

化学成分对低牌号冷轧无取向电工钢铁损的影响

李晶 岳铁军 余健 史志强 姚国伟
(北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083)

摘要 通过50 kg真空感应炉熔炼-锻造成100 mm×25 mm板坯-350四辊轧机热轧2 mm带材-350四辊冷轧机轧成0.5 mm带材流程,研究了主要元素(%)-0.015~0.070C、1.21~2.30Si、0.25~0.33Mn、0.013~0.018P、0.008~0.017S、0.002~0.210Al对低牌号冷轧无取向电工钢铁损的影响。结果表明,随钢中碳、磷、硫、锰含量的增加,冷轧无取向电工钢铁损明显增加;随硅含量增加,钢的铁损降低;铝与钢中的氮形成细小的AlN颗粒,阻碍钢材晶粒长大,随钢中铝含量增加,铁损增加。

关键词 冷轧无取向电工钢 化学成分 晶粒尺寸 铁损

Effect of Chemical Composition on Core Loss of Low Grade Cold Rolled Non-Oriented Electrical Steel

Li Jing, Yue Tiejun, Yu Jian, Shi Zhiqiang and Yao Guowei
(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract The effect of main element - 0.015 ~ 0.070C, 1.21 ~ 2.30Si, 0.25 ~ 0.33Mn, 0.013 ~ 0.018P, 0.008 ~ 0.017S, 0.002 ~ 0.210Al in low grade cold rolled non-oriented electrical steel on core loss has been studied by the process of 50 kg vacuum induction furnace steelmaking - 100 mm×25 mm slab forging - 2 mm strip hot rolled by 350 four high mill - 0.5 mm strip cold rolled by 350 four high mill. Results showed that with increasing carbon, phosphorus, sulphide, manganese content in steel the core loss of cold rolled non-oriented electrical steel obviously increased; with increasing silicon content in steel the core loss decreased and as aluminum with nitrogen formed fine AlN particles to prevent grain growing up in steel, the core loss increased with increasing aluminum content in steel.

Material Index Cold Rolled Non-Oriented Electrical Steel, Chemical Composition, Grain Size, Core Loss

电工钢(硅钢)是重要的金属功能材料,主要用于制造电动机、发电机、变压器铁芯和各种电讯器材,按重量计占磁性材料用量的90%~95%^[1]。

中、低牌号冷轧无取向电工钢片可用于中小型电机、家用电器压缩机、变压器、稳流器等。影响冷轧无取向电工钢电磁性能的主要因素有:晶粒尺寸、化学成分、内应力、钢板厚度和钢板表面状态等。其中,晶粒尺寸对无取向电工钢电磁性能的影响是十分明显的,而化学成分含量对最终晶粒的大小具有重要影响,本文研究了无取向电工钢的主要化学成分对铁损和晶粒大小的影响。

1 试验研究

用50 kg真空感应炉熔炼试验研究用钢,试验用钢的成分按照钢厂实际生产的低牌号冷轧无取向电工钢成分设计,熔炼钢水经浇铸并将铸坯锻打成宽×厚=100 mm×25 mm的板坯。

板坯经高温箱式电阻炉加热到1 150 ℃,均热2 h,后由350四辊/二辊热轧试验机轧制成2 mm带材,终轧控制温度为800 ℃,最后经保温缓冷至室温。

表1 试验低牌号冷轧无取向电工钢试样的成分含量及铁损
Table 1 Chemical composition and core loss of test low grade cold rolled non-oriented electrical steels

试样号	成分/%						铁损/ (W·kg ⁻¹)
	C	Si	Mn	P	S	Al	
1	0.015	1.23	0.30	0.016	0.017	0.006	7.13
2	0.02	1.65	0.25	0.013	0.013	0.006	7.25
3	0.02	2.21	0.30	0.016	0.008	0.004	5.90
4	0.02	2.23	0.28	0.016	0.010	0.004	7.19
5	0.04	1.21	0.33	0.016	0.013	0.007	8.39
6	0.04	1.66	0.32	0.015	0.015	0.005	7.23
7	0.04	1.95	0.26	0.014	0.014	0.007	7.89
8	0.04	2.28	0.30	0.014	0.015	0.006	7.71
9	0.04	1.23	0.31	0.018	0.017	0.008	9.38
10	0.04	1.60	0.27	0.015	0.016	0.006	7.20
11	0.04	2.00	0.26	0.015	0.012	0.006	5.46
12	0.04	2.30	0.30	0.016	0.015	0.007	6.51
13	0.07	1.52	0.31	0.017	0.016	0.007	9.75
14	0.04	1.94	0.29	0.017	0.013	0.007	7.66

