

無方向性けい素鋼板の熱処理条件と磁気特性

Relationship between the Annealing Conditions and Magnetic Properties of Non-oriented Silicon Steel Sheets

黄 柏英・山本健一・山城康正

琉球大学工学部, 沖縄県中頭郡西原町字千原 1 番地 (〒903-0213)

B. Y. Huang, K. Yamamoto, and Y. Yamashiro

Faculty of Engineering, University of the Ryukyus, 1 Senbaru, Nakagami-gun, Okinawa 903-0213

Methods for improving the magnetic properties of 3% non-oriented silicon steel were investigated. The thickness of samples was reduced to 0.1 mm by cold-rolling, and they were subsequently annealed in an argon gas atmosphere under various annealing conditions (annealing temperature, holding time, heating rate, and cooling rate). The obtained minimum iron loss was $W_{15/50}=2.38$ W/kg, the coercive force was $H_c=38$ A/m, and the magnetic induction at 800 A/m was $B_8=1.69$ T. The sample annealed under the optimum annealing conditions showed a dual-axis-like torque curve and had a high proportion of (100) plane texture.

Key words: non-oriented silicon steel, cold-rolling, grain texture, magnetic loss, torque curve

1. ま え が き

電磁鋼板は発電機や電動機など回転機の鉄心材料として多く用いられており、また電気機器の性能を左右する最も重要な因子の一つである。機器を小形軽量化、高効率化するため、鉄心の磁気特性を改良する試みが多くなされている。回転機ではその性質上、鉄心には無方向性けい素鋼板がおもに用いられており、無方向性けい素鋼板を高磁束密度、低損失化することが近年特に強く要求されている¹⁾。

現在、工業的に用いられている無方向性けい素鋼板は、用途に応じて使い分けられるが、最も磁束密度が高い材料で $B_8=1.58$ T 程度、損失値が最も低い材料で $W_{15/50}=2.10$ W/kg 程度である^{2), 3)}。高磁束密度でかつ低磁気損失を有する無方向性けい素鋼板を作製することができれば、回転機の小形軽量化、高効率化が可能になると考えられる。

そこで、本研究では無方向性けい素鋼板の磁気特性改善の方法として試料の薄手化を試みた。冷間圧延により厚さ 0.1 mm とした後、Ar ガス中で熱処理を行い試料を作製した。その結果最も特性の良い試料で、磁束密度は $B_8=1.69$ T、損失値 $W_{15/50}=2.38$ W/kg が得られた。作製した試料の熱処理条件によるトルク曲線などの磁気特性変化および結晶組織について検討を行ったので、その結果を本稿で報告する。

2. 実験方法

実験母材として、市販の厚さ 0.5 mm 3% 無方向けい素鋼板(新日本製鐵(株)製: H9)を使用した。試料は母材から長さ 100 mm、幅 25 mm に切り出し、46% のフッ酸(HF)で、

表面被膜を除去した後、蒸留水、エタノールを用いて洗浄、乾燥させた後、直径 20 mm のワークロールを有する 4 段圧延機で、1 回平均の圧延率を 10% に統一して、所定の厚さ 0.1 mm まで冷間圧延した後、長さ 100 mm、幅 5 mm に切り出して用いた。

熱処理の際に、試料をアルミナ板で挟んで赤外線集中加熱炉の炉心管内の中心部に配置し、管内を純度 99.999% のアルゴン(Ar)ガスで十分に置換した後、Ar 雰囲気中で熱処理を行った。このとき、Ar ガスは完全に閉じ込めた状態で実験を行った。

熱処理温度(T)、熱処理時間(HT)、昇温速度(HR)、冷却速度(CR)を熱処理パラメータとして試料を作製した。作製した試料の諸磁気特性は次の装置を用いて測定した。交流磁気損失は磁気損失測定器(凌和電子(株)製)により測定周波数 $f=50$ Hz で測定した。直流磁気特性は B-H ループトレサ(テスラ社製)を用いて、800 A/m の磁界印加時における磁束密度 B_8 および保磁力 H_c を測定した。また、試料の磁気異方性トルクは磁気異方性トルク計((株)玉川製作所製)を用いて測定した。トルク測定に用いた試料はフッ酸と硝酸の混合液中で化学エッチングすることによって、直径 4 mm の円板状にした。極点図の測定は透過法によった。

