

内 部

硅钢片参考资料

(九)

1973

太原钢铁公司科技处

目 录

电工钢的钢水炉外处理	(1)
在硅钢生产工艺方面的一些改进	(8)
增加取向硅钢导磁率的热轧工艺	(15)
电工钢的热轧塑性问题	(18)
电工钢相成份对形成裂边的影响	(25)
防止硅钢板坏裂纹的冷却方法	(33)
单取向硅钢片的制造方法	(35)
单取向硅钢片的生产方法	(39)
单取向硅钢片的制造方法	(42)
低铁损单取向硅钢片的制造方法	(46)
降低高磁感单取向硅钢片铁损的方法	(49)
高磁感电磁钢板的制造方法	(53)
高磁感电磁钢板的热处理方法	(60)
高磁感薄电磁钢板的制造方法	(67)
磁性优良的硅钢片的制造方法	(72)
硅钢卷连续退火设备	(75)
具有〈001〉织构组织的磁性钢板的制造方法	(91)
磁性钢板的制造方法	(95)
取向电工钢板	(97)
取向电工钢板的制造方法	(102)
具有稳定铁损值的电工钢板的生产方法	(108)
提高无取向电工钢板磁性的退火方法	(114)
真空脱碳电机钢的性能	(117)
无时效电工钢板	(128)
电工钢板的磁场冷却	(132)
硅钢带的退火方法	(135)
硅钢退火用的涂料的改进	(139)
硅钢薄板的制造方法	(143)
硅钢“纤维状”硅酸镁涂层的处理	(147)
在硅钢片表面上形成绝缘薄膜的方法	(149)

硅钢片用的硅酸钾玻璃状涂层的制造方法.....	(154)
取向硅钢绝缘薄膜的制造方法.....	(160)
电工钢绝缘涂层用的涂料.....	(166)
电工钢板的绝缘涂层及涂敷方法.....	(170)
英国标准 (电气装置磁路用的薄板)	(175)
欧洲共同市场冷轧和热轧无取向电工钢板和钢带的质量标准.....	(200)

电工钢钢水炉外处理

多年来，人们总是把真空处理（其中包括在包中进行真空处理）作为改善电工钢质量的有效方法。由于真空处理提高了冶炼温度，降低了钢中硫和碳的含量、纯净了钢水，所以磁性得以改善。真空处理还可降低过热钢水的氢，防止注锭时钢水上涨。

近年来的实践并未证实真空处理变压器钢的优良效果，因此许多工厂停止了这方面的工作。此外，炼钢工艺的改进，可在不过热的情况下降低钢中的硫和碳，没有专门的真空脱气也可获得致密的钢锭。

同时，为进一步改善电工钢的质量，必须更充分地去掉钢中的杂质元素和非金属夹杂。正确的选择钢水炉外处理的方法就可基本上达到此目的。本文作者就选择炉外处理合适方案作了大生产试验。

工厂的电炉车间有真空装置，它是四个PBH—60叶片式传动泵（第一级）和四个PBH—30泵并联在一起的装置。在足够高的抽气速度下，该装置保证工作时的真空度为4~10毫米水银柱。真空室的容积为80米³，在真空室的铰链式的移动盖上可放置中间盛钢桶（为真空倒包用）。

1. 电工钢的真空处理

首先考察现有的真空处理方法对变压器钢质量的影响。

1 包中真空处理

为了在包中进行真空处理，钢水重量减少10~15吨，这样，包中渣面上就可余下高度为600~700毫米的自由空间。当真空室的压力降到60~80毫米水银柱时，渣子开始激烈起泡，甚至不断外溢。起泡时间持续2~3分钟，从开始真空处理经过5~6分钟后，尽管真空度增加到6~10毫米水银柱，但包中的渣面静止不动。由于此原因及塞杆不耐蚀，真空处理时间一般不超过10~12分钟。

由于钢水搅拌很弱，包中渣层较厚（达300毫米），热损失是不大的，包中钢水温度平均仅下降30°C。所以在这种情况下，钢水不需要有很大的过热。

真空处理过程中，渣液被包衬的耐火材料所稀释（渣子熔蚀了500~600公斤桶衬，主要是在渣带上），使碱度降低15~20%。

2 倒包真空处理

出钢前半小时在真空室里放入一个钢包，再在真空室顶盖上固定一个容积为0.4米³的中间包（带塞杆）。用铅板盖住水口，然后把钢包于热到800~1000°C。

真空泵提前启动，在倒包开始时真空度是20~25毫米水银柱。开始后的头2—3分钟

内，残压降到6—8毫米水银柱，并一直保持到倒包完了。倒包总的时间为12~15分钟。此时钢水冷却了75~80°C。试验熔炼的浇注温度平均比一般浇注温度低30~40°C，但在大多数情况下这并不妨碍得到高质量的扁锭。出钢温度平均提高30°C。

