

电工钢连续退火机组的特点及其比较

梁师帅

(武汉钢铁设计研究院)

摘 要 介绍了国内外几条电工钢连续退火机组,并进行了比较,针对国内电工钢连续退火机组现状提出了一些建议。

关键词 电工钢 连续退火 设备比较

FEATURES AND COMPARISON OF CONTINUOUS ANNEALING LINES FOR SILICON STEEL STRIP

Liang Shishuai

(Wuhan Iron & Steel Design and Research Institute)

Synopsis The present article introduces the main features of continuous annealing lines for silicon steel strip at home and abroad and makes a comparison between each and another line. It also puts forward some helpful advice in light of the present state of the continuous annealing lines for the silicon steel strip at home

Keywords silicon steel strip continuous annealing equipment comparison

1 电工钢的热处理特点

连续退火机组用于电工钢热处理,其目的是通过再结晶退火消除冷轧应力,并促使晶粒长大,将钢中的碳脱到 0.005 % 以下(最好为 0.003 % 以下),以保证磁性、硬度、磁时效符合要求。为了尽快实现再结晶和晶粒长大,要求带钢快速升到规定的退火温度,使晶粒粗化,改善织构和磁性。电工钢退火工艺的加热和冷却技术是影响带钢性能的关键因素。要获得最佳性能的无取向硅钢,还要根据不同的牌号制定出最佳的热处理工艺。

1.1 化学成分控制

硅、锰、铝是按照规定控制在一定范围内的元素,而碳、硫、氮、氧是有害元素。生产的牌号不同,对这些元素的要求各不相同。无取向硅钢中夹杂物和杂质元素要尽量减少,这对提高磁性有重要的影响。如: MnS 、 AlN 、 TiN 、 TiC 、 ZnN 等的析出物在退火时明显阻碍晶粒长大。

1.2 脱碳退火要求

炉内气氛:既要有利于钢带最大程度地脱碳,又要防止表面氧化。因此炉内气氛为加湿的氢—氮混合气。增加水蒸气含量有利于脱碳,但增加了钢带氧化的危险;气体含一定比例的氢气是为了减轻带钢的氧化,保证带钢表面光亮。通常采用气体露点 $50 \sim 70$, $P_{\text{H}_2\text{O}}/P_{\text{H}_2}$ 在 $0.20 \sim 0.28$ 范围内。炉内压力控制很重要,操作压力一般控制在 $49 \sim 98.1$ Pa,决不允许产生负压,避免钢带氧化,更是为了防止氢爆炸。因此炉子的密封也极为重要。

退火温度:一般说来提高炉温会加速脱碳过程进行,但是炉温升到一定温度时,碳在 γ -Fe 中的固溶度逐渐下降,带钢中可以自由扩散的碳原子数减少,此时再升高炉温,会加剧带钢氧化。对于低碳低硅电工钢其退火温度必须在相变点以下,因为相变可以产生大小混合晶粒,破坏有利的织构组分,并减慢脱碳速度,使带钢磁性变坏。在

联系人:梁师帅,高级工程师,武汉市(430080)武汉钢铁设计研究院工业炉室

- 相区内退火温度增高、退火时间延长,都会使晶粒尺寸增大,铁损降低,磁感应强度和硬度也降低。另外由于带钢的硬度随着温度的升高而降低,冲片性变坏。退火温度在 600 ~ 850 之间时,温度越高,再结晶晶粒越大。所以为了提高产量,得到优良的带钢磁性,应选用高温短时间退火,退火温度一般为 800 ~ 850 。退火时的升温速度快对晶粒长大和磁性有利。

在炉时间:根据硅钢的初始含碳量和要求的铁损值共同决定的。在炉时间越长,其脱碳效果越好,但是在炉时间不能太长,不但影响产量,而且造成电工钢的磁性降低。

1.3 炉内张力控制

炉内张力控制是保证良好板形、磁性和降低铁损的关键措施。在保证良好的带钢板形的前提下,应尽量降低炉内张力。因为张力过大,铁损值明显增大,也易发生断带。

1.4 冷却对带钢性能的影响

冷却开始温度越低,铁损值越小见图 1、图 2,冷却的开始温度在 850 时,铁损值最小。冷却速度过快,不仅产生较大的内应力,而且铁损值增高。如果以小于 200 /min 速度冷却,铁损值明显降低,但冷却速度慢会大大加长连续退火炉的长度。合理的冷却速度对带钢生产有重要意义。

