研究

WC-Co 合金の強度と破壊靱性*

貞 廣 孟 史**, 蕎麦田 薫**

Takeshi Sadahiro and Kaoru Sobata: Rupture Strength and Fracture Toughness of WC-Co Alloys.

Effect of plastic zone at the tip of small defect on the fracture toughness calculated with rupture strength and defect size was studied.

(1) Fracture toughness evaluated by approximating the cross section of the small fracture defect with the inscribed circle or the ellipse is smaller than that determined by the Bridge Indentation method based on linear elastic fracture mechanics. The difference between the two values increases with the decrease of defect size and the increase of Co content.

(2) Fracture toughness estimated by taking account of the yielding of the plastic zone at the tip of defect agrees with the measured value by the BI method.

(Received April 24, 1986)

I 緒 言

WC-Co 合金の強度・靱性を評価する方法として、抗折力が古くから用いられてきた。ところが、同一 Co 量と同一 WC 粒度を有する WC-Co 合金でも、抗折力値は研究者によって大きく異なり、同一ロットの試片においてもばらつきが大きいなどの問題点があった。巣孔が破壊に関与する場合には、抗折力値は著しく低下することが明らかになり¹⁾、試料内部または表面の巣孔などの欠陥が注目されるようになった。鈴木ら²⁾は、巣孔、粗大 WC 粒、Co プールなどが破壊の起源となり、その寸法と抗折力値から求められる欠陥に作用する応力との間に相関があることを報告している。

一方、WC-Co 合金に破壊力学が適用されるようになり³⁾ 破壊靱性測定法も種々検討されてきた。最近、試料内部に存在し、破壊の起源となった微小欠陥の大きさとそれに作用した応力から破壊靱性値を求めることも報告されている^{4,5)}。ところが材料が脆性材料であっても負荷に伴って、欠陥先端の応力分布は線形性の乱れた領域***を生じ、欠陥先端での応力は無限大とはならない。したがって、塑性域の大きさが欠陥寸法に対して無視できない場合、実際の欠陥寸法よりも塑性域の大きさだけ大きい仮想欠陥寸法をもつと考え、塑性域補正が行われる¹⁰⁾。そのため塑性域補正を行っていない実際の欠陥寸法から

計算した破壊靱性値は、線形破壊力学に基づく、大きな欠陥から求めた破壊靱性値よりも小さくなることが考えられる。

そこで、本研究では WC-Co 合金の抗折試験において破壊起源となる試料内部の微小欠陥先端における塑性域補正について検討した。

II 実験方法

用いた試料は、WC 平均粒度が約 1.2 μm の WC-(5.5, 10 および 20) mass%Co 合金と 1673 K, 147 MPa Ar 中で HIP 処理した WC-10 mass%Co 合金である。試料寸法は JIS 抗折試片 (4×8×24 mm³) で、抗折力値は JIS 抗折試験により求めた。破壊靱性値は Bridge Indentation 法⁶⁻⁸⁾ (以後、BI 法と称す) により求めた。

抗折力試験において、破壊の起源となった欠陥寸法は光顕および SEM 観察により、長軸長 2a および短軸長 2c を求めた。欠陥の面積は、欠陥を楕円と考えて πac より計算した。

そして、欠陥に作用する破壊応力 (公称応力 σ) は次式により求めた⁹⁾。

$$\sigma = 4\sigma_m xy / BW \quad (1)$$

ここで、 σ_m は抗折力値、 x は応力が 0 である中立軸から破壊起点までの厚さ方向における距離、 y は外支点から破壊起点までの距離、 B は試片の幅 (8 mm)、 W は

* 昭和60年5月本協会春季大会にて発表、昭和61年4月24日受理。

** 東芝タンガロイ (株) 研究部、〒235 横浜市中区新杉田町8。

*** この領域は、金属材料では塑性変形によって形成されるので塑性域と呼ばれ、セラミックスでは各種のマイクロクラックや結晶相転移などから形成され、プロセスゾーンとも呼ばれている。

試片の厚さ (4 mm) である。

III 実験結果および考察

用いた試料の性質を Table 1 に示した。HIP 処理した合金は硬さがわずかに低下し、破壊靱性値は逆に増大した。

まず, Almond ら⁴⁾ が提唱した公称応力と欠陥の面積との関係について検討した。これは破壊の起源となった内部欠陥を等価円欠陥と考えた場合であり、破壊靱性値 (K_{Ic}) は次式により求められる。

$$K_{Ic} = \sigma / A^{-1/4} \quad (2)$$

ここで, A は欠陥の面積である。

Fig. 1 に WC-10 mass%Co 合金の公称応力と欠陥面積の $-1/4$ 乗根との関係を示した。(2)式からの破壊靱性値は Fig. 1 において、原点を通る直線 (点線) の勾配から求めることができる。その値は $10.8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ である。これは BI 法による破壊靱性値 $13.8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ よりも小さい。一方, BI 法による破壊靱性値を(2)式に代入し、図示すると図中の実線のようになり、点線の勾配よりも大きい勾配を示しているのがわかる。

Fig. 2 に HIP 処理した WC-10 mass%Co 合金の公称応力と欠陥面積の $-1/4$ 乗根との関係を図示した。これによると HIP 処理によって欠陥寸法が全体的に小さく

Table 1 Properties of WC-Co alloys studied.

