

冷轧变形量和热处理工艺对电磁纯铁矫顽力的影响

谢振亚

(太钢不锈钢股份有限公司技术中心,太原 030003)

摘要 试验用电磁纯铁 0.5~2.5 mm 冷轧板由 3.5~4.5 mm 热连轧电磁纯铁板(%:0.005C,0.50Al)经 350 mm 四辊可逆式精轧机冷轧而成。结果表明,电磁纯铁板获得较小矫顽力的最佳退火温度为 850~900 ℃,退火升降温速度对矫顽力影响较小。当冷轧变形量由 28.6% 增加至 88.9% 时,900 ℃ 退火后纯铁板的矫顽力由 29.8 A/m 增加到 73.5 A/m,获得较小矫顽力的最佳冷轧变形量为 ≤45%。

关键词 冷轧电磁纯铁板 矫顽力 变形量 热处理

Effect of Cold-Rolling Deformation and Heat Treatment Process on Coercive Force of Magnetic Pure Iron

Xie Zhenya

(Technical Center, Stainless Steel Co Ltd, Taisteel, Taiyuan 030003)

Abstract The 0.5~2.5 mm cold rolled sheet of test magnetic pure iron is rolled by 350 mm four high reversing finishing mill from 3.5~4.5 mm hot continuous rolled plate of magnetic pure iron (%:0.005C,0.50Al). Results show that the optimum annealing temperature for the magnetic pure iron sheet to get smaller coercive force is 850~900 ℃, the heating and cooling speed of annealing has no obvious influence on the coercive force; with increasing cold-rolling deformation from 28.6% to 88.9%, the coercive force of pure iron sheet annealed at 900 ℃ increases from 29.8 A/m to 73.5 A/m, therefore the optimum cold rolling deformation to get smaller coercive force is ≤45%.

Material Index Cold Rolled Magnetic Pure Iron Sheet, Coercive Force, Deformation, Heat Treatment

电磁纯铁是一种碳含量很低的铁基软磁合金。由于其具有饱和磁感应强度(Bs)高、矫顽力(Hc)低、磁导率(μ)高、冷、热加工性能好、价格便宜等优点,在电器、电讯、电子、航空等工业领域中得到广泛应用。但由于它的电阻率低,易老化等特点,使它不能用作交变磁场下的电工材料,一般被用作恒稳磁场下的导磁材料。在制造永磁体时,需要选择矫顽力大的材料。制造铁芯、轭铁等则需要电磁纯铁这样矫顽力小的材料,以使电流切断后尽快失去磁性。

太钢生产的电磁纯铁产品也被大量用于制造衔铁、轭铁、铁芯、磁屏蔽等。电磁纯铁的热轧厚板和冷轧薄板最常用的为 DT4A、DT4E、DT4C 三种牌号。由于冷轧变形量及热处理工艺对磁性能影响很大,在生产实践中常常出现同一炉批次的坯料,由于其变形量和热处理工艺的差异,导致矫顽力差别很大。因为同一规格的 DT4A、E、C 级三级产品,价格相差很多,因此针对不同的坯料及成品厚度,在生产中选择合理的冷轧变形制度及磁性退火工艺来有效改善电磁纯铁的磁性能,获得较高的饱和磁化强度和低的矫顽力,可以最大限度地提高企业的经济效益。

实验所用坯料为热连轧电磁纯铁板,其生产工

艺流程为:铁水预处理-转炉冶炼-RH 真空处理-连铸-热连轧轧制。电磁纯铁的化学成分见表 1。

表 1 电磁纯铁的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of magnetic pure iron /%

C	Si	Mn	P	S	Al
0.005	0.075	0.16	0.006	0.005	0.50

1 冷轧变形量对矫顽力的影响

冷轧变形量不同直接影响冷轧后再结晶磁性退火的晶粒大小,也就是影响晶粒度的织构,从而影响产品的矫顽力。找出变形量与电磁纯铁板矫顽力之间的规律,目的是为在生产过程中找到最佳的生产工艺。

实验坯料采用 3.5、4.0、4.5 mm 三种不同厚度的热连轧电磁纯铁板,经过分卷、酸洗后,在 350 mm 四辊可逆式精轧机上冷轧,轧成厚度分别为 2.5、1.5、1.0、0.5 mm 四种不同厚度的试样,对不同厚度的试样按国标 GB/T6985-1986 磁性退火工艺进行退火。国标 GB/T6985-1986 磁性退火工艺为^[1]: 800 ℃ 以下自然升温,800 ℃ 以上采用 ≤50 ℃/h 的升温速度,加热到(900 ±10) ℃ 保温 4h,保温后,

700 ℃以上采用 ≤ 50 ℃/h的降温速度,700 ℃以下吊外罩随炉降温,150 ℃以下出炉。退火处理是在纯氢气氛的罩式炉内进行。在退火后的冷轧电磁纯铁板上取横向试样,试样规格为200 mm \times 20 mm,然后进行矫顽力检测。