2 电工钢连退机组的特点比较

2.1 新日铁电工钢连续退火机组特点

新日铁公司生产电工钢产品的厂家有八幡厂和广田,其指标见表 1。无取向电工钢生产采用的工序 H18 以下中低牌号电工钢采用酸洗 冷

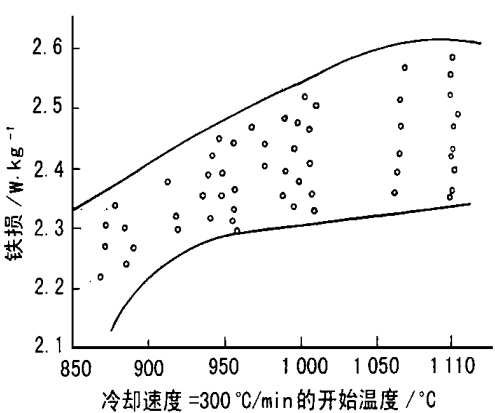


图 1 冷却速度为 300 /min 的开始温度与铁损的关系

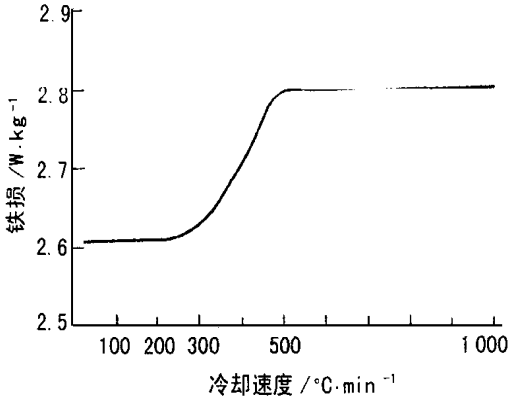


图 2 冷却速度对铁损的影响

轧 退火及涂绝缘层工艺,H18 以上无取向电工钢在冷轧酸洗之前需进行常化处理。八幡厂 1 号 ACL 机组建于 1972 年,当时设计机组工艺段速度 150 m/min,1986 年机组改造后工艺段速度提高到 235 m/min,板宽 700 ~ 1 300 mm、板厚 0.15 ~ 1.0 mm。它是目前世界电工钢连续退火涂层机组工艺处理速度最高的机组。其退火工艺采用一次加热、均热工艺,不考虑电工钢的脱碳退火。

表 1 八幡、广田厂退火机组特点

厂名	机组	工艺速度 /m min ⁻¹	产量 /t min ⁻¹	处理品种	备注
八幡	1 号 ACL	235	35 700	全部无取向,取向中间退火。(不脱碳)	取向中间退火速度为 150 m/min
	2 号 ACL	150	14 000	H18 ~ 60,取向中间退火,脱碳退火	取向中间退火及脱碳退火速度 100 m/min
广田	BA1	60	5 000	取向中间退火,脱碳退火	
	BA2	100	8 000	取向及无取向均可	
	BA3	160	25 000	无取向电工钢	

以八幡厂 1 号 ACL 机组为例,其主要特征如下。

(1) 机组工艺段处理速度高

由于无取向电工钢生产的前工序炼钢精炼能力的提高,电工钢钢质含碳量在炼钢时就已控制在 50 ×10⁻⁶ 及 30 ×10⁻⁶ 以下,中低牌号电工钢的

后部工序趋于简单化,无须再进行脱碳,只要冷轧后退火恢复晶粒并长大,因此退火机组的工艺速度可大大提高。

(2) 采用了水冷技术

随着工艺速度的提高,炉子段的冷却能力将成为突出矛盾,由于气体喷射冷却能力较小,机组速度的提高,意味着炉子段冷却带的长度大大加长,为此日方开发了水冷技术,在无取向电工钢带在气体喷射冷却段冷却到 400 后直接进入水槽冷却,并使带钢快速冷却至 100 以下。

