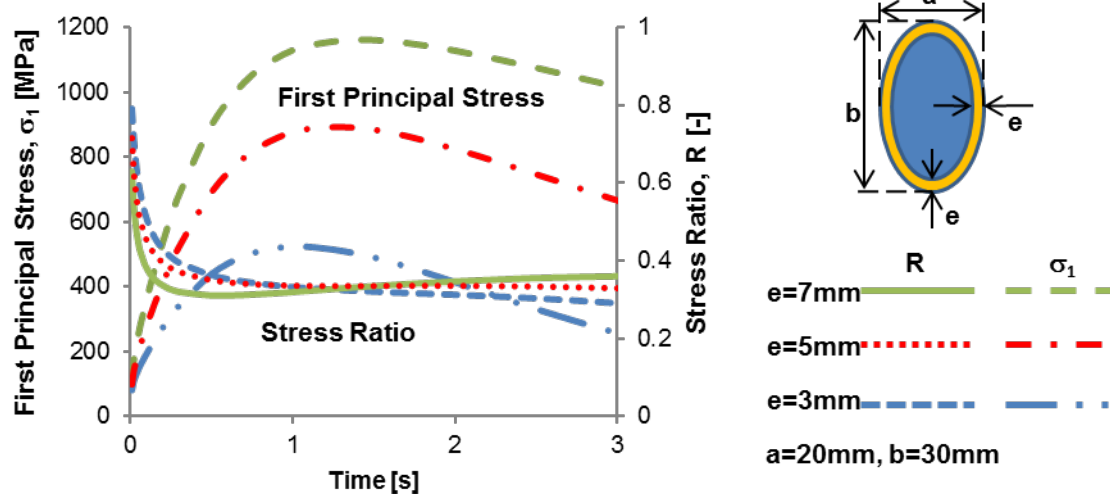


図3 熱応力解析結果

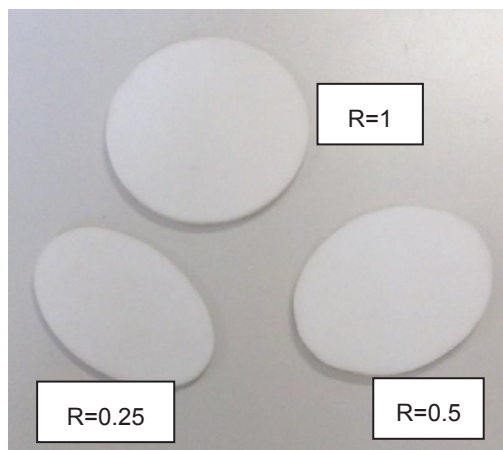


図4 作製した試験片

伝達係数や初期温度は熱応力比にはほとんど影響しないことが示された。

図3に熱応力解析結果の一例を示す。図右にあるように、ロッドの形状は、試験片の短径 a および長径 b から一定のクリアランス e を差し引いた寸法の楕円の場合が最も安定した応力比の挙動が得られることがわかった。図は、初期加熱温度 $T_0 = 850^\circ\text{C}$ 、接触部の熱伝達係数 $h = 2500 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ の場合の試験片中心部の長径方向の最大熱応力(第1主応力) σ_1 と熱応力比 R の推移を示すが、 $e = 7 \text{ mm}$ とした場合が最も大きな熱応力が発生するものの、熱応力比は $e = 5 \text{ mm}$ の場合が最も安定して一定の値を取ることが理解される。結局、本研究では、熱応力比 $R = 1$ の場合は $a = 35 \text{ mm}$, $b = 35 \text{ mm}$, $e = 5.5 \text{ mm}$, $R = 0.5$ では $a = 27 \text{ mm}$, $b = 35 \text{ mm}$, $e = 5 \text{ mm}$, $R = 0.25$ では $a = 21 \text{ mm}$, $b = 35 \text{ mm}$, $e = 5 \text{ mm}$ とした。

