

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15277

研究課題名(和文) 磁気変態に伴う拡散速度変化に着目した耐熱鋼の新しいクリープ強化概念の確立

研究課題名(英文) Establishment of a new creep strengthening concept for heat-resistant steel focusing on the change in diffusion rate due to magnetic transformation

研究代表者

山崎 重人 (Yamasaki, Shigeto)

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：00804741

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、15mass%のCrを含むフェライト鋼について、Co添加に伴う磁気特性の変化とクリープ強度の関係を調査した。Co添加によって鋼の体積磁化が室温から約800℃の温度範囲で増大し、Co添加量が異なる鋼種間の最小ひずみ速度の比と体積磁化の差は温度に対して類似した変化を示したことから、鋼の磁化の大きさがクリープ強度と密接に関連しており、磁化が大きいほどクリープ強度が上昇することが示された。とくに、低Co鋼のみが強磁性を失うが高Co鋼は磁化を維持する温度範囲において顕著なクリープ強度差が生じることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究はフェライト系耐熱鋼の強化法に対して新たな観点を与えるものであり、次世代の耐熱鋼開発において重要な知見となる。とくに、コバルトは希少かつ高価な元素であるため、その添加量を最適化する上で本研究で明らかとなった「磁化と強度の相関関係およびその温度依存性」は極めて有用なものである。

研究成果の概要(英文)：In this study, the relationship between the change in magnetic properties and creep strength associated with the addition of Co in ferrite steels containing 15 mass% Cr was investigated. The addition of Co increased the volume magnetization of steel in the temperature range from room temperature to about 800℃, and the ratio of the minimum strain rate and the difference in volume magnetization between the steels with different amounts of Co added showed similar changes with respect to temperature. Therefore, it was shown that the magnitude of the magnetization of steel is closely related to the creep strength, and that the larger the magnetization, the higher the creep strength. In particular, it was clarified that a remarkable difference in creep strength is shown in the temperature range in which only the low Co steel loses ferromagnetism, but the high Co steel maintains the magnetization.

研究分野：高温強度学

キーワード：クリープ 磁性 拡散

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

純鉄は約 770°C で磁気変態し、低温では強磁性、高温では常磁性となる。磁気変態は拡散現象にも大きく影響する。強磁性領域と常磁性領域では拡散定数とその温度依存性に変化が生じ、その変化に対応して常磁性領域とその直下の温度域でクリープ弱化が生じることが報告されている [S. Karashima et al.: Trans JIM, 13(1972), 176.]。磁気変態に関連して拡散速度が変化するという事実は、拡散速度が強度を支配するクリープ変形において極めて重要な観点だと思われる。しかし、申請者の知る限りでは実際のフェライト系耐熱鋼の材料設計に対して磁気変態の効果を積極的に考慮した研究は存在しない。これは、火力発電ボイラの蒸気管などに使用される 9mass% の Cr を含むフェライト系耐熱鋼の使用温度が最高でも 620°C 程度であり、従来のフェライト系耐熱鋼は強磁性域で使用されるものとみなされてきたためであろう。

現在、高効率火力発電の実現を目指して 700°C で使用可能な次世代フェライト系耐熱鋼の開発が進められているが、十分な耐酸化性を確保するためには約 15mass% まで Cr 量を増加することが不可欠である。鉄の磁気変態温度 T_C は固溶元素の添加によって変化する。中でも、フェライト系耐熱鋼に多量に添加され、かつ固溶限が大きい Cr は T_C を大幅に低下させる。つまり、次世代フェライト系耐熱鋼では使用温度が 700°C 程度まで上昇することに加え、Cr 添加量がさらに多くなることによって、材料の使用環境が常磁性領域に近づくことになる。

2. 研究の目的

本研究では、核心をなす学術的「問い」として、以下を掲げた。

磁気変態温度以下何度程度から特異なクリープ弱化が顕在化するか？

添加元素や微細組織は磁気変態に関連したクリープ弱化に対してどの程度の影響を及ぼすか？

については、 T_C 以下数十°C の範囲に拡散定数が急激に変化する(見かけの活性化エネルギーが異常に高い値となる)遷移域が存在する。この拡散定数の遷移域の存在は、 T_C の近傍では強磁性領域であっても一定の温度範囲に渡ってクリープ弱化が生じる可能性を示唆している。したがって、クリープ弱化が顕在化する温度範囲を明らかにすることは、従来鋼や次世代鋼の適用上限温度を見極める上で重要な知見となる。また、添加元素の種類や量に応じて磁気変態温度や拡散定数が遷移する温度範囲が変化するか、変化する場合にはどの程度変わるかということも興味深い疑問点である。