(3) 采用 2 辊式辊涂机

限制机组速度提高的另一个原因是涂层机的辊涂速度,当涂层速度达到 150 m/min 以上时,带钢的涂层质量往往无法保证,新日铁采用的 2 辊式辊涂机并结合其涂层液在 235 m/min 高速情况下仍能保证良好的涂层质量。

(4) 机组实行高度自动化,以减少劳动定员。

(5) 重视质量检测及检查:机组在线设置带钢厚度,涂层表面缺陷检测等装置的同时,专门设置

一人安排其进行带钢表面质量检测,机组也设置小活套供表面检查。

2.2 川崎电工钢连续退火机组特点

川崎水岛两条电工钢连续退火机组的主要参数见表 2。

表 2 川崎水岛两条中 2 钢连续退火机组的主要参数

厂名	机组	工艺速度	产量	处理品种	是否设
		/m·min ⁻¹	/t·m ⁻¹		飘浮器
水岛	1AL	88	13 000	S18~S23	/
	2AL	152	24 000	S6,10,12,14,S30~S60	14 只

川崎电工钢连续退火机组有以下主要特点:

(1) 中低牌号(S18 以下)在酸洗线前不用常化处理。冷轧后送车间进行退火及涂层,再送精整车间进行剪切、包装。

(2) 化学成分控制严格,它直接与产品质量、生产工艺相关。在冶炼过程中除碳的成分要严格控制外需要对其他成分进行控制,见表 3。

表 3 川崎电工钢化学成分

牌号	w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(P)	w(S)	w(Al)	w(O)	w(N)	w(Ti)	实物质量	
	/×10 ⁻⁶	/%	/%	/%	/×10 ⁻⁶	/%	/×10 ⁻⁶	/×10 ⁻⁶	/×10 ⁻⁶	w/kg	B50(T)
A470	30~50	1.45	0.2	0.04	50	0.25	30	40	30	4.1 (4.7)	1.7 (1.64)
540	30~40	1.25	0.2	0.04	60	0.25	30	40	30	4.3 (5.4)	1.7 (1.64)
600	30~50	1.00	0.2	0.04	50	0.25	30	40	30	4.8 (6.0)	1.71
700	30~50	0.65	0.2	0.04	50	0.25	30	40	30	5.2 (7.0)	1.74
800	30~50	0.65	0.2	0.08	70	0.25	50	50	30	5.7 (8.0)	1.74
1000	30~50	0.35	0.2	0.08	50	0.002	100	100	30	6.0 (10)	1.75
1300	30~50	0.12	0.25	0.08	50	0.003	100	50	30	7.5 (13)	1.76
1500	30~50	0.12	0.25	0.08	50	0.002	100	50	30	10.0 (15)	1.76 (1.70)

注:铁损(w/kg)括号内数为 JIS 标准值,由此对比可知川崎的实物质量比 JIS 标准高很多。

(3) 退火工艺特点:由于化学成分控制严格,一般生产 S6,10,12,14 及 S30~60 都不进行脱碳,直接在炼钢控制化学成分即可,而对于 S18~23 这几个牌号在含 Si 量不太高、含 C 量不够低(30~50)×10⁻⁶的特殊情况下,为防止时效而采用脱碳退火处理,这就是对 1 号 AL 的特点要求。为此,1 号 AL 退火曲线及炉内温度、湿度控制特点见图 3。

钢中的 C+H₂O=CO+H₂ 在脱碳过程中炉温稍低(850)有利于氧化膜生成的抑制作用,而在干的退火阶段氧化不会太严重可提高炉温。

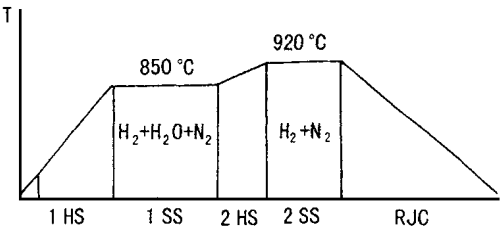


图 3 1 号 AL 退火曲线及炉内温度、湿度控制

(4) 漂浮器的使用

川崎 1 号 AL 有脱碳的要求,炉子在湿的气氛工作带钢沉积的 Fe₃O₄、Fe₂O₃、FeO、FeSiO₂、SiO₂、

Al_2O_3 等氧化物易在湿气氛中被还原,然后在炉辊上结瘤使带钢表面产生压痕及白点,为防止这类问题的产生川崎采用了漂浮器这一新技术。其原理是用气垫使带钢不与炉辊接触而上浮防止表面压痕。

