微泵电机定子用低碳钢蓝化工艺及性能试验

王 洋，傅剑辉
（江苏大学 流体机械工程技术研究中心，江苏 镇江 212013）

摘 要：基于低碳钢比硅钢片资源丰富，且价格低廉，为降低水泵行业微型电泵电机定子用材料成本，进行了退火蓝化低碳钢替代硅钢片的试验. 分析了低碳钢的退火蓝化机理，研制了一套低碳钢定子材料的退火蓝化工艺方案，并将蓝化后的低碳钢定子在电泵电机中进行了试验验证，对使用低碳钢材料与硅钢片材料的电泵电机的空载电流、满载电流、效率、功率因数和温升等主要技术指标进行了对比分析. 试验结果表明，退火蓝化工艺能显著提高低碳钢的电磁性能，使其达到硅钢片的技术指标，从而满足电泵电机的性能要求，验证了将低碳钢经退火蓝化后替代硅钢片用作微型电泵电机定子材料的可行性.

关键词：微型电泵；电机定子；低碳钢；硅钢片；退火蓝化；电磁性能
中图分类号：TG162.8 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-6254(2009)06-0384-04

Experiment on blueing technique of low-carbon steel for electromotor stator of micro electric pump

Wang Yang, Fu Jianhui
(Technical and Research Center of Fluid Machinery Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: Compared to silicon steel sheet, low-carbon steel has its advantages of rich resources and low price. In order to reduce cost of micro electromotor of micro electric pump used in pump industry, an experimental study of the application of low-carbon steel instead of silicon steel sheet on the electromotor of micro electric pump was carried out. The mechanism of annealing and blueing was analyzed. A process of annealing and blueing treatment for stator of low-carbon steel was designed. In order to make a comparative analysis of the main technical specifications such as no-load and full-load current, efficiency, temperature rise, and power factor of electromotor between low-carbon steel stator and silicon steel stator, a performance test of electromotor of electric pump installed with the stator of low-carbon steel was conducted. The experimental results show that the electromagnetic properties of low-carbon steel sheet after annealing and blueing treatment reach the technical specifications of silicon steel, so it is workable to be taken as alternative material for silicon steel sheet for stator of electromotor of motor pump.

Key words: micro electric pump; electromotor stator; low-carbon steel; silicon steel sheet; annealing and blueing; electromagnetic properties

硅钢片是电机定子传统使用的导磁材料，它的电磁性能直接关系到电机产品的品质、安全性和能源消耗[1,2]. 理想的导磁材料应具备低铁损值和高磁感应强度的特性，为提高预期性能，硅钢片生产必

收稿日期：2009-07-06
基金项目：国家标准化管理委员会基金资助项目(20074310-T-604)
作者简介：王 洋(1955—)，男，河北定州人，研究员(pgwy@ujs.edu.cn)，主要从事流体机械及工程研究.
傅剑辉(1983—)，男，浙江金华人，硕士生(happyfjh@hotmail.com)，主要从事流体机械及工程研究.

万方数据

须经过诸多复杂生产工艺，主要表现在轧制过程中要进行多次中间退火，同时材料表面还要进行涂绝缘膜等工艺，造成生产环节多，周期长，成本提高[3].

鉴于低碳钢比硅钢片具有资源丰富和价格低廉优势，国内外学者从具有间歇式工作特点的小型电机入手，进行了将低碳钢应用于电扇、冰箱等家用电器电机的研究工作，并取得了一些成果. 但在水泵行业微型电泵上的应用研究尚未见到相关报道. 目前微型电泵用电机的需求量很大，电机定子材料主要为DR510热轧硅钢片，成本较高，为降低水泵行业微型电泵的成本，用低碳钢替代硅钢片作为电机定子材料的试验研究具有重要的实用价值.

1　试验材料与方法

1.1　试验材料

Q195低碳钢具有含碳量低、塑性好、易冲压、价格低廉等特点，与硅钢片相比，其铁损大，但经退火蓝化处理后，铁损可明显下降. 其主要化学成分和力学性能见表1[4]，其中 σ_s 为屈服强度，σ_b 为抗拉强度，δ_5 为延伸率.

