超硬合金の微小き裂進展特性に及ぼすWC粒子径の影響

Small fatigue crack growth behavior of ultrafine-grained cemented carbides

佐武 貴司 (富山大院) ○吉田 知功 (富山工大) 正 石原 外美 (富山大)

正 五嶋 孝仁 (富山大) 砂田 聡 (富山大)

Takashi SABU, Tomonori YOSHIDA, Sotomi ISHIHARA, Takahito GOSHIMA, and Satoshi SUNADA

Faculty of Engineering, Toyama University, Toyama 930-8555, Japan

Key Word: Small Fatigue Crack Growth, WC Grains Size

1. 緒言

超硬合金は強度、破壊靱性等の機械的特性をはじめ、諸特性に優れているため、高速機械加工における工具材を初めとして、多方面で利用されている。しかしながら、その汎用的使用環境における、繰返し荷重下での疲労破壊特性については未だ不明な部分が多く存在する。

本研究では、WC粒子径の異なる3種類の超硬合金 (F20:0.31 μm , D60:1.23 μm , C70:3.42 μm) の微小疲労き裂進展特性を明らかにすることを目的として、室温において種々の応力比のもとで疲労試験を行った。そして、Rカーブ特性及び微小疲労表面き裂の進展特性を調査すると同時に、き裂先端部の微視的破壊機構、き裂の形態等に及ぼすWC粒子径の影響について検討、考察を加えた。

2. 試験片及び実験方法

2.1 試験片 用いた試験片素材は市販の超硬合金材である。その化学成分は3種類の試験片共に WC:85, Co:15 (wt%) である。WC粒子径の平均値はすでに示したが、SEM写真を用いて直線切断法によって測定した各素材のWC粒子径分布を調査した。結果を図1に示す。また機械的性質を表1に示す。試験片形状は、4×8×25mmの矩形棒状試験片であり、4点曲げ疲労試験を行った。また、疲労試験に先だって、ダイヤモンドペーストを用いて表面が鏡面になるまで研磨した後、タングステンのワイヤーを用いて、ワイヤー放電加工により試験片中央部に直径100 μm 、深さ約100 μm の穴を導入した。疲労予荷重を負荷し、穴からき裂を発生させた後に実験を開始した。

2.2 実験方法 用いた試験機は油圧サーボ疲労試験機である。正弦波、10Hzの応力繰返し速度のもとで4点曲げ疲労試験を行った。用いた応力比は、R=0.1, 0.5の2種類で、室温環境下で実験を行った。疲労試験は一定の応力繰返し数毎に実験を中断し、連続実験時の80%の負荷のもとで、最大引張り応力作用面のレプリカを採取した。得られたレプリカを400倍の光学顕微鏡と試験片表面のSEM観察を行うことによりき裂の形態と長さの

Fig.1 Distributions of WC grain sizes for three materials.

変化を調査した。応力拡大係数の計算は、曲げ負荷を受ける表面き裂に対するNewmann-Rajuの式を用いた。実験結果よりき裂形状比として $a/c=0.61$ を用いた。ここに a はき裂深さ、 c はき裂半長である。

Table 1 Mechanical properties

	F20	D60	C70
WC diameter dm (μm)	0.31	1.23	3.42
Young's Modulus (GPa)	520	520	520
Bending strength (MPa)	3480	3430	2750
HV	1530	1220	1020
Tensile strength (MPa)	1910	1860	1520
Poisson's ratio	0.23	0.23	0.23

3. 実験結果及び考察

3.1 き裂進展特性

図2は、3種類の素材に対する dc/dN - K_{max} 関係を、負荷応力比 $R=0.1$ について示したものである。図よりWC粒子径が小さくなるほどき裂進展が加速している事がわかる。また高き裂進展速度領域ほど、WC粒子径によるき裂進展速度の差異が大きくなっている。 $R=0.5$ についても同様の整理を行った。その結果を図3に示す。 $R=0.1$ と同様にWC粒子径が小さい試験片ほどき裂進展が加速しており、また高き裂進展速度域ほどWC粒子径による差が顕著となる。次に、一定のき裂進展速度をもたらすのに必要な K_{max} 値を求め、これらの K_{max} 値とWC粒子径との関係を、 $R=0.1$ の場合について図4に示した。図より、高き裂進展速度域ほど、粒子径の増加に伴う K_{max} の増加の割合が大きくなっている。以上の結果は、高き裂進展速度領

Fig.2 Relationship between dc/dN and K_{max} at $R=0.1$.