带材经350四辊轧机冷轧至厚度0.5 mm带材,经保护气氛退火后,在带材上取样,测定其铁损值P_{1.5/50}。试样各元素百分含量和铁损值大小见表1。

2 化学成分对铁损的影响

2.1 C含量

在本研究的成分范围内,当 $1.21\% \leq Si \leq 1.65\%$ 、 $0.25\% \leq Mn \leq 0.33\%$ 、 $0.013\% \leq P \leq 0.018\%$ 、 $0.013\% \leq S \leq 0.017\%$ 、Al 含量在 0.006% 左右时,低牌号无取向电工钢中碳含量变化对铁损的影响如图 1 所示。

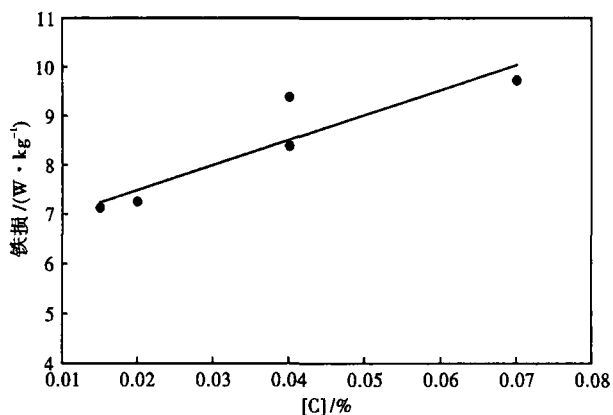


图 1 钢中碳含量对低牌号冷轧无取向电工钢铁损的影响
Fig. 1 Effect of carbon content in steel on core loss of low grade cold rolled non-oriented electrical steel

由图 1 可知,随碳含量的增加,无取向电工钢的铁损增大。在其余成分含量大体相当的情况下,碳含量为 0.015% 的 1 号试样铁损为 7.13 W/kg ;碳含量为 0.04% 的 9 号试样铁损达到 9.38 W/kg ,碳含量低的 1 号试样比碳含量高的 9 号试样的铁损要小 2.25 W/kg 。

碳对铁-硅相图有显著影响,碳能扩大 γ 相区,碳含量高会使无取向电工钢的相变温度降低,不利于产品的晶粒充分长大,最终导致产品铁损升高。所以,为实现高质量的无取向电工钢应保证钢中较低的碳含量,但是考虑到实际生产中保证很低的碳含量,会使转炉出钢钢液过氧化,金属收得率降低,同时也会对脱氧不利,因此应保证 $0.02\% \leq C \leq 0.04\%$ 。

2.2 Si 含量

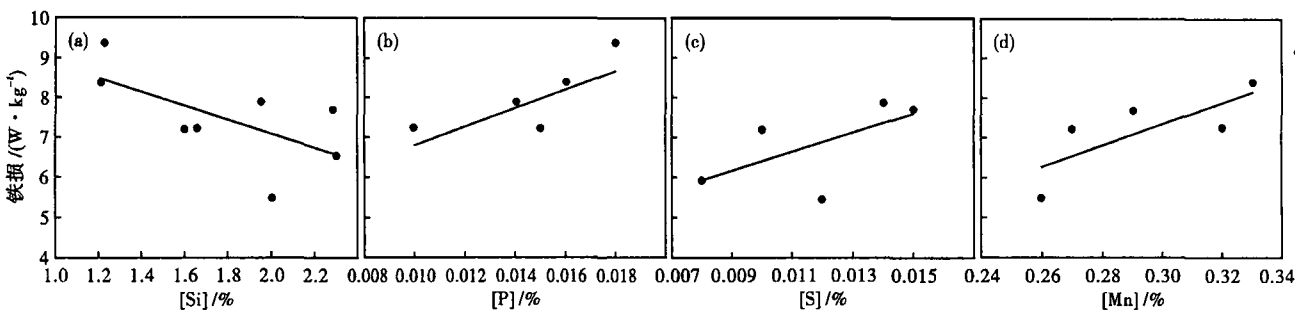


图 2 钢中硅(a)、磷(b)、硫(c)、锰(d)含量对低牌号冷轧无取向电工钢铁损的影响
Fig. 2 Effect of silicon (a), phosphorus (b), sulphur (c) and manganese (d) content in steel on core loss of low grade cold rolled non-oriented electrical steel