表1　Q195低碳钢化学成分与力学性能

Tab.1　Chemical composition and mechanics properties of Q195

化学成分	C	Mn	Si	S	P
（质量分数）/%	≤0.12	≤0.50	≤0.30	≤0.035	≤0.04
力学性能	σ_s/MPa	σ_b/MPa	δ_5/%		
	≥195	315~430	≥33		

1.2　材料的退火蓝化

将低碳钢冲压成定子冲片，并将其预先叠片后再进行退火蓝化处理. 因为叠片后的定子冲片之间仍能保持一定的层间距，可以保证退火蓝化处理时保护气及蓝化介质的流通，另外，在处理过程中可消除叠片过程产生的应力[5].

1.2.1　退火蓝化机理

低碳钢材料通常为钢带卷材，在使用时要先把钢带卷材裁剪成一定宽度卷料，然后把卷料放在冲床上冲压成电机定子冲片. 由于在这一过程中低碳钢钢带受机械裁剪、冲压应力和应变的影响，特别是冲压成的定子冲片的齿部尺寸非常小，该处受冲压应力的影响非常大，这些均导致定子冲片的电磁性能严重恶化，铁损值增加，使电机的效率明显降低[6]，因此必须对低碳钢定子进行退火蓝化处理.

退火处理可消除低碳钢定子冲片受机械冲压应力和应变的影响，降低碳含量，并使晶粒粗化，从而降低残余应力、晶界和碳杂质（渗碳体颗粒形式）等有害因素对电磁性能的不利影响. 软磁材料的电磁性能，如矫顽磁力、铁损和磁导率等，具有组织敏感性，且在不同程度上受一个或多个因素的影响. 关于钢铁材料的晶体组织结构对电磁性能的影响，国内外学者已进行过大量的研究. 铁被认为在 <100> 晶轴方向最易磁化，其次是 <110> 方向，最难磁化的是 <111> 方向. 退火后碳含量进一步降低，可促进铁素体晶粒的生长，形成有利的电磁性能组织结构[7]，从而提高低碳钢定子的电磁性能.

蓝化处理是使低碳钢定子与蓝化介质产生化学反应，在定子冲片表面形成一层致密的氧化绝缘膜，本研究采用的蓝化介质为空气和水蒸气的混合气体，其化学反应式如下：

$$2Fe + O_2 \rightarrow 2FeO \quad (1)$$

$$6FeO + O_2 \rightarrow 2Fe_3O_4 \quad (2)$$

$$4Fe_3O_4 + O_2 \rightarrow 6\ Fe_2O_3 \quad (3)$$

$$Fe + H_2O \rightarrow FeO + H_2\uparrow \quad (4)$$

$$3FeO + H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + H_2\uparrow \quad (5)$$

$$2Fe_3O_4 + H_2O \rightarrow 3Fe_2O_3 + H_2\uparrow \quad (6)$$

式(1)和(4)生成的FeO性能不稳定，随着蓝化过程的继续，会与水蒸气结合生成 Fe_3O_4 和 H_2. H_2 对 Fe_2O_3 有还原作用，应及时将其排出，以加速在低碳钢定子表面生成 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 氧化膜. 该氧化膜不仅能够防止低碳钢定子表面锈蚀，而且能增加定子冲片间的绝缘电阻，减少铁芯的涡流损耗.

1.2.2　退火蓝化装置系统

采用燃气钟罩退火蓝化炉对低碳钢定子叠片进行退火蓝化处理，退火和蓝化过程在同一炉子内完成. 装置见图1，由加热罩、内罩、炉台、高速运行的循环风机、氮气氢气供给系统、控温热电偶、向炉内通入蓝化介质的管线及炉内均匀分配器、冷却水系统、抽真空系统和叠装低碳钢定子的料笼等组成.

加热罩内的烧嘴呈切向布置，上下两排，每个烧嘴都装有电磁点火装置和紫外线火焰监测器，当燃烧达到一定程度时，关闭上排烧嘴，热量仅由下排供给. 内罩结构为波纹型，与传统的光面型内罩相比，波纹型内罩可以缩短加热时间，提高生产能力，延长内罩寿命，同时有利于提高产品质量. 炉台下方的循环风机可提高炉内保护气体流速和循环量，强化炉内对流传热，改善炉温均匀性，达到节能增产与提高产品质量的综合效果.

