研 究

高強度焼結鋼の疲労亀裂伝播特性

岩田 篤, 山口 和幸, 下山 仁一, 河合 伸泰

福井工業大学, 〒910-8505 福井市学園3-6-1.

The Characteristics of Fatigue Crack Propagation in the High Tensile Strength Sintered Steels

Atsushi Iwata, Kazuyuki Yamaguchi, Toshikazu Shimoyama and Nobuyasu Kawai

Fukui University of Technology, 3-6-1 Gakuen, Fukui 910-8505.

Received June 12, 2003

SYNOPSIS

Fatigue crack propagation behavior was investigated for high tensile sintered steels of about 1000MPa level.

It was made clear that the diffusion bonded steel was most excellent as for the fatigue crack propagation behavior. The difference of fatigue crack propagation behavior with the different Ni content and sintered density was found to be significant, even if the alloying method was the same.

As for high tensile sintered steel, it was found that fatigue crack propagated through grain boundaries.

KEY WORDS

High tensile sintered steel, Fatigue crack propagation, Fe-Ni-Mo-(Cu)-C alloys

1 緒 言

高強度焼結鋼の疲労亀裂の発生と伝播を明らかにすることは機械構造部品を設計する上で、極めて重要な問題である。また、焼結鋼の疲労強度を高めることが望まれており、このような観点から、小型簡易型疲労試験機を使用し、鋭い切欠き状態のCT試験片を用いて疲労亀裂伝播特性を比較検討した。本研究では引張強さが1000MPa級の供試鋼として、焼入れ焼戻しの高強度焼結鋼である部分拡散型焼結鋼(PA-A)、プレアロイ型焼結鋼(PA-B)、プレアロイ-プレミックス型焼結鋼(PA-C, PA-D, PA-F)を用いて疲労亀裂伝播特性を調べた。また400MPa級でMnS添加方法の異なる焼結のままの低強度焼結鋼(PA-K, PA-M, PA-P)と比較する。

2 実験方法

2.1 疲労亀裂伝播試験

本装置はFig.1に示すように荷重を伝達するレバーを活用し、A点に圧縮変位を与え、支点部B点を介してC点に荷重が伝わり、試験片に引張力を負荷する方式である。A点のモータ軸に取り付けた偏芯カムを回転させて荷重を変動させることができるようにした試験機で、下記のような仕様である。

試験装置本体

負荷荷重範囲: 200N ~ 3kN

周波数 : 28Hz (電源周波数 60Hz 時)

波形 : 正弦波

概略寸法 : 幅約350×長さ850×高さ500mm

振幅 : ±200N ~ ±1kN

Fig.1 Fatigue Test Equipment.

疲労亀裂伝播試験に使用したCTタイプの超小型試験片の寸法形状をFig.2に示す。最大荷重 $P_{\max}$ を決定後、時間と共に荷重が随時変動があった場合には初めに決定した荷重を保つように調整しながら実験を実施した。供試材料の降伏応力より求められる $P_{\max}$ の1/2以下を荷重条件に設定し、 $P_{\max}$ より $K_{\max}$ 、 $P_{\min}$ より $K_{\min}$ を求め、 $K_{\max}$ と $K_{\min}$ の比を $R=K_{\min}/K_{\max}$ から求めた¹⁻³⁾。そのRの値は0.1を目標とした。

続いて、CT試験片に対して応力拡大係数範囲 ΔK は次式で計算した。

$$\Delta K = \frac{\Delta P(2+\alpha)}{b(1-\alpha)^{3/2}\sqrt{w}} \left(0.086 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4 \right) \quad (1)$$

$$\alpha = a/w$$

$$\Delta P: \text{荷重 (N)} \quad \Delta P = P_{\max} - P_{\min}$$

$$a: \text{亀裂長さ (m)} \quad w: \text{板幅 (m)} \quad b: \text{板厚 (m)}$$

なお、応力拡大係数Kについては(1)式の ΔK をKの値に置き換え計算できる。

また、疲労亀裂伝播速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK は、Paris 式によって次の(2)式で表される。

$$da/dN = C_2 (\Delta K)^{m_2} \quad (2)$$

C_2 及び m_2 は材料定数

また、疲労亀裂が伝播しなくなる下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} から、疲労亀裂が伝播しなくなる亀裂先端の開口変位範囲 $\Delta CTOD_{th}$ (Crack Tip Opening Displacement)は次の(3)式で求

