

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 22 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560840

研究課題名(和文) 高強度チタン合金における侵入型元素の有効利用技術と特性発現機構

研究課題名(英文) Beneficial use of interstitial elements and work hardening mechanism in high strength titanium alloys

研究代表者

土山 聡宏 (Tsuchiyama, Toshihiro)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40315106

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：汎用の元素から構成される低合金チタン合金をベースに酸素または窒素を高濃度に添加した合金を製造し、金属組織や機械的性質に及ぼす両元素の影響を調査した。その結果、酸素や窒素を添加すると金属組織には大きな変化が現れないが、材料の強度は大きく上昇し、かつ延性はあまり低下しないことが明らかとなった。酸素や窒素添加によってそのような優れた機械的性質が得られる理由を、組織中の相と相の強度比の観点から考察し、ひずみの均一化効果、ならびに相における加工硬化能の有効作用もよって理論的に解明した。

研究成果の概要(英文)：High oxygen or nitrogen titanium alloys were produced on the basis of a low alloy titanium alloy consisting of conventional alloying elements, and then the microstructure and mechanical property were investigated. As a result, the microstructure was hardly influenced by oxygen and nitrogen, while the strength of the alloys were greatly increased without deteriorating ductility too much. The reason of the improvement of mechanical property due to oxygen and nitrogen addition was discussed in terms of the strength ratio of alpha phase to beta phase, and then it was clarified by theoretical considerations of the strain uniformity effect as well as the positive work hardenability effect of beta phase.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学 構造・機能材料

キーワード：チタン合金 侵入型元素 酸素 窒素 機械的性質 強度-延性バランス

1. 研究開始当初の背景

Ti-6Al-4V 合金を代表とするチタン合金は、鉄鋼に比べて耐食性や比強度に優れることから、海水環境や化学プラントなどの高腐食環境下での構造物や、医療・福祉分野、その他耐食性が要求される民生品として幅広く使用されている。このように構造材料として利用されるチタン合金では、強度と延性の両方が重要であることはいまでもなく、種々の合金元素の添加や金属組織の制御によって強度-延性バランスの改善が試みられてきた。しかし一方では、資源枯渇の問題により、V や Mo のような高価な希少金属はなるべく使用しない合金が望まれている背景もある。すなわち、資源的に豊富で安価な汎用元素から構成され、力学特性に優れるチタン合金の開発が社会的なニーズとなっている。

2. 研究の目的

チタン中で侵入型固溶元素として振る舞う酸素と窒素は、一般にチタン合金の延性を低下させる有害な不純物と見なされてきたが、最近申請者は、適切な組織制御を行えば、酸素・窒素がチタン合金の強度だけでなく均一伸びも同時に増大させるむしろ有益な強化元素であることを見いだした。一方、この性質が高歪み域で発現する本合金における特異な加工硬化現象に起因することも明らかにしている。本申請研究では、省資源で安価な構造用新チタン合金の開発を目指し、高酸素・窒素含有チタン合金における高加工硬化および高延性化の機構を解明すること、そして理想的な酸素・窒素利用法の指針を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

酸素と窒素を最大 0.5mass%まで添加した種々の Ti-Cr 系合金を製造し、組織と特性の関係、またそれに及ぼす酸素・窒素添加量の影響を明確化する。とくに特性の解析に必要

となる α/β 相比や元素の分配挙動などの組織因子を X 線回折や TEM-EDS 法を用いて明らかにしておく。

また、特性の発現機構を明らかにするため、二相合金中の各相を模擬した単相材を用いた特性・変形組織発達の調査を実施、さらにはその場中性子線回折法を用いた二相合金中の各相、各粒の塑性変形の定量評価を行う。以上の情報を組み合わせて、加工硬化機構を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 固溶化処理およびその後の時効処理によって ($\alpha + \beta$) 二相組織を形成する Ti-4%Cr 合金に酸素および窒素を単独添加し、引張変形挙動に及ぼす両元素濃度の変化を調査した結果、添加量が増加するほど降伏強度および引張強度が上昇した。しかし、伸びの低下は顕著ではなく、適切な濃度調整によって優れた強度-伸びバランスが得られた。なお、同一添加量で比較すると、酸素より窒素の方が強化能が高いことがわかった。

(2) 酸素、窒素添加による上記の機械的性質の向上は、引張変形に伴う加工硬化率の増大に起因することが明らかとなった。図 1 に示した Ti-4Cr-0.2O 合金の例では、約 3% の引張変形後に著しく加工硬化率が増大し、塑性不安定の発現を高ひずみ域に移行させていることがわかる。

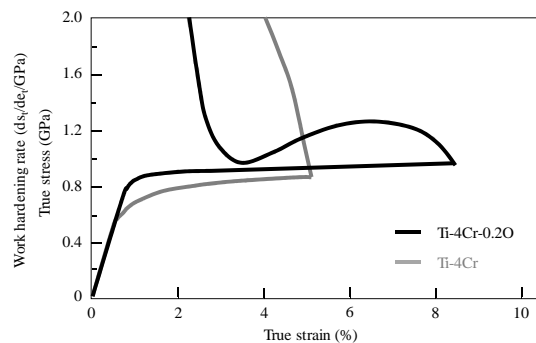


図 1 Ti-4Cr 合金および Ti-4Cr-0.2O 合金における真応力/加工硬化率-真歪み曲線

(3) 時効処理に伴う元素分配挙動を熱力学計算によって見積もった結果(実験により妥当性を確認) 優れた機械的性質が得られる Ti-4Cr-0.2O 合金の 1023K 時効処理の場合には、表 1 に示すように、酸素は α 相に約 0.4% まで濃化し、Ti-4Cr 合金の α 相に比べて著しく高強度化された。一方 Cr は β 相に約 8% まで濃化するが、Ti-4Cr 合金と Ti-4Cr-0.2O 合金で差異は認められなかった。