3 真空处理钢的质量

考查了直至冷轧板成品的全部工序中两种真空处理方法的效果。氢含量用综合真空加热和熔化法确定（中央黑色冶金科学研究所的方法），氧用真空熔化法确定，氮用化学法确定。

在包中真空处理后，钢中的氢仅降低了10~15%（每百克钢中平均从5.9厘米³降到5.1厘米³），而氮含量未发生变化，保持在 $6.8 \sim 7.0 \times 10^{-8}$ %水平上。

真空倒包处理后，氢浓度平均降低30%，而氮含量实际上没降低。

硅钢中的氧主要是以氧化物夹杂形式存在，因此研究了它们在真空处理过程中的状态。用金相方法确定非金属夹杂物（统计150个视场，放大525倍），所用的是锻样试片（I—II）和从铸造偏坯的酸蚀试样切下的样品（IV）。每一种真空处理方法（A—包中真空处

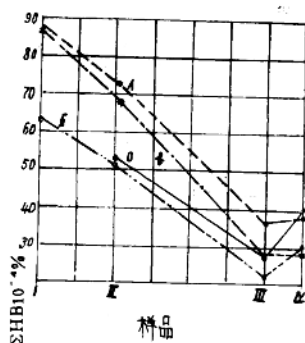


图1 钢水在包中停留时和浇注时非金属夹杂总量 ΣHB 的变化○—一般炉号；A—包中真空处理；δ—倒包真空处理；B—经真空—渣处理；I和II—真空处理前后取样，III—浇注中从注流取样；IV钢锭中取样。

理，B—真空倒包，○—进行对比用的一般炉号）除去大约同样数量的夹杂物，夹杂物的数量在浇注过程中也几乎是以同样速度持续降低（图1）。显然，在真空处理和浇注时，优先进行的是非金属夹杂物的凝聚和上浮。从钢中析出的主要是大块硅酸盐夹杂（A），而小的结晶状夹杂（KP—氧化铝、钛和铝的氮化物）几乎是不变的（I—出钢后在包中取样，II—真空处理后取样，III—浇注中取样，IV—从铸造偏坯的酸蚀试样中取样，括号内为炉数）。

真空处理前，夹杂量比较高（I、A和B），因为试验钢水的温度高。

方 案 试 样	A (5)				B (6)				O (10)		
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	IV
硅酸盐夹杂 $10^{-4}\%$	81	68	30	31	78	61	19	20	42	21	24
结晶状夹杂 $10^{-4}\%$	7	5	6	7	8	8	9	11	8	6	7
夹杂总量 $\Sigma HB10^{-4}\%$	98	73	36	38	86	69	28	31	50	27	31

经真空倒包处理的钢多半结晶为等轴晶组织。不存在柱状晶区可能与浇注温度低有关。试验的和普通的钢锭皮下气泡缺陷几乎是一样的。真空脱气仅仅抵偿了钢水在炉中由于过热而造成气体饱和度的增加。

真空处理不改变热轧和退火坯料的组织和性能。

经真空处理(A和B)与未经真空处理(O)的钢的磁性实际上没有差别。铁损和磁感值稍有差别,这可认为是偶然的或其它多种因素影响造成的。变压器钢板的牌号率(按IOCT2802—58)同样不能证明真空处理的有利影响。

钢板厚度 毫米	0.35			0.60		
	○	A	B	○	A	B
处理方法						
炉 数	131	49	15	199	90	16
批 数	556	175	53	682	301	50
牌 号 率 %						
Э300	8.0	5.5	1.7	1.2	0.3	—
Э200	77.0	80.0	70.8	89.0	93.0	90.0
Э100	12.5	11.5	18.9	8.5	5.7	10.0
废品	2.5	3.5	8.6	1.3	1.0	—

