K6-5

SPS 法により作製した TiC または TiB 強化 TiAl 合金の引張特性

Tensile properties of TiC or TiB reinforced TiAl alloy by SPS method

○阿波根亘[1]，松本崇史[2]，出井裕[3]，小宮良樹[3]
*Wataru Ahagon[1], Takashi Matsumoto[2], Hiroshi Izui[3], Yoshiki Komiya[3]

Abstract: Titanium aluminides have some attractive properties at high temperature. So, it is expected as a heat-resistant material and structural material. However, its disadvantages such as low ductility and strength at room temperature make difficult to put to practical use. This work tries to improve strength at room temperature by the addition of TiC or TiB as a reinforcement. TiC/Ti-Al-Nb and TiB/Ti-Al-Nb composites were fabricated by spark plasma sintering (SPS) process using mixed powders of pure Ti, pure Al and NbC or NbB_2. TiC/Ti-Al-Nb and TiB/Ti-Al-Nb composites showed a maximum tensile strength at TiC volume fraction of 5% and TiB volume fraction of 15%.

1.　緒言

TiAl は軽量で耐熱性に優れる材料である[1][2]．代表的な耐熱合金である Ni 合金の約半分程度の比重であり，その一部を置き換えることで重量の削減や燃費の向上などが期待できる．一方，TiAl は室温での延性や強度に劣る[1][2]ため，実用化が進んでいない．しかし，近年では環境対策や燃料費の高騰などから航空機にも更なる燃費の向上が求められており，B787 などの航空機のエンジンにも使用されはじめている．

TiAl の室温での機械的特性の欠点は，第三金属元素やセラミックを添加することで改善することが可能である[2]．本研究では，純 Ti および純 Al に NbC または NbB_2 を添加し，SPS 法を用いて焼結を行うことで強化材となる TiC および TiB を内部生成させ，第三金属元素として Nb が添加されている状況下での機械的特性の評価を行った．

2.　実験方法

本研究では，母材としてトーホーテック（株）製純 Ti 粉末 TC-200 と（株）高純度化学研究所製純 Al 粉末 ALE-16PB を使用した．添加粉末には日本新金属（株）製 NbC 粉末および NbB_2 粉末を使用した．

粉末の混合は遊星ボールミルを用いて，回転数 200rpm，混合時間 30min の条件で行った．この際，純 Ti および純 Al は原子比で Ti：Al＝52：48 となるように混合を行った[4]．また，添加粉末はそれぞれ焼結後に生成される強化材の体積含有率が 5～20%となるように混合を行った．混合した粉末は，高強度カーボングラファイト製ダイ・パンチに充てんし，SPS 装置を用いて焼結を行った．まず，昇温速度を 20°C/min，保持時間を 10min で固定し，焼結温度を 900°C～1100°C，焼結圧力を 50MPa～60MPa までそれぞれ変化させて Ti-48at.%Al の焼結を行うことで[5]，最適焼結条件を決定した．その後，得られた最適焼結条件を用いて TiC/Ti-Al-Nb および TiB/Ti-Al-Nb の焼結を行った．

焼結体は，マイクロビッカース硬さの測定および引張試験を行った後，XRD による相の同定および SEM によるミクロ組織の観察を行った．

3.　実験結果および考察

3.1　Ti-48at.%Al の焼結条件の決定

Ti-48at.%Al の各焼結圧力における最大引張強さと焼結温度の関係を図 1 に示す．図 1 より，いずれの焼結圧力においても焼結温度 1000°C で引張強さの最大値を示した．

次に各焼結圧力における焼結体のミクロ組織の観察を反射電子像により行った．その結果を図 2 に示す．図中の白い部分は Ti_3Al 相，灰色の部分は TiAl 相である．図 2（a）では赤い矢印が示しているように，空孔が多く観察できるため引張強さが低い値を示すと考えられる．焼結温度 1000°C では，焼結が進むことで引張強さが上昇するが，その後 1100°C にかけては TiAl

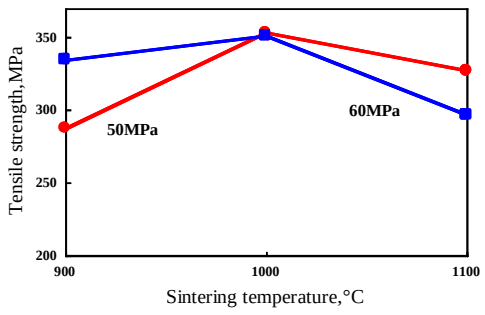
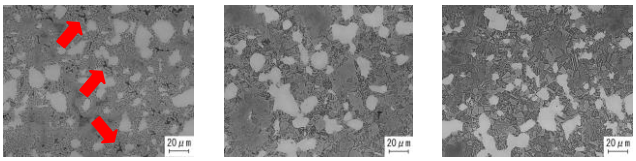


