

結晶粒相当の厚さを有する ガスタービン翼構造体の疲労き裂進展特性

長岡技科大[院] 山野邊壯 長岡技科大[院] ○津留武志
長岡技科大 阪口基己 長岡技科大 岡崎正和

Fatigue crack propagation in the gas turbine component with the thin-wall structure comparable to grain size

So YAMANOBE, Takeshi TSURU, Motoki SAKAGUCHI and Masakazu OKAZAKI

1 緒 言

航空機や発電用ガスタービンなどの高温高圧部には、高温強度に優れた Ni 基超合金が用いられている。この種の部材は 900°C を越える高温環境下で力学的負荷を受けるため、さまざまな劣化や損傷が生じる。機器を運用する上では部材の寿命を正確に捉えることが重要である。これまで、Ni 基超合金の高温疲労やクリープ特性に関する研究は多くなされてきたが、それらは板厚 5-6mm の比較的大きな標準試験片を使ったものがほとんどである。それに対し、実際のブレードは、厚さが 0.5 から 1mm と非常に薄く、その板厚方向に 1-2 個程度の結晶粒しか含まないため、結晶方位、粒径、隣接する結晶粒からの拘束といった結晶学的因子の影響が顕著に現れると考えられる。

本研究では、単結晶および多結晶 Ni 基超合金から実機高温部材と同程度の厚さを有する小型 CT 試験片を切り出し、その疲労き裂進展特性に及ぼす板厚、結晶方位および結晶粒界の影響を検討した。

2 試験片および実験方法

2.1 単結晶材試験片

まず、疲労き裂進展特性に及ぼす結晶方位の影響を検討するため、単結晶 Ni 基超合金 CMSX-4 から、厚さ 0.5mm の疲労き裂進展試験片を作成した。試験片は、負荷方向が結晶学的 [100] 方向および [110] 方向となるように、放電加工により切り出した。試験片寸法を Fig.1 に示す。[100] 方向からは 2 枚、[110] 方向からは 3 枚の試験片を切り出した。本稿では、それぞれ [100]-1, [100]-2 ならびに、[110]-1, [110]-2, [110]-3 と表記する。

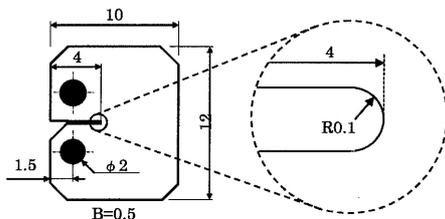


Fig.1 Geometry of a miniature CT specimen of CMSX-4

2.2 多結晶材試験片

多結晶超合金の疲労き裂進展特性に及ぼす試験片板厚ならびに結晶粒の方位の影響を検討するため、Ni 基超合金 IN939 の鑄造ロッド材(平均結晶粒径 1.8mm)から、

2.1 節と同様の寸法の小型試験片を作成した。試験片板厚がき裂進展速度に与える影響を検討するため、板厚 0.5mm と 2.0mm の 2 種類の試験片を準備した。本稿では、それぞれの試験片を IN939-0.5, IN939-2.0 と表記する

2.3 き裂進展試験

試験には島津サーボパルサ疲労試験機を用いた。試験条件は、室温、大気中、荷重比 $R=0.4$ 、負荷周波数 10Hz、荷重制御で行った。き裂長さは、き裂がおおよそ 0.1mm 進展するごとに試験片を治具から取り外し、光学顕微鏡を用いて測定した。

3 結果および考察

3.1 単結晶材のき裂進展試験結果

単結晶材の疲労き裂進展試験結果を Fig.2 に示す。ここで、横軸には投影き裂長さから求めたモード I 応力拡大係数範囲、縦軸には投影き裂進展速度をとっている。Fig.2 から、まず、[100] 方向から切り出した 2 つの試験片 ([100]-1, [100]-2) は同程度のき裂進展速度を示していることが分かる。これに対し、[110] 試験片は、試験片ごとに結果がばらつき、[110]-1 試験片は [100] 試験片と同等であるのに対し、[110]-2, -3 試験片はそれらより低いき裂進展速度を示した。これらの試験片の破面観察を行った結果 (Fig.3), [100]-1, -2 および [110]-1 は破面が単一の {111} すべり面で構成されているのに対し、[110]-2, および [110]-3 では、き裂が複数の {111} すべり面にまたがって進展している様相を呈していた。また、Fig.2 に示したき裂進展速度の各データと、それに対応する破面とを比較した結果、[110]-2 ならびに [110]-3 にて進展速度が低くなっているデータ (Fig.2 中の丸で囲ったデータ) は、

