

# 高純度Fe-(4,5,6)wt%Si合金における磁気・機械特性及び磁区構造とその挙動

著者	Lei Zhe
発行年	2016-03-25
学位授与番号	17104甲生工第257号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10228/5633">http://hdl.handle.net/10228/5633</a>

氏名・(本籍)	LEI ZHE (中国)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	生工博甲第257号
学位授与の日付	平成28年3月25日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	高純度 Fe-(4,5,6)wt%Si 合金における磁気・機械特性及び磁区構造
	とその挙動
論文審査委員会	委員長 教授 西田 治男
	” 内藤 正路
	” 石黒 博
	” 春山 哲也
	” 平木場浩二

## 学位論文内容の要旨

本論文は、軟磁性材料であり珪素鋼板の基となる鉄シリコン合金に関する基礎研究である。

珪素鋼板は現代産業を支えるモーターやトランス等の電気機器用鉄心材料として多用される軟磁性材料である。近年、エネルギー消費量低減が求められ、鉄心材料性能の高効率化への要求がますます厳しくなっている。また、自動車産業においてもハイブリッド自動車や電気自動車の開発と実用化が急速に進展する事に伴い、より高効率で優れた珪素鋼板が求められている。

本研究では、珪素鋼板の磁気特性、特に効率の向上を目指し、その基本材料である鉄シリコン合金を高純度化する事が改善策となるとの着想に基づき、高純度 99.99wt%電解鉄と 99.999wt%シリコンを原料として高純度溶解できるコールドクルーシブル溶解炉を用いて、高純度鉄シリコン合金すなわち Fe-(4, 5, 6)wt%Si 試料に着目し、これらの高純度試料に関して磁気・機械特性及び磁区構造とその挙動が検討されている。

第1章では、上記の事が「序論」として述べられている。

第2章では、Fe-(4, 5, 6)wt%Si 試料において、結晶粒組織・集合組織などの要素を考慮し、Si 濃度の増加に伴う磁気特性の変化が検討されている。この調査により、Fe-6wt%Si 試料は Fe-(4, 5)wt%Si 試料より低磁界印加時に透磁率が2倍程度優れ高磁束密度を得る事ができるため、低い印加磁界で使用できる軟磁性材料として適切である事が明らかにされている。更に、Fe-(4, 5, 6)wt%Si 試料とも、磁束密度に対する保磁力およびヒステリシス損の変化が検討され、3試料とも保磁力は三段階に変化、即ち、最

初の段階では徐々に増加し、中間段階では殆ど変化せず、最終段階では急速に増加する事、及びヒステリシス損は磁束密度が 1.2 T 以下の場合、一様に直線的に増加し、その後急速に増加する事を明らかにしている。これら保磁力・ヒステリシス損変化の要因として、3 試料とも結晶粒径は同程度であるが、集合組織を持たない事により起因すると考察されている。

第 3 章では、Lorentz 電子顕微鏡及び Kerr 効果顕微鏡を用い、Fe-(4, 5, 6)wt%Si 試料の静的磁区及び磁界印加による動的磁区挙動が検討されている。Lorentz 電子顕微鏡による薄片試料の磁壁移動の観察結果より、Fe-6wt%Si 試料は Fe-5wt%Si 試料より低磁界で磁壁が移動し始め、その後の移動速度も大きい事が明らかにされている。更に、1 つの対称的な結晶粒の粒界における磁壁移動より、この対称性は磁区の連続性および磁壁の移動に影響しない事が明らかにされている。Kerr 効果顕微鏡によるバルク試料の表面静的磁区は試料を構成する結晶間の磁化容易軸とのなす角度に左右され、この角度が小さい場合、単純な磁区が現れ、角度が大きくなると、サイズが小さく複雑な磁区が現れる事が明らかにされている。また、Fe-(5, 6)wt%Si 試料の磁区形状とサイズの比較結果より、2 試料の磁区形状とサイズに差がない事が明らかにされている。

第 4 章では、高純度 Fe-4wt%Si 試料へ 0.1wt%炭素を添加し、磁気特性へ及ぼす影響および要因が検討されている。0.1wt%炭素の添加により、高純度 Fe-4wt%Si 試料の磁気特性は、保磁力が 4 倍程度大きく、ヒステリシス損が 6 倍程度大きく、最大透磁率が半減するように大幅に劣化しており、これは炭素添加試料の結晶粒内と粒界に析出した線状炭化物が磁壁移動の阻害要因となり引き起こされている事が明らかにされている。

第 5 章では、Fe-4wt%Si 試料の引張試験等により、加工性、さらに、Fe-(4, 5, 6)wt%Si 試料の結晶相が検討され、これら試料の加工性のメカニズムが推定されている。Fe-4wt%Si 試料の引張試験より伸びは 10%程度であり、粒内破壊で脆性破壊形態が観察されており、脆性的である事が明らかにされている。また、Fe-(5, 6)wt%Si 試料では切削加工が難しい程度の脆性である事が明らかにされている。従って、純度 99.99%レベルの高純度化では Fe-(4, 5, 6)wt%Si 試料の室温脆性は改善できず、実際の加工も難しいと結論付けられている。結晶相観察結果より、Fe-(5, 6)wt%Si 試料では B2 相と D03 相が存在しており、これらが試料の脆性の要因であるとされている。

第 6 章では、本研究が総括され今後の研究課題が述べられている。

以上のように、本研究は、珪素鋼板の特性改善を目指すものであり、高純度鉄シリコン合金に関する多面的な基礎的データを提供するものである。これらの研究成果は、軟磁性材料の磁気特性改善に大きく貢献するものと考えられる。

## 学位論文審査の結果の要旨

本論文に関し、調査委員から「磁気特性はどのようになるのがよいのか」、「コールドクルーシブル溶解炉で試料が浮遊する原理は何か」、「ヒステリシス損が磁束密度に対して直線的や曲線的に変化する事は何を意味しているか」、「不純物添加で炭素を選んだ理由は何か」、「破断面で段状に見えるのは何なのか」等、種々の質問がなされたが、いずれも著者から満足な回答が得られた。また、公聴会においても、多数の出席者があり、種々の質問がなされたが、いずれも著者の説明によって質問者の理解が得られた。

以上により、論文調査及び最終試験の結果に基づき、審査委員会において慎重に審査した結果、本論文が、博士（工学）の学位に十分値するものであると判断した。