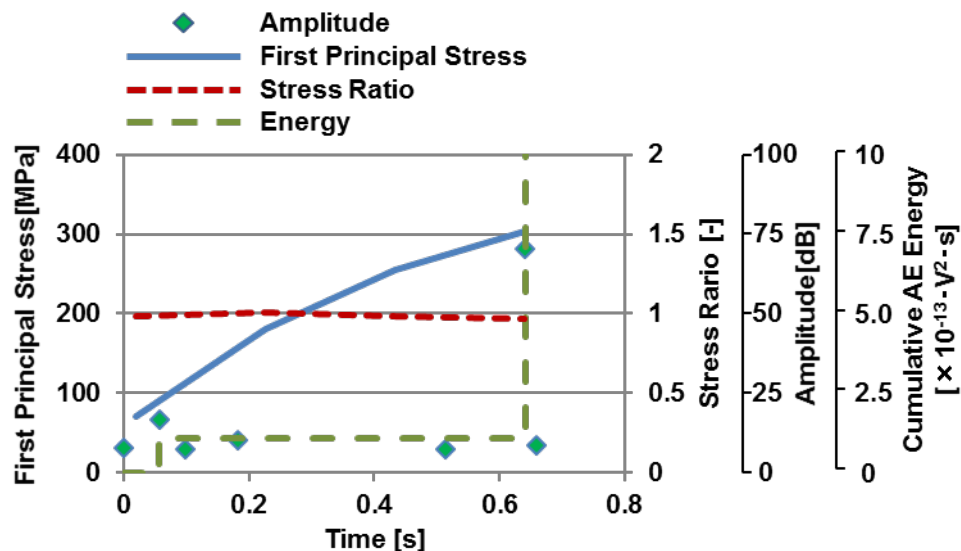
上述のように決定した条件に従って作成した寸法の試験片を図4に示す。いずれも厚さは 0.6 mm で統一した。得られた平均粒径は $2.5 \mu\text{m}$ 、見かけ密度は 3.93 g/cm^3 、

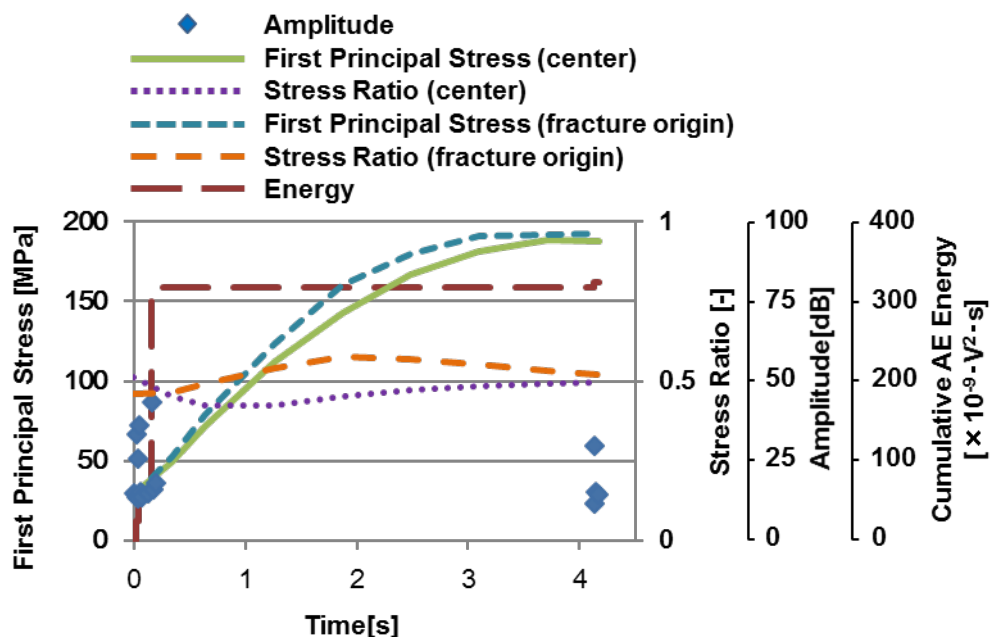
開気孔率は 0.32% 、熱伝導率は $35.3 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 、比熱は $0.76 \text{ J/(g} \cdot \text{K)}$ であった。