在不考虑化学成分及退火温度等其它因素影响的条件下,统计分析不同成品厚度对应的矫顽力。从表2可

以看出,随着冷轧变形量的增加,冷轧电磁纯铁板的矫顽力升高;当冷轧变形量由28.6%增加到88.9%时,矫顽力由29.8 A/m增加到73.5 A/m,这说明冷轧变形量对电磁纯铁板的矫顽力影响较大,相对较小的冷轧变形量有利于改善磁性能,获得较低的矫顽力。

在冷轧过程中,电磁纯铁板的塑性变形主要分两个阶段完成:

(1)应变连续变形阶段,这一阶段冷轧变形量小受晶界影响所发生的复杂滑移区域也小;

(2)在高变形阶段,应变出现了不连续,随形变量的增加,复杂滑移区增加,晶体发生转动,此时位错出现了交滑移及多滑移^[2],这对电磁纯铁板退火后的矫顽力有较大的影响。

随变形量的不同,形成不同的冷轧形变微观组织,从而影响再结晶形核与长大机理。从表2可以看出,冷轧变形量在小于45%时,通过应变诱发晶界迁移,促进退火晶粒反常长大而获得较低的矫顽力,可达到C级。40%~60%中等以上冷轧变形量时,随变形量增大胞状组织发展更加完善,当它们的位向差明显时最易形成形变带,而形变带是连续再结晶核的主要发源地^[3],形核数量明显增加,晶粒变小,矫顽力增加到E级。当冷轧变形量大于60%时,退火时再结晶形核率、晶粒长大速率都急剧增加,即形核率大于晶粒长大速率,故再结晶晶粒变细,矫顽力急剧升高,磁性能变坏。

因此,在生产过程中要充分考虑冷轧变形对电磁纯铁板矫顽力的影响,同时还要兼顾到生产成本及生产效率等其他因素的影响。在生产成品为1.5 mm厚度以上的纯铁板时,将冷轧变形量控制在60%以下,既可以降低冷轧生产成本,也可以获得较低的矫顽力值。但如果在生产成品厚度为1.0 mm以下的规格产品时,就不能只单纯考虑变形量,应考虑到会增加坯料酸洗量及生产成本,因此可采用中间退火等方式来降低矫顽力。

表2 冷轧变形量对电磁纯铁板矫顽力的影响

Table 2 Effect of cold rolling deformation on coercive force of magnetic pure iron sheet

坯料厚度/mm	冷轧板规格/mm							
	2.5		1.5		1.0		0.5	
	变形量/%	矫顽力/(A·m ⁻¹)	变形量/%	矫顽力/(A·m ⁻¹)	变形量/%	矫顽力/(A·m ⁻¹)	变形量/%	矫顽力/(A·m ⁻¹)
3.5	28.6	29.8	57.1	41.0	71.4	50.2	85.7	68.6
4.0	37.5	31.6	62.5	43.5	75.0	52.3	87.5	70.1
4.5	44.4	36.4	66.7	46.8	77.8	54.6	88.9	73.5

2 磁性热处理对矫顽力的影响

2.1 退火温度

电磁纯铁磁性退火的目的是为了通过磁性退火消除变形内应力,使基体完成再结晶过程,并使晶粒充分长大以获得高的电磁性能。高电磁性能的金相组织是等轴的、大的晶粒且均匀的铁素体组织^[4]。晶粒小或大小不均匀,均会对矫顽力产生较大的影响,而晶粒度的大小与均匀度受到保温温度和升温及降温速度的影响。因此热处理工艺对降低电磁纯铁矫顽力也至关重要。

为了说明退火温度对矫顽力的影响,取变形量为37.5%的2.5 mm冷轧电磁纯铁试样。分别按750、800、850、900、950、1 000 ℃六种退火温度进行退火。退火处理在纯氢气氛的罩式炉内进行。然后取样测量其矫顽力,如表3所示。

表3 退火温度对电磁纯铁板矫顽力的影响,冷轧变形量37.5%

Table 3 Effect of annealing temperature on coercive force of magnetic pure iron sheet, cold rolling deformation 37.5%

退火温度/℃	矫顽力/(A·m ⁻¹)
750 \pm 10	73.8
800 \pm 10	57.9
850 \pm 10	36.8
900 \pm 20	32.6
950 \pm 10	31.3
1 000 \pm 10	29.5

从表3来看,磁性热处理温度对矫顽力的影响较大,最高温度与最低温度的矫顽力相差47.3 A/m,总体变化趋势是:随着磁性热处理温度的升高,试样的矫顽力越来越低。变化最大的温度段是750~850 ℃。这是由于加热温度过低时,晶粒长大受到影响。当热处理温度达到900 ℃以上时,虽然随着温度的升高,矫顽力还会越来越小,但变化趋于平缓。这是因为随着磁性退火温度的升高,保温4 h后晶粒充分长大并逐渐稳定,因而矫顽力变化

