

氏名	安藤 誠		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	甲博理工第463号		
学位授与年月日	平成26年3月25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
学位論文題目	自動車熱交換器用材料のクリープ特性		
審査会	主査 伊藤 吾朗	委員 篠 嶋 妥	
	委員 鈴木 徹也	委員 車 田 亮	

論文内容の要旨

アルミニウム合金は、成形加工が容易であり、さらに熱伝導性に優れるといった利点を生かし、自動車用熱交換器の材料として広く利用されている。近年は熱交換器を高性能化するに伴い、構成部材が従来よりも高い温度にさらされるようになり、本系合金の高温での耐久性を向上させることが必要となっている。高温で使用される熱交換器を設計するためには、材料の高温特性として、クリープ特性や高温疲労特性が重要となる。しかし、アルミニウム合金はもともと高温に晒されるような用途が少なく、特に、中強度合金である 3XXX 系合金や 6XXX 系合金が高温下で用いられることはほとんど無かったため、これらの合金の高温特性に関する知見は乏しい。以上のような事情を鑑み、3XXX 系合金や 6XXX 系合金の高温特性に関する研究を行うこととした。

まず、熱交換器用材料として最も一般的な 3003 合金のクリープ特性として、しきい応力についての研究を行った。また、クリープ特性を向上させるための手段として、Mg 添加の影響についても検討を行った。具体的には、3003 アルミニウム合金およびこれに 0.2mass%Mg を添加した合金の高温引張試験およびクリープ試験を行い、しきい応力について下記の知見を得た。

1. どちらの合金においても 200°C のクリープ試験においてしきい応力が認められた。
2. 3003+Mg 合金の 200°C におけるしきい応力は 3003 合金より 15%ほど高く、0.2%の Mg 添加はしきい応力の観点から高温特性の向上に有効であることが分かった。
3. クリープ試験によって得られたしきい応力は、分散粒子から計算される Orowan 応力よりも 2~3 割程度高かった。しきい応力に寄与する組織因子として、固溶 Mn および固溶 Mg の影響が推定された。

従来、しきい応力は分散粒子によってもたらされるものと考えられており、上記 3 で得られた知見は全く新しいものであるため、これについてさらに詳細な研究を行った。具体的には、高純度の二元合金を用いて固溶 Mn がクリープ挙動に及ぼす影響について検討した。その結果、分散粒子の存在しない Al-0.6%Mn において、低応力側での大きなクリープ速度低下が見られた。このことから、固溶 Mn は低応力域では転位運動を大きく抑制する効果を持つことが示された。このような効果は、実用合金成分 (Al-0.04%Fe-0.25%Si-1.0%Mn) でも見られた。

以上の研究成果により、従来の自動車熱交換器に主に用いられてきた 3003 合金のよ

うな Al-Mn 系合金における金属組織とクリープ特性との関係について、未解明であった挙動が明らかになったといえる。しかし近年は材料薄肉化のために高強度化の要求が高まっており、Mg の添加により高強度化を実現することが検討されている。ブレイジングシートの心材に Mg が存在すると、ろう付加熱時に溶体化され、さらにこれを時効硬化させることにより大幅な高強度化を達成できる。ここで時効に關与する合金元素は Mg および Si であるので、心材に Mg を添加したブレイジングシートの時効挙動は、Al-Mg-Si 系合金における挙動と同様のものとなる。

そこで、Al-0.5%Si-0.3%Mg (mass%, 以下同様) 合金を供試材として用い、時効とクリープ挙動との関係について検討した。なお、本研究では時効挙動を検討しやすくするため、Mn を含有する合金と含有しない合金の両方を供試材とした。その結果、下記の知見を得た。

1. クリープ温度が 150°C の場合は、175°C での予備時効処理にて最大強度とするよりも、亜時効とした方が耐クリープ性に優れていた。亜時効の場合は、クリープ中に新たな・”相への遷移が起こるためであると考えられた。
2. クリープ温度が 200°C の場合は、175°C での予備時効処理にて最大強度とした方が、亜時効とするよりも耐クリープ性に優れていた。最大強度まで時効すると、クリープ中の時効析出物の粗大化が比較的起こりにくいためであると考えられた。
3. クリープ温度が 150°C、200°C のどちらの場合においても、動的析出によって過時効化が促進されていることが示された。
4. Mn を添加しても、上記の傾向は概ね同じであった。ただし、Mn 添加によって全体的に耐クリープ性が低下した。