当 C 含量为 0.04% 、 $0.26\% \leq Mn \leq 0.33\%$ 、 $0.014\% \leq P \leq 0.018\%$ 、 $0.012\% \leq S \leq 0.017\%$ 、 $0.005\% \leq Al \leq 0.008\%$ 时,硅含量的变化对低牌号无取向电工钢铁损的影响如图 2(a) 所示。

由图 2(a) 得出,在无取向电工钢中随硅含量的增加,铁损降低。要得到晶粒粗大、均匀的冷轧无取向电工钢产品,硅含量应适量增加,但如果硅含量过高,会对后续的轧制过程产生不利影响。

研究发现硅含量为 1.23% 的 9 号试样铁损为 9.38 W/kg ;硅含量为 2.30% 的 12 号试样铁损为 6.51 W/kg ,9 号试样比 12 号试样的铁损值高出 2.87 W/kg ;而且 9 号试样的晶粒细小,12 号试样的晶粒较粗大。

硅是无取向电工钢中最主要的合金元素,对无取向电工钢的组织 and 电磁性能具有决定性影响。硅是缩小 γ 相区元素,硅含量的增加可以提高 α 相向 γ 相转变的相变温度,有利于产品晶粒粗大化,有利于减少晶界面,从而降低产品的铁损,提高产品质量和牌号。

2.3 P 含量

当 $0.02\% \leq C \leq 0.04\%$ 、 $1.21\% \leq Si \leq 2.28\%$ 、 $0.25\% \leq Mn \leq 0.33\%$ 、 $0.013\% \leq S \leq 0.017\%$ 、 $0.005\% \leq Al \leq 0.008\%$ 时,磷含量的变化与铁损的关系如图 2(b) 所示。由图 2(b) 可知,磷含量增加,冷轧无取向电工钢铁损值有所升高,要得到低铁损冷轧无取向电工钢,磷含量应严格控制。当磷含量为 0.010% 时,铁损为 7.25 W/kg ;当磷含量为 0.018% 时,铁损最高达到了 9.38 W/kg 。

在冷轧无取向电工钢中,磷对晶粒大小的影响具有双重性。一方面,磷能缩小 γ 相区,促使晶粒长大,对电磁性能有利;另一方面,磷会沿晶界偏聚阻碍晶界移动和晶粒长大,导致热轧后和冷轧再结晶后晶粒尺寸变小,最终使产品铁损升高。

在实际生产中,要通过合理的成分设计和工艺控制,尽量降低磷的不利影响,增加磷的有利作用。

2.4 S 含量

当 $0.02\% \leq C \leq 0.04\%$ 、 $1.95\% \leq Si \leq 2.28\%$ 、 $0.26\% \leq Mn \leq 0.30\%$ 、 $0.014\% \leq P \leq 0.016\%$ 、 $0.004\% \leq Al \leq 0.007\%$ 时,S 含量变化对铁损的影响如图 2(c) 所示。

由图 2(c) 可知,随钢中硫含量升高,铁损显著增加。当硫含量为 0.008% 时,铁损仅为 5.90 W/kg;硫含量为 0.014% 时,铁损则达到 7.89 W/kg;为得到高质量、低铁损的无取向电工钢产品,钢中硫必须降低。研究还发现硫含量为 0.010% 的 4 号试样的晶粒呈细长状,硫含量比 4 号试样低 20×10^{-6} 的 3 号试样的晶粒则显得粗大。

硫对晶粒长大的影响主要体现在以下两个方面:(1)硫在晶界偏聚阻碍了产品在退火过程中晶粒的长大;(2)硫与锰形成细小的 MnS 夹杂,强烈阻碍晶粒的长大。当硫含量高时,形成的 MnS 细小夹杂对产品电磁性能的提高也是极为不利的。

