

新能源汽车驱动电机用无取向硅钢研究进展

邬宇轩, 刘朋成, 冯海涛, 卢晓禹, 郝娟娟

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 新能源汽车驱动电机用无取向硅钢作为新能源汽车产业的关键材料之一, 具有广泛的应用前景和巨大的市场潜力。文章探讨了新能源汽车驱动电机用无取向硅钢的性能指标, 并简要概述了当前无取向硅钢在稀土改性、退火工艺优化以及电机实际应用等方面的研究现状。通过在无取向硅钢中添加稀土元素, 不断优化退火处理工艺, 并结合电机实际应用的需求进行针对性改进, 可以显著提高新能源汽车驱动电机用无取向硅钢的整体性能。

关键词: 新能源汽车; 无取向硅钢; 磁性能; 电机; 稀土

中图分类号: TF777

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2025)01-0046-05

Research Progress on Non-oriented Silicon Steel for Driving Motor of New Energy Automobile

Wu Yuxuan, Liu Pengcheng, Feng Haitao, Lu Xiaoyu, Hao Juanjuan

(Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: As one of key materials in the new energy automobile industry, non-oriented silicon steel for driving motor of new energy automobile is with broad application prospects and huge market potential. In this paper, it is discussed the performance indexes of non-oriented silicon steel for driving motor of new energy automobile as well as briefly summarized current research status of non-oriented silicon steel on such aspects as rare earth modification, optimization of annealing process and practical applications of motor. The overall performances of non-oriented silicon steel for driving motor of new energy automobile could be significantly improved by adding rare earth elements into non-oriented silicon steel, continuously optimizing annealing treatment process and making targeted improvements combining with the requirements of practical applications of motor.

Key words: new energy automobile; non-oriented silicon steel; magnetic property; motor; rare earth

随着全球能源结构的转型和环保意识的增强, 新能源汽车产业正以前所未有的速度蓬勃发展。作为新能源汽车的核心部件之一, 驱动电机的性能和效率直接关系到整车的动力性、经济性以及续航能力。无取向硅钢作为一种具有优异磁性能和加工性

