

高温環境で酸化された C/C 複合材の耐衝撃貫通特性

指導教員 教授 笠野 英秋
助手 長谷川 脩

88047 菅原 成幸
88055 丹野 荘司

1. はじめに

C/C 複合材は強化材とマトリックスが共に炭素からなる材料である。この材料は軽量かつ高強度であり、非酸化雰囲気中では 1500 以上の超高温環境下でもその強度を保持することができる。また他の材料に比べ熱膨張係数が小さいことから、急激な温度変化による熱衝撃に対して損傷を受けにくいという長所がある。

しかし酸化雰囲気中では環境温度が 500 以上になると酸化し、質量損失を生ずる。これを防ぐために、炭化ケイ素などでコーティングするが、コーティング材の熱膨張係数が大きいとコーティング材にクラックが入ることがある。また、コーティング材が破壊したときには C/C 複合材料が高温/酸化雰囲気中にさらされ、酸化による大きな質量損失が生じるという問題がある⁽¹⁾。

本研究では C/C 複合材を、高温で酸化させることにより、材料の劣化状況、質量損失、ならびに衝撃貫通特性について調べることを目的とする。

2. 実験装置及び方法

2.1 酸化試験

超高温炉の加熱速度は 6.3 /min とする。設定温度に達したら 5 分間その温度で保持し、その後、約 10 時間かけて室温まで徐冷する。保持温度は 900、1000、1100、1200 の 4 種類に設定し、試験片は表 1 に示した 3 種類について、計 12 通りの条件で試験を行った。

超高温炉は株式会社モトヤマ製で、超高温炉本体と超高温炉制御盤から構成されており、炉の内部の大きさは 200×230×280(mm)で、炉中に試験片を設置するためのホルダーが備え付けられている。加熱は炭化ケイ素セラミックスのヒーターによって最高 1500 の温度場を作り出すことができる。

酸化試験前の試験片の質量 S と試験後の試験片の質量 R をそれぞれ測定し、質量残存率 M_{sf} を求める。質量残存率とは酸化試験で残った質量と初期質量の割合である。算出式を式(1)に示す。

$$M_{sf} = \frac{R}{S} \times 100 \quad (1)$$

2.2 衝撃試験

酸化試験後の試験片で衝撃試験を行い、劣化による耐衝撃貫通特性の低下について調べる。積層数が 3、5、7 層で鋼球の衝撃速度は最小速度 100m/s から最大速度 300m/s の間で 5 通り行う。

本研究では C/C 複合材の耐衝撃貫通特性を調べるためにエネルギー保存則の式(2)を用いる。ここで V_i : 鋼

球が試験片に衝突する前の速度(衝撃速度)、 V_R : 鋼球が試験片を貫通した後の速度(残存速度)、 M : 鋼球の質量、 m : 試験片の飛散速度である。

$$\frac{1}{2}MV_i^2 = \frac{1}{2}(M+m)V_R^2 + E_p \quad (2)$$

いくつかの仮定の下で、式(2)より、 V_b : 貫通限界速度と V_R : 残存速度が得られる。

$$V_b = \sqrt{V_i^2 - \left(\frac{M+m}{M}\right)V_R^2} \quad (3)$$

$$V_R = \left(\frac{M}{M+m}\right)^{\frac{1}{2}} \sqrt{V_i^2 - V_b^2} \quad (4)$$

V_i と V_R から ΔV : 速度低下量と E_{ab} : エネルギー吸収率を求めることができる。

$$\Delta V = V_i - \left(\frac{M}{M+m}\right)^{\frac{1}{2}} \sqrt{V_i^2 - V_b^2} \quad (5)$$

$$E_{ab} = \frac{\frac{1}{2}MV_i^2 - \frac{1}{2}MV_R^2}{\frac{1}{2}MV_i^2} \times 100 \quad (6)$$

衝撃試験では衝撃試験システム(図 1)を用いる。本システムは衝撃試験機、レーザー検出器、超高速写真撮影システムから構成されている。窒素ガスの解放エネルギーを利用して直径 5 mm、重さ 0.51g の鋼球を最高 300m/s で発射することができる。

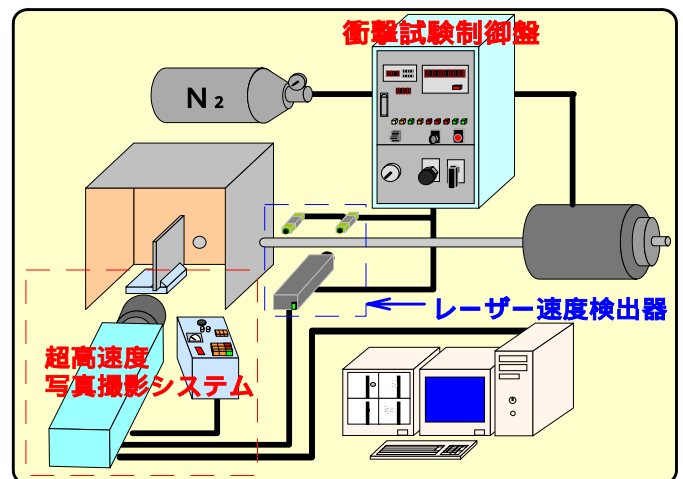


図 1 衝撃試験システム

3. 実験結果

3.1 酸化試験の結果

酸化試験での環境温度と質量残存率の関係を図 2 に示す。各プロットは平均値である。

積層数3層は試験片の表面の層が酸化によって消失すると、中心の層は両方向で酸化雰囲気中にさらされるため酸化が進み、5層、7層に比べ質量残存率が低くなったと考えられる。積層数7層の場合、環境温度900、1000、1100で5層の場合より低い値になった。これは5層の場合より表面積が 320 mm^2 大きいために酸化がより進んだためと考えられる。環境温度1200では3層では試験片が完全に消失し、5層、7層では中央部だけが酸化により薄い膜として残った。

