

学位論文内容の要旨

報告番号	先端科学技術 甲第 154 号	氏名	木村正宏
論文題目	金属粉末射出成形法によって作製した Fe-Cr-Si 系軟磁性材料に関する研究		

自動車の電子制御式燃料噴射装置に使われるニードルバルブの製造方法の一つとして、3次元複雑形状の金属部品をニアネットシェイプで製作できる金属粉末射出成形法（MIM）が採用されるようになった。現在、MIMによるニードルバルブの生産では軟磁性材料としてPBパーマロイが採用されているが、近年においてはその特性として、応答性の向上やコアロスの低減、さらに耐食性の改善や高硬度化と素材価格の低減等が求められるようになってきている。そこで、本研究ではFe-Cr系軟磁性材料の特性向上を目的とし、Si等の合金元素を数%添加したFe-Cr-Si系軟磁性材料をMIMによって作製し、その磁気特性と材料特性について明らかにした。

第1章では、本研究の背景と目的、および本論文の構成について述べた。

第2章では、本研究に関連する技術の技術的な背景として、始めに金属粉末射出成形法（MIM）の誕生から現在の状況について概説し、その後、その製造プロセスについて述べた。次に本研究の対象となる軟磁性材料について概説し、その磁気特性を表す磁化曲線から求められる最大磁束密度 B_m 、最大透磁率 μ_m 、保磁力 H_c などの特性について述べた。最後に、軟磁性材料の利用分野として電子制御式燃料噴射装置について概説し、その主要構成部品であるニードルバルブに使われる軟磁性材料とMIMの適用例について述べた。

第3章では、MIMによってSiを数%含有させたFe-Cr-Si系軟磁性材料を作製し、CrおよびSi量が磁気特性と材料特性に及ぼす影響について明らかにした。その結果、Fe-Cr-Si系合金のSi量を3%とすることで相対密度は99%以上となり、Cr量の変化は焼結性にほとんど影響を及ぼさないことがわかった。また、CrおよびSi量を増やすことで電気抵抗率を上げ、交流磁界におけるコアロスを低減することができ、電気抵抗率の増加に対するSi量の影響が顕著であることがわかった。しかし、MIMにおける気孔率増加による電気抵抗率の増加は、渦電流損失の低減には効果がなく、むしろヒステリシス損失の増大を招き、コアロスを増加させることがわかった。一方、Cr量を減らすことで磁束密度 B_{2000} および最大透磁率 μ_m を高くし、保磁力 H_c を低くすることが可能であることがわかった。さらに、Fe-Cr-Si系合金のSi量を3%とすることで引張強さおよび硬さは上昇し、緻密化後の伸びは低くなるが、Cr量を減らすことで伸びの低下を軽減することが可能であることがわかった。これらの結果から、磁気特性に優れ、交流磁界におけるコアロス低減を可能とするFe-Cr-Si系合金として、Fe-9Cr-3Siが適すると結論した。

第4章では、Fe-Cr-Si系軟磁性材料のCr量を減らすことで耐食性の低下が懸念される

ため、耐食性を向上させる Mo を添加した Fe-Cr-Si-Mo 系軟磁性材料を MIM によって作製し、Mo の添加が磁気特性と材料特性に及ぼす影響について明らかにした。その結果、Fe-Cr-Si 系合金に 2% の Mo を添加することで、低温での焼結時の相対密度は向上するが、高温での焼結時にその効果はなく、最終的に緻密化されたときの相対密度は Mo を添加しない場合よりも低くなることがわかった。また、2% の Mo を添加することで、電気抵抗率は増加し、交流磁界におけるコアロス低減を低減することができるが、低周波数域におけるコアロスの低減効果は小さいことがわかった。さらに、MIM における気孔率増加による電気抵抗率の増加は、Mo を 2% 添加した場合においても渦電流損失の低減には効果がなく、むしろヒステリシス損失の増大を招き、コアロスを増加させることがわかった。加えて、Fe-Cr-Si 系合金に 2% の Mo を添加することで、磁束密度 B_{2000} および最大透磁率 μ_m は低下し、保磁力 H_c は高くなり、磁気特性は若干低下することがわかった。一方、2% の Mo を添加することで、耐食性を大幅に向上させることが可能であり、Cr 量を 10% まで減らしても 15Cr-3Si 並みの耐食性を期待できることがわかった。また、2% の Mo を添加することで引張強さおよび硬さは上昇し、緻密化後の伸びは低下するが、Cr 量を減らすことで伸びの低下を軽減することが可能であることがわかった。これらの結果から、磁気特性および耐食性を兼ね備えた Fe-Cr-Si-Mo 系軟磁性材料として、Fe-10Cr-3Si-2Mo が適すると結論した。

第 5 章では、Si および Mo の添加によって高硬度化を狙った Fe-Cr-Si 系軟磁性材料を MIM によって作製し、Si 添加量の増加および Mo の添加が磁気特性と材料特性に及ぼす影響について明らかにした。その結果、Fe-Cr-Si 系合金の Si 量を 6% とすることで焼結性は著しく向上して相対密度は 99% 以上となり、電気抵抗率も著しく高くなることがわかった。また、2% の Mo を添加することで焼結性はやや低下するが、電気抵抗率は増加することがわかった。しかし、2% の Mo を添加することで電気抵抗率を増加させ、渦電流損失を低下させても、保磁力 H_c の増加によるヒステリシス損失の増大によりコアロスは増加することがわかった。さらに、MIM における気孔率増加による電気抵抗率の増加は、Si を 6% 添加した場合においても渦電流損失の低減には効果がなく、むしろヒステリシス損失の増大を招き、コアロスを増加させることがわかった。また、Fe-Cr-Si 系合金の合金元素の添加量増加に伴い、磁束密度 B_{2000} および最大透磁率 μ_m は低下し、保磁力 H_c は高くなり、直流磁気特性は低下することがわかった。一方、Si 添加量の増加、および 2% の Mo を添加することで耐食性を大幅に向上させ、硬さも上昇させることが可能であることがわかった。その結果、引張強さは著しく上昇するが伸びが低下し、Si を 6% 添加したときの伸びの低下は特に著しく、MIM 以外の製法による製品のニアネットシェイプ化は困難であると判断した。また、EPMA による面分析および平衡状態図の計算結果から、Fe-12Cr-6Si-2Mo において Laves 相が析出していることが確認され、磁気特性および機械的性質に若干影響を及ぼしているものと推察した。これらの結果から、磁気特性および機械的性質を兼ね備えた高硬度 Fe-Cr-Si 系軟磁性材料として、Fe-12Cr-4.5Si-2Mo が適すると結論した。

第 6 章では本論文の総括を行い、MIM の適用により、加工が困難となるこれらの軟磁性材料を用いた金属部品をニアネットシェイプで製作可能であると結論付けた。