统计分析表明,包中真空处理时的残压 p 毫米水银柱与电磁性能 P_{10} 。(瓦/公斤)和 B_{25} 。(高斯)之间实际上没有相关关系。而真空倒包时,这个关系也不明显。(r—相关系数,1毫米水银柱=0.133千牛顿/米²,1高斯=10⁻⁴韦伯)

	方 程	r
A	$P_{10} = 0.72 - 0.0006p$	0.04
	$B_{25} = 18410 - 1.1p$	0.01
	$P_{10} = 0.63 - 0.008p$	0.52
	$B_{25} = 19120 - 72.8p$	0.34

因此,残压为5~10毫米水银柱时,已知的两种真空处理方法均不能改善电磁性能。这种真空处理方法使装炉量减少,电能和耐火材料消耗增加,并增加附助费用,其经济效果是不利的。再增加真空度,同样也不会有实质性的效果。

II 电工钢的真空一渣处理

电工钢化学成份的特点,是造成真空处理对它的质量没有显著影响的基本原因。由于硅含量高和碳含量低,用碳脱氧的过程不充分。在现有真空条件下脱氮也是困难的。

因此真空处理仅仅降低一些氢的含量，实际上对其钢的性能无影响，而对电磁性能有决定性影响的硫，氧和非金属夹杂并不能保证去除。

为了去除钢水中的硫和氧，在电弧炉中炼钢时，要保持高碱度的白渣。但在冶炼的还原期，熔池是平静的，并且钢水与渣子接触面不大，精炼过程进行的缓慢。

现在，借助于同时出钢和出渣的方法来加速精炼过程。开始先使渣子流入包中，然后加快摇炉，使大股的钢流冲击至渣层上，把渣液粉碎成小滴，并使之与钢水很好地混合，结果提高了精炼反应的速度。

用这种精炼方法从钢水中去除各种杂质的可能性取决于钢与渣的成分，而两相间相互作用的程度决定于渣子的物理化学性能，特别是它的粘度。

但是，生产数据表明，出钢时将钢与渣混出，并未能充分利用电炉渣的精炼能力。硫在硅钢和白渣之间的分配系数为50~70，其值大大低于平衡值。在精炼时就是利用合成渣，亦未获得很好的效果，这可能是因为渣与钢水接触不完善造成的。

作者在生产中研究和试验了在真空倒包处理时用同炉电炉渣重复处理钢的方法，即所谓的真空——渣处理。

应用渣子虹吸管，可第二次利用渣子来处理钢水（图2）。虹吸管的作用是可把渣子排到任何一个容器，特别是第二个盛钢桶中。这样最后的渣子总共被利用了两次，一次是出钢时，另一次是真空处理时。

经钢包边缘排渣用的虹吸管是由厚钢管（20~25mm）作成的焊接构件，其中包括吸收管（a）和排出管（b）。排出管开始时就从下面用铰接式盖紧密盖住。排渣之前，先将吸收管浸入渣中一定深度。然后借助空气喷射泵2，使虹吸管腔内逐渐地形成负压，此时渣子沿着吸收管上升，并流入排出管，最后充满了虹吸管。此后打开下盖，渣子自动地流入位于下面的容器里。过滤器③用于密封虹吸管的顶部，这是一个带有金属圆片可更换的盒子，金属片之间塞满钢屑。排渣时如果渣子充满气体，则过滤器就不能很好地充满渣子。为此，虹吸管腔内应保持适当的负压，使渣子上升高度仅超过弯管水平，直到排渣完毕还如此。这时，保持一定负压的过滤器将析出的气体沿软管c排出。

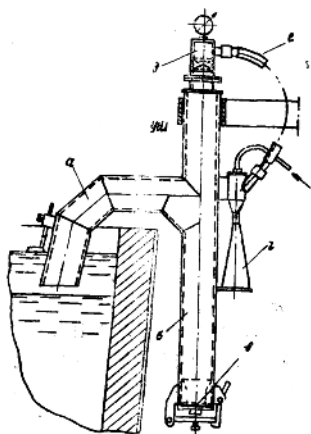


图2 渣子虹吸管（符号的意义见正文）

为进行渣处理，在真空室旁装置一个迴转悬臂梁，在其端部固定住虹吸管。悬臂梁可在一个专门的平台上移动悬臂梁和操纵虹吸管。真空——渣处理的其它准备与一般真空倒包处理的一样。

