研 究

セラミックスの強度信頼性評価 (第6報)
—研削加工損傷への応用—西 誠^{☆1}, 杉田 忠彰^{☆1}, 舟田 義則^{☆2}^{☆1} 金沢大学工学部, 〒920 金沢市小立野2-40-20. ^{☆2} 石川県工業試験場, 〒920-02 金沢市戸水町ロ-1.Strength Reliability Evaluation of Ceramics (6th Report)
—Application of Ceramics with Grinding Damage—Makoto Nishi^{☆1}, Tadaaki Sugita^{☆1} and Yoshinori Funada^{☆2}^{☆1} Faculty of Engineering, Kanazawa University, 2-40-20 Kodatsuno, Kanazawa 920. ^{☆2} Industrial Research Institute of Ishikawa, ロ-1 Tomizu, Kanazawa 920-02.

Received December 8, 1995

SYNOPSIS

The strength reliability of the PSZ ceramics with grinding damages under cyclic loading is evaluated by the crack growth parameters of grinding damage model, which is estimated from the result of fatigue testing. The result of cyclic four point bending test of ceramics specimens with grinding surface shows that the fatigue characteristics depends on the initial crack length and density of cracks caused by grinding. In order to estimate the model of cracks on grinding surface, the initial crack length and the length of crack growth during cyclic bending is measured from the fatigue fractured surface. Also the density of cracks is assumed from an approximated life curve at the fatigue characteristics. And then the crack growth parameters m , C and fatigue fracture toughness value K_{fc} are calculated using the estimated model of cracks. Further, statistical characteristics of the crack growth parameters for the ceramics with multiple cracks are expressed by Weibull distribution function in the ceramics with single cracks. The evaluated strength reliability agrees with a fatigue characteristics of ceramics with grinding surface under cyclic four point bending. Therefore, it is found that the proposed method in this study is sufficiently effective for the strength reliability evaluation of ceramics with grinding damages.

KEY WORD

grinding damage, fatigue characteristics, strength reliability evaluation, PSZ ceramics

1 緒言

本研究は加工損傷を有するセラミックスの強度信頼性評価を行うことを目的として、前報¹⁻⁵⁾まで加工損傷を複数亀裂群としてモデル化することによって、強度信頼性を評価する手法を提案した。また、実際にレーザ損傷のような等長等周期亀裂群を有するセラミックスにおける寿命予測を行い、提案した強度信頼性評価

法の妥当性について検討した。

ここで、提案した手法を用いて強度信頼性評価を行う場合、セラミック部材の加工損傷をある一定の亀裂間隔と亀裂長さを有する等長等周期亀裂群としてモデル化することが必要である^{3,4)}。しかしながら、セラミックスの大部分の加工においては、前報⁵⁾で評価されたレーザ加工のように、加工面の観察から亀裂群を

モデル化することは困難である。しかも通常のセラミックスの加工では、亀裂状加工損傷をできるだけ低く抑えた加工、あるいは加工損傷がほとんど見られない加工が施されているため、加工損傷はほとんど観察されない。また、加工損傷を等長等周期亀裂群としてモデル化することが可能であるかも明らかではない。しかしながら、その一方でセラミックスの破損は亀裂を原因とすることがほとんどであることから、加工による損傷を見かけ上亀裂としてモデル化し、強度信頼性を評価することはセラミックスを機械構造用部材として利用する上できわめて重要な問題である。

以上のことから本報告では、本研究における強度信頼性評価の総括として、セラミックスにおいて最も一般的な加工の1つである研削加工について取り上げ、その強度信頼性評価を行う。具体的には、研削加工面を有するセラミックスの疲労試験結果から研削加工面を亀裂群としてモデル化する手法について検討するとともに、強度信頼性評価を試みる。その際、研削方向および砥石粒度が強度信頼性に及ぼす影響についても検討を行う。

2. 研削加工損傷を有するセラミックスの疲労試験

2.1 試験条件

研削加工面を有するセラミックスを亀裂群としてモデル化し、強度信頼性評価を行うために、研削加工面を有するセラミックスの疲労試験を行う。試験試料はこれまでの報告³⁻⁵⁾同様、部分安定化ジルコニア（以下PSZ）を用いた。疲労試験はFig.1に示す4点曲げ試験により行うものとし、試料形状は長さ36mm、幅4mm、厚さ3mmに加工した。また、試料引っ張り側の面には研削加工を施した。Table 1は試料に施した研削加工条件である。研削加工は湿式のアップカットで、切り込み10 μ mのワンパス研削で行った。なお、研削速度は1200m/min、テーブル送り速度は12m/minに設定している。

さらに、本報告では加工損傷の程度の違いによる影響を考慮するため、砥石の粒度および研削の方向を変化させた。研削方向はFig.1に示すように試料長手方向に対して直交方向（以下幅方向）と平行方向（以下長手方向）に研削を行った2種類とした。また、砥石の粒度は#60、140、270の3種類とした。通常の研削加工においてはより小さい粒径の砥石で研削加工が行われているが、ここでは研削加工損傷に対する強度信頼性評価法の妥当性を検討することを目的としているこ

Fig.1 Direction of grinding of four point bending specimen.