能的电工钢板, 逐渐成为新能源汽车驱动电机制造的理想材料^[1]。

无取向硅钢主要用于制造新能源汽车驱动电机定子和转子的铁芯。采用高性能的无取向硅钢, 不仅可以提高电机的效率和功率密度, 还可以降低电

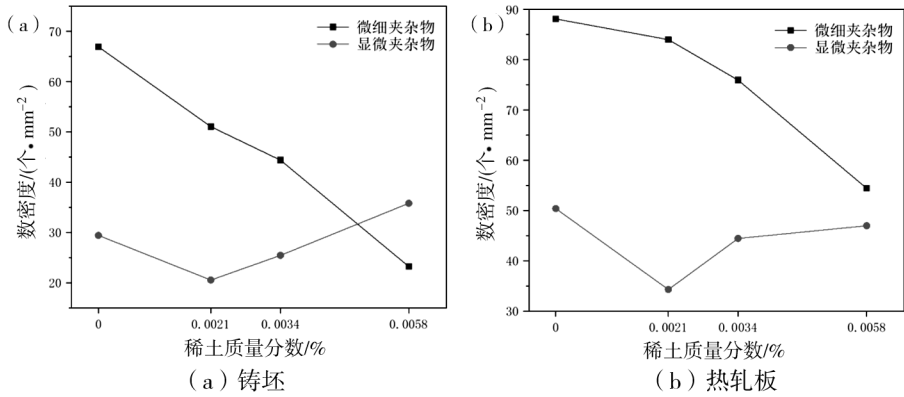


图 2 不同稀土含量下铸坯、热轧板组织中夹杂物的数密度统计

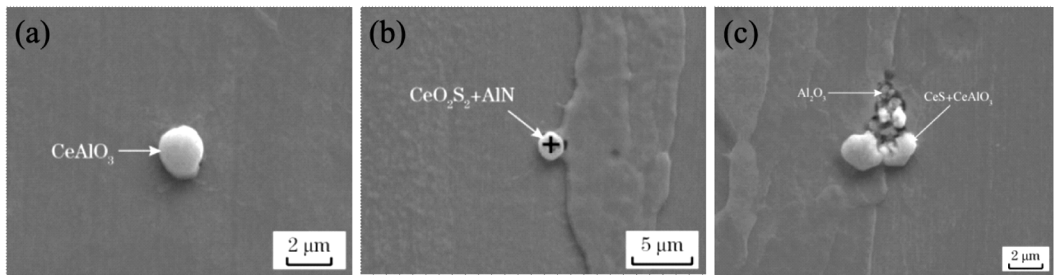


图 3 钢中稀土夹杂物的典型形貌

岳尔斌等^[14]进行了稀土铈对无取向硅钢成品磁性能影响规律的系统研究,分析发现适量添加铈可以有效提高无取向硅钢的磁性能,但添加过量稀

土,作用反而变差,添加不同含量稀土元素的无取向硅钢成品磁性能测量结果如图 4 所示^[14]。

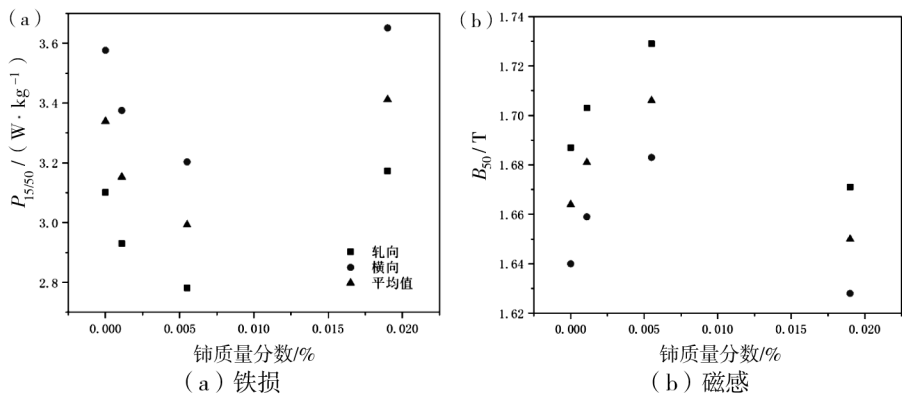


图 4 无取向硅钢添加不同铈含量与磁性能的关系

3 退火工艺对新能源汽车驱动电机用无取向硅钢的影响研究

学者在研究过程中发现,无取向硅钢的晶粒尺

寸、织构等微观形态会直接影响最终成品的磁性能,这与无取向硅钢的整个生产工艺流程密切相关,包括铸坯加热、热轧、常化、冷轧以及最终退火工艺^[15]。尤其最终退火工艺,作为控制成品性能的最

后一环,其作用尤为重要,它会诱导冷轧板的条带状组织发生回复、再结晶和晶粒长大,并且会伴随着晶粒取向的转变,这个过程对成品性能起着决定性的作用,因此研究制定合理的退火工艺参数成为重点研究方向,诸多学者对无取向硅钢的退火工艺进行了研究。Duan 等^[16]通过分析发现,提高加热温度可以有效提高磁导率、降低损耗,这主要是在退火过程中,快速加热会导致原始晶粒转变为有利再结晶组织。一些关于退火加热速度对再结晶组织演化影

响的研究报告指出,快速加热有利于 $\langle 111 \rangle // ND$ 织构发展^[17], Park 等^[18]的研究也表明加热速度影响 Goss 和 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 织构的形成。

石文敏等^[19]研究了退火过程中不同加热速度对高牌号无取向硅钢显微组织、织构和磁性能的影响。研究表明,随着加热速度的提高,退火板中的 γ 取向线织构被抑制, λ 取向线织构强度显著提高,有利于成品板磁感的提高,图 5 为不同加热速度对应试样最终退火后的取向线分布密度^[19]。