试验结果表明,硫含量为 0.008% 的 3 号试样的铁损值仅为 5.90 W/kg,显示出了优越的电磁性能;而硫含量为 0.010% 的 4 号试样的铁损值却达到了 7.19 W/kg,硫含量增加 20×10^{-6} ,铁损值升高了 1.29 W/kg,可见无取向电工钢中的硫含量对产品晶粒大小和电磁性能的影响是明显的,为了得到较粗大的晶粒和低的铁损值,应尽可能降低产品中的硫含量。

2.5 Mn 含量

锰含量的变化对低牌号无取向电工钢铁损的影响如图 2(d) 所示,随低牌号无取向电工钢中锰含量的升高,铁损增加。

试验中发现,C 含量为 0.04%、 $1.21\% \leq Si \leq 2.00\%$ 、 $0.005\% \leq Al \leq 0.007\%$ 、P 和 S 的波动分别在 $(20 \sim 40) \times 10^{-6}$ 范围内的情况下,锰含量为 0.26% 时,铁损为 5.46 W/kg;当锰含量达到 0.33% 时,铁损达到 8.39 W/kg。

锰是扩大 γ 相区元素,会降低硅钢的相变温度,不利于晶粒的长大和铁损的降低。

2.6 Al 含量

在无取向电工钢中,铝对磁性能起到重要作用。铝总体上能提高电阻率和促使晶粒粗化,降低铁损。当硅钢中其余元素含量大致相同时,本试验中却发现,随钢中铝含量增加,铁损值反而升高,试验结果

表 2 钢中铝含量对低牌号冷轧无取向电工钢铁损的影响
Table 2 Effect of aluminum content in steel on core loss of low grade cold rolled non-oriented electrical steel

试样号	成分/%						铁损/ (W·kg ⁻¹)
	C	Si	Mn	P	S	Al	
15	0.05	0.40	0.32	0.069	0.016	0.002	8.33
16	0.05	0.44	0.34	0.068	0.019	0.021	8.92
17	0.05	0.40	0.34	0.067	0.016	0.210	9.40

如表 2 所示。当铝含量为 0.002% 时,铁损值为 8.33 W/kg;当铝含量为 0.021% 时,铁损值为 8.92 W/kg;当铝含量达到 0.210% 时,铁损值则达到了 9.4 W/kg。出现这种结果,与冶炼过程中生成的细小 AlN 颗粒有密切关系。

据有关文献介绍,采用模拟 CSP 工艺生产的无取向电工钢存在铝的危险区问题。当 $Al < 0.005\%$ 时,铝含量越低,阻碍晶粒长大的细小铝越少,铁损会明显降低;当 $Al > 0.15\%$ 时形成粗大 AlN,成品晶粒明显长大,同样降低铁损。但是当铝含量在 0.005% ~ 0.150% 危险区范围内时,最易形成细小 AlN,阻碍晶粒长大,铁损明显增高、磁性能恶化^[2]。在本试验中铝含量的设定与此危险区有很大的关系,试验过程中随着 Al 含量的提高生成了大量的细小 AlN 颗粒,阻碍了晶粒的长大。

3 结论

(1) 要保证低牌号无取向电工钢的铁损小于 7.00 W/kg,钢中碳含量越低越好,应控制钢中 $C \leq 0.04\%$ 、 $P \leq 0.011\%$ 、 $S \leq 0.012\%$ 、 $Mn \leq 0.29\%$ 、 $Si \geq 2.0\%$ 。

(2) 冶炼无取向电工钢存在铝的危险区问题,为减少细小 AlN 的生成,低牌号无取向电工钢中铝含量应小于 0.007%。

(3) 随着晶粒尺寸的增大,无取向电工钢的铁损降低,即晶粒尺寸越大,铁损越低。

参考文献

- 王小燕,刘学华,姚静.薄板坯连铸连轧生产电工钢现状及其优势.安徽冶金科技职业学院学报,2005,15(4):4
- 孙颖,李军,赵宇,等. Al 含量对模拟 CSP 工艺无取向电工钢磁性能影响的初步分析.金属功能材料,2007,14(1):9

李晶(1967-),男,博士,教授,1999 年北京科技大学博士毕业,冶金工艺研究。

收稿日期:2007-10-25