3. 実験結果および検討

熱処理温度に対する鉄損特性変化を Fig. 1 に示す。この際に昇温速度を 5 °C/s として所望の温度とした後に、1.5 h 保持した後に、制御せず炉中で自然冷却させた。同図に示すように、いずれの B_m においても 800 °C の温度で熱処理したとき、鉄損は最小値になっていた。

熱処理温度を 800 °C 一定として、熱処理時間を変化させたときの鉄損を Fig. 2 に示す。このとき他の条件は先の場合と同じく、昇温速度は 5 °C/s、自然冷却とした。同図からわかるように、鉄損値は 1.5 h で極小となっていた。磁束密度が $B_m=1.5$ T 以上となると、鉄損の変化が顕著となってくる。

Fig. 3 は昇温速度に対する鉄損の変化を示す。このときの熱処理温度は 800 °C、熱処理時間は 1.5 h とした。冷却条件はこれまでと同じく炉中で自然冷却とした。鉄損は昇温速度に対して顕著には変化していないが、昇温速度が 12.5 °C/s において、わずかにではあるが低い値を示す傾向にある。

熱処理温度 800 °C、熱処理時間 1.5 h、昇温速度 12.5 °C/s の条件で、冷却速度を変化させたときの鉄損特性の変化を Fig.

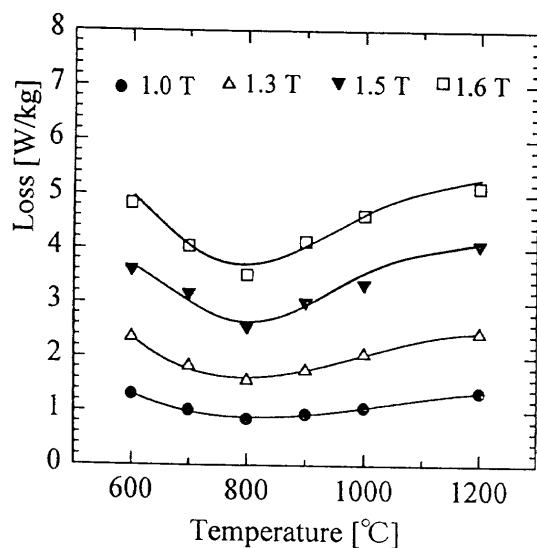


Fig. 1 Iron loss dependence on the annealing temperature.

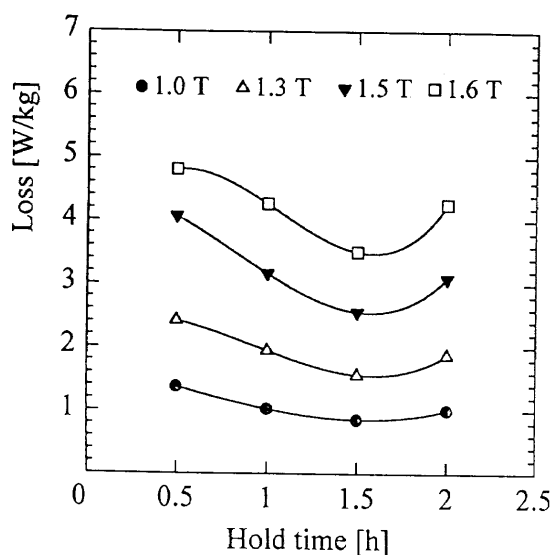


Fig. 2 Iron loss dependence on the hold time.