上記の研究は実用的な観点から、優れたクリープ特性を得るために適した予備時効処理条件を明らかにするという観点からの検討である。クリープ変形中の時効挙動をより基礎的に解明するという観点から、予備時効処理を施さない場合についても検討を行った。また既に述べたように、上記の研究は単純化のため Mn を含有しない合金を用いたが、現在実際の熱交換器に用いられるような、1%程度の Mn を添加した場合における、クリープ変形中の時効挙動についても検討を行った。その結果、以下の知見を得た。

1. Mn 添加により、クリープ中の時効析出の密度が低下し、耐クリープ性が低下した。
2. Mn レス合金の場合は、クリープ変形による過時効化の促進が見られた。転位芯に沿った拡散による影響と考えられた。

上述のように、本論文では 3XXX 系や 6XXX 系のアルミニウム合金のクリープ特性について検討し、固溶 Mn によるしきい応力の発現など、基礎的に重要な新知見を示した。さらに、様々な熱交換器の考慮した場合に、耐クリープ性の観点から時効硬化を最大限に有効活用する方策についても示した。これらの知見は、基礎から応用にわたり、熱交換器用材料の高耐熱化に大きく寄与するものである。

論文審査の結果の要旨

自動車用熱交換器用の 3000 系や 6000 系のアルミニウム合金には、近年高温での耐久性向上が要求されてきており、本論文はその基礎となるクリープ特性について検討している。

まず、熱交換器用材料として最も一般的な 3003 系 (Al-Mn 系) 合金のクリープ特性について、実用の 3003 合金、これに Mg を添加した合金、高純度の Al-Mn 二元合金、不純物の Si、Fe を含む Al-Mn 合金などを試料として調べている。いずれの合金においても 200°C のクリープ試験においてしきい応力が現れることを見出ししている。そして Mg 添加合金のしきい応力は無添加合金より 15% ほど高く、Mg 添加はしきい応力の観点から高温特性の向上に有効であることを明らかにした。得られたしきい応力は、分散粒子から計算される Orowan 応力よりも 2~3 割程度高く、固溶 Mn 量が多いほど高くなったので、しきい応力は固溶 Mn によるという新知見を示した。そして固溶 Mg は、固溶 Mn の効果を助長していると考えられている。それ以外にこの系の合金のクリープは分散粒子によるピン止め効果で説明できることを示している。

次に 6000 系の Al-0.5%Si-0.3%Mg 合金を供試材として用い、時効とクリープ挙動との関係について検討している。クリープ温度が 150°C の場合は、175°C での予備時効処理にて最大強度とするよりも、亜時効とした方が耐クリープ性に優れることを示し、亜時効の場合は、クリープ中に新たな β'' 相への遷移が起こるためであると考察している。一方、クリープ温度が 200°C の場合は、175°C での予備時効処理にて最大強度とした方が、亜時効とするよりも耐クリープ性に優れていることを示し、最大強度まで時効すると、クリープ中の時効析出物の粗大化が比較的起こりにくいためであると考察している。クリープ温度が 150°C、200°C のいずれの場合においても、動的析出 (応力負荷下での析出) によって過時効化が促進されていることが示された。さらに、クリープ変形中の時効挙動をより基礎的に解明するという観点から、予備時効処理を施さない場合の検討や、現在実際の熱交換器に用いられるような、1% 程度の Mn を添加した場合における、クリープ変形中の時効挙動の検討も行った。

上述のように、本論文では 3000 系や 6000 系のアルミニウム合金のクリープ特性について検討し、固溶 Mn によるしきい応力の発現など基礎的に重要な新知見を示している。また結果は、近年高温での耐久性向上が要求されてきている自動車用熱交換器用アルミニウム材料の応用面での発展、すなわち工学的な観点においても有益なものと判断され、よって、本論文は博士 (工学) の論文にふさわしいと判定された。