められる。

$$\Delta CTOD_{th} = \frac{4(\Delta K_{th})^2}{\pi E \sigma_{ys}} \quad (3)$$

$$E: \text{ヤング率} \quad \sigma_{ys}: 0.2\% \text{ 耐力}$$

2.2 供試焼結鋼

焼入れ焼戻し高強度焼結鋼(PA-A, PA-B, PA-C, PA-D, PA-F)と、焼結のままの低強度焼結鋼(PA-K, PA-M, PA-P)の製造条件をTable 1に、化学組成をTable 2、機械的性質をTable 3にそれぞれ示した。

Fig.2 CT Specimen.

Table 1 Manufacturing conditions of sintered steels.

No	Component	Base powder	Alloying method	Sintering condition	Heat treatment
PA-A	0.4C-4Ni-0.5Mo-1.5Cu	4800DF-Cu-0.5C	diffusion	1140°C 20min N ₂ gas	880°C 60min OQ 180°C 60min AC
PA-B	0.4C-0.5Ni-1Mo	46F4H-0.5C	prealloy		
PA-C	0.4C-2.5Ni-1Mo	46F4H-2Ni-0.5C	prealloy-premix		
PA-D	0.4C-4.5Ni-1Mo	46F4H-4Ni-0.5C	prealloy-premix		
PA-F	0.5C-1.5Ni-1.0Mo-2.0Cu	46F3H-2Cu-0.6C	prealloy-premix		
PA-K	0.5C-0.3Mn-0.3MnS	300M-Mn	premix		As sintered
PA-M	0.56C-0.6Mn-0.3S	400MSA	prealloy		
PA-P	0.5C	300M-Mn	premix		

Table 2 Chemical compositions of sintered steels.

No	Chemical compositions (wt%)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
PA-A	0.42	0.01	0.08	0.008	0.004	4.22	0.02	0.55	Cu:1.5
PA-B	0.45	0.02	0.19	0.013	0.008	0.5	0.01	0.95	
PA-C	0.46	0.02	0.19	0.013	0.007	2.53	0.02	0.94	-
PA-D	0.45	0.02	0.19	0.013	0.008	4.52	0.02	0.92	-
PA-F	0.56	0.01	0.19	0.014	0.007	1.44	0.01	1.05	Cu:1.98
PA-K	0.48	0.010	0.41	0.015	0.104	-	-	-	Cu:1.92
PA-M	0.46	0.014	0.61	0.015	0.281	-	-	-	Cu:1.98
PA-P	0.50	0.008	0.20	0.015	0.007	-	-	-	Cu:2.07

Table 3 Mechanical properties of sintered steels.

No	Sintered density (Mg/m ³)	Mechanical properties					
		Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%) GL=2.5mm	RA (%)	Vickers hardness (10kgf) ※ (200gf)	Young's modulus (GPa)
PA-A	7.00	833	1046	1.30	0.90	325	138
PA-B	7.01	968	1113	0.60	0.40	331	141
PA-C	7.02	951	1141	0.70	0.30	345	142
PA-D	7.02	877	1126	1.10	0.40	351	147
PA-F	6.83	806	869	0.50	0.00	318	127
PA-K	6.80	280	379	3.10	2.30	※164	131
PA-M	6.79	282	353	2.70	2.70	※161	124
PA-P	6.82	273	363	3.30	2.30	※171	130