4に示す。同図からわかるように、鉄損の冷却速度に対する変化は高磁束密度下で顕著となっている。冷却速度が 1.0°C/s のときに鉄損は最小値 $W_{15/50}=2.38\text{ W/kg}$ を示していた。この試料の 1.3 T , 50 Hz における鉄損を二周波法によりヒステリシス損失 W_h と渦電流損失 W_e に分離した結果をFig. 5に示す。ヒステリシス損失はばらつきが多いがほぼ一定値となっている。一方、渦電流損失は冷却速度が速くなるのに伴い単調に減少している。

以上のことから、本実験における最適な熱処理条件は、熱処理温度が 800°C 、熱処理時間 1.5 h 、昇温速度 12.5°C/s 、冷却速度 1.0°C/s であることがわかった。この条件下で熱処理した試料の B_8 は本実験範囲内で最大であり、 $B_8=1.69\text{ T}$ であった。

一般にけい素鋼板の結晶粒の大きさはその磁気特性と密接な関係があることが知られている⁴⁾。Fig. 1~4において用いたすべての試料について鉄損分離をしたところ、 W_e と W_h は熱処理条件に強く影響を受けていることがわかった。ところで、

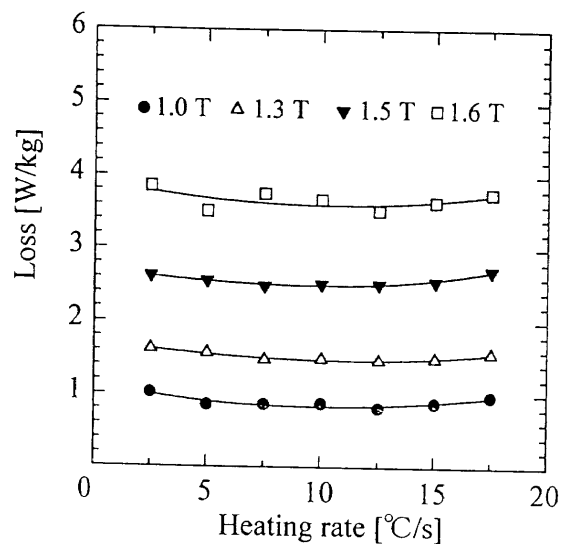


Fig. 3 Iron loss dependence on the heating rate.

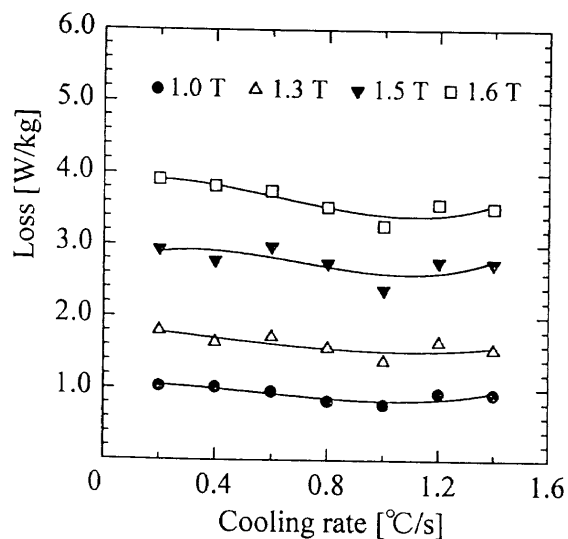


Fig. 4 Iron loss dependence on the cooling rate.

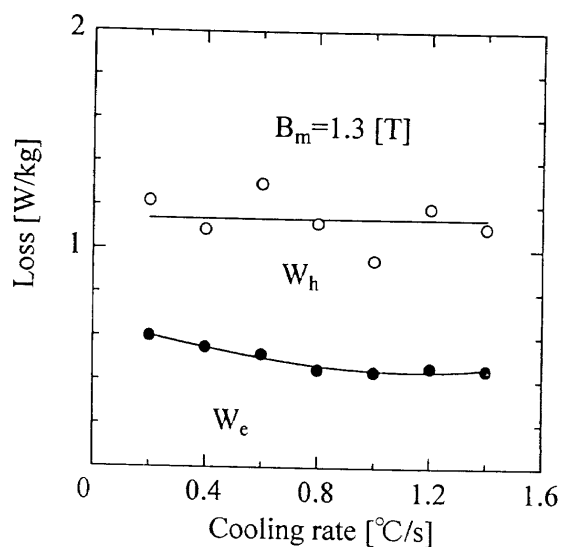


Fig. 5 W_e and W_h dependence on the cooling rate.

