

510 不均質材の熱衝撃実験における臨界温度差の評価

Evaluation of the Critical Temperature Difference for the Heterogeneous Material in the Thermal-Shock Experiment

○ 石原外美* (富山大), 五嶋孝仁*, 柴田博司** (富山商船高専),
清水理能* (富山大), 岩脇章二 (ヤンマーディーゼル)

*Department of Mechanical Engineering, Toyama University, Gofuku3190, Toyama 930-8555, Japan

** Department of Computer Engineering, Toyama National College of Maritime Technology, Shinminato, Toyama, 933-0293, JAPAN

Key Words: Thermal Shock, Heterogeneous Material, Critical Temperature Difference, FEM.

1. 緒言

硬脆材料に熱衝撃を与えると微視割れが材料表面に発生する。本研究では、超硬合金を供試材として熱衝撃時における微視き裂の発生機構について以下の3点に注目して研究を行った。まず超硬合金のWC/Co界面の割れ強さを静的曲げ実験により調査した。ついで熱衝撃を与えたときに試験片高さ方向に生じる温度勾配によって発生する巨視的な熱応力を評価した。最後に場所に関して均一な温度場であったとしても経時に変化する温度により結晶粒界をはさむ熱膨張率の違いや結晶の異方性等によって、結晶粒内部及び粒界に発生する微視的応力を評価した。その結果、臨界冷却温度差 ΔT_c の熱衝撃時にはWC/Co界面に発生する全熱応力は界面の割れ強さに匹敵し、微視割れを発生させるのに十分であることを明らかにした。これらの知見を基に ΔT_c の予測法を提案し、様々な材料に対してこの予測法の有用性を確認した。

2. 超硬合金のWC-Co界面の割れ強さ

2.1 試験片 試験として、市販の超硬合金が用いられた。その化学成分はWC:72,TiC:8,TaC:8,NbC:2,Co:10(wt%)である。試験片の形状と寸法は、 $8 \times 4 \times 25$ (mm)の矩形の棒状試験片である。機械的特性は線膨張係数x方向5.74×10-6,y方向7.34×10-6,ヤング率x方向520GPa,y方向598GPa,ポアソン比0.23,破壊韌性値12.7MPam^{1/2},曲げ強度2000MPaである。ここでx方向とは超硬合金の圧延方向、y方向は圧延方向に対して垂直な方向を示している。実験に先立って試験片の冷却面をダイヤモンドペーストにより鏡面に仕上げた。

2.2 実験方法 万能引張圧縮試験機を用いて超硬合金の4点曲げ実験を行った。また、試験片表面を鏡面研磨後、エッチングを施した。曲げ実験は試験片に負荷する荷重を少しづつ増加させていく、一定の応力毎に試験片表面のレプリカを順次採取した。採取されたレプリカに金を蒸着した後、SEM(電子顕微鏡)を用いて約3000倍で表面組織を写真撮影した。この操作を試験片が破断するまで繰返した。

2.3 曲げ実験で生じた微視割れのSEM写真 図1に、応力の増加に伴う、超硬合金の表面組織変化を示す。図中の灰色の部分がCO、白色の部分がWCである。図より、負荷応力が1850MPaまでは、試験片に微視割れはほとんど確認されないが、負荷応力が1900MPaに到達すると、WC/CO界面に微視割れが多数発生していることが観察され、この試験片は、負荷応力が1900MPaをわずかに超えた直後に破断した。

2.4 材料力学による評価式 図2は超硬合金の微視割れの模式図を示したものである。今、試験片の縦方向に引張り応力 σ_0 が生じているとする。以下に示す式(1),(2)より微視割れに生じる垂直応力 σ_N とせん断応力 τ_N を求める。そして σ_N と τ_N を式(3)に代入して微視割れ発生部に生じる相当応力を求めた。なおこの計算は実験で観察された全ての微視割れに対して行った。計算の結果、微視割れに生じる相当応力は1700~1900MPaの範囲で分布していることが分かった。

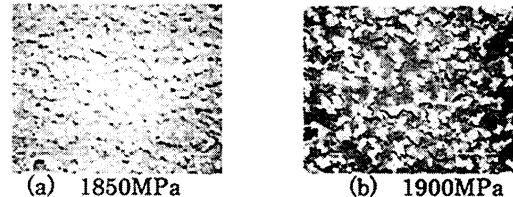


Fig. 1 SEM photograph of microscopic cracks appeared in cemented carbide specimen.