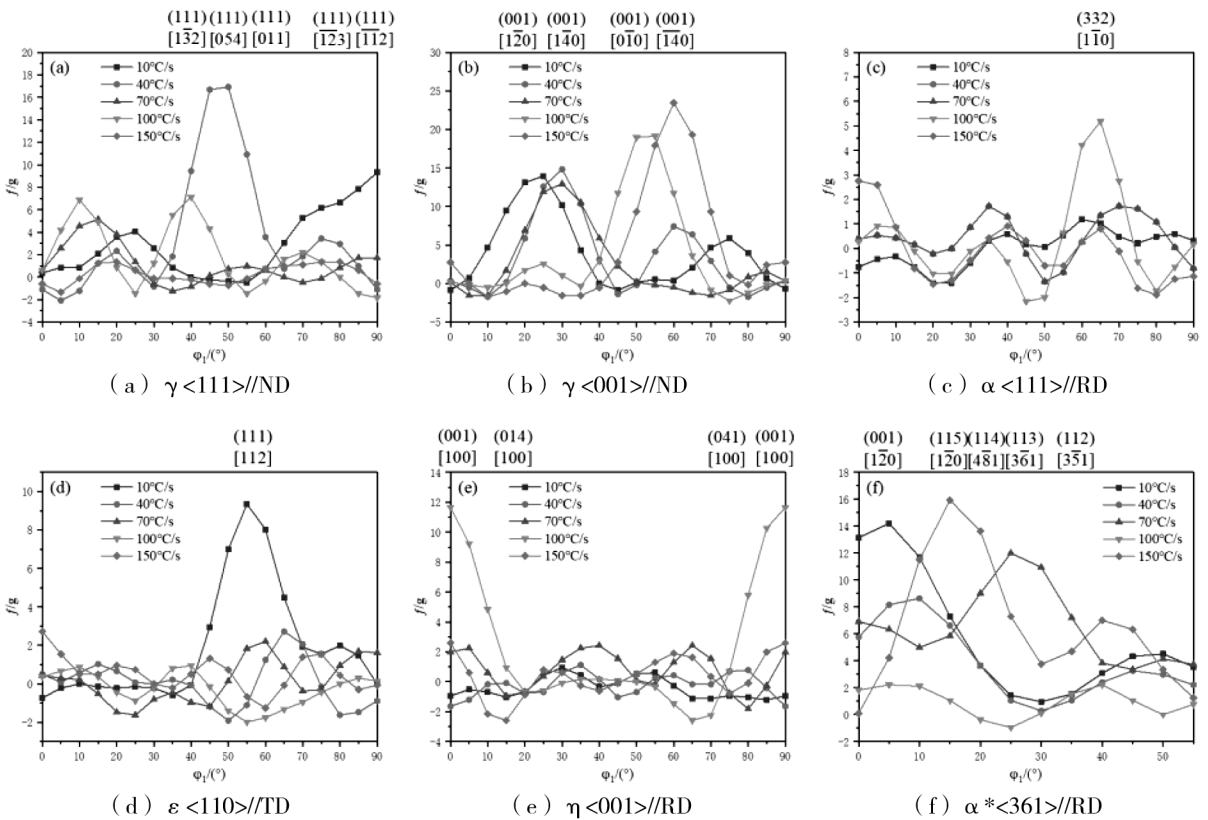


图 5 不同加热速度对应试样最终退火后的取向线分布密度

4 新能源汽车驱动电机用无取向硅钢的应用研究

新能源汽车驱动电机用无取向硅钢作为新能源汽车产业的关键材料之一,具有广泛的应用前景和巨大的市场潜力,电动机中的硅钢铁芯经常在复杂工况下工作,对硅钢的性能提出了很大的挑战,诸多学者针对无取向硅钢在电机中的实际应用状况进行了细致的分析研究。颜昌昊^[20]等通过模拟仿真对

比了非晶材料和硅钢的磁性能及其应用于高速电机的电机效率和不同转速下的铁损差值,为不同转速工况的电机提供选材建议。Wang 等^[21]为了满足高性能和特殊环境电机应用的需求,对材料在多物理场条件下的性能进行更深入的研究,通过搭建一个温度场、应力场、电磁场与其他场同时作用的测试系统,准确模拟了电机的实际复杂工况,探索无取向硅钢的动态特性,图 6 为电机效率仿真数据与实测效率数据比较图^[21]。