在漂浮器使用的区段里炉内技术参数如下。

炉内气氛: $\text{N}_2 + \text{H}_2$ 其中 N_2 75 % ,炉温 850 ,风量 $620 \text{ m}^3/\text{min}$,炉压 110 mmHg (1 mmHg = 133.322 Pa)。

(5) 表面涂层的特点

对表面涂层要求应具有良好的使用性能,包括良好的绝缘性、高占积率、高耐湿性、冲片、焊接、耐热等。半有机涂层(无机膜 + 树脂)与无机涂层在占积率方面都比较好。而在溶接性能及耐热性能方面无机涂层更好一些。

涂层前必须进行清洗和冷却。

来自退火炉的带钢 进入浸液槽进行一次冷却,准备清洗 表面刷洗 喷淋冷却 进入纯水槽去除 Cl^- 离子采用喷淋 除湿冷风低湿干燥(目标温度 25 进入涂层室涂层。

(6) 在线检查项目:在线检查项目见表 4。

表 4 在线检查项目

检查项目	目 的
连续铁损测定装置	保证全长相对值稳定
射线板厚测量	保证全长厚度正确
板宽测量	保证全长板宽均匀
孔穴检测器	全卷质量保证
膜厚测定	保证全长膜厚均匀

(7) 成品检验项目:铁损、磁通密度;层间抵抗测定、占积率测定、时效促进测量、板宽方面的厚度测量、硬度计测量。

2.3 宝钢 1550 电工钢连续退火机组特点

宝钢 1550 冷轧从川崎引进两条 SACL 机组,其主要特点有。

(1) 带钢加热的炉段全部采用 W 型辐射管间接加热,烧嘴为抽鼓式,助燃空气经过换热器预热至 400 。

(2) 2 号 SACL 第一、第二加热段为湿气氛,对带钢进行脱碳退火;第三加热段、均热段等各段为干气氛,带钢再结晶退火。其中第二加热段(脱碳段)不用炉辊而用飘浮器传送带钢,避免炉辊结

瘤,并且可以提高带钢表面质量,避免换辊的停产损失。

(3) 涂层干燥炉的干燥段由热风干燥带钢。烧嘴安装在侧墙上,风箱安装在带钢的上下方。循环风机将热风送入风箱,热风从风箱内喷向带钢,从而起到干燥带钢的作用。为了避免划伤带钢,在风箱和带钢之间有足够的距离。干燥段出口处安装飘浮器,可以稳定地传送带钢,并避免在传送带钢时产生任何表面缺陷。

干燥炉烧结段和冷却段带钢由飘浮器传送,当带钢温度低于 200 时,由炉辊代替飘浮器传送带钢。

(4) 采用了轻型炉衬结构,其优点表现如下:其热阻较砌砖结构大(导热系数小),降低了能耗;

热惯性小,使炉子升稳或降温时间缩短,从而提高了热响应能力,便于生产;由于砌砖结构长期使用会因强度下降而掉渣,另外带钢跑偏刮渣,易使带钢产生小亮点等表面缺陷。所以采用轻型炉衬结构会提高表面质量,改善操作环境。

2.4 武钢电工钢连续退火机组特点

武钢硅钢片厂引进的是日本新日铁技术,经过消化吸收,现在能完全实现国产化。其主要特点如下。

(1) 拥有我国第一条完全国产化的硅钢带连续退火机组 CA - 5,它于 1998 年 7 月正式投产,机组工艺段速度 150 m/min,速度高、产量大。

(2) 设置预热炉、无氧化炉、辐射管加热炉。CA - 5 设计采用 NOF 明火加热方案。其优点是加热快、炉子短,节约能源投资,占厂房面积小,有利于设置布置及车间物流畅通。缺点是存在一定的风险,设计或操作若有失误,就可能导致带钢被氧化。

宝钢 SACL - 1,机组工艺段速度 150 m/min,与 CA - 5 机组相同,其带钢加热全部采用 W 型辐射管加热,炉长为 126.45 m,而 CA - 5 的 PH、NOF 和 RTF 总长为 81.26 m,比宝钢同机组短 45.19 m。