Table 1 Conditions of grinding.

Grinding method	Plunge surface grinding , Up cut
Grinding wheel	SDC60P75B7 SDC140P75B7 SDC270P75B7
Grinding wheel size	200 X 8 X 31.75
Grinding wheel speed	1200 m / min
Table speed	12 m / min
Depth of cut	10 μ m
Work	PSZ

とから研削加工損傷を得易い比較的大きな粒径の砥石を使用した。

Photo. 1は#60、270の砥石でPSZの研削加工を行った加工面を観察した結果である。#60で研削加工を行った場合、明らかに研削加工が原因と考えられる無数の亀裂が、塑性流動による研削加工条痕とともに発生しているのが観察される。また、亀裂は研削方向に対して直交、平行両方向にそれぞれ発生し、網の目状の亀裂を形成している。また、この亀裂は研削による熱損傷によって形成されたものと推定される。さらに、#270で研削した場合も研削方向に対して、平行と直交方向に亀裂が網の目状に発生しているのが観察される。

2.2 研削加工面を有するセラミックスの疲労特性

(1) 砥石粒度の影響

#60、140、270の各粒度の砥石によって、研削加工を施したPSZの疲労試験を行った結果を繰り返し応力変動幅と寿命との関係としてFig.2に示す。ただし、同図における試料はすべて長手方向に研削を行った試料である。これによると、すべての砥石粒度でばらつきはあるものの、これまでの疲労試験^{1,3,5)}同様、応力変

動幅が低下するに従って寿命が長くなっており、疲労による応力の減少が認められる。また、砥石粒度で比較した場合、粒度の大きい砥石で加工するほど疲労強度が増加している。すなわち、寿命回数 10^4 で比較すると#60において応力変動幅は310MPaであるのに対し、#270では540MPaに増加している。この原因としては砥石の粒度が大きくなることによって、加工面に残留する亀裂が浅くなるためと考えられる。

(2) 研削方向の影響

つぎに、研削方向の影響を明らかにするため、砥石粒度#60および#140で幅方向に研削を行ったPSZについて疲労試験を行った。Fig.3は#60で幅方向に研削したPSZの疲労試験結果を応力変動幅と寿命の関係でまとめたものである。また、比較として同じ粒度で長手方向に研削加工を行ったPSZの疲労試験結果も合わせて示す。この図によると、幅方向に研削した場合も、長手方向に研削した場合と同様に、負荷応力が低下するに従って寿命が増加する。また、研削方向によって疲労強度は大きく変化することも認められる。すなわち、#60の場合、 N_c が 10^4 での長手方向研削部材の疲労強度は約230MN/m²であるのに対し、幅方向研削部材のそれは約480MN/m²となり、後者の疲労強度は2倍以上となる。また、#140でも同様なことがいえる。この原因としては、研削加工法を施した場合、研削方向と研削方向に対して垂直な方向では破壊に関与する先在亀裂長さが異なるためと考えられる。

2.2 破断面観察および疲労破壊靱性値の算出

Photo.2に研削加工損傷を有するPSZの疲労破断面の観察例を示す。この図から観察されるように、研削時に発生する亀裂群のため破壊の起点となる初期亀裂部分は破壊時に飛散する。そのため、破壊起点において飛散した約8 μ mの領域を初期亀裂部分として測定した。さらに、これまでのPSZの破断面観察例と同様、疲労による亀裂の進展が原因とみられる半楕円状の亀裂の安定伝播領域と、破断の際の不安定亀裂伝播領域が存在することが認められる。すなわち、図中のAの破壊起点を囲む半楕円状の領域が疲労亀裂による伝播領域であり、Bの領域が不安定亀裂伝播による破断領域であると考えられる。また、疲労亀裂進展によって半楕円状に進展した亀裂の深さは、この破断面の場合、約

Photo. 1 Typical surfaces of PSZ after grinding.

Fig.2 Effect of grain size on relationships between stress range and number of bending cycles to failure.

Fig.3 Effect of grinding direction on relationships between stress range and number of bending cycles to failure.