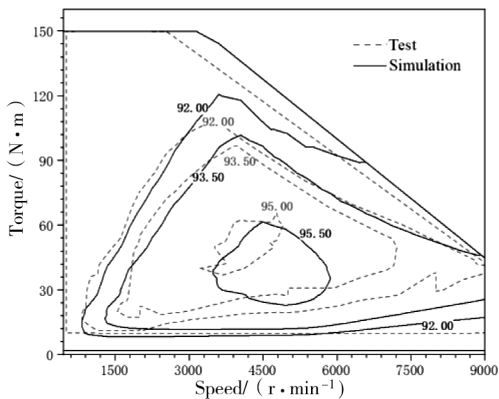


图 6 电机效率仿真数据与实测效率数据比较

4 结束语

无取向硅钢作为新能源汽车驱动电机制备的核心材料,展现出了广阔的应用舞台和巨大的市场机遇。本文分析了新能源汽车驱动电机用无取向硅钢的性能要求,浅析了当前业界对无取向硅钢在稀土处理、退火工艺以及电机应用方面的研究,通过在无取向硅钢中合理添加稀土元素、优化改进退火工艺,并以电机应用实践为指导,可以有效改善新能源汽车驱动电机用无取向硅钢的综合性能。未来,随着新能源汽车产业的持续发展和技术的不断进步,无取向硅钢将迎来更加广阔的发展空间和更加美好的发展前景。

参 考 文 献

[1] 王凯. 新能源汽车电机技术标准化的挑战与对策[J]. 中国标准化,2023(17):83-87.

[2] 何昱瑞. 稀土高强无取向硅钢制备过程中组织与析出物演变规律研究[D]. 包头:内蒙古科技大学,2024.

[3] 梁瑞. 取向硅钢片对近极槽永磁力矩电机性能影响的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2024.

[4] 胡明睿,朱英杰,赵益鏊,等. 新能源汽车驱动电机用无取向硅钢性能分析[J]. 电工钢,2023,5(3):28-33.

[5] 樊立峰,秦美美,岳尔斌,等. 新能源汽车对无取向硅钢的技术挑战[J]. 材料导报,2021,35(15):4-6.

[6] 徐星星,秦镜,赵海斌,等. 新能源汽车用高牌

号无取向电工钢的研究现状及发展趋势[J]. 江西冶金,2020,40(3):6-11.

[7] 邱鑫. 电动汽车用永磁同步电机驱动系统若干关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2014.

[8] 崔荣高. 考虑制造影响的电工钢叠片磁性能建模及其应用研究[D]. 上海:上海交通大学,2020.

[9] 杨健,李婷婷. 稀土处理的无取向硅钢夹杂物控制研究进展[J]. 钢铁,2022,57(7):1-15.

[10] 周情耀,秦镜,赵海斌,等. 钕对冷轧高硅钢薄板组织、织构及磁性能的影响[J]. 电工钢,2020,2(3):9-13.

[11] 刘海明,高力. 稀土金属在无取向硅钢中的作用[J]. 钢铁,1987(11):41-45.

[12] 宋程,项利,石超,等. 稀土处理对高牌号无取向硅钢中夹杂物的影响[J]. 电工钢,2024,6(1):39-45.

[13] 李娜,项利,仇圣桃. 钕对 1.2% Si-0.4% Al 无取向电工钢织构和磁性能的影响[J]. 材料热处理学报,2016,37(6):89-94.

[14] 岳尔斌,李娜. 稀土钕对 2.9% Si 无取向硅钢磁性能的影响[J]. 钢铁,2014,49(12):65-70.

[15] 乔鹏飞. 新能源汽车用无取向硅钢全流程组织、织构与析出物的演变研究[D]. 包头:内蒙古科技大学,2023.

[16] Duan X, Huneus H, Kochmann T, et al. Effect of Annealing Temperature and Heating Rate on the Magnetic and Mechanical Properties of Electrical Steel[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1996,160(1):133-135.

[17] Bae B K, Woo J S, Kwan J K, et al. Effect of Heating Rate on Properties of Non-Oriented Electrical Steel Containing 0.4% Si[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2003,254-255:373-375.