Co content (mass%)	HRA	HV (GPa)	Fracture toughness ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)
5.5	90.7	15.2	10.2
10	88.7	12.8	13.8
10 hipped	88.5	12.6	14.0
20	85.7	9.8	17.7

Fig. 1 Relationship between nominal stress acting on fracture initiation defect and defect area for WC-10 mass%Co alloy.

Fig. 2 Relationship between nominal stress and defect area for WC-10 mass%Co alloy hipped.

なっているのがわかる*。特に、欠陥寸法が小さいときには、公称応力がほぼ一定値を示しているようにみえる。Almond ら⁴⁾ や大槻ら⁵⁾ はこれを限界強度** としている。

図中の点線の勾配から求めた破壊靱性値は $11.3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ で、BI 法によって求めた破壊靱性値よりも小さい。

次に、大槻ら⁵⁾ が提唱した、破壊の起源となる欠陥を楕円欠陥と考えた場合について検討した。このときの破壊靱性値 (K_{Ic}) は次式で示される。

$$K_{Ic} = \sigma \sqrt{\pi c} / \phi \quad (3)$$

ここで, c は楕円欠陥の短軸長の $1/2$ で, ϕ は次式で表される楕円積分である。

$$\phi = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - (a^2 - c^2)/a^2 \cdot \sin^2 \varphi} d\varphi \quad (4)$$

ここで, φ は離心率, a は楕円欠陥の長軸長の $1/2$ である。

Fig. 3 に WC-10 mass%Co 合金の公称応力と楕円欠陥寸法との関係を示した。これによると欠陥寸法が小さいほど公称応力は増大する。(3)式からの破壊靱性値は原点を通る直線の勾配から求められる。Almond らの円欠陥と考えた場合と同様に、BI 法の破壊靱性値 (実線) よりも小さい値である。

以上の結果から、破壊の起源となる欠陥を円欠陥と考えても、楕円欠陥と考えても、線形破壊力学に基づいた

* この結果は HIP 処理によって効果はあったものの、あまり欠陥寸法が減少しなかった場合である。果孔はほとんど消滅したが、果孔が Co により埋めこまれたと思われる Co プール、粗大 WC 粒の凝集体などが欠陥となっていた。

** WC-Co 合金においては、破壊の起源となる欠陥のない試片の作製ができない。即ち必ず欠陥から破壊が起こる。しかし、欠陥寸法が極端に小さくなると強度がある一定の値に近づく。これが限界強度である。

Fig. 3 Relationship between nominal stress and size of equivalent defect approximated with an ellipsoid for WC-10 mass% Co alloy.

BI 法による破壊靱性値に比べて、微小欠陥から計算した破壊靱性値は小さいことがわかった。

このことから、抗折試験の際、破壊の起源となった欠陥が微小であるため、その先端部に形成された塑性域、あるいはプロセスゾーンの影響が無視できないことを示していると考えられる。なお、超硬合金の場合には、塑性変形域が形成されると考えられるので、ここでは、それを考慮した補正について検討する。

本研究では、抗折試験の際破壊の起源となる欠陥の形状を楕円で近似し、破壊靱性値は(3)式で表す。しかし、破壊起源となる欠陥には円欠陥や表面欠陥など種々の形状の欠陥があるので、

$$K_{Ic} = \sigma \sqrt{\pi ce} \quad (5)$$

として表すことにする。ここで ce は等価欠陥寸法⁹⁾で、楕円欠陥の場合は $ce = c/\phi^2$ である。

欠陥が微小欠陥である場合は塑性域 r を無視できないので、塑性域の外側の応力分布は実際の欠陥寸法 ce より r だけ大きい仮想欠陥寸法 $(ce+r)$ に対する応力拡大係数で表示される¹⁰⁾。すなわち

$$K_{Ic} = \sigma \sqrt{\pi(ce+r)} \quad (6)$$

である。そこで、塑性域補正をしていない実際の微小欠陥寸法だけの場合の(5)式と区別するために(5)式を

$$K_c = \sigma \sqrt{\pi ce} \quad \text{と表す。}$$

本研究では塑性域* を WC-5.5 mass% Co 合金では $0.65 \mu\text{m}$ とし、WC-20 mass% Co 合金では、 $4.68 \mu\text{m}$ とした。

Fig. 4 に WC-5.5 mass% Co 合金と WC-20 mass% Co

Fig. 4 Relationship between nominal stress and size of equivalent defect for WC-Co alloys. LEFM shows approximation of linear elastic fracture mechanics.