結晶粒成長が熱処理条件に強く依存することは周知の事実であるので⁴⁾、熱処理条件をパラメータにして、平均結晶粒径と

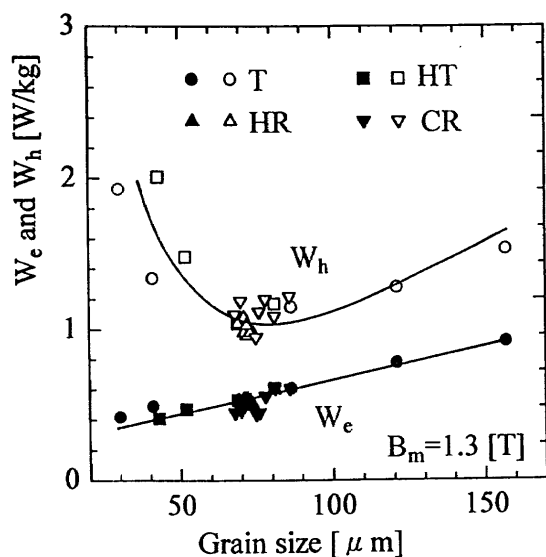


Fig. 6 W_e and W_h dependence on the grain size.

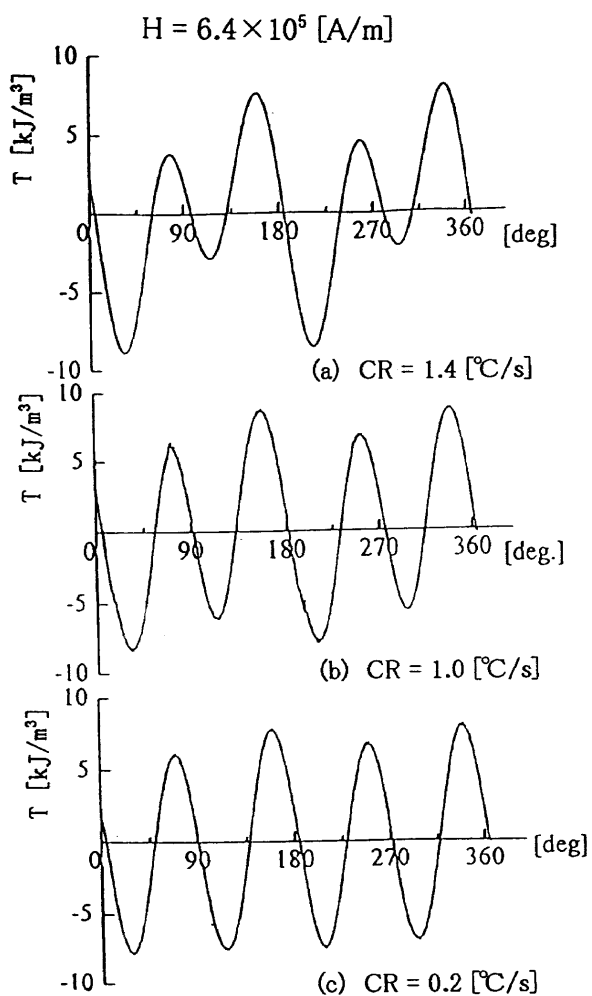


Fig. 7 Torque curves of samples annealed with cooling rates of (a) 1.4°C/s, (b) 1.0°C/s, and (c) 0.2°C/s. The annealing temperature was 800°C, the hold time was 1.5 h, and the heating rate was 12.5°C/s.