3 試験結果と考察

3.1 疲労亀裂伝播試験

Fig.3に焼入れ焼戻し1000MPa級高強度焼結鋼(PA-A, PA-B, PA-C, PA-D), また比較として用いた引張強さ1000MPa級の高張力鋼(HT-100)も合わせてプロットした。下限応力拡大係数範囲 ΔK_{th} 値は, PA-A部分拡散型焼結鋼とNi添加量の最も多いプレアロイ型プレミックス型PA-D焼結鋼の $6.6\text{MPa}\sqrt{m}$ が最も高く, つづいてNi添加量の少ないプレアロイ型プレミックス型PA-C焼結鋼の $4.4\text{MPa}\sqrt{m}$, 最も低かったのはプレアロイ型PA-B焼結鋼の $3.4\text{MPa}\sqrt{m}$ であった。疲労亀裂伝播速度 da/dN の対数値の勾配 m_2 は, PA-A焼結鋼は4.1, PA-B

焼結鋼は7.1, PA-C焼結鋼は4.4, PA-D焼結鋼は6.2が得られた。これらのPA-AからPA-Dまでの合金添加方法の疲労亀裂伝播特性への影響を見ると, 部分拡散型焼結鋼PA-Aが ΔK_{th} , m_2 ともに最も優れた伝播特性を示し, ついで4.5%とNi添加量の多いPA-D焼結鋼が ΔK_{th} は部分拡散型焼結鋼PA-Aと同じ値であったものの勾配 m_2 がPA-A焼結鋼, PA-C焼結鋼について3番目であった。プレアロイ型のPA-B焼結鋼は ΔK_{th} , m_2 ともに最も悪い値となった。これらの結果から金属組織が不均質で粒界をNiなどの添加粉末で強化された部分拡散型やプレミックス型の方が均質なプレアロイ型よりも良好な亀裂伝播特性を持っていることが分った。また比較の高張力鋼(HT-100)の3.0と比べると, 本実験で使用した高強度焼結鋼は勾配 m_2 が大きいことから伝播速度が速いことが分かった。

つづいてPA-F焼結鋼とPA-PからPA-M焼結鋼の特性をFig.4に示す。PA-KからPA-P焼結鋼の下限応力拡大係数範囲 ΔK_{th} 値は, 高強度焼結鋼(PA-A, PA-B, PA-C, PA-D)の値と比べると低い値となった。また焼結のままの低強度焼結鋼(PA-K, PA-M, PA-P)の勾配 m_2 の値は, 9.0~14.0と高い値となり伝播速度が速いことが分かった。熱処理を施してあるPA-F焼結鋼は ΔK_{th} 値, 勾配 m_2 の値ともに低強度焼結鋼より優れているが, 部分拡散型焼結鋼PA-A焼結鋼やプレアロイ型プレミックス型PA-D焼結鋼よりも劣っていることが分かった。

次に, 引張強さ σ_B と疲労亀裂が伝播しなくなる下限応力拡大係数範囲 ΔK_{th} の関係について, Fig.5に一括して示した。高張力鋼では, 引張強さ σ_B が大きくなるにつれて ΔK_{th} が下がる傾向があるのに対して, 焼結鋼では, 約1000MPaで ΔK_{th} が最大になり, そこから引張強さ σ_B が大きくなるにつれて ΔK_{th} が下がると推測され, 山型を描くような範囲であると考えられる。これは低い引張強さのPA-K, PA-M, PA-Pは密度が 6.8kg/m^3 前後とPA-AからPA-Dの 7.0kg/m^3 よりも低く, 気孔が多いこと, 熱処理されていないため基地が低強度であることが高張力鋼の挙動と異なる理由と推測される。低い引張強さで密度を 7.0kg/m^3 まで上げた時に, 高張力鋼と同様に引張強さ σ_B が高くなれば, ΔK_{th} が低下するかどうか調べることは今後の課題である。続いて, Fig.6に引張強さ σ_B と, 疲労亀裂が伝播しなくなる亀裂先端の開口変位範囲 $\Delta CTOD_{th}$ の関係

Fig.3 ΔK - da/dN relation of PA-A, PA-B, PA-C, PA-D and HT-100.

