耐熱セラミックスの高温強度

和久 芳春*

ローマ・クラブが1972年に「成長の限界」を発表して以来、人類は地球環境、資源、食糧問題等に対して危機意識を持ち始めた。最近では地球環境や省エネルギー問題は国際的な最重要課題と認識され、あらゆる分野でエネルギー消費効率の向上が叫ばれている。米国では熱効率の高い先進ガスタービンエンジンの開発を検討しており、1923 K以上の酸化雰囲気中で安定に使用できる超耐熱構造材料の開発が必要であるとしている⁽¹⁾。現在ガスタービンエンジンの動翼に使われているNi基超耐熱合金の融点は1633 Kから1673 Kであり、今後耐熱性の向上はあまり期待できない。また、現在世界中で研究開発中の先進耐熱構造材料は、いずれも高温になると強度が低下し、いまのところ、酸化性雰囲気中で1923 K以上の温度で使える可能性のある耐熱構造材料は存在しない⁽¹⁾。これに対して、近年開発された一方向凝固セラミックス—MGC(Melt Growth Composite)材料—は、酸化物原料を溶解して一方向凝固法により製造される1973~2073 Kでも優れた高温強度を有する材料で、従来の耐熱構造材料には見られない画期的な高温特性を示す。

MGC材料は共晶反応を利用して凝固時の結晶成長を精密に制御して製造され、網の目構造の単結晶同士が微細に絡み合った新規な組織構造を持つ共晶セラミックスである。Al₂O₃/YAG系MGC材料⁽²⁾の場合、この材料の室温強度は融点(約2093 K)直下の2073 Kまで維持され(図1、表1参照)、1873 K、10⁻⁴ s⁻¹のひずみ速度でのクリープ強度は同じ組成の焼結材料の約13倍である。さらに、大気中の1973 Kで3.6×10⁶ s熱処理しても強度低下、組織変化が見られない、高温で転位の運動により塑性変形を示す等の高温特性を有する。また、Al₂O₃/GdAlO₃系MGC材料⁽³⁾の場合、この材料の曲げ降伏応力は1873 Kにおいて約700 MPaと高く(表1参照)、しかも曲げ試験で破壊しない延性を示す。

図1 Al₂O₃/YAG系MGC材料の曲げ強度の温度依存性。

表1 MGC材料の高温曲げ強度。

	1873 K	2073 K
Al ₂ O ₃ /YAG系 MGC材料	362 MPa	370 MPa
Al ₂ O ₃ /GdAlO ₃ 系 MGC材料	700 MPa	

また、塑性変形領域のAl₂O₃相、GdAlO₃相には共に転位組織が観察される。以上のことから、この材料が高い曲げ降伏応力と大きな延性を示す理由は、網の目構造を持つ単結晶同士が三次元的に連続して微細に絡み合った組織構造とアモルファス相が存在しない整合性の良い強い結合の界面の形成と密接に関係しているものと考えられ、結晶粒界すべりや結晶粒の回転が起こりにくく、各構成相の塑性変形が転位の運動により生じ、高い降伏応力が得られたものと推測される。

MGC材料は金属材料とセラミックス材料の長所を兼ね備えた新しいタイプの耐熱構造材料である。この優れた高温特性を利用した革新的発電システム開発の可能性を調査するため、1998年度から通産省のニューサンシャイン計画の中で先導研究がスタートする。MGC材料の研究はまだ緒に付いたばかりで、問題点も多く抱えているが、この材料のもつ優れた高温特性を利用する立場からの目的を持った基礎的研究と応用的研究の融合により大きく進展出来るものと期待している。

文 献

- (1) E. L. Courtright, H. C. Graham, A. P. Katz and R. J. Kerans: Materials Directorate, Wright Laboratory, Air Force Material Command, Patterson Air Force Base, WL-TR-91-4046, (1992), 1.
- (2) Y. Waku, N. Nakagawa, T. Wakamoto, H. Ohtsubo, K. Shimizu and Y. Kohtoku: J. Materials Sci., **33** (1998), 1217.
- (3) Y. Waku, N. Nakagawa, T. Wakamoto, H. Ohtsubo, K. Shimizu and Y. Kohtoku: Nature, **389** (1997), 49.

* 株式会社超高温材料研究所プロジェクト部長(〒755-0001 宇部市大字沖宇部573-3)
High Temperature Strength of Heat-Resistant Ceramics; Yoshiharu Waku(Japan Ultra-high Temperature Materials Research Institute, Ube)
Keywords: heat-resistant structural material, high temperature strength, unidirectional solidification, oxide ceramic, eutectic, single crystal, creep strength, plastic deformation
(1998年8月6日受理)