万方数据

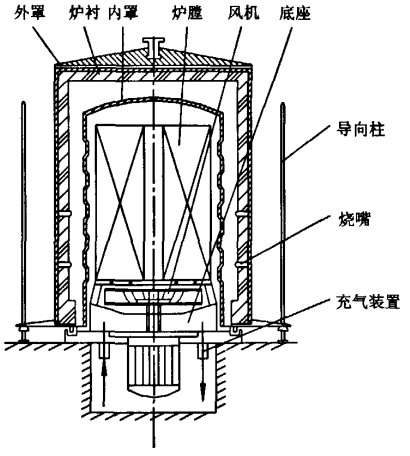


图1 罩式退火炉结构

Fig. 1 Configuration of bell-typed annealing furnace

1.2.3 退火蓝化工艺

热处理工艺是改善低碳钢电磁性能的关键,选择合理的热处理工艺参数,对改善低碳钢的电磁性能起到十分重要的作用[8,9]. 本试验主要工艺过程为:按叠装要求往料笼内叠装Q195低碳钢定子叠片,吊扣退火蓝化炉内罩,预抽真空及密封性测试,通入氮气和氢气混合气体,吊扣退火蓝化炉外罩,加热至特定温度时保温,冷却至特定温度时通入蓝化介质并保温、冷却、出炉. 其工艺参数曲线如图2.

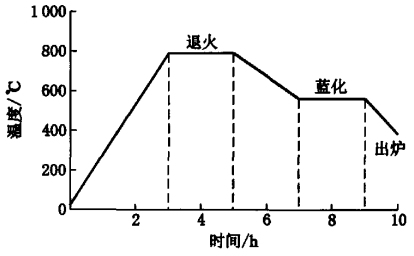


图2 退火蓝化工艺曲线图

Fig. 2 Process parameters curve of annealing and blueing

2 试验结果

低碳钢定子经过退火蓝化处理后,其表面可观察到一层蓝化过程产生的乌色氧化膜. 经测定,低碳钢定子碳含量进一步降低,退火蓝化处理前后低碳钢定子表面碳含量和氧化膜厚度的变化,见表2.

电磁性能的测定按GB/T 3655—2000《用爱泼斯坦方圈法测量电工钢片(带)磁性能的方法》进行,测试仪器为磁性材料自动测量装置(TYU-2000M),退火蓝化前后电磁性能对比见表3. 图3为退火蓝化处理后的Q195低碳钢在轧制方向上的金相显微组织.

表2 Q195低碳钢碳含量和氧化膜厚度

Tab. 2 Carbon content and oxide film thickness of Q195

Q195	碳含量/%	氧化膜/μm
退火蓝化前	0.081	0
退火蓝化后	0.006	1~2

表3 Q195退火蓝化前后的铁损及磁感应强度

Tab. 3 Core loss and magnetic induction of Q195 before and after annealing and blueing

参数	铁损/(W/kg)		磁感应强度/T		
	P10/50	P15/50	B25	B50	B100
Q195 蓝化前	7.306	14.109	1.622	1.718	1.826
Q195 蓝化后	3.320	6.799	1.632	1.722	1.841
DR510	2.135	5.074	1.599	1.719	1.924

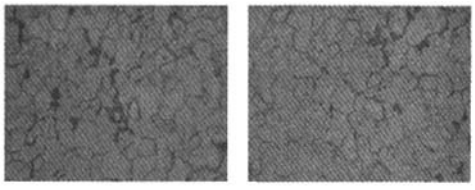


图3 退火蓝化后的显微组织

Fig. 3 Microstructure after annealing and blueing

根据电机的试验方法,将DR510硅钢片定子和退火蓝化处理后的Q195低碳钢定子,在试制的某功率为0.75 kW微型电泵配套三相电机上进行了对比试验,分别测量并记录了两电泵电机的空载性能、负载性能、堵转性能和温升等数据. 样机对比试验结果如表4所示.

表4 电泵配套电机性能对照表

Tab. 4 Performance comparison of electromotor of electric pump

性能参数		定子材料		标准值
		Q195	DR510	
空载性能	空载电流/A	1.08	1.23	
	空载输入功率/W	97.00	110.00	
	铁芯损耗/W	63.90	53.70	
	定子铜耗/W	101.00	119.00	
负载性能	满载电流/A	1.70	1.79	1.81
	满载输入功率/W	990.00	982.00	1 000.00
	功率因数	0.88	0.83	0.84
	效率/%	75.70	76.30	75.00
堵转性能	启动电流/倍	5.41	5.15	6.50
	启动转矩/倍	3.00	2.71	2.20
温升	绕组温升/K	49	53	80