75 μm の深さである。これらのことから、この試料においては加工損傷として表面に深さ約 8 μm の初期亀裂を有し、繰り返し疲労によって半楕円状に約75 μm まで進展した後不安定伝播を起こし破断に至ったと考えられる。ここで、研削加工損傷を有する場合の疲労亀裂の進展量は、これまでの複数亀裂群、レーザ熱衝撃亀裂群の破断面から観察された疲労亀裂の進展量に比べて小さくなっている。これは、研削加工損傷における初期亀裂長さが、他の複数亀裂群に比べて小さいため、疲労を生じる繰り返し応力が大きくなったためと考えられる。

セラミックスの強度信頼性評価を行う際に、破壊の起点となる初期亀裂長さを測定することが必要である。そのため、破断面において観察された破壊の起点部分を初期亀裂長さとして測定した。Table 2は破断面の観察から測定した各研削条件での亀裂深さの平均値を示したものである。これによると、砥粒粒度が大きくなるほど加工面に先在する亀裂が短くなるのが認められる。また、研削方向によって先在する亀裂長さが異なっている。このことは、研削方向に平行に発生する亀裂は幅方向に研削した試料の破壊に関与し、直交方向に発生する亀裂は長手方向に研削した試料の破壊に関与すると考えられることから、研削方向に直交する亀裂の深さが、研削方向に平行に発生する亀裂に比べて小さくなっているためと推定される。

さらに、破断面観察から疲労による亀裂の進展領域を測定し、この亀裂長さに対応する応力拡大係数を疲労破壊靱性値として算出した。Table 2に各研削条件における K_{fc} の平均値を示す。 K_{fc} は砥粒粒度が大きいくほど大きくなる。この原因として考えられることは、砥粒粒度が大きくなるほど、初期亀裂長さが小さくなるため、疲労を生じる繰り返し応力が大きくなり、結果として破断時において破断に至らなかった亀裂との相互干渉が大きくなるためと考えられる。

3 考察

3.1 各種研削加工損傷の評価

次に、これまで提案してきた強度信頼性評価法に基づいて、研削加工損傷を有するPSZの強度信頼性評価を行う。まず加工損傷を等長等周期亀裂群としてモデル化するために亀裂密度の算定を行う。前報⁵⁾のレーザ加工の場合において亀裂密度は加工面の観察から亀裂密度を測定した。しかしながら、研削加工面の亀裂をレーザ加工のように加工面から評価することは困難である。そこで、ここでは各種の研削加工面を有する部材の疲労特性と本研究で提案してきた寿命予測法による寿命線図を近似し、その結果から研削加工面における亀裂密度 a/d (亀裂長さ/亀裂間隔) を算定する手法を用いた。

具体的には、疲労破断面で測定した初期亀裂が研削加工面に等長等周期で先在すると仮定する。そして、その初期亀裂群を有する部材について、レーザ加工損傷の場合と同様に寿命予測を行う。その際、複数亀裂群におけるもう1つのパラメータである亀裂間隔を考慮するため、疲労試験で求めた疲労特性に最も適合した寿命線図となる亀裂密度を選択する。

Fig.4は#60の研削加工面を有する部材の疲労試験から得た疲労特性と寿命予測線図を重ねた結果である。ただし、研削加工による初期亀裂はTable 2に示す初期亀裂長さを用いた。また、それぞれの研削加工における亀裂密度の適用範囲は、疲労特性に対して寿命線図が最も当てはまる範囲をあらかじめ選択した。すなわち、砥粒粒度#60の場合に、長手方向の亀裂密度を a/d

Table 2 Initial crack length and fatigue fracture toughness value for various grain size and direction of grinding

Grain size	# 60		# 140		# 270	Single crack
Direction of grinding	Longitudinal	Cross	Longitudinal	Cross	Longitudinal	
Initial crack length μm	34	25	10	8	7	
K_{fc}^* $\text{MN/m}^{3/2}$	5.17	5.69	5.88	7.19	7.10	4.49

K_{fc}^* : Average value of fatigue fracture toughness

Fig. 4 Approximated life curve on relationships between stress range and number of bending cycles to failure.