さらに、格子拡散に比べて転位芯拡散や粒界拡散は磁気変態の影響をより顕著に受けることが報告されている [飯島ら: 日本金属学会誌, 69(2005), 321.]。上述したように、実用のフェライト系耐熱鋼の微細組織には多くの結晶粒界やマルテンサイト変態により導入された転位下部組織が存在する。つまり、フェライト系耐熱鋼においては磁気変態に関連したクリープ弱化がより顕著に生じることが予想され、転位密度、マルテンサイトラス幅、旧オーステナイト粒径といった微細組織の量や大きさが磁気変態に関連したクリープ弱化に対してどの程度の影響を及ぼすかという点も明らかにされるべきである。

本研究では、上述の「問い」の解明を通じてフェライト系耐熱鋼の磁気変態に関連したクリープ弱化を理解し、この現象に対する新たなクリープ強化法として「磁気変態温度の制御による拡散速度低減」という概念の確立を目的とする。さらに、得られた強化原理に基づいて、長時間クリープ強度に優れた新規フェライト系耐熱鋼を試作することを最終目標とする。

3. 研究の方法

本研究では、実用フェライト系耐熱鋼に添加される多種の元素の内でも固溶量が多く、磁気変態温度に及ぼす影響が大きい元素として Co に着目し、実用フェライト系耐熱鋼の微細組織を意図して、15Cr-xCo (x=0, 3, 6)合金を作製した。まず、作製した合金の磁気特性を評価するために、室温から 800 の温度範囲で自発磁化測定を行った。次いで、磁気特性の異なるフェライト組織合金のクリープ試験から、磁気変態に関連したクリープ弱化が生じる温度範囲とそれに及ぼす添加元素の種類と量の影響を評価した。また、Cr と Co は鉄に固溶した際の格子ミスフィットが小さく、鉄中での拡散速度も鉄の自己拡散と同程度であるため、これらの元素による高温固溶強化への寄与はほとんど無いと考えられるが、これを確認するために、XRD による格子定数測定とピッカーズ硬さ試験を実施した。

4. 研究成果

フェライト系耐熱鋼のクリープ強度を向上させる合金元素として報告されている Co について、その添加にともなう鉄の磁気特性の変化がクリープ強度に及ぼす影響について検討した結果、以下の結論が得られた。

1. 最大 6mass% までの Co 添加では格子定数はほとんど変化せず、固溶強化にはほとんど寄与しない。また、析出も生じないことから Co 添加によって室温でのピッカーズ硬さは上昇しない。

- 一方、650 から 750 でのクリープ強度は Co 添加量が多いほど向上した。
2. Co 添加により体積磁化が室温から約 800 の温度範囲で増大し、その効果は添加量が多いほど大きい。
 3. Co 添加量が異なる鋼種間の最小ひずみ速度の比と体積磁化の差は温度に対して類似した変化を示したことから、鋼の磁化の大きさがクリープ強度と密接に関連しており、磁化が大きいほどクリープ強度が上昇することが示された。具体的には、Co 添加により磁化が増大した鋼種とそうでない鋼種を比較した場合、両鋼ともに磁化が大きい低温域や強磁性を失う高温域では顕著な強度差が生じないが、一方の鋼種のみが強磁性を失い、もう一方の鋼種は磁化を維持する温度範囲において顕著なクリープ強度差が生じたと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 山崎 重人, 光原 昌寿, 中島 英治	4. 巻 106
2. 論文標題 コバルト含有高クロムフェライト鋼のクリープ強度と磁気特性の関係	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 鉄と鋼	6. 最初と最後の頁 788-798
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/tetsutohagane.TETSU-2020-041	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shigeto Yamasaki, Masatoshi Mitsuahara, Hideharu Nakashima	4. 巻 61
2. 論文標題 Relationship between Creep Strength and Magnetic Properties of Cobalt-bearing High Chromium Ferritic Steel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ISIJ international	6. 最初と最後の頁 408-416
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-315	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山崎重人・光原昌寿・中島英治
2. 発表標題 コバルト添加フェライト系耐熱鋼のクリープ強度と磁気特性の関係
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第181回春季講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤野翔太、山崎重人、光原昌寿、中島英治
2. 発表標題 フェライト系耐熱鋼の磁気変態点変化がクリープ 変形に及ぼす影響
3. 学会等名 日本金属学会九州支部・日本鉄鋼協会九州支部・軽金属学会九州支部 合同学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------