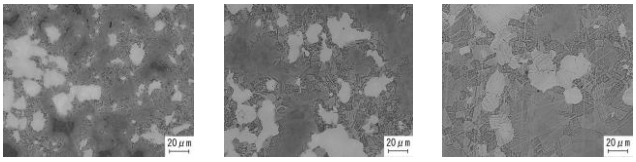
Fig.1 Tensile strength vs sintering temperature for Ti-48at.%Al

1：日大理工・院（前）・航宇　2：日大理工・学部・航宇　3：日大理工・教員・航宇

相を中心に結晶粒が粗大化したことで引張強さが低下したと考えられる．また，焼結圧力 60MPa では，白く見える Ti_3Al 相が偏っており，焼結中に融けた Al が Ti と反応しきれずに偏ったと考えられる．以上のことから，最適焼結条件は焼結温度 1000℃，焼結圧力 50MPa である．



（a）50MPa，900℃　（b）50MPa，1000℃　（c）50MPa，1100℃



（d）60MPa，900℃　（e）60MPa，1000℃　（f）60MPa，1100℃

Fig.2 Microstructures (BSE) of Ti-48at.%Al sintered at various temperature and pressure

3.2　TiC/Ti-Al-Nb および TiB/Ti-Al-Nb における機械的特性の評価

TiC または TiB 強化における最大引張強さと強化材体積含有率の関係および Nb の含有率を図 3 に示す．図 3 より，5vol.%TiC および 15vol.%TiB で引張強さが最大値を示した．

図 3 の破線は Nb の理論含有率を示しており，5vol.%TiC のときに約 4.2at.%，15vol.%TiB のときに約 6.3at.%となる．Nb の含有率は NbC 添加では NbB_2 添加の約 2 倍になるため，この違いが引張強さの最大値を示す強化材含有率に影響を与えていると考えられる．

次に 5vol.%TiC および 15vol.%TiB における反射電子像を図 4 に示す．図中の白～灰色の部分は Ti_3Al 相，灰色～黒の部分は TiAl 相，最も明るい部分は Nb を含む相である．

図 4 から，NbB_2 添加では白く細かい粒子が凝集して

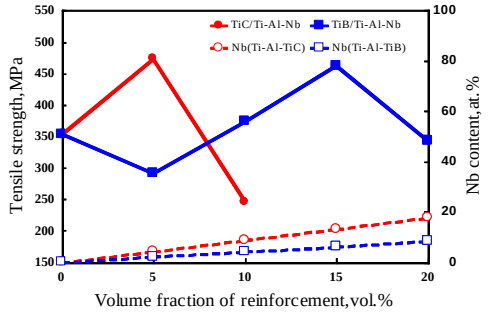
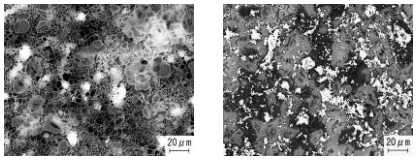


Fig.3 Tensile strength and Nb content vs volume fraction of TiC or TiB



（a）5vol.%TiC　（b）15vol.%TiB

Fig.4 Microstructures (BSE) of 5vol.%TiC/Ti-Al-Nb and 15vol.%TiB/Ti-Al-Nb

いる箇所が観察でき，その凝集部には TiB と NbB_2 が混在していると考えられる．NbB_2 が残っている分 TiAl 相の Nb の含有率が少なくなり，実際には 5vol.%TiC と 15vol.%TiB の条件での Nb の含有率は同程度であると考えられる．

4.　結言

(1) Ti-48at.%Al の最適焼結条件は焼結温度 1000℃，焼結圧力 50MPa である．

(2) TiC/Ti-Al-Nb および TiB/Ti-Al-Nb における引張強さは 5vol.%TiC および 15vol.%TiB でそれぞれ最大値を示した．

(3) NbB_2 添加では TiB と NbB_2 が混在する状態となり，Nb の含有量が理論値より少ないと考えられる．

(4) 引張強さが最大値を示した条件での Nb の理論含有率は NbC 添加で 4.3at.%，NbB_2 添加で 6.2at.%であるが，実際には未反応の NbB_2 があるため同程度だと考えられる．

5.　参考文献

[1] Kunal Kothari, Ramachandran Radhakrishnan, Norman M. Wereley, “Advances in gamma titanium aluminides and their manufacturing techniques”, Progress in Aerospace Sciences, Volume 55, November 2012, pp. 1-16

[2] 野田俊治，“金属間化合物 TiAl の開発とその実用化の現状”, 鋳造工学, Vol. 73, No. 12 (2001), pp. 823-828

[3] X. Lu, X. B. He, B. Zhang, X.H.Qu, L. Zhang, Z. X. Guo, J. J. Tian, “High-temperature oxidation behavior of TiAl-based alloys fabricated by spark plasma sintering”, Journal of Alloys and Compounds, Volume 478, June 2009, pp. 220-225

[4] Joanne L. Murray (1987), “Phase Diagrams of Binary Titanium Alloys”, ASM INTERNATIONAL, pp. 12-24

[5] M. A. Lagos, I. Agote, “SPS synthesis and consolidation of TiAl alloys from elemental powders: Microstructure evolution”, Intermetallics, Volume 36, May 2013, pp. 51-56