

氏名（本籍地）	Zehao Li
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第 9798 号
学位授与年月日	令和 3年 3月 25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	

Development of Heat-treatable Wrought Magnesium Alloys with Excellent Formability
(成形性に優れた熱処理型マグネシウム展伸合金の開発)

主査	筑波大学教授(連携大学院)	Ph.D.	宝野和博
副査	筑波大学教授	工学博士	金熙榮
副査	筑波大学教授	理学博士	黒田眞司
副査	筑波大学准教授	工学博士	谷本久典

論 文 の 要 旨

金属系構造材料のなかで最軽量のマグネシウム(Mg)合金が自動車、高速鉄道、家電製品などの構造部材として応用されれば、これらの軽量化に大きく貢献すると期待される。しかしながら、hcp 構造を持つ Mg 合金は fcc 構造の Al 合金に比べ展伸性と成形性に劣るために加工コストが高くなるため、現在実用化されている Mg 合金部材の大半は鋳造材である。加工性に優れ、強度、伸びともに中強度 Al 合金に匹敵する安価な展伸 Mg 合金を開発することができれば、Mg 合金の構造部材としての応用が広がり、車体の軽量化に有効であろうと期待されている。ところが市販合金のなかで、6000 系中強度 Al 合金に匹敵する成形性と強度を兼ね備える合金は存在しない。例えば、商用 Mg-3Al-1Zn 合金(AZ31)の降伏強度は約 200 MPa で強度的には十分であるが、成形性の指標となる室温の Index Erichsen (I.E.) 値が 4 mm 以下であり、板材としてのプレス加工の要求を大きく下回っている。このように室温成形性が劣る主な原因は、圧延加工時に(0002)面に強く配向した結晶繊維組織が形成されるためである。希土類元素を添加することにより底面配向性を弱め、成形性を改善した報告はあるが、強度と成形性の間には負の相関があるために、成形性に優れた Mg 合金の強度は十分ではなかった。また、底面配向低減のために添加される希土類元素が合金のコストを上げてしまうことも欠点であった。

このような背景から、本論文では、Zn, Ca, Al などの自然界で豊富な元素のみで構成される Mg 合金で Guinier Preston zone (G.P. ゾーン)という準安定相を析出させることにより、高強度と室温成形性を兼ね備えた Mg 合金の開発を行った結果を報告している。また開発合金において結晶配向が低下するメカニズムの検討、短時間の熱処理で迅速に強化するメカニズムの考察、さらに時効析出を活用して熱伝導性にすぐれた展伸合金の開発に展開した結果を報告している。本論文は全 7 章から構成されており、

第 1 章では、Mg 合金板材のこれまでの研究を概観し、本研究の研究背景と課題を論じている。第 2 章では、本論文で使用した試料作製法と特性評価方法、微細組織解析法を記述した。

第 3 章では、Mg-1.2Al-0.5Ca 基合金に、系統的に Zn を添加した Mg-1.2Al-0.5Ca-0.4Mn-xZn 合金板材の成形性、時効硬化性と機械的特性、微細構造を詳細に評価し、Zn 添加が微細組織の底面配向に及ぼす影響とそのメカニズムを調査した結果を報告している。成形性と強度のトレードオフジレンマを克服するために、成形性の良い低濃度 Mg 合金で顕著な時効効果を見出すことが有効と考え、先行研究を参考にして G.P.ゾーンの析出による時効硬化応答が顕著である Mg-Al-Ca 合金を基材として選択し、底面配向を弱めるために Zn を系統的に添加した。その中で Mg-1.2Al-0.5Ca-0.4Mn-0.8Zn(wt.%, AXMZ1000)合金は、溶体化処理した状態では、I.E.値が 7.7 mm, 降伏強度が 147 MPa と良好な値を示すことを見出した。その後、200 °C で 1 時間の時効処理を行うと、降伏強度が 200 MPa 以上に大幅に増加することを見出し、成形性と強度のトレードオフジレンマを克服した。この合金の成形性が向上したのは、微量の Zn 添加により底面配向弱くなったことによるが、そのメカニズムを明らかにするために、EBSD ならびに TEM 観察により Zn 添加により底面配向性を低下することのできるメカニズムについても論じている。