万方数据

3　分析与讨论

由表3可知，经过退火蓝化处理后，低碳钢定子的铁损得到了很大的改善，大大缩小了与硅钢片之间的差距. 处理后的铁损 P10/50 为3.320，比处理前的7.306减少了54.6%；处理后的铁损 P15/50 为6.799，比处理前的14.109减少了51.8%. 退火蓝化处理后铁损大幅降低，本研究认为其主要原因有以下几点：

1）碳含量的降低. 碳对低碳钢的电磁性能有不利影响，因为低碳钢中的碳通常以碳化物沉淀（如 Fe_3C 渗碳体）的形式存在，这种沉淀物在低碳钢的结晶过程中会阻碍晶粒的生长，从而增加低碳钢组织的晶界. 而在低碳钢定子的磁化过程中，晶界和碳化物沉淀（尤其当碳化物沉淀的尺寸介于0.01至0.10 μm时）对磁畴壁的移动会产生阻碍作用，从而降低定子的电磁性能. 由表2可知，经退火蓝化后低碳钢定子表面的碳含量急剧降低，从处理前的0.081%降至0.006%，相当于工业纯铁的水平. 碳含量的急剧降低，有效地去除了碳杂质，粗化了铁素体晶粒，并产生了适当的晶体组织（如图3所示），导致磁滞损耗下降，从而降低了铁损值，消除了由高碳含量引起的对电磁性能的负面影响.

2）氧化绝缘膜的形成. 由表2可知，经过退火蓝化处理后，低碳钢定子的表面形成了一层1～2 μm的氧化绝缘膜. 这层氧化绝缘膜不仅起到了防锈作用，而且大大增加了低碳钢定子叠片之间的绝缘电阻，减小了片与片之间的涡流损耗，从而使铁损下降，电磁性能提高.

3）冲片应力的消除. 由于挤压和拉拔应力的作用，定子冲片内部或表面容易产生塑性变形或塑性凸出效应，使磁畴的排列发生变化，由原来的无序排列变为部分有序排列，导致材料的磁导率下降，矫顽力增大，给定子的电磁性能带来不利影响. 但低碳钢定子经退火蓝化处理后，其残余应力得到去除，从而消除了由此产生的不利因素.

由表3亦可知，低碳钢定子经过退火蓝化后，磁感应强度有所提高. 在低磁场段，低碳钢定子的磁感应强度 B25 和 B50 均比 DR510 硅钢片的高；在高磁场段，低碳钢定子的磁感应强度 B100 比 DR510 硅钢片的略小，但由于微型电泵电机的功率较小，磁场强度较低，因此这并不影响本试验研究.

由表4知，采用了经退火蓝化处理后的低碳钢定子的电泵电机主要性能指标与 DR510 硅钢片电泵电机相比均有不同程度的变化. 具体分析如下：

1）电泵电机采用处理后的低碳钢后，其空载电流和满载电流明显减小，较用硅钢片的空载电流和满载电流分别降低了12.2%和5.0%，这主要是因为处理后的低碳钢的磁感应强度比硅钢片的优良.

2）电泵电机采用处理后的低碳钢的效率高于标准值，并接近于硅钢片的水平. 这是因为处理后的低碳钢的工作电流相对较小，定子铜耗的减小量部分或全部抵消了铁损的增加量，从而使其效率能够与硅钢片的相当.

3）由样机数据的对比分析可知，采用低碳钢定子的电泵电机功率因数较硅钢片的有所提高. 主要是因低碳钢的磁感应强度比硅钢片有小幅度的提高，电机激磁电流减小，使功率因数提高.

4）采用处理后的低碳钢的电泵电机的温升比硅钢片的有所降低，主要是因为工作电流的降低，导致了绕组发热量的减少，再加上低碳钢材料的导热性能比硅钢片好，因而温升下降.

4　结　论

1）Q195低碳钢定子经过退火蓝化后，碳含量急剧降低，并且在表面形成了一层氧化绝缘膜，从而使铁损明显降低，电磁性能得到了改善.

2）与 DR510 硅钢片微型电泵电机相比，Q195低碳钢定子经退火蓝化后，其样机的空载电流和满载电流均明显小于 DR510 硅钢片微型电泵电机，功率因数也略有提高，效率虽略为降低，但仍高于标准值，从而证明样机性能可满足微型电泵电机要求.