[18] Park N J, Lee E J, Joo H D, et al. Evolution of Goss Orientation During Rapid Heating for Primary Recrystallization in Grain-Oriented Electrical Steel[J]. ISIJ International, 2011, 51(6):975-981.

(下转第 55 页)

3 结论

(1) La 的加入使得管线钢中 AlN 、 Al_2O_3 夹杂物变性成为 La-O-S、La-O-S-Al、LaS 夹杂物, 添加 0.005% 稀土 La 后, 夹杂物平均尺寸由 $4.37 \mu\text{m}$ 减小到 $2.92 \mu\text{m}$ 。

(2) La 对奥氏体晶粒具有明显的细化作用, 随着 La 含量的增加, 奥氏体的晶粒度由 5 级变成了 8.5 级。

(3) 加入 0.002 5% 稀土 La 后, 钢中的夹杂物主要是尺寸约 $1 \mu\text{m}$ 的 La-O-S 和 La-O-S-Al, 具有钉扎作用, 从而使奥氏体晶粒尺寸明显减小。

参 考 文 献

- [1] 刘佼, 王权, 刘莉, 等. 超低碳贝氏体钢形变奥氏体静态再结晶行为研究[J]. 内蒙古科技大学学报, 2014, 33(2): 128 - 131.
- [2] 王权, 孙婷婷, 白雅琼, 等. 冷却速度对超低碳微合金钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2015, 40(2): 148 - 151.
- [3] 王权, 武鹏祥, 孙婷婷, 等. 控轧控冷条件下 X100 管线钢的组织转变及性能[J]. 金属热处理, 2016, 41(11): 21 - 25.
- [4] 王权, 武鹏祥, 孙婷婷, 等. 回火工艺对超低碳微合金钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2017, 42(4): 91 - 94.
- [5] 王壮飞, 唐帅, 刘振宇, 等. Nb 对低碳微合金钢连续冷却相变行为的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(8): 1117 - 1119.
- [6] Wang Zhuangfei, Tang Shuai, Liu Zhenyu, et al. Effect of Nb on Continuous Cooling Transformation Behavior of Low Carbon Microalloyed Steel [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2014, 35(8): 1117 - 1119.
- [7] 林乙丑, 张彦敏, 张广威, 等. 1.25Cr0.5MoSiNb 钢过冷奥氏体连续冷却转变[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(1): 119 - 125.
- [8] Lin Yichou, Zhang Yanmin, Zhang Guangwei, et al. Continuous Cooling Transformation of Supercooled Austenite of 1.25Cr0.5MoSiNb Steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42(1): 119 - 125.
- [9] 谭会杰, 王海燕, 李德超, 等. X80 管线钢连续冷却相变及组织研究[J]. 金属热处理, 2015, 40(7): 91 - 94.
- [10] Tan Huijie, Wang Haiyan, Li Dechao, et al. Continuous Cooling Transformation and Microstructure of X80 Pipeline Steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(7): 91 - 94.
- [11] 庞庆海, 郎庆斌, 马窦琴, 等. 2.25Cr1Mo0.25V 钢连续冷却转变过程的相变行为[J]. 金属热处理, 2019, 44(2): 12 - 16.
- [12] Pang Qinghai, Lang Qingbin, Ma Douqin, et al. Continuous Cooling Transformation Behavior of 2.25Cr1Mo0.25V Steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(2): 12 - 16.
- [13] 邓鹏, 宋仁伯, 孙挺, 等. 70Mn 钢连续冷却转变曲线及其相变模型[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(4): 208 - 212.

(上接第 50 页)

- [19] 石文敏, 杨光, 吴章汉, 等. 退火加热速度对高牌号无取向硅钢组织、织构及磁性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(4): 138 - 145.
- [20] 颜昌昊, 樊庆林, 马德稷, 等. 不同转速永磁同步电机非晶合金和硅钢选材分析[J]. 电工钢, 2024, 6(1): 52 - 58.
- [21] Anqi W, Baozhi T, Yulin L, et al. Transient Magnetic Properties of Non-Grain Oriented Silicon Steel under Multi-Physics Field [J]. Materials, 2022, 15(23): 8305 - 8305.