与通常一样，钢和渣一起流出。出钢后将钢水包运到敞开的真空室（其内予先放着一个浇注盛钢桶）上。把天车吊着的钢水包安放在接收包上，然后，迴转悬臂梁和提升盛钢桶，使吸收管浸入渣中一定深度。然后，经过35~60秒的时间，就可把上面钢包中约70%的渣吸到下面的盛钢桶中。

随后使钢包下降500~700毫米，并回转悬臂梁把虹吸管转回到原来的位置。接着关上真空室的盖，抽真空使残压达20~30毫米水银柱。同时将真空室上的有钢水的钢包对好，进行倒包。开始倒包后真空度增加到6~10毫米水银柱。倒包进行8~10分钟。其速度可用上面的中间钢包的塞杆来调节。

钢流被分裂成若干股细流，并穿过在真空下沸腾的渣子。因此，真空——渣处理可认为是炉外处理的综合方法。这种真空处理方法使两相接触面增加，从而加强了渣的精炼作用。同时，在真空作用下使钢水和渣子去气。

新的处理方法伴随钢水急冷（在倒包的10分钟内冷却了85°C）。在双流倒包情况下（中间包中有两个水口），温差降到75°C。

作重复处理用的渣量为钢水量的4.0~4.5%。渣子（15炉的平均值）具有下列的化学成分（B—碱度 C_2O/SiO_2 ，I'—出钢前炉中取样，I和II—处理前后包中取样，II'—浇注后从包中取样）。

	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Fe总量	MnO	S	B
I'	55.4	20.2	16.2	5.2	0.51	0.10	0.17	2.79
I	49.0	21.1	19.2	6.6	0.63	0.12	0.27	2.32
II	44.8	24.2	18.3	7.9	0.61	0.11	0.32	1.85
II'	43.9	26.8	13.8	9.3	0.39	0.10	0.31	1.64

由于钢包内衬耐火材料的溶解，渣中的SiO₂和Al₂O₃含量增加了，随着渣子的稀释，C₂O的浓度相应降低。

出钢时氧化镁急剧增加，这大概是因为炉中渣的成分不均匀；当炉坡的镁砂烧结层溶解时，渣子外圈就富集了氧化镁，而出钢时只是把氧化镁混匀。随后因渣子被钢包内衬耐火材料所稀释，而使MgO的浓度下降。渣的碱度在出钢时降低15~20%，而在真空——渣处理倒包降低20~30%，这是由于在真空处理时渣子强烈沸腾，钢包内衬被严重浸蚀造成的。

真空——渣处理除了大大降低硫含量外，实际上对变压器钢中的大多数杂质元素没有影响。铝也从0.028%降到0.017%。

脱硫的原因是：在出钢过程中和在真空中用渣子重复处理钢水时渣的精炼作用，这一点可从渣的成分的变化看是明显的。渣中(S)和钢中[S]以及钢中(O)在处理过程中的

变化如下% (33个试验炉次的平均数据, 在浇注中间从流股中取的样含氧为0.0024%)。

	[S]	[S]	[O]	$L_s = (S) / [S]$
I'	0.17	0.015	0.0083	111
I	0.28	0.005	0.0044	55
II	0.31	0.003	0.0038	100

出钢时(试样 I'—II)脱硫率是60~80%(平均67%),真空——渣处理(试样 I—II)时再脱30%—60%(平均40%), 这样总的脱硫率达80%。

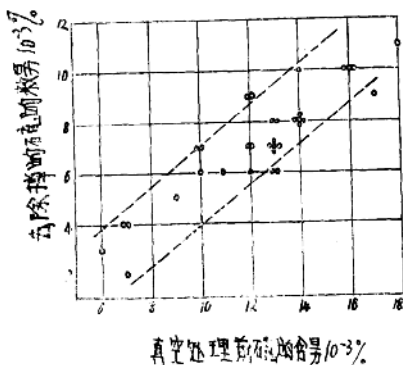


图3 出钢时脱硫量与钢中原始含量的关系

力, 并且钢—渣系统更趋近于平衡。这可能不仅与渣的良好物理化学性能有关, 而且与硫在硅钢中活度高有关。

在大多数情况下, 电工钢的硫含量经真空——渣处理后从0.005~0.006降到0.002~0.004%。这点在几率曲线上明显可见(图4)。

真空——渣处理时, 如果残压为6~10毫米水银柱, 氢含量降低程度和普通倒包时一样。而氮实际上保持不变(为 $7.5 \sim 9.0 \times 10^{-3}\%$)。