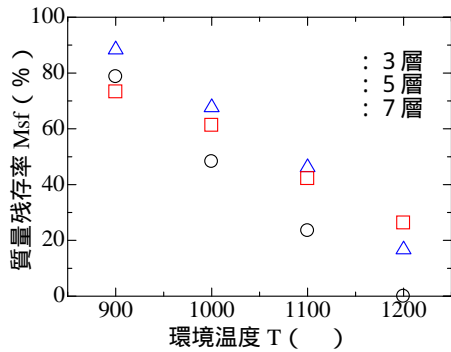


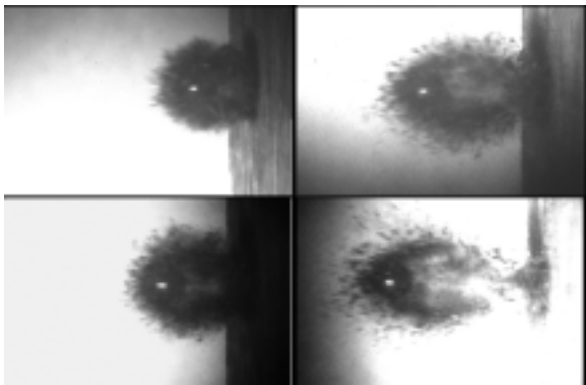
図2 環境温度と質量残存率の関係

3.2 衝撃試験の結果

本試験で得られた衝撃貫通写真の一例を図3と図4に示す。この画像から鋼球の残存速度を求める。

露光時間： $3\ \mu\text{s}$

インターフレーム： $30\ \mu\text{s}$

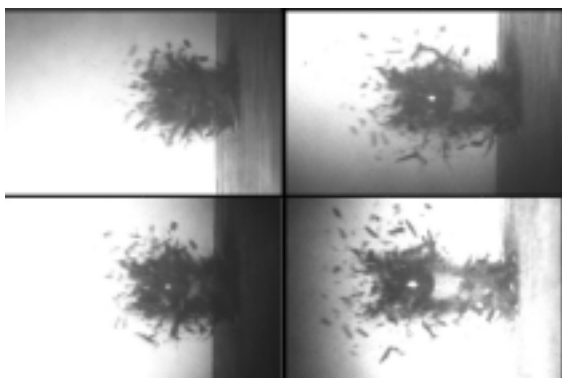


衝撃速度：152.4 m/s

図3 衝撃貫通写真(3層)

露光時間： $3\ \mu\text{s}$

インターフレーム： $30\ \mu\text{s}$



衝撃速度：102.1 m/s

図4 衝撃貫通写真(5層)

図5と図6に3層、5層の衝撃速度とエネルギー吸収率の関係を示す。共に衝撃速度とエネルギー吸収率の関係では、全体で衝撃速度が上昇するとエネルギー吸収率が下がっている。

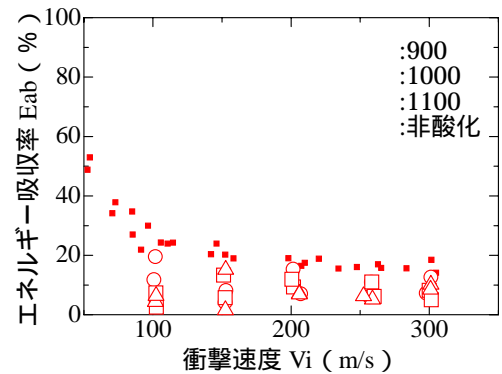


図5 衝撃速度とエネルギー吸収率の関係(3層)

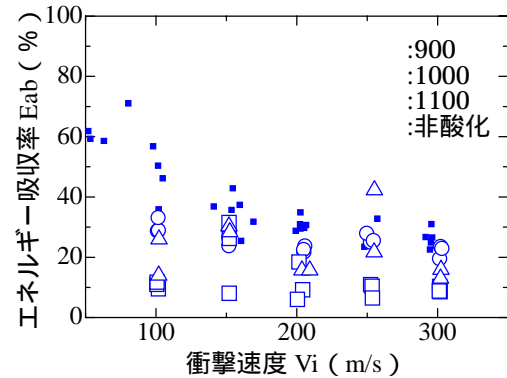


図6 衝撃速度とエネルギー吸収率の関係(5層)

4. 結論

本研究ではC/C複合材料の酸化特性と、酸化した材料の耐衝撃特性について調べた。得られた主な結果は次のとおりである。

環境温度が高くなると酸化による質量の消失する割合がおおきくなり、本研究で使用した1.2 mm、2.0 mm、2.8 mmのC/C複合材料では環境温度が1300に達すると、試験片が酸化によって完全に消失した。

酸化による質量損失のないC/C複合材と比べると、残存速度は全体的に高い値を示し、特に低速域ではその差が20%、34%と、高い値になった。エネルギー吸収率は酸化による質量損失のないC/C複合材に比べ、3層では50%、5層の場合は900と1000で70%、1100で80%低下した。

参考文献

- (1) 東京理科大学大学院基礎工学研究科博士課程材料工学専攻 青木 卓哉
C/C複合材の耐酸化性付与技術に関する研究