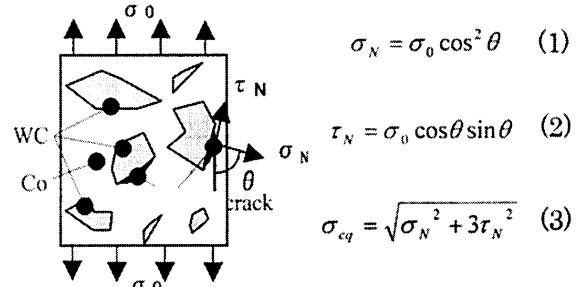


Fig. 2 Calculation-method for the equivalent stress at crack locations.

3. 試験片内部の温度勾配により生じる巨視的熱応力

次に、試験片に熱衝撃を与えた後、曲げ実験を行い、曲げ強さが急減する臨界冷却温度差 ΔT_c を求めた。 ΔT_c の熱衝撃負荷によって、WC/CO界面に多数の微視割れが生じていることが観察された。臨界冷却温度差 ΔT_c の熱衝撃と ΔT_c 以下の熱衝撃を比較したところ、 ΔT_c では、微視割れの個数、長さ、面積ともに大幅に増加していることが分かった。ついで、熱衝撃時の試験片高さ方向に生じる温度勾配によって発生する最大熱応力を求めた。

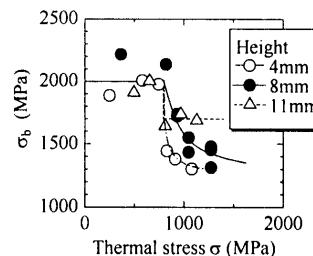


Fig.3 Variation of the bending strength as a function of the macroscopic thermal stress.

図3は熱衝撃後の曲げ強さを、材料の異方性を考慮して求めた発生最大熱応力で整理したものである。図よりわかるように、熱衝撃後の曲げ強さは、試験片高さに依らず約900MPaにおいて急激に減少している。この値を前述で明らかにしたWC/CO界面の割れ強さ1700~1900MPaと比較すると、前者は後者よりも明らかに小さい。従って、超硬合

金の熱衝撃において、臨界冷却温度差 ΔT_c 時にWC/CO界面に発生する微小割れは、熱衝撃によって生じた試験片内部の温度勾配による最大熱応力のみでは説明できない。そこで以後の4章では温度の経時的变化によってWC/CO界面近傍に生じる微視的熱応力値について有限要素法を用いて研究する。

4. 温度の経時変化により結晶界面に発生する微視応力

4.1 FEM 解析 汎用有限要素プログラム、MENTAT/MARC(日本マーク株式会社)を用い、任意の熱衝撃温度差 ΔT を与えた場合の、結晶粒内並びに粒界に発生する微視的熱応力を求めた。供試材として用いた超硬合金は硬質相(WC)と結合相(Co)の2つの相で構成されている。WC結晶粒に関しては弾性平面要素、Coに関しては弾塑性平面要素を採用した。

4.2 計算結果および考察 図4は経時的变化により結晶界面に生じた最大の微視的熱応力 σ_{micro} を熱衝撃温度差 ΔT の関数として表したものである。図より、 ΔT の増加に伴い、微視的熱応力は一次元的に増加している。また、変位を拘束したときの応力結果は変位を自由に与えたときの値よりも大きな値を示す。図より $\Delta T_c=500K$ では全面拘束した場合の最大応力は960MPaとなる。

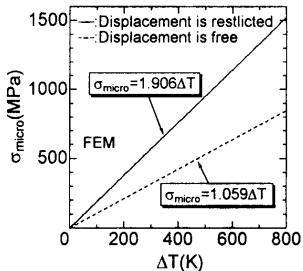


Fig. 4 The relationship between the microscopic stress at the WC/CO interface and ΔT .

5. 温度勾配による応力 σ_{macro} と経時的变化による熱応力 σ_{micro} の合応力

微視割れに生じる相当応力の結果をワイブル分布で整理する。図5はWC/Co界面の割れ強さと、熱衝撃によって微視割れ界面に生じる相当応力を比較したものである。なお界面に生じる相当応力は3章で求めた巨視的応力と4章で求めた微視的応力を合わせた合応力を示している。ただし、微視的応力結果は、変位を拘束した場合と変位を自由に与えた場合の二通りを用いた。この結果より、温度勾配による熱応力 σ_{macro} と変位を拘束した場合の時間的な温度変化による熱応力 σ_{micro} の合応力 $\sigma_{total,eq}$ は1750~1950MPaとなり、WC/Co界面の割れ強さ1700~1900MPaと近い値を示す。以上より、熱衝撃時のWC-CO界面に割れを生じさせるためには、温度勾配による熱応力値 σ_{macro} と変位を拘束した場合の経時的变化による熱応力値 σ_{micro} を重ね合わせる必要がある。

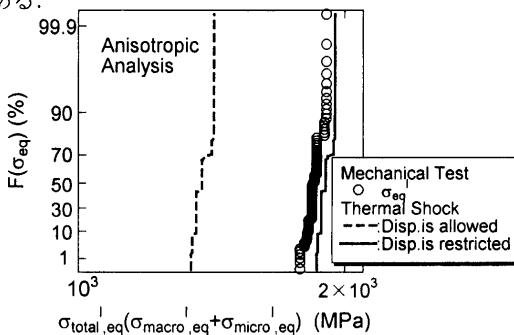


Fig. 5 Comparison between calculated resultant stress and breaking strength of the WC/CO interface.

