

先進高温材料 - 耐熱金属間化合物の実用化 -

Advanced High-Temperature Materials

- Development of Practicable High Temperature Intermetallics -

(研究プロジェクト番号: JSPS-RFTF 96R12301)

プロジェクトリーダー

山口 正治 京都大学大学院工学研究科・教授

コアメンバー

松尾 孝 東京工業大学大学院理工学研究科・教授

丸山 公一 東北大学大学院工学研究科・教授

乾 晴行 京都大学大学院工学研究科・助教授

竹山 雅夫 東京工業大学大学院理工学研究科・助教授

小池 淳一 東北大学大学院工学研究科・助教授

伊藤 和博 京都大学大学院工学研究科・助手



1. 研究目的

本研究プロジェクトでは、実用的な特性を備える金属間化合物、中でも TiAl と MoSi₂ に注目し、その実用化を実現するための研究を展開した。主たる研究課題は以下のとおりである。

(1) TiAl 基合金の一方方向凝固(DS)プロセスと TiAl 基 DS 合金の開発。DS 材の力学特性ならびに耐酸化性の測定。

(2) MoSi₂ および関連するシリサイド系化合物の単結晶の育成。育成された単結晶の力学特性を主とする物性の測定。これら化合物の実用化可能性の評価。

2. 研究成果の概要

2.1 TiAl 基合金

新しい軽量高温材料として注目されている TiAl 基合金は、TiAl () 単相の素材ではなく、TiAl 相を主体として少量の Ti₃Al () 相を含む 2 種類の金属間化合物からなる素材である。 / 2 2 相材料は、凝固状態では相と 2 相が互いに積み重なった特異な層状(ラメラ)組織を形成し、800 以下の温度範囲で優れた高温強度を示す。 / 2 2 相材料の組織は高温加工とその後の熱処理により様々に変化するが、高温強度や破壊靱性はラメラ組織が優れている。しかし、ラメラ組織の力学的性質には顕著な異方性がある。そこで結晶全体が同じ方位のラメラ組織をもった結晶(PST 結晶)を育成し、力学特性をさまざまな条件下で測定することによってラメラ組織の力学的異方性を明らかにした¹⁾。

もちろんクリープ強度もラメラ組織方位に依存する。図1は、Ti-48at.%Al PST 結晶の 875、68.6MPa におけるひずみ 0.01 でのクリープ速度とラメラ界面と応力軸とのなす角度φの関係を示している。クリープ速度は φ=45° で最大となり、φ=3° のとき最小値を示す^{2,3)}。この最小値はラメラ多結晶材のものに比べ 2 桁小さい。図2は、3 種類のラメラ方位を持つ PST 結晶(φ=0° (A 方位)、35° (B)、90° (N)) のクリープ抵抗(最小クリープ速度)をクリー

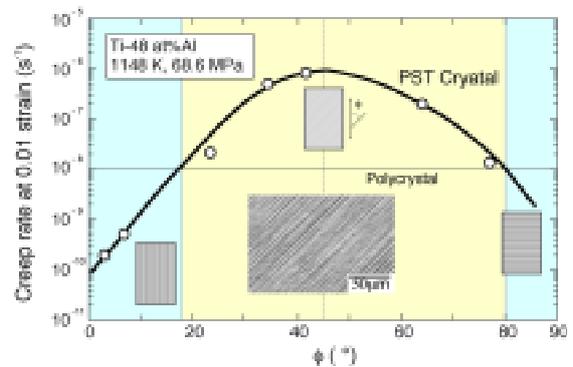


図1 Ti-48at.%Al PST 結晶のクリープ速度のラメラ方位依存性

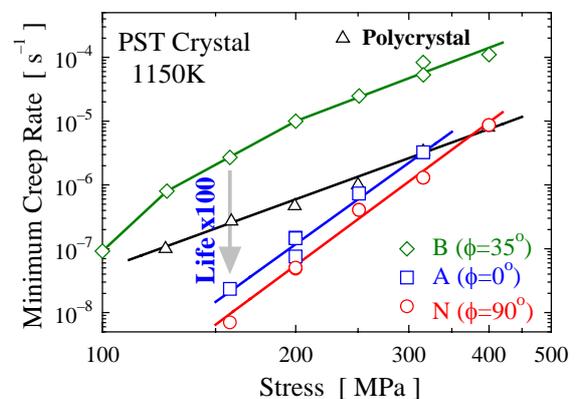


図2 異なるラメラ方位を有する PST 結晶のクリープ速度の応力依存性

プ荷重に対してプロットしたものである^{4,5)}。軟方位(B)に比べて硬方位(A と N)はクリープ抵抗が優れ、100 倍長寿命であることがわかる。硬方位 PST 結晶のクリープ抵抗はラメラ間隔の微細化やα₂ 相の体積比を増すことによってさらに向上する。このように硬方位(A と N)は共に強度に優れているが、φ=90° の引張延性はほとんどゼロに等しく、優れた引張延性を示すφ=0° 方位の実用性が高い。

このような PST 結晶の異方的力学特性の研究から、φ=90° 方位の脆さを避け、高強度、高引張延性、高破壊靱性を備えたラメラ組織材を得るためには、それらの特性を備えた

$\phi=0^\circ$ 方位の柱状晶粒のみからなる図 3 のような凝固材を得るための DS プロセスを開発しなければならない。本プロジェクトでは、この TiAl 基合金の DS プロセスに関して集中的な研究を行い、種結晶を用いる一方向凝固によってラメラ界面が軸方向に平行に配向した柱状晶からなる組織を実現できること、いったんラメラ組織方位が揃えば、期待通りの優れた機械的性質が得られることを明らかにした^{1,6)}。