Fig. 4 ΔK -da/dN relation of PA-F, PA-K, PA-M and PA-P. Fig. 5 Relation between σ_B and ΔK_{th} . Fig. 6 Relation between σ_B and $\Delta CTOD_{th}$.

を高張力鋼の実験結果と合わせて比較してみた。高張力鋼では、引張強さが高くなるにつれて $\Delta CTOD_{th}$ が低くなるが、今回の供試鋼である焼結鋼もばらつきは大きいですが、引張強さが高くなるにつれて $\Delta CTOD_{th}$ が低くなる傾向がみられる。

3.2 ミクロ組織観察

高強度焼結鋼と高張力鋼についてミクロ観察を行った。Fig. 7は高強度焼結鋼(PA-B)のミクロ組織と高張力鋼(HT-100)のミクロ組織である。高張力鋼は結晶粒内を通して破壊しているのに対して、高強度焼結鋼は、気孔およびもとの粉末の粒界を通っている。このことから、粉末粒子同士の結合力が弱く、高強度焼結鋼は疲労によりもとの粉末の粒界を通り破壊したと考えられる。

3.3 破断面観察

高強度焼結鋼と高張力鋼について、走電子顕微鏡顕微鏡(SEM)による観察を行った。Fig. 8は高強度焼結鋼(PA-A)と高張力鋼(HT-100)のSEMの写真である。高張力鋼は疲労破面を見ることができるが、高強度焼結鋼では疲労破面ともとの粉末表面を見ることができる⁴⁾。

4 結 言

引張強さが1000MPa級の、焼入れ焼戻し高強度焼結鋼である、拡散型焼結鋼(PA-A)、プレアロイ型焼結鋼(PA-B)、プレ

Microstructure of sintered steel (PA-B)

Microstructure of high tensile steel (HT-100)

Fig. 7 Microstructures of sintered steel (PA-B) and high tensile steel (HT-100).

Fig.8 Fracture surface of high tensile sintered steel (PA-A) and high tensile steel (HT-100).

アロイブレミックス型焼結鋼(PA-C, PA-D)について疲労亀裂伝播特性を調べた。

その結果を要約すると次の通りである。

- (1) 高強度焼結鋼の応力拡大係数範囲 ΔK と、亀裂伝播速度 da/dN の関係を求めると、傾き m_2 はプレアロイ型焼結鋼PA-Bの値が7.1と最も高く伝播速度が速いことが明らかになり、拡散型焼結鋼PA-Aの傾き m_2 値は4.1と高強度焼結鋼の中では一番低い値になったことから疲労強度に最も優れていることが明らかになった。
- (2) 高強度焼結鋼の機械的性質引張強さ σ_B と、下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} の関係を求めると、引張強さ σ_B が約1000 MPaで下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} が最大になり、そこから引張強さ σ_B が高くなるにつれて下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} が低くなることが明らかになった。
- (3) 合金元素添加方法の違いは疲労亀裂伝播特性に大きな影響

を与えるものであることが明らかになった。また化学成分からNi含有量が多いほど疲労亀裂特性に優れていることが分かった。

- (4) 高強度焼結鋼と高強度鋼のマイクロ組織から、高張力鋼は粒内を通り破壊しているのに対して、高強度焼結鋼はもとの粉末の粒界を通り破壊をしていることが明らかになった。

文 献

- 1) 横堀武夫: 日本金属学会 強度委員会編, 金属材料の強度と破壊, 丸善株式会社, (1964).
- 2) 横堀武夫: 金属の疲労破壊, 丸善株式会社, (1970).
- 3) 國尾武, 中沢一, 林郁彦, 岡村弘之: 破壊力学実験法, 朝倉書店, (1984).
- 4) 藤木榮: 機械部品の疲労破壊・破断面の見方, 日刊工業新聞社, (2002).