也就不大。当热处理温度 ≥ 950 °C时,虽然矫顽力较小,但钢板发生粘结。因此,最能充分发挥材料潜在磁性能的退火温度为 850~900 °C。

2.2 升温/降温速度

为了说明升温/降温速度对电磁纯铁冷轧板矫顽力的影响,同样取变形量为 37.5% 的 2.5 mm 冷轧电磁纯铁试样。分别对 850、900、950、1 000 °C 四个保温温度进行了不同升温、降温速度的对比。3 种工艺如下:

(1)按国家标准 GB/T6985-1986 磁性退火工艺中的升温速度及降温速度进行退火;

(2)升温速度不控制,保温、降温按国标进行;

(3)升温、保温按国标进行,降温速度不控制。

然后取样测量其矫顽力。3 种工艺的矫顽力如表 4 所示。

表 4 升、降温速度对电磁纯铁板矫顽力的影响,冷轧变形量 37.5%

Table 4 Effect of heating and cooling speed of annealing on coercive force of magnetic pure iron sheet, cold rolling deformation 37.5%

工艺	矫顽力/(A·m ⁻¹)			
	(850±10)°C	(900±20)°C	(950±10)°C	(1 000±10)°C
1	36.8	33.6	31.3	29.8
2	40.9	35.9	33.7	32.6
3	38.6	34.7	32.5	32.4

2.2.1 升温速度

控制升温速度的目的—是为了脱碳、二是为了获得大小均匀的晶粒。由于目前冶炼工艺碳含量已很低,一般为 0.002%~0.009%,所以就目前的冶炼情况,单从脱碳角度来看,可以不控制升温速度。但由于在 800 °C 以上加热速度过快时,晶粒来不及并吞,往往会形成晶粒大小不一,从而对矫顽力产生一定的影响^[4]。从表 4 可以看出,不控制升温速度的工艺 2 与正常磁性热处理工艺 1 相比,不控制升温速度对矫顽力的影响差别最大为 4.1 A/m,最小为 2.3 A/m,因此,控制升温速度对电磁纯铁冷轧板矫顽力影响不显著。

2.2.2 降温速度

降温速度控制在 ≤ 50 °C/h,是为了防止因冷却速度太快而产生的热应力影响矫顽力。但大生产过程中,在 700 °C 以下冷却时,由于装炉量等因素的影响,冷却速度缓慢,热应力可完全被消除^[5],对矫顽力的影响差别最大为 2.6 A/m,最小为 1.1 A/m,故

对矫顽力影响很小。

总之,通过 850、900、950、1 000 °C 四个不同温度下的升温、降温速度的对比实验可知,升温速度和降温速度对电磁纯铁冷轧板的矫顽力影响不显著。

3 结论

(1)冷轧变形量不同直接影响冷轧后再结晶磁性退火的晶粒大小,从而影响电磁纯铁产品的矫顽力。冷轧变形量 $\leq 45\%$ 时,通过应变诱发晶界迁移,促进退火晶粒反常长大而获得较好的磁性能。在选择坯料方面,要充分考虑到变形量,根据不同的成品厚度选择不同的坯料,防止因变形量过小造成晶粒不均匀或因变形量太大造成晶粒过小,矫顽力增大的现象发生。

(2)当热处理温度达到 900 °C 以上时,随着温度的升高,矫顽力会越来越小,但变化趋于平缓。当热处理温度大于 950 °C 时,钢板发生粘结。因此,能够充分发挥材料潜在磁性能的退火温度在 850~900 °C。

(3)在 800 °C 以上加热速度过快时,由于晶粒来不及并吞,会形成晶粒大小不一,对矫顽力产生一定的影响,但影响不显著。

(4)冷却速度对电磁纯铁冷轧板的矫顽力影响很小。

(5)电磁纯铁具有很强的组织敏感性,对材料中的晶体结构及缺陷、杂质等非常敏感,这又取决于材料的成分、加工方法和热处理制度等因素,因此,只有在各方面规范操作、严格控制,才能使其电磁性能达到最佳。

参考文献

- 1 孙大勇,雷廷权,章守华,等.热处理手册(第 2 版)第 1 卷.北京:机械工业出版社,1997
- 2 贺光.降低电磁纯铁矫顽力的工艺研究.太钢科技,1996,81(1):29
- 3 何忠治.电工钢.北京:冶金工业出版社,1997
- 4 郭四成,张凤翔.电磁纯铁金相组织对 Hc 的影响.长岭技术,2007,31(1):32
- 5 任卫斌.国家标准和航标中关于电磁纯铁退火工艺的探讨.金属热处理,2007,32(4):81

谢振亚(1970-),女,工程师,1992 年包头钢铁学院毕业,热轧电磁纯铁型材及冷轧电磁纯铁板的技术工作。

收稿日期:2010-04-16