3）通过退火蓝化大幅降低了低碳钢铁损，充分利用低碳钢磁感高的优点，将 Q195 低碳钢定子在微型电泵电机中进行了生产应用. 经实践验证，Q195低碳钢微型电泵电机的性能可完全达到 DR510 硅钢片微型电泵电机的性能指标.

参考文献（References）

[1] Oldani C R. Decarburization and grain growth kinetics during the annealing of electrical steels[J]. *Scripta Materialia*, 1996,35(11): 1253－1257.

[2] 陆夫昌. 冷轧低碳钢板在电扇电机中的应用研究[J]. 电机技术,1997(4):14－16.
Lu Fuchang. Research on the application of low-carbon cold rolled steel on electromotor of electric fan[J]. *Motor Technology*, 1997(4):14－16. (in Chinese)

（下转第392页）

万方数据

due to impeller-volute interaction in a centrifugal pump [J]. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2002, 124: 348 - 355.

[4] 吕智君,兰才有,王福军. 自吸泵研究现状及发展趋势[J]. 排灌机械,2005,23(3):1 - 5.
Lü Zhijun, Lan Caiyou, Wang Fujun. The present status and development of self-pump[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2005, 23 (3): 1 - 5. (in Chinese)

[5] 陈松山,葛 强,严登丰,等. 泵站竖井进水流道数值模拟与装置特性试验[J]. 农业机械学报,2006,37(10):58 - 61.
Chen Songshan, Ge Qiang, Yan Dengfeng, et al. Numerical simulation of turbulent flow inside inlet duct and experiment[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(10): 58 - 61. (in Chinese)

[6] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

[7] Caridad J, Kenyery F. CFD analysis of electric submersible pumps handing two-phase mixtures[J]. *Transaction of the ASME: Journal of Energy Resource Technology*, 2004, 126(2): 99 - 102.

[8] 赵万勇,刘天宝,李易松. 旋流泵的流动规律[J]. 排灌机械,2007,25(6):52 - 55.
Zhao Wanyong, Liu Tianbao, Li Yisong, Flow mechanism in votex-pump[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2007, 25 (6): 52 - 55. (in Chinese)

[9] 施卫东,张启华,陆伟刚. 新型井泵水力设计及内部流动的数值模拟[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2006,27(6):528 - 531.
Shi Weidong, Zhang Qihua, Lu Weigang. Hydraulic design of new-type deep well pump and flow calculation [J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2006, 27(6): 528 - 531. (in Chinese)

[10] Zhou Weidong, Zhao Zhimei, Lee T S, et al. Investigation of flow through centrifugal pump impellers using computational fluid dynamics[J]. *International Journal of Rotating Machinery*, 2003, 9(1): 49 - 61.

(责任编辑 贾国方)

(上接第287页)

[3] 刘国安. 低碳铁在冰箱压缩机中的应用[J]. 天津冶金,1999(3):10 - 11.
Liu Guo'an. Application of low carbon iron on refrigerator compressor[J]. *Tianjin Metallurgy*, 1999(3): 10 - 11. (in Chinese)

[4] 国家标准局. GB 700—2006 碳素结构钢[S]. 北京:标准出版社,2007.

[5] Standaert C, Eloot K, De Paepe A, et al. Decarburisation of interlocked and laser welded stator and rotor cores [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1996, 160: 139 - 140.

[6] 黄卫华. 半工艺无取向电工冷轧钢的技术特点及其退火热处理工艺探讨[J]. 电机电器技术,2002(1):40 - 43.
Huang Weihua. Technical features of semi-processed non-oriented cold rolled electric steel and study of its annealing heat treatment[J]. *Electric Machine and Apparatus Technology*, 2002(1): 40 - 43. (in Chinese)

[7] Oldani C, Silvetti S P. Microstructure and texture evolution during the annealing of a lamination steel [J]. *Scripta Materialia*, 2000, 43: 129 - 134.

[8] 毛必华,华向东. 热处理工艺参数对硅钢片电磁性能的影响[J]. 江西冶金,2000,20(1):13 - 14.
Mao Bihua, Hua Xiangdong. The influence of the parameter of heat treatment technique on electromagnetic property of silicon steel slice [J]. *Jiangxi Metallurgy*, 2000, 20(1): 13 - 14. (in Chinese)

[9] 陈国钧,李茂昌,周元龙. 金属软磁材料及其热处理[M]. 北京:机械工业出版社,1986.

(责任编辑 赵 鸥)

万方数据