高硅钢中溶解的氧很少, 并且, 大部分以非金属相存

可以发现试验数据是比较分散的, 因此, 脱硫效果在很大程度上取决于出钢的情况, 即取决于钢水和渣搅拌程度。此外, 出钢时脱硫量与钢中原始含硫量几乎成直线关系(图3)。

由于处理前原始含硫量低, 因此, 可以认为重复处理的效果是很好的。出钢时硫在钢与渣之间的分配系数从10~15增加到40~70, 而在真空中重复处理后一般增加到80~100, 个别情况下增加到120~140。因此, 重复处理更充分地发挥了渣的精炼能力。

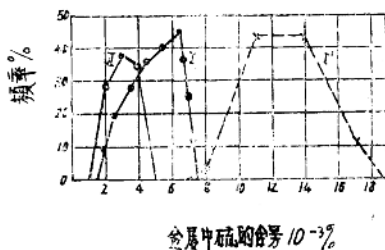


图4 硫在钢中分布的几率曲线 I'—出钢前炉中取样 I、II—出钢后及真空——渣处理后在包中取样。

在。因此用真空熔化法分析出的氧主要是表明了钢中的非金属夹杂物中的氧。出钢时氧含量降低40—45%，而在重复处理时，由于渣洗作用和夹杂的析出，又可排出约15%的氧。在浇注时氧继续下降，显然，这与氧化物夹杂从钢中分离出来有关。

真空一渣处理使非金属夹杂总量降低40%。重复处理还去除了许多最有害的（从电磁性能角度来看）小的结晶状的夹杂（KP）。

从注流中取出的试样中，这些夹杂的含量比普通炉次（○）减少 $\frac{1}{2} - \frac{2}{3}$ [○—5炉，B—8炉用真空一渣处理，ΠCJI和CCJI—简单的和复杂的硅酸盐]， $10^{-4}\%$ ：

方法	试样	ΣHB	CCJI	ΠCJI	KP
B	I	87	68	10	9
	II	52	42	6	4
	III	31	18	8	5
O	II	53	42	2	9

尽管温度较低，但试验的几炉钢的浇注性能同样很好（用连续浇注），证明了真空处理的钢的高流动性。钢锭的宏观组织实际上与一般钢没有区别。

为了确定新的真空处理方法对电工钢性能的影响，冶炼了两批钢，一批用真空一渣处理（分子），另一批用一般工艺（分母）。所有钢的后步各工序的工艺过程是一样的。两批钢的牌号率和磁性如下：

钢板厚度	毫米	0.50	0.35
批 数 (B/O)		51/43	43/55
牌 号 率 %			
Э330		41.24/11.6	25.5/18.2
Э320		56.8/69.8	60.5/63.6
Э310		2.0/13.9	14.0/18.2
废 品		—/4.7	—/—
P ₁₀	瓦/公斤	6.88/0.93	0.67/0.69
P ₁₅	瓦/公斤	1.85/1.98	1.42/1.46
B ₂₅	韦 伯	1.90/1.90	1.904/1.842

用新的方法处理后，0.5毫米的钢板铁损值显著降低，磁感仍保持高水平；所以，Э330的牌号率高。0.35毫米的钢板尽管质量等级较高，但性能差别不很明显。

经重复处理的钢由于杂质（包括硫和非金属夹杂）少，因此改善了质量。

王国宾 译自《钢》（俄）1965№8.711~715安树均校

在硅钢生产工艺方面的一些改进

本专利是叙述一种具有高取向度和高磁性硅钢的生产方法。

至今，在生产冷轧晶粒取向硅钢带和硅钢板的工艺方面，做了很多不同的改进，以改善其磁性。就工业生产中的工艺和理论水平来说，现在有可能生产一种具有极好磁性的硅钢带和硅钢板。因此，所提出任一工艺改进方案，只要能至少使铁损降低2—3%，就将被看作是对工业生产的重要贡献。

过去在生产冷轧用的热轧硅钢带方面有两种不同的工艺。一种为直接热加工工艺，另一种为板坯再加热工艺。采用直接热加工工艺时，钢锭经加热后，就直接将板坯轧成热轧带材，其间不进行中间再加热。而采用板坯再加热工艺时，先将加热后的钢锭轧制成板坯，再将板坯高温加热至 $2300\sim 2550^{\circ}\text{F}$ ，然后才将板坯轧成热轧带材，这正如美国专利4421,211和美国专利2,599,340所描述的。