Fig.3 Relationship between dc/dN and K_{max} at $R=0.5$.

Fig.4 Relationship between $K_{\max}$ and dm at $R=0.1$.

域ほどWC粒子径によるき裂進展阻止効果の増加が期待できることを示している。図は省くが $R=0.5$ においても、 $R=0.1$ と同様の傾向を示し、高き裂進展速度領域では $R=0.1$ よりもき裂進展阻止効果が強く現れる傾向が認められた。

3.2 SEM観察による微小表面き裂の進展挙動 疲労き裂が、き裂先端前方のWC結晶粒とどのように干渉し進展するかを調査するために、疲労過程の連続観察を行った。図5のSEM写真は、 $R=0.1, K_{\max}=7.0 \text{ MPa m}^{1/2}$ におけるき裂進展形態を示したものである。(a)図は $dm=3.4 \mu\text{m}$ 、(b)図は $dm=0.3 \mu\text{m}$ に対するものである。図6は、図5を用いて観察起点からのき裂の進展長さとき裂進展速度の関係を示したものである。図(a)よりわかるように、き裂は進展途上でWC結晶粒にぶつかると一旦進展を停止し、その後の繰返し荷重の負荷によって再び進展する。ある程度進展すると再びWC結晶粒に突き当たり停止する。このようにき裂は進展、停滞を繰返しながら不連続的に進展する。また、き裂は、界面を進展するときなどは進展方向からかなり傾いて進展しており、ジグザグ状

に進展する様子が明確に認められた。一方図(b)の粒子径が $0.3 \mu\text{m}$ に対する観察結果では、き裂はほとんど停滞せずに、ほぼ一定のき裂進展速度で連続的に進展する事が観察された。また、き裂は(a)のようにジグザグ状ではなく直線的に進展していた。以上の観察結果が示すように、WC粒子径が小さい場合、WC結晶粒にぶつかってき裂が停止しても迂回したりして再進展しやすいものと考えられる。

高き裂進展速度域において、WC粒子径によるき裂進展抵抗の差異が生じる原因は、WC粒子そのものによる阻止効果に加えて、 $3.4 \mu\text{m}$ の試験片はジグザグに進展するのに対して $0.3 \mu\text{m}$ のものは直線的に進展することも原因の一つと考えられる。また、 $3.4 \mu\text{m}$ のき裂先端近傍では、き裂が途切れて不連続的に進展している箇所、いわゆる未破断の架橋部が多数存在していた。一方、 $0.3 \mu\text{m}$ の素材ではこのような架橋部はほとんど確認できなかった。以上のき裂進展特性は高き裂進展速度域で顕著に認められた。一方、低き裂進展速度域、並びに低 R 比では、繰返し応力による影響（架橋部解消）が相対的に増加し、上記架橋効果が低減するために、WC粒子によるき裂進展抵抗の増加効果を抑制することが期待できる。

なお、紙数の関係で R 曲線に関する結果は省略する。

4. 結論

- (1)WC粒子径が小さいほどき裂進展は加速する。また、高き裂進展速度域ほどその差が顕著になる。
- (2)WC粒子径が小さいときき裂は直線的に、またWC粒子径が大きいときき裂はジグザグ状に進展する。
- (3)高き裂進展速度域ではWC粒子径が大きいと未破断の架橋部が生じやすく、それによりき裂進展の駆動力が減少して、き裂進展速度が減少する。

(a) $dm=3.4 \mu\text{m}$

(b) $dm=0.3 \mu\text{m}$

Fig.5 Typical examples of crack morphologies for the crack propagating crack.

Fig.6 Variation of crack growth rate due to an interaction between crack and WC grains.