

Changing of thermal barrier characteristic for TBC by high temperature exposure

○学 木下 潤 (新潟大院) 正 大木 基史 (新潟大)
 正 石橋 達弥 (新潟大) 学 内山 夫己 (新潟大院)

Jun KINOSHITA, Graduate School of Science and Technology, Niigata University, 8050, Ikarashi 2-no-cho, Niigata
 Motohiko OHKI, Faculty of Engineering, Niigata University, 8050, Ikarashi 2-no-cho, Niigata
 Tatsuya ISHIBASHI, Faculty of Engineering, Niigata University, 8050, Ikarashi 2-no-cho, Niigata
 Hiroki UCHIYAMA, Graduate School of Science and Technology, Niigata University, 8050, Ikarashi 2-no-cho, Niigata

Key Words Thermal Barrier Coatings, High Temperature Exposure, Thermal Conductivity, Porosity

1. 緒言

発電用ガスタービンの熱効率向上のため実機への適用が進められている熱バリアコーティング(TBC: Thermal Barrier Coatings)材は、耐熱・耐酸化性に優れた金属アンダーコートと、低熱伝導性のセラミックトップコートから構成されるのが一般的であり、金属高温部材上に施工される。従来のガスタービンにTBC材を用いることで、熱効率を飛躍的に向上させると共に、金属基材温度の低下に伴う基材寿命の延伸が可能となる。その一方で、TBCは本質的にセラミックと金属の熱膨張係数の相違に起因する熱応力を発生し、その結果コーティング剥離等の損傷を引き起こす。さらに、実機稼動条件では長時間高温暴露によりトップコート内部の気孔が焼結進行により縮小し、トップコートの機械的・熱的特性が変化するという問題も抱えている¹⁾。

そこで本研究では、高温暴露を施したTBC試験片の焼結過程において、暴露時間に伴い変化する気孔率および熱伝導率の相関性を定式化し、高温環境下における熱特性の変化要因を定量的に評価することを目的とする。

2. 試験方法

2.1 試験片

本報告では二種の試験片を用いた。Fig.1に、熱伝導率測定に用いたボタン型TBC試験片の形状および寸法を示す。また、断面観察による気孔率測定のために、ボタン型TBC試験片を1/4にカットした試験片を用いた。両試験片の組成は同様で、基材にCo基超合金FSX414を、アンダーコートに基材の機械的・熱的特性に近い特性を示すCoNiCrAlY合金を、トップコートに金属に近い熱膨張率と低い熱伝導率を持つ7wt.%Y₂O₃部分安定化ZrO₂(PSZ)を用いている。

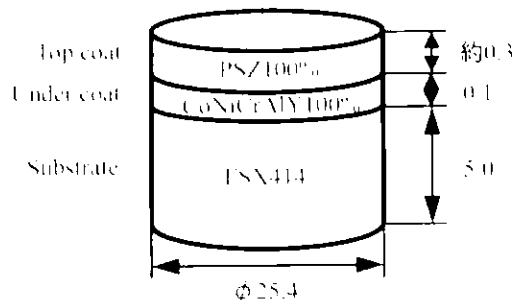


Fig.1 Geometry, shape of TBC specimen

2.2 試験条件

上述した二種の試験片を大気炉にて高温暴露を施した。暴露温度は1000℃、1100℃の二段階、暴露時間は100h、200h、500hの三段階とした。

2.3 熱伝導率測定

As-sprayedおよび高温暴露したボタン型試験片に対して、各高温暴露温度および暴露時間における熱伝導率を測定した。熱伝導率測定装置の模式図をFig.2に示す。試験片を熱流方向と垂直に、上下のヒートシンク棒の中央に固定し、ヒートシンク棒上端はヒーターで、下端は冷却水によって一定温度に保っている。また、ヒートシンク棒周辺を断熱材で囲むことによって周囲に熱が漏れるのを防ぎ、熱流を上下方向のみの一次元に保っている。この装置を用いて測定したA1、A2、B1の各点における温度および既知のパラメータを式(1)に代入することにより試験片の見掛けの熱抵抗値を算出する。算出した試験片の熱抵抗値および既知のパラメータを式(2)に代入することによりトップコートの熱伝導率を算出する。