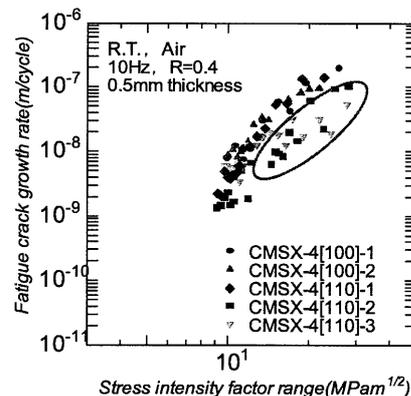


Fig.2 Fatigue crack growth rate in CMSX-4

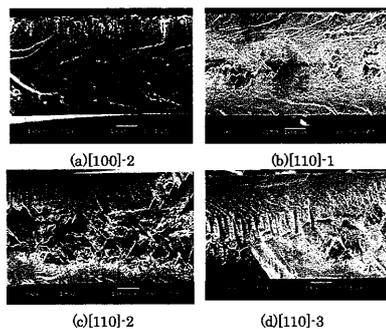


Fig.3 Fracture surface of CMSX-4

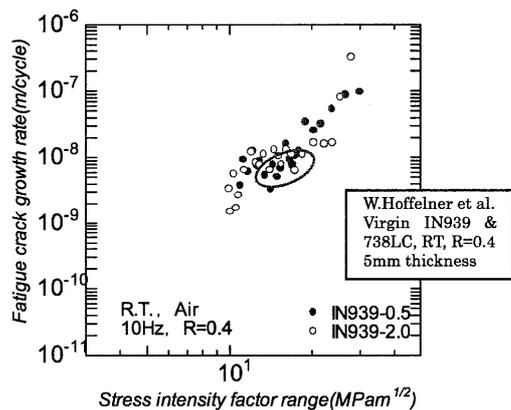


Fig.4 Fatigue crack growth rate in as-cast IN939

上述の複数のすべり面にまたがってき裂が進展した際のものであることが明らかとなった。複数のすべり面に沿ってき裂が進展する際にき裂進展速度が低下した原因としては、き裂先端で非共面せん断すべりが生じることによるき裂先端の応力緩和、き裂が屈折することによるき裂進展駆動力の減少、破面粗さにより破面同士が接触して生じる粗さ誘起き裂閉口などが考えられる¹⁾。

3.2 多結晶材のき裂進展結果

多結晶超合金 IN939 の試験結果を Fig.4 に示す。板厚 0.5mm (IN939-0.5), 板厚 2.0mm (IN939-2.0) の結果を、標準寸法試験片を用いた文献²⁾の結果と比較して示している。Fig.4 より、まず、板厚 0.5mm と 2.0mm 試験片ではき裂進展速度に有意な差はないことがわかる。また、両試験片のき裂進展速度は標準寸法試験片に比べ高くなっていた。

IN939-2.0 の破面観察結果を Fig.5 に示す。Fig.5 より、IN939-2.0 の破面は、負荷軸とほぼ垂直な単一のすべり面に沿った破面と、それから大きく傾いた複数のすべり面からなる破面により構成されていることがわかる。これらの破面と、Fig.4 中のき裂進展速度を対応させた結果、き裂が後者の破面を進展する場合にはき裂進展速度が部分的に低下することがわかった (Fig.4 中の丸で囲った領域に対応)。また、それぞれの破面を形成している結晶粒が負荷軸に対してどの方位を向いているかを測定するため、破面を研磨し、負荷軸と垂直な面に対して EBSD 解析を行った結果 (Fig.5), 前者の破面を形成している領域では、結晶粒は<100>あるいは<111>方位に近い結晶方位を有し、後者の破面では結晶粒は<110>方位に

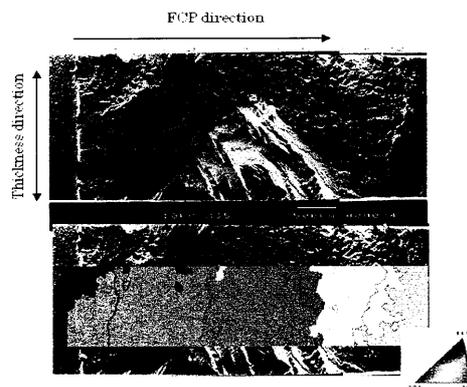


Fig.5 Fracture surface and EBSD result of the specimen IN939-2.0

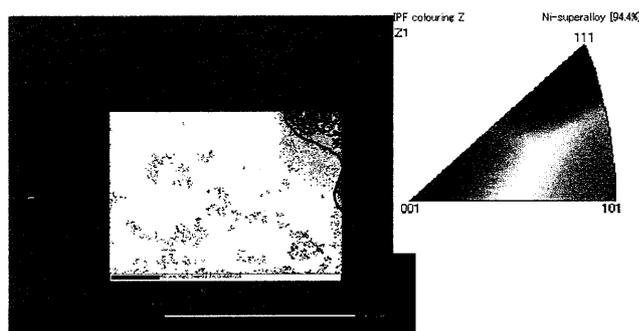


Fig.6 EBSD result in the specimen IN939-2.0

近い方位に配向していることがわかった。前節において、単結晶 Ni 基超合金では、[110]方向から負荷を加えた場合はき裂は複数のすべり面に沿って進展し、その場合にはき裂進展速度が部分的に低下することを実験的に示したが、多結晶超合金においても、負荷軸が<110>方位となる結晶粒をき裂が進展する場合、き裂は複数のすべり面に沿って進展し、それにとまって進展速度が低下することが明らかとなった。

IN939-2.0 試験片に対し、粒界近傍での局所的な結晶方位分布に着目して EBSP 解析を行った結果を Fig.6 に示す。粒界 (図中実線で標記) の左側の結晶粒は<102>方位、右側の結晶粒は<112>方位に近い方位に配向しているが、前者の結晶粒の粒界近傍では格子が部分的に<112>方位に回転している領域があることがわかる。これは、き裂先端が粒界に近づいた際に、粒界を超えてき裂を連続的に進展させるため、進展する先にある結晶粒の方位に合わせて、格子が部分的に回転した結果であると推測される。この種の現象はき裂の停留を引き起こす可能性があるため、より詳細な検討が必要である。

4 結言 省略

謝辞: 本研究の遂行にあたり、科学研究費補助金 (No.21760069) の補助を受けた。

参考文献

- 1) Suresh, S. Shin, C.F., Int. J. Fracture, Vol30, pp273-259, (1986)
- 2) W. Hoffelner, Metall. Trans. A, Vol.13A, pp.1245-1255, (1982)