合金の公称応力と等価欠陥寸法 ce との関係を示した。ここで、実線は線形破壊力学 (LEFM) における関係で、 $-1/2$ の勾配を示している。点線は塑性域を考慮に入れたときの計算式(6)式から求められた関係を示している。計算値と実測値とが非常によく一致しているのがわかる。これらを一つのパラメータで整理して表示するために、(5)(6)式より、次式の関係が得られる。

$$\begin{aligned} K_c/K_{Ic} &= \sigma \sqrt{\pi ce} / \sigma \sqrt{\pi(ce+r)} \\ &= 1/\sqrt{1+(r/ce)} \end{aligned} \quad (7)$$

(7) 式を用いて、WC-5.5 mass% Co 合金と WC-20 mass% Co 合金の結果を示すと Fig. 5 のようになる。(7) 式から計算したものが実線であり、計算値と実測値とがよく一致しているのがわかる。

以上の結果から、欠陥先端での応力は、線形破壊力学が示すような無限大とはならない。そのため負荷に伴って欠陥先端に生ずる、線形性の乱れている領域を考慮しなければならない。欠陥寸法が小さいほど、その領域が相対的に大きくなるので、その影響が大きくなる。そこで抗折試験における破壊の起源となるような微小欠陥の

Fig. 5 Relationship between normalized fracture toughness K_c/K_{Ic} and ratio of equivalent defect size and plastic zone size, ce/r for WC-Co alloys.

* 一般に塑性域は $1/2\pi(K_{Ic}/\sigma_{ys})^2$ で表される¹⁰⁾。ここで、 σ_{ys} は降伏応力である。本研究では、降伏応力はビッカース硬さの $1/3$ から計算した¹¹⁾。

大きさとそれに作用した応力から求めた破壊靱性値は、欠陥寸法が小さくなるほど、線形破壊力学からの靱性値から離れて、小さくなることが理解できる。

IV 結 論

WC-Co 合金の抗折試験において、破壊起源となる微小欠陥とそれに作用する応力から求めた破壊靱性値における塑性域補正について検討した。

得られた結果は次の通りである。

- (1) 抗折試験の破壊起源となる欠陥を等価円または楕円と考えて求めた破壊靱性値は、線形破壊力学を適用した Bridge Indentation 法による破壊靱性値よりも小さい。

両者の差は欠陥寸法が小さいほど、また高 Co 合金ほど大きくなる。

- (2) 抗折試験の破壊起源となる欠陥は微小欠陥である

ため、欠陥先端に生ずる塑性域の補正をして計算した破壊靱性値は BI 法による実測値とよく一致した。

文 献

- 1) P. B. Anderson: Planseeberichte für Pul. Met., **15** (1967), 180.
- 2) 鈴木, 林: 日本金属学会誌, **38** (1974), 1013.
- 3) P. Kenny: Powder Metallurgy, **14** (1971), 22.
- 4) E. A. Almond and B. Roebeck: Metal Sci., **11** (1977), 458.
- 5) 大槻, 木藤, 増田: 日本金属学会誌, **45** (1981), 432.
- 6) T. Sadahiro and S. Takatsu: 1980 Powder Metallurgy Conference, U.S.A. May 27 (1980).
- 7) 貞廣: 日本金属学会誌, **45** (1981), 291.
- 8) 貞廣: 蕎麦田: 粉体および粉末冶金, **33** (1986), 422.
- 9) 高橋, 宇佐美, 中門, 宮田, 志田: 窯業協会誌, **93** (1985), 186.
- 10) G. R. Irwin: Proc. 7th Sagamore OMR Conf., (1960) Syracuse Univ., IV-63.
- 11) 貞廣: 日本金属学会, **37** (1973), 1153.

会 告

第32回人工鉱物討論会

共 催: 粉体粉末冶金協会他

日 時: 昭和62年10月14日(水)~15日(木)

会 場: 千葉工業大学津田沼校舎(総武線津田沼駅前)

討論主題: 1)人工鉱物の探索・合成法,

2)人工鉱物の評価法,

3)人工鉱物の合成および評価のための装置

申込締切: 昭和62年7月4日(土)

申込内容: ①講演題目, 研究場所, 発表者氏名(講演者○印), ②申込者氏名, ③申込者連絡先(所属, 郵便番号, 所在地, 電話番号, ④200字程度の要旨(プログラム編成用)を添えて下さい。講演申込受付次第, オフセット用原稿用紙をお送りいたします。

申込先: 〒113文京区本郷7-3-1

東京大学工学部 柳田 博明

第32回人工鉱物討論会実行委員会

Tel 03(812)2111 内線7196

会 告

International Symposium on Non-Equilibrium Solid Phases of Metals and Alloys

主 催: 日本金属学会

日 時: 昭和63年3月14日(月)~17日(木)

場 所: 国立京都国際会館, 京都市左京区宝ヶ池

内 容: この会議は日本金属学会主催の第5回小規模国際シンポジウム(JIMIS-5)として開催される。基礎応用の両面から注目されている非平衡合金、化合物の形成能, 構造, 物性などについて, 基礎的な研究発表, 討論を行うが, 特に次のような主題を予定している。

- 1) Preparations
- 2) Phase formation and structures
- 3) Non-equilibrium phases and phase diagrams
- 4) Physical and chemical properties
- 5) Topics: quasicrystal and high Tc superconductor

連絡先: 〒606 京都市左京区吉田本町

京都大学工学部金属加工学教室 中村 陽二

Tel 075(751)2111 内線5465