正如美国专利2,599,340所认识到的，迄今人们把注意力主要都集中在各次冷轧的压下量，以及为了发展磁性而进行的中间退火和最终退火的温度上。迄今，人们已经认识到（正如美国专利2,599,340指出的），下列因数：实际的热轧温度、在热轧期间和热轧后轧件的冷却速度以及热轧终了时的实际温度，虽然也是较重要的，然而，它们对热轧带随后进行的冷轧和高温最终退火来说，影响是不大的。近年来在硅钢轧工艺方面所发生的唯一变化是在美国专利2,599,340中提出的，而这种变化也仅仅适用于板坯再加热工艺。

本专利的目的是改进将钢锭直接热轧成带材的工艺，以便使热轧带材经随后冷轧和最终退火后的磁性获得改进。

与本专利有关的材料是硅含量2.5%~4.00%（最好为2.9%~3.4%）的硅钢。这种钢的成份范围及某一特定分析列于表I。

硅钢通常采用平炉冶炼，当然也可用其它合适的冶炼设备来生产。这种钢注成断面尺寸为19吋×35吋—26吋×36吋（或更大）的钢锭。在直接热加工工艺中，钢锭先在均热炉内加热至 2200°F — 2300°F ，然后在初轧开坯机上进行开坯并热轧成厚度为0.060~0.10吋的带材，这期间不考虑钢的温度，只要它能保证热轧带材没有边缘裂缝和其它缺陷即可。

下面介绍一下过去采用的直接热加工工艺。钢锭加热到 2200°F ~ 2300°F →开坯成厚度为5~9吋的板坯→在可逆式轧机上进行轧制，一般轧五道，使板坯厚度减为 $\frac{3}{4}$ ~ $\frac{1}{4}$ 吋，此时板坯的温度略低于 1975°F →在此温度下，在串列式轧机上轧成厚度为0.060~0.10吋的带材→两次或多次冷轧，其间要进行中间退火，退火温度为 1600°F ~

表 I

	重量%(一般范围)	某一分析
硅	2.90—3.40	3.15
碳	0.020—0.035	0.028
锰	0.035—0.10	0.065
硫	0.005—0.025	0.020
磷	0.005—0.020	0.008
铝	最大 0.05	>.01
铜	0.050—0.30	0.080
镍	0.030—0.15	0.060
锡	0.005—0.020	0.010

1850°F→在干氢中2100°F进行高温退火。有时，在冷轧前，热轧带材还要进行箱式退火或1400°F—2000°F的连续热处理。热轧带材通常还要进行酸洗。冷轧带材最好在最终高温退火前，先在1450°F~1500°F进行短时的脱碳热处理。

工业界知道，冷轧时每道次的压下量与中间退火温度间的关系以及脱碳处理和最终高温退火的关系，均对硅钢带的取向度有决定性影响。上述的两个工序之间的关系不构成成本专利的一部份。已经发现，这里叙述的新的直接热轧工艺与过去的相应工艺相比，可使晶粒取向硅钢的磁性获得显著改进。

在本专利的操作中，应严格控制热轧的各个因素，即从钢锭的均热温度开始直至热轧成带材为止这一期间的各个因素。业已发现，在金属的整个热加工过程中，维持合适的温度，对获得稳定的良好结果以及使其性能显著超过过去工艺的结果来说，是至关重要的。

一般在合适的均热炉中将钢锭加热至2300—2475°F，加热时间和加热温度随钢锭的大小变化。例如对断面尺寸为19吋×35吋的钢锭，至少要在2300°F以上加热5小时（其中包括在2400°F以上加热3小时）较合适。而对断面尺寸为26吋×36吋的钢锭，则最少要在2300°F以上加热7小时（其中包括在2400°F以上加热3小时）较合适。在超过2400°F以上的较高温度下长时间加热是不合适的，因为钢锭表面易于熔化，而熔滴则流入均热炉底部，并损坏均热炉底部的耐火砖。

虽然，尚未完全弄清在2300°F的高温（或更高的温度）下加热钢锭对所述工艺有利的原因，然而已经发现，在这样高的温度下均热钢锭，将消除在低温下可能存在于硅钢中的少量奥氏体相。这是可能的，因为形成奥氏体的锰，通常都是以杂质的形式存在的。此外，还有一些其它元素也是以稳定奥氏体相的杂质形式存在的。当锰含量超过