= 0.4~0.5, 幅方向のそれを $a/d = 0.38 \sim 0.48$ とした。そして、それぞれの範囲で亀裂間隔を 0.01 毎に変化させ、最も相関係数の高い寿命線図を求めた。その結果、Fig. 4 に示すように、#60 の研削加工面の場合、長手方向で亀裂密度 $a/d = 0.48$ 、幅方向で $a/d = 0.35$ の時の寿命線図と一致した。そして、ここで示した亀裂間隔が、各種研削加工面の加工損傷を等長等周期亀裂群と仮定したときの亀裂密度となると考えられる。そしてこの結果を用いることにより、研削加工損傷を有する PSZ 部材の強度信頼性評価を行うための、亀裂進展特性を求めることができる。

以上の結果から、各研削条件の場合に対応した亀裂密度での疲労亀裂進展パラメータを求め Table 3 に示す。この結果が、PSZ の研削加工における研削損傷状態とその加工損傷に起因する疲労亀裂進展特性を表していることになる。

3.2 研削加工損傷を有する部材の強度信頼性評価

最後に上記の結果から各種研削加工面を有する部材の強度信頼性評価を行う。ただし、強度信頼性評価に

Fig. 5 Example of strength reliability evaluation of PSZ with grinding surface.

において必要とされる疲労亀裂進展パラメータの確率特性は、複数亀裂およびレーザ加工損傷と同様の理由で、単数亀裂の場合の確率特性に従うものとした。

Fig. 5 は砥石砥石粒度 #60 で長手方向および幅方向に研削した加工面を有する部材の寿命線図を破壊確率 $F = 0.01 \sim 0.99$ までの範囲で示した結果である。また、図中に同じ条件で 4 点曲げ疲労試験を行ったときの疲労特性も合わせて示す。これによると、砥石粒度が #60 の場合、長手方向と幅方向のいずれも、ほとんどの疲労試験の実験値が、破壊確率を 0.01 と 0.99 としたときの寿命線図の間となる。このことは、Table 2 に示した亀裂進展特性と単数亀裂における亀裂進展特性の確率特性を用いて、加工損傷を有する PSZ 部材の強度信頼性評価を行うことが十分可能であることを示している。したがって、研削加工面のような加工損傷に対しても本研究で提案した強度信頼性評価法が十分適用可能であるといえる。

以上のことから、研削加工面のような加工損傷を有するセラミックスに対しても本研究で提案した強度信頼性評価法がかなり適用できるであろうとすることが

Table 3 Crack density and crack growth parameters for various grain size and direction of grinding.

Grain size	# 60		# 140		# 270	Single crack
Direction of grinding	Longitudinal	Cross	Longitudinal	Cross	Longitudinal	
Crack density	0.48	0.48	0.50	0.38	0.58	
m	17.05	13.85	10.47	9.62	14.72	6.62
C	2.32×10^{-12}	3.62×10^{-12}	3.49×10^{-8}	6.52×10^{-10}	8.75×10^{-12}	1.44×10^{-6}

できる。さらに、このことは、どのような加工損傷においても加工面の加工損傷状態が複数亀裂群としてモデル化され、亀裂先端に働く応力拡大係数が定式化されるなら、その加工損傷を有するセラミックスの強度信頼性評価を行うことができることを示している。

4 結言

本報告ではセラミックスにおいて最も一般的な加工の1つである研削加工について取り上げ、研削加工面を有するセラミックスの疲労試験結果から研削加工面を亀裂群としてモデル化する手法について、検討するとともに、その強度信頼性評価を行った。また、研削方向および砥粒粒度の影響についても検討を行った。そして以下の結論を得た。

- (1)各種研削加工を施したPSZについて疲労試験を行った結果、加工条件の変化により疲労特性が変化することが認められた。すなわち、研削における砥粒粒度が小さいほど寿命が増加するのが分かった。また、試料の長手方向研削のものよりも幅方向研削の試料の寿命が延びた。
- (2)破断面観察により、各研削条件での亀裂長さと疲

労破壊靱性値 K_{Ic} を測定した。その結果、砥粒粒度や研削方向によって破壊に関与する亀裂長さが変化することがわかった。また砥粒粒度が大きいほど K_{Ic} の値が大きくなることが分かった。

- (3)4点曲げ疲労試験結果で得られた疲労特性を、亀裂密度をパラメータとした寿命線図と対応させた結果、研削条件によって亀裂密度が変化することが確認された。
- (4)各種の研削加工面の亀裂モデルにおける強度信頼性評価を行い、疲労試験の結果と比較検討した結果、ほとんどの研削条件において、疲労試験結果が破壊確率 F が0.01から0.99までの範囲の寿命線図内に含まれることが確認された。

文献

- 1) 杉田, 上田, 西: 粉体および粉末冶金, **35** (1988)781.
- 2) 杉田, 上田, 西: 粉体および粉末冶金, **36** (1989)865.
- 3) 西, 杉田: 粉体および粉末冶金, **39** (1992)50.
- 4) 西, 杉田, 舟田: 粉体および粉末冶金, **41**(1994)1412.
- 5) 西, 杉田, 舟田: 粉体および粉末冶金, **41**(1994)1419.