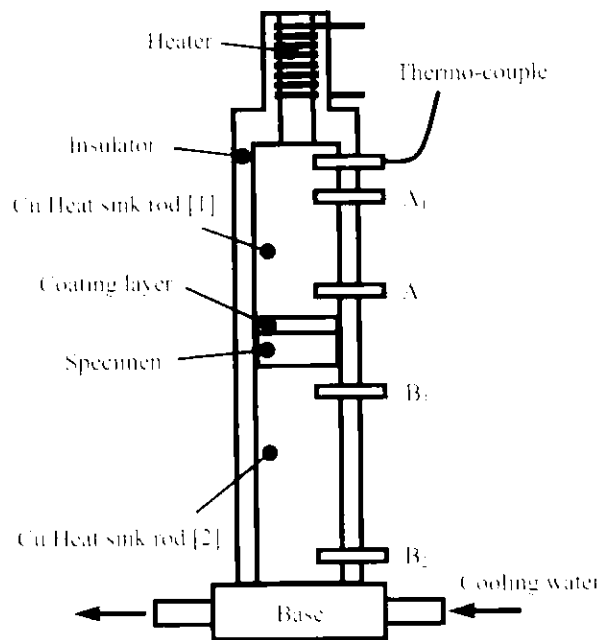


Fig.2 Schematic illustration of the thermal conductivity measurement device

$$R' = \frac{(A_2 - B_1) \cdot L}{(A_1 - A_2) \cdot \lambda_f \cdot S} \quad (1)$$

ここで、

- R' : 試験片の熱抵抗値 [K · W]
- L : A1 - A2 測定位置間距離 (8.0 · 10⁻² [m])
- λ_f : ロッド1の熱伝導率 (394 [W · m · K⁻¹])

S : 試験片の断面積(=5.1×10⁻⁴[m²])
 A_1, A_2, B_1 : 各測定位置での測定温度

$$\lambda_t = \frac{\tau_t}{(R' - R_u - R_s - r) \cdot S} \quad (2)$$

ここで、

λ_t : トップコートの熱伝導率[W/(m・K)]
 τ_t : トップコート厚さ(=3.0×10⁻⁴[m])
 R_u : アンダーコートの熱抵抗値(=1.7×10⁻²[K/W])
 R_s : 基材の熱抵抗値(=9.4×10⁻¹[K/W])
 r : 接触抵抗(=0.14[K/W])

2.4 気孔率測定

高温暴露によるトップコート気孔率変化を定量的に評価するため、日本電子製 JSM 走査型電子顕微鏡(SEM : Scanning Electron Microscopy)を用いた1/4カット試験片のトップコート断面観察を行った。SEM観察は主に二次電子像(SEI)によって行われるが、本報告では反射電子像(BEIV)を用いて行った。SEM断面観察写真を画像処理ソフトにより二値化し、気孔部分の面積割合を算出することで気孔率を推定した。また、同一高温暴露条件で撮影した10箇所 SEM断面観察写真からの算出結果を平均化した。

3. 試験結果および考察

1000℃で100h高温暴露したときの気孔率変化をTable1に示す。気孔率に関して、推定値がas-sprayedよりも上昇した値が数箇所あったが、これは高温暴露によるき裂進展や測定位置のズレによるものであり、平均化した気孔率は約7%減少していることが明らかとなった。

Fig.3(a), (b)にas-sprayedおよび100h高温暴露のSEM断面観察写真を示す。これらの結果より、微小気孔が焼結進展により消滅している事、大きな気孔の焼結は観察されなかった事から、現段階での焼結は微小気孔の消滅に留まっていると考えられる。