W_e および W_h の関係を Fig. 6 に示す。同図からわかるように、 W_e は平均結晶粒径に依存しており、平均結晶粒径が増大するに伴って、 W_e は単調に増加している。結晶粒径が小さ

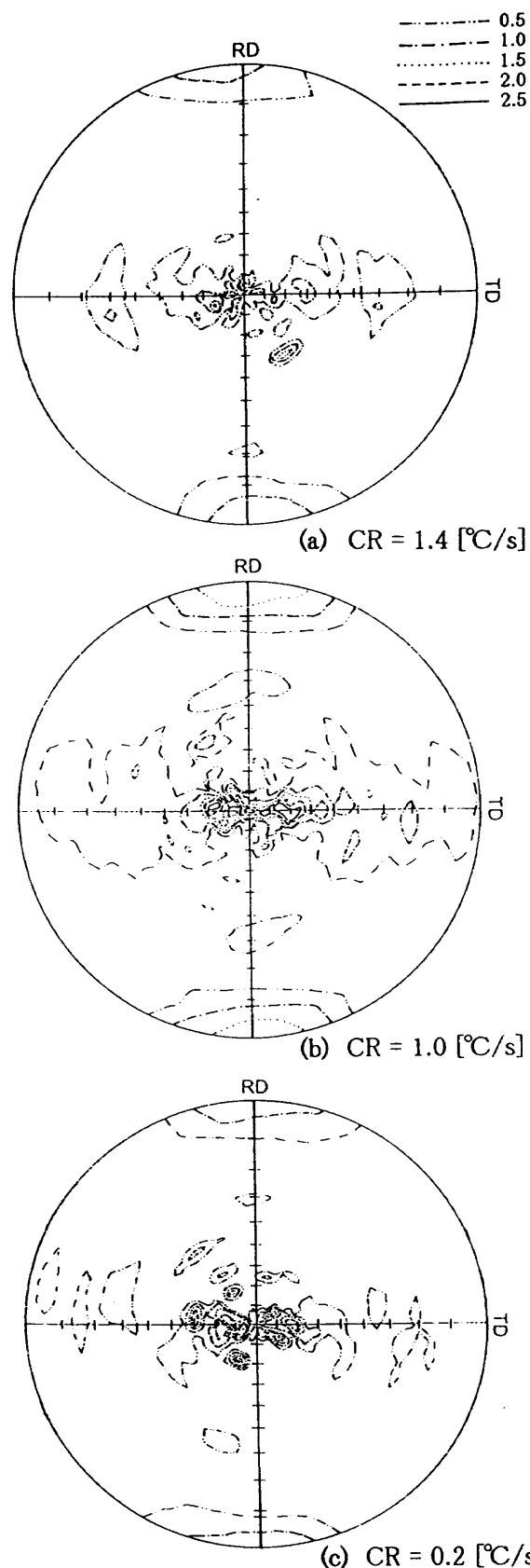


Fig. 8 (200) pole figures for cooling rates of (a) 1.4°C/s, (b) 1.0°C/s, and (c) 0.2°C/s. The annealing temperature was 800°C, the hold time was 1.5 h, and the heating rate was 12.5°C/s.

いと、粒界に生ずる静磁エネルギーを減少させるために、磁壁間隔が狭まる。この場合、励磁の際の磁壁移動距離が小さくなり、 W_e が低下することとなる⁴⁾。一方、 W_h は平均結晶粒径が $75\text{ }\mu\text{m}$ のときに最も低い値を示しているが、 W_h が特定の結晶粒径において最小値となることは一般に考えにくい⁴⁾。結晶成長の過程において、単純な結晶粒径成長ではなく、平均結晶粒径が $75\text{ }\mu\text{m}$ となる熱処理条件で、好ましい集合組織が成長し、 W_h が最小となったと考えられる^{5,6)}。

実験範囲内の各熱処理条件で熱処理した試料の磁気異方性トルクを測定した。熱処理温度、時間、昇温速度を変化させて熱処理した試料を用いて測定したトルク曲線の形はほぼ同じであり、(110)[001]結晶組織が強い場合に得られるトルク曲線⁷⁾となっている。一方、冷却速度を変化させたとき、測定したトルク曲線の形に変化が見られた。Fig. 7(a)~(c)はそれぞれ冷却速度(CR)を 1.4°C/s 、 1.0°C/s 、 0.2°C/s で熱処理した試料を用いて測定したトルク曲線である。同図(a)は先に述べたような(110)[001]結晶組織に見られるようなトルク曲線となっている。同図(b)、(c)では(100)[001]結晶組織の強い場合のトルク曲線となっており⁷⁾、冷却速度に依存してトルク曲線の形が変化することがわかった。そこで、その理由を明確化するため結晶組織についての検討を行うこととした。