第 4 章では本研究で開発した AZMZ1000 合金が迅速な時効効果を示すメカニズムを解明するために、その基本系である Mg-0.5Ca ならびにそれに 1.6wt.%Zn を加えた Mg-0.5Ca-1.6Zn 合金の時効硬化速度を比較し、陽電子消滅時間測定を併せて、Zn が時効硬化速度を改善するメカニズムを考察した結果を報告している。市販の Mg-Al-Zn (AZ) や Mg-Zn-Zr (ZK) などの Mg 合金系は時効硬化応答が緩慢であるのに対し、Mg-Ca ベースの希薄合金に Zn を微量添加することで、G.P. ゾーンが緻密に分散して、それが時効硬化応答性を大幅に向上させることが解明された。

第 5 章では、第 4 章で研究した G.P.ゾーン形成型の基本合金、Mg-0.5Ca-1.6Zn 合金の析出過程を収差補正走査型電子顕微鏡(STEM)により詳細に調べた。これまでの研究では、Mg-Ca-Zn 系では S.S.S.S.S. (過飽和固溶体)→規則化 G.P.ゾーン→ η' → η という単純な析出過程が報告されていたが、この過程で析出する析出物相の正確な構造や組成については議論の余地があった。本章では等温時効過程で析出する種々の析出物の構造を原子分解能 STEM で解析することにより、これまであいまいであった析出物の構造を全て決定し、時効硬化をもたらす準安定析出物を全て同定した。

第 6 章では、優れた室温成形性、高強度、高熱伝導率を兼ね備えた新規な Mg-1.6Zn-0.5Ca-0.4Zr(wt.%, ZXK210)板状合金の開発結果を報告している。熱処理可能な Mg 合金では、時効硬化による高強度に加えて、高い熱伝導率などの付加的な機能が同時に実現される可能性がある。商用 Mg 合金、例えば Mg-3Al-1Zn (wt.%, AZ31) や Mg-6Al-1Zn (wt.%, AZ61) の強度は、主にマトリックス中の溶質、すなわち固溶体強化に依存しているため、溶質原子によって誘起される格子歪みは、電子およびフォノンの散乱を著しく増大させ、結果として低い熱伝導率をもたらす。一方、時効効果 Mg 合金では、Mg 第 2 相の析出により母相中の溶質濃度が下がるために、高強度と高熱伝導率の両立が期待されている。そこで、第 3, 4 章の結果に基づき、Mg-Zn 系合金に微量の Ca を添加することで時効硬化応答性が大幅に向上し、さらに結晶粒微細化剤として Zr を添加すると機械的特性のさらなる改善につながると期待された。このような考えで開発された Mg-Zn-Ca-Zr 希薄合金系は、Mg 合金としては優れた熱伝導性、高強度、成形性を同時に達成することができることを示した。

第7章では、以上の成果をまとめ、今後の展望を述べた。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

本論文は、車体軽量化に貢献できると期待される強度と成形性を兼ね備えた Mg 合金板材の開発ならびにその過程で見出された現象の基礎的理解を目指した研究成果を報告しており、6000 系 Al 合金に匹敵する降伏強度・室温成形性を兼ね備えた板材を開発したこと、良好な成形性をもたらす弱い底面配向の起源、塗装焼付け硬化のメカニズム解明、開発合金の析出過程に形成する準安定析出物の同定を行ったことで、実用性の可能性が期待される Mg 合金板材開発に大きく貢献する実験結果を報告しており、その工学的価値が高いだけでなく、精緻な微細構造解に基づいた現象の説明にも踏み込んでおりその学術的価値も高い。

〔最終試験結果〕

2021 年 2 月 10 日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。