図 4 に、PST タイプのラメラ組織をもつ典型的な DS 合金の機械的性質と耐酸化性を示す。降伏応力、引張延性、クリープ強度の全てにおいて優れていることがわかる⁶⁾。現在、この特性に比肩し得る他の TiAl 基合金は存在しない。750 -240MPa では、DS 材の定常クリープ速度は 10^{-9} - 10^{-10} /s 台となり、通常の TiAl 基合金に比して 1-2 桁小さい。

2.2 MoSi₂ と Mo₅SiB₂ 単結晶

単結晶を用いた MoSi₂ の高温強度に関する詳細な研究の結果、[001]方位は他の方位に比して圧倒的に高強度であること(1000 でも変形応力は 1 GPa を遥かに越える)、[001]方位の MoSi₂ 単結晶はクリープ強度も非常に高く、先進的セラミックス材料のそれに匹敵することが明らかになった⁷⁾。一方向凝固法により MoSi₂ 基複合材料の MoSi₂ マトリックスを単結晶化しその方位を制御すれば、高温クリープ特性の飛躍的向上を実現し得る可能性がある。さらに、新たな高温材料として注目さ

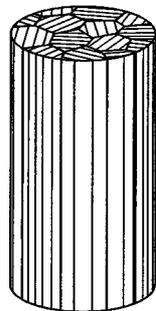


図 3 一方向凝固(DS)インゴット

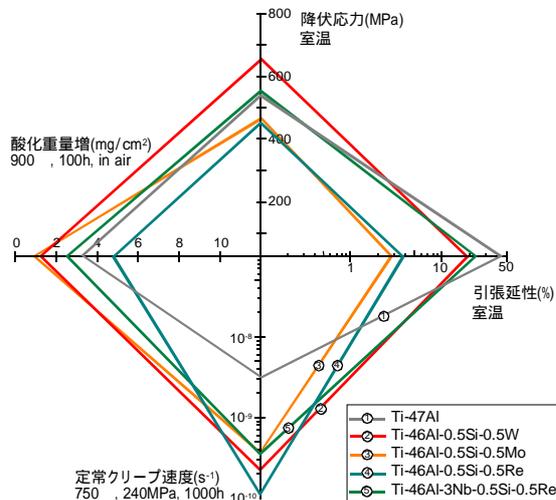


図 4 TiAl 基合金 DS 材の力学的性質と耐酸化性

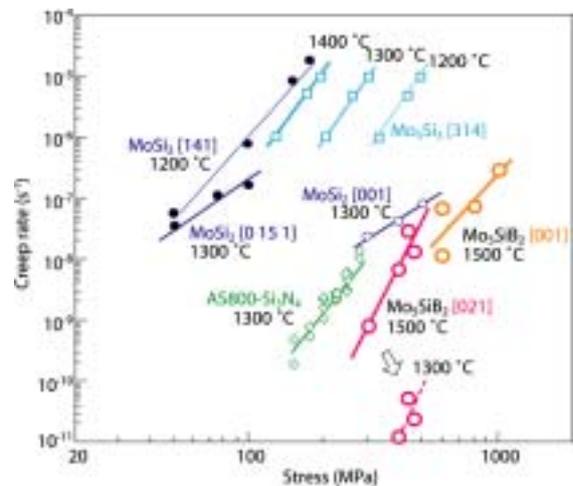


図 5 Mo₅SiB₂ 単結晶といくつかの超高温材料のクリープ速度

れる Mo₅SiB₂ の単結晶の育成に成功し、[001] 方位 MoSi₂ 単結晶や Si₃N₄-SiC 系セラミックス材料より遥かに優れたクリープ強度を有することを明らかにした⁸⁾。図 5 は[021]方位 Mo₅SiB₂ 単結晶のクリープ速度を示している⁸⁾。

最近の主たる発表論文

- (1) M. Yamaguchi, H. Inui and K. Ito, "High-Temperature Structural Intermetallics", *Acta Mater.*, 48 (2000) 307-322.
- (2) T. Matsuo, T. Nozaki, T. Asai, S. Y. Chang and M. Takeyama, Effect of Lamellar Plates on Creep Resistance in Near Gamma TiAl Alloys *Intermetallics*, 6 (7-8) (1998) 695-698.
- (3) Y. Yamamoto, H. Morishima, K. Koike, M. Takeyama and T. Matsuo, Control of Lamellar Orientation in TiAl Based PST Crystal by Using Seed Crystals, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 646 (2001), N5.54.1-N5.54.6.
- (4) G. Wegmann and K. Maruyama, "On the Microstructural Stability of TiAl/Ti₃Al Polysynthetically Twinned (PST) Crystals under Creep Conditions", *Phil. Mag. A*, 80 (10) (2000) 2283-2298.
- (5) H.Y. Kim and K. Maruyama, "Parallel Twinning during Creep Deformation in Soft Orientation PST Crystal of TiAl Alloy", *Acta Mater.*, 49 (14) (2001) 2635-2643.
- (6) S. Muto, T. Yamanaka, H. N. Lee, D. R. Johnson, H. Inui and M. Yamaguchi, *Adv. Eng. Mater.*, 3 (6) (2001) 391-294.
- (7) H. Inui, K. Ishikawa and M. Yamaguchi, "Creep Deformation of Single Crystals of Binary and Some Ternary MoSi₂ with the C11_b Structure", *Intermetallics*, 8 (9-11) (2000) 1159-1168.
- (8) K. Ito, K. Ihara, K. Tanaka, M. Fujikura and M. Yamaguchi, "Physical and Mechanical Properties of Single Crystal of the T2 Phase in the Mo-Si-B system, *Intermetallics*, 9 (7) (2001) 591-602.