Fig. 7(a)~(c)の試料について測定した(200)極点図をそれぞれFig. 8(a)~(c)に示す。同図(a)において、(100)、(110)と(122)などの結晶組織が見られ、方向性は小さい。それは(100)に対する(110)の割合が比較的大きいので、トルク曲線はFig. 7(a)の形になったと考えられる。同図(b)において、試料の結晶組織は(100)と(110)が(a)の場合よりも強く見られる。試料の中に(100)の割合が最も多く、[001]方向が試料の圧延方向に割合強く集中しているので、トルク曲線はFig. 7(b)に示した二方向性的な形となっている。またこのとき、Fig. 4に示したように交流磁気損失は最も低くなっていた。同図(c)において、(100)結晶組織は同図(b)より高い強度が見られた。そのため、トルク曲線はFig. 7(c)の形となり、二方向性傾向が強く見られている。しかしながらこの試料の磁気損失は、Fig. 4に示したように $CR=1.0^\circ\text{C/s}$ の場合よりも大きくなっている。一般に、回転機に用いられる鉄心材料の磁気特性は、圧延方向のみでなく、使用中に回転磁界の影響を受ける

ため、圧延方向に対して直角方向の特性を考慮する必要がある^{8,9)}。本論文では、圧延方向のみの磁気損失を測定したが、圧延方向に対して直角方向の磁気特性も考慮すると、Fig. 8(c)の試料が無方向性けい素鋼板としては好都合であると考えられる。このことについては、今後さらに検討を進めていく予定である。

4. ま と め

厚さ 0.5 mm の3%無方向性けい素鋼板から 0.1 mm まで圧延した試料をアルゴン(Ar)ガス雰囲気中で最適な熱処理条件を見いだした。磁気損失、磁気特性、および結晶組織を検討した結果、以下のことを明らかにした。

(1) 熱処理温度 800°C 、熱処理時間 1.5 h 、昇温速度 12.5°C/s 、冷却速度 1.0°C/s の熱処理時間で熱処理した場合の交流磁気損失は最小となった。そのとき鉄損は $W_{15/50}=2.38\text{ W/kg}$ 、磁束密度は $B_8=1.69\text{ T}$ であり、保磁力は $H_c=38\text{ A/m}$ 、平均結晶粒径の大きさは $75\text{ }\mu\text{m}$ であった。

(2) 冷却速度を変化させると、トルク曲線の変化が観察され、最適な熱処理条件で熱処理した試料は、二方向性的トルク曲線が観察された。

(3) 二方向性的なトルク曲線を示した材料では(100)面が強く観察された。

謝 辞 本研究に用いた試料を提供して下さい、また極点図の測定および有益な意見をいただきました新日本製鐵(株)の開道力氏に心から感謝致します。

文 献

- 1) 開道 力: 電気学会論文誌 D, **116**, 265 (1996).
- 2) 新日鐵: 「無方向性電磁鋼板」Cat. No. SC502, p. 10 (1988).
- 3) 開道 力: エレクトロニクス, p. 49, 1997年2月号.
- 4) 開道 力, 脇坂岳顕: 電気学会論文誌 A, **117**, 685 (1997).
- 5) K. Matsumura and B. Fukuda: *IEEE Trans. Magn.*, **20**, 1533 (1984).
- 6) C. K. Hou: *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 471 (1996).
- 7) 田口 悟: 「電磁鋼板」, p. 29 (新日鐵, 1979).
- 8) 日本工業規格: ケイ素鋼板試験方法, JIS C 2550 (1961).
- 9) 山口俊尚, 成田賢仁: 電気学会論文誌 A, **96**, 341 (1976).

1997年10月29日受理, 1998年2月2日採録