6. 簡便式による ΔT_c の予測

種々の2相複合材料を作成し、弾塑性有限要素解析によつて、二相間に発生する微視応力を計算した。計算はFEMモデルに熱衝撃温度差 ΔT を与え、二相の物性値を変化させてやることにより行った。その結果、複合材料の結晶界面間の微視応力 σ_{micro} は式(4)の近似式で与えられる。

$$\begin{aligned} \sigma_{micro} &= 2.31 \times 10^4 A \Delta T \left[F_1 \left(\frac{E_2}{E_1} \right) \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + F_2 \left(\frac{E_2}{E_1} \right) \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1} \right) + F_3 \left(\frac{E_2}{E_1} \right) \right] \\ F_1 \left(\frac{E_2}{E_1} \right) &= 90 \left(\frac{E_2}{E_1} \right)^2 + 42 \left(\frac{E_2}{E_1} \right) - 2 \\ F_2 \left(\frac{E_2}{E_1} \right) &= -69 \left(\frac{E_2}{E_1} \right)^2 + 33 \left(\frac{E_2}{E_1} \right) + 16 \\ F_3 \left(\frac{E_2}{E_1} \right) &= -209 \left(\frac{E_2}{E_1} \right)^2 + 426 \left(\frac{E_2}{E_1} \right) + 26 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 E_1 :WCのヤング率、 E_2 :Coのヤング率、 α_1 :WCの線膨張係数、 α_2 :Coの線膨張係数、A:WCの面積比($=WC/(WC+Co)$)を示している。

また一面冷却型熱衝撃実験法を用いて種々の材料を用いて熱衝撃実験を行った結果、空間的な温度変化により発生する熱応力 σ_{macro} と $\alpha E \Delta T$ の関係は次式で近似できる。

$$\sigma_{macro} = 0.705 \alpha E \Delta T - 43.8 \quad (5)$$

ΔT_c における熱衝撃時の巨視的応力 σ_{macro} とWC-Co界面で生じる微視的応力 σ_{micro} の相当応力の和で与えられる界面の合応力は超硬合金の界面強さと一致し、WC/Coの界面強さは曲げ強度と等しい。これらを考慮し、 ΔT_c の予測式として式(6)を得た。ただし $\sigma_{micro}=X \Delta T$ とおいた。

$$\Delta T_c = \frac{\sigma_b + 43.8}{0.705 \alpha E + X} \quad (6)$$

そこで数種類の材料物性値を用い、式(7)による予測結果と実験結果との比較を図6に示す。図中には熱衝撃を与えたときに、材料に巨視的応力のみが働くと考えて臨界冷却温度差 ΔT_c を算出した結果を白抜きの記号で、巨視的応力と微視的応力が共に影響するものと考え、式(6)より算出した ΔT_c を黒塗りの記号で示した。図より巨視応力のみを考慮した場合、実験値と大きな差異を生じるが、巨視応力と微視応力の合応力で ΔT_c を予測すると、実験結果と良い一致を示すことが分かる。従って式(6)の予測式を用いれば、実験を行わなくても、様々な材料の臨界冷却温度 ΔT_c を予想できるものと思われる。

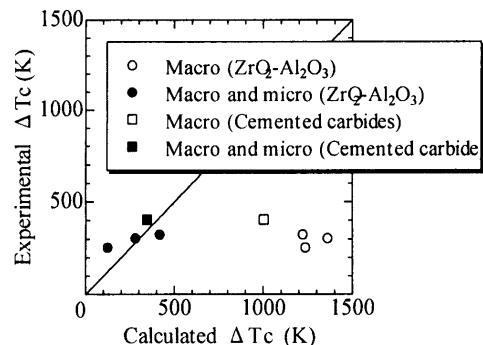


Fig. 6 Comparison of $(\Delta T_c)_{cal}$ with $(\Delta T_c)_{exp}$.

7. 結言

- (1) ΔT_c 時にWC/COの界面割れを生じさせるためには、巨視的熱応力と結晶界面で発生する微視的熱応力の両者を考慮する必要がある。
- (2) 巨視応力と微視応力の合応力によって求めた ΔT_c は実験値とほぼ等しく、 ΔT_c 予測式の有用性を確認した。