PH、NOF、RTF 三个炉段用三种不同的炉内气氛和炉温,将带钢加热到不同的温度。

如何将 NOF 明火加热带钢的风险降到最低限度,甚至变险为安,尤其在 NOF 排烟系统增设了空气换热器后,显得特别重要。CA - 5 消化吸

收了 CA - 4 的引进技术,已获成功。这些技术主要在控制系统上,控制上的中心思想是在任何情况下都不允许空气渗入炉膛,不允许 NOF 炉气倒流进入 RTF、SF,不允许保护气体中的 H_2 在低温状态下进入排烟管和换热器,同时还对换热器及排烟机等设备设置防超温措施。

(3) 水淬冷却装置(LC)

带钢温度经过 RJC 冷却到 400℃ 时,需继续冷却和涂层。CA - 5 连续退火炉的冷却段如果不用 LC,全部采用 RJC,将带钢冷却到 220℃ 以下(与 CA - 4 相同),那么还需增加 13 台 RJC,而车间已没有地方加长机组,即使有地方,机组过长,纠偏难度也更大。采用 LC,只占 4 m 的机组长度,耗电量仅为 13 台 RJC 的 1/6。达到了节能和省投资的目的。

(4) TAL 技术(即串列式退火技术),TAL 技术用于无取向硅钢促使成品晶粒长大,提高最终电磁性能;也可用于取向硅钢,使二次再结晶更稳定。对无取向硅钢来说,前段采用低温湿氢脱碳,后段为高温干氢用于成品晶粒长大,促使磁性得到显著提高。武钢硅钢片厂 CA - 4、CA - 6 机组上带有 TAL 设施。

3 国内自行设计电工钢连退机组应注意的问题

从武钢与宝钢两家电工钢连退机组的比较可看出:宝钢生产的中低牌号电工钢,其质量占有一定优势,但由于是引进的国外技术和设备,所以投资较大;而武钢则实现了完全国产化,不但技术先进可行,而且投资大大减少。因此国内现有不少厂家都有新建电工钢连退机组的想法。我们设计单位也必须紧跟国内外的先进技术并积极地进行消化吸收,确保技术的先进可靠。针对武钢 CA - 5 存在的一些不足:能耗偏高,带钢高速运行时涂层质量不佳、链传动存在故障等,在此列出几条建议以供参考。

(1) 电工钢的生产需要从炼钢到成品一系列工序的配合,工序极其复杂,化学成分控制严格,因此各厂家需考虑自身的实际情况,不能盲目投资建设。

(2) 提高电工钢前工序炼钢精炼能力,降低电工钢原料含碳量,使中低牌号无取向硅钢生产时不用脱碳,从而减少退火炉均热段长度。这样,加热段可全部采用辐射管进行间接加热,以提高带钢表面质量,同时减少 PH/NOF 控制和操作的难度。

由于电工钢一般只能在卧式炉生产,因而受机组速度的限制。但是当含碳量降低到 0.004% ~ 0.005% 时,中低牌号的电工钢 W30 ~ W60 在以生产镀锡板或冷轧板为主的立式炉中兼能生产,例如川崎的干叶 2 号线能生产镀锡板、电工钢、冷轧板等,轧组速度和产量都能大大增加。

(3) 连续退火炉各炉段设备的最优化设计,特别应关注以下几点:

积极开发研制飘浮器,改善带钢表面质量;

进一步完善国产循环喷吹冷却器(RJC)软硬件设计,RJC 是连续退火技术的核心,应积极开发快速循环喷吹冷却器,以缩短炉子长度,减少投资;

进一步完善国产水淬技术;

应用效率更高的空气喷吹冷却器(AJC),缩短炉子长度,减少投资;

应用比 U 型抽吸式辐射管烧嘴效率更高的 W 型抽鼓式辐射管烧嘴,节约能源。

(4) 采用轻型炉衬结构。一方面降低能耗,另一方面提高表面质量并改善操作环境。

(5) 生产电工钢的卧式炉速度不能太高的原因主要是受涂层机限制,因此有必要进行高速涂层机的研制,提高涂层质量。

(收稿日期:2000 - 04 - 24)