3.2 ディスクオンロッド試験

作成した試験片に対して、ディスクオンロッド試験を行った。図5に、円板試験片、すなわち熱応力比 $R = 1$ 、初期温度 $T_0 = 550^\circ\text{C}$ の場合のディスクオンロッド試験結果を示す。試験片中心部に最大熱応力 σ_1 が発生し、単調に増加して最終破断に至っている。また、試験片終身部の熱応力比 R はほぼ1で一定に推移しており、等2軸熱応力のもとで熱クラックが発生し破断に至ったことが理解される。図右に破断後の試験片を示すが、最大熱応力の発生した試験片中心部から放射状に直線的な熱クラックが進展している。AE発生挙動を見ると、試験初期から小振幅のAEが検出され、最終破断時に大振幅のAEが検出された。以上の結果から、急冷直後から最大熱応力の発生する試験片中心部にマイクロ損傷が発生・蓄積し、熱クラックが発生と同時に不安定進展して破断に至ったことが推察される。

一方、図6は、楕円板試験片を用いたディスクオンロッド試験、すなわち熱応力比 $R = 0.5$ 、初期温度 $T_0 = 650^\circ\text{C}$ の場合の試験結果である。この場合、試験片とロッドの接触が不均一(いわゆる片当たり)となり、最大熱応力は試験片中心から長軸方向にややずれた箇所発生し、そこを起点として熱クラックが発生して最終破断に至った。そこで、図には試験片中心部と最終破断位置(=最大熱応力発生位置)の両方の熱応力(第1主応力) σ_1 と熱応力比 R の推移を示す。図より、最終破断位置では中心部より常に大きな熱応力が発生している。また、接触は不均一であったものの、最終破断位置および試験片中心部のいずれでも熱応力比は目標とした値 0.5 付近で推移した。図右に破断後の試験片を示すが、最大熱応力発生点から発生した熱クラックは、湾曲と枝分かれを伴いながら進展し破断に至っているこ

図5 ディスクオンロッド試験結果 ($R=1$ 、 $T_0 = 550^\circ\text{C}$)

図6 ディスクオンロッド試験結果 (R=0.5、 $T_0 = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$)

とが理解される。また、試験開始の直後に大振幅の AE 信号が検出され、その後停滞した後、再び大振幅 AE 信号が検出されて最終破断に至っている。以上から、最大熱応力発生点で生成した熱クラックは一旦停止し、湾曲と枝分かれしながら進展して最終破断に至ったと推察される。

以上のように、試験片とロッドの形状を最適化することで任意の熱応力の下での熱クラック発生・進展過程の評価が可能になったことが示される。

4. 結び

本研究では、高強度金型材料の熱クラック発生を防止することを最終目標として、種々の熱応力比のもとでの熱クラック発生挙動の評価技術の開発を行った。著者らが開発したディスクオンロッド試験を改良し、試験片とロッドの形状を円形から楕円形にし、それらの寸法を最適化することで、任意の熱応力比のもとでの熱クラック発生過程の評価が可能となった。

一方で、試験片とロッドの接触が付近位置になる課題が残っており、今後は試験片ホルダやロッドのアライメント

の調整が容易な試験システムの開発を進める予定である。また、種々の機械的応力のもとでの破壊過程の評価も行い、例えば高強度金型材料の新規設計などによる熱クラック防止のための基礎的知見を明らかにしていく所存である。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの一般研究開発助成により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。

参考文献

- 1) S. Wakayama, S. Kobayashi and T. Wada, Journal of Acoustic Emission, Vol.23, pp. 150-155 (2005)
- 2) T. Sakai, S. Wakayama, G. Kametani, K. Yoshida and T. Akatsu, Bulletin of JSME Mechanical Engineering Journal, Vol. 1, No. 1, pp. 1-10 (2014)
- 3) T. Akatsu, H. Takashima, Y. Shinoda, F. Wakai and S. Wakayama, Int. J. Appl. Ceram. Technol., 1-9 (2016)