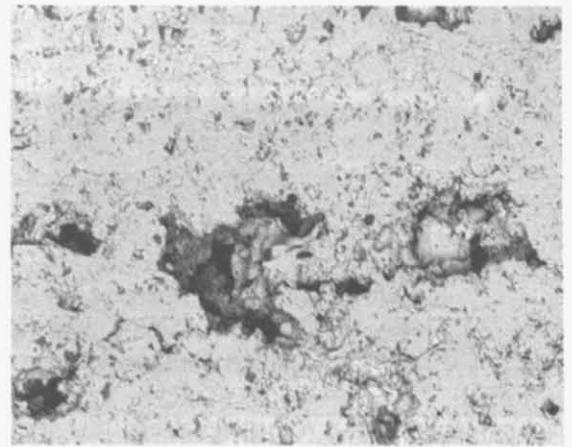
Table2にそれぞれの試験片の熱伝導率測定結果を示す。これより、100h高温暴露により熱伝導率が約11%上昇した事が明らかとなった。これは上述の微小気孔の消滅に起因すると考えられる。

Table1 Changing of porosity

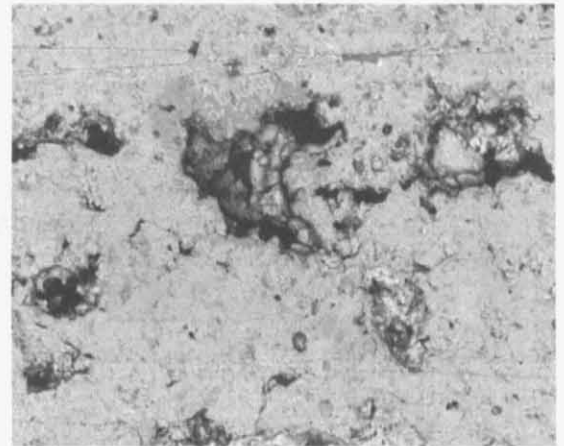
Position	Porosity [%]	
	as-sprayed	100h-heated
No.1	22.1	18.6
No.2	21.0	18.2
No.3	28.8	31.4
No.4	22.8	18.8
No.5	22.9	18.9
No.6	24.9	21.2
No.7	29.2	29.8
No.8	27.2	28.7
No.9	25.9	24.2
No.10	22.1	19.7
average	24.69	22.95

Table2 Changing of thermal conductivity

	as-sprayed	100h-heated
Thermal conductivity [W/(m・K)]	0.88	0.98



(a) as-sprayed



(a) 100h-heated of top coat

Fig.3 Cross-section observation

今後は1000℃におけるより長時間の熱処理を継続すると共に、温度による焼結進行の相違を検討するため1100℃における高温暴露を行う。それらの結果より高温暴露による気孔率変化と熱伝導率変化の相関性を定量的に評価する。

4. 結言

- (1) 1000℃で100hの高温暴露では平均化した気孔率が約7%減少した。
- (2) SEM断面観察写真から微小気孔が焼結進展により消滅したが、大きな気孔の焼結は観察されなかった。
- (3) 熱伝導率測定結果から、焼結による微小気孔の消滅が原因と考えられる約11%の上昇が見られた。
- (4) 今後は、暴露時間による気孔率変化と熱伝導率変化の定量的評価を行うと共に、暴露温度による焼結進行の相違も検討する。
- (5) それらの結果から、高温暴露による気孔率変化と熱伝導率変化の相関性を定量的に評価する。

謝辞

学部4年の米田恭祐君にお手伝いいただき感謝します。

<参考文献>

- (1) 久保貴博・高木圭介・北山和弘：ガスタービン遮熱コーティングの健全性評価、東芝レビューVol.58
- (2) 大木基史・武藤睦治・大原稔・高橋雅士・石橋達弥：遮熱コーティング材の熱サイクル損傷および遮熱特性、溶射学会論文集、第16巻・第3号、p.395-404(1998)