表 1 Ti-4Cr 合金および Ti-4Cr-0.2O 合金における各相の平衡組成 (Thermo-Calc)

Alloy		[mass% Cr]	[mass% O]
Ti-4Cr	α	0.52	0.099
	β	7.7	0.014
Ti-4Cr-0.2O	α	0.54	0.37
	β	8.5	0.047

(4) 二相チタン合金中の α 相を模擬した Ti-O 合金の引張試験を実施した結果、酸素濃度の増加に伴い、降伏応力と加工硬化率は単調に増加した(図 2)。それによって変形機構は転位すべりから双晶変形に遷移した。

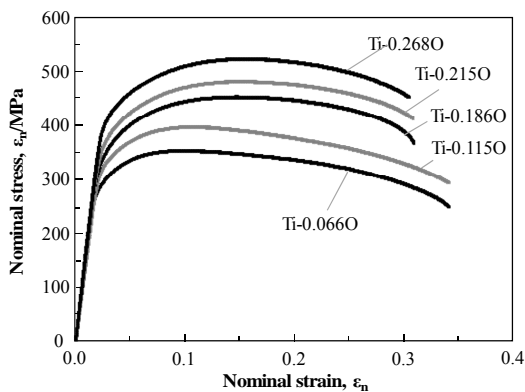


図 2 酸素濃度の異なる種々の Ti-O 合金における応力-ひずみ曲線

(5) 二相チタン合金中の β 相を模擬した Ti-Cr 合金の引張試験を実施した結果、Ti-4Cr 合金の時効材中の β 相組成に相当する Ti-8Cr 合金において、著しい加工硬化の増大および伸びの増大が生じた。組織観察の結果、図 3 に示すように、 β 相中で変形双晶が形成

され、変形に伴い結晶粒微細化が生じることが確認された。つまり、Ti-8Cr 合金における加工硬化の増大および伸びの増大は TWIP (Twinning Induced Plasticity: 双晶誘起塑性) 効果に起因すると考えられる。

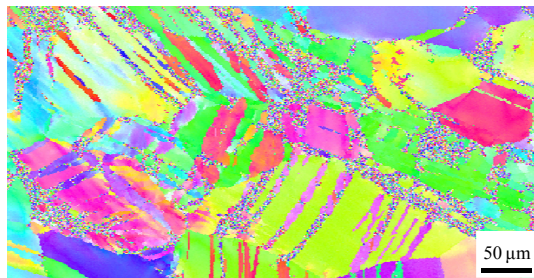


図 3 Ti-8Cr 合金に形成された変形双晶を示す EBSD 方位マップ

(6) DIC 解析により、二相チタン合金におけるひずみ分布を調査した結果、酸素・窒素が添加されていない Ti-4Cr 合金では、ひずみは α 相のみに集中していることがわかった。それによって (α/β) 界面でのポイドの発生が誘発され、早期破断を生じることが明らかとなった。それに対して酸素が添加された Ti-4Cr-O 合金では、 α 相が酸素で固溶強化されたことにより両相が均一に変形することとなり、高ひずみ域で塑性変形した β 相が TWIP 効果を発現し、試料の平均の加工硬化率を引き上げていると推察される。

(7) 以上の結果より、従来、延性を損なうため有害と考えられていた酸素や窒素などの侵入型元素は、適切な量を利用し、適切な組織制御を行うことによって、チタン合金の機械的性質の著しい改善を可能にする元素であることが判明した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 1 件)

Duck-soo Kang, Norimitsu Koga, Nobuo Nakada, Toshihiro Tsuchiyama and S. Takaki:

"Enhanced work hardening by

redistribution of oxygen In ($\alpha+\beta$) type Ti-4Cr-0.2O alloy"

Materials Science and Engineering A, 査読有, vol. 606, 2014, pp. 101-107.

〔学会発表〕(計4件)

岡本惇志、古賀紀光、姜徳守、土山聡宏、高木節雄

「($\alpha+\beta$)型 Ti-Cr 合金における酸素添加による機械的性質の変化」

日本鉄鋼協会第 166 回秋季講演大会、2014 年 9 月 18 日、金沢大学

土山聡宏、岡本惇志、姜徳守、高木節雄

「酸素を添加した 2 相チタン合金における加工硬化機構」

日本鉄鋼協会第 167 回春季講演大会、2014 年 3 月 23 日、東京工業大学

Duck-soo Kang, Norimitsu Koga, Toshihiro Tsuchiyama and S. Takaki

"Effect of oxygen on inhomogeneous deformation behavior in ($\alpha+\beta$) type titanium alloys"

KU-KIMS-POSTECH-SNU International Symposium, 21st June, 2013, POSTECH, 浦項

岡本惇志、古賀紀光、姜徳守、土山聡宏、高木節雄

「($\alpha+\beta$)型 Ti-4Cr 合金の酸素添加による高延性化」日本金属学会九州支部・日本鉄鋼協会九州支部合同学術講演大会

2013 年 6 月 9 日、熊本県民交流館パレア

6 . 研究組織

(1)研究代表者

土山 聡宏 (Toshihiro Tsuchiyama)

九州大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：40315106

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

諸岡 聡 (Satoshi Morooka)

首都大学東京・システムデザイン学部システムデザイン学科・助教

研究者番号：10534422