

金属材料的光亮热处理

何 英 介 编 译

内 容 提 要

本书是根据国内外有关文献和资料编译而成,着重介绍金属材料的光亮热处理技术。全书分为真空热处理和保护气体热处理两大部分。真空热处理部分内容较全面,包括基本原理,在热处理上的应用,各种类型的炉子及工艺,真空系统设计,炉子热工计算,炉子主要部件讨论等章。保护气体热处理部分重点介绍各种类型的炉子及工艺。

本书可供国防、冶金、机械制造等工业部门从事热处理和压力加工工作的设计、科研、生产技术人员参考。

金属材料的光亮热处理

何英介 编译

上海人民出版社出版

(上海绍兴路5号)

新华书店上海发行所发行 上海市印十二厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 6.75 字数 147,000

1976年4月第1版 1976年4月第1次印刷

统一书号: 15171·231 定价: 0.40 元

前 言

所谓“光亮热处理”，通常包括真空热处理和保护气体热处理两种。这种技术早在一百多年前就有人提出来了，但直到本世纪四十年代才开始实际应用于工业生产中，其迅速发展只是近十多年来的事情。这同核技术和空间技术的发展对金属材料提出越来越复杂的要求有关。发展光亮热处理技术是发展现代尖端科学技术必须解决的一个问题。

我国建国二十多年来，在伟大领袖毛主席和中国共产党的英明领导下，光亮热处理技术从无到有，从小到大，日益发展。特别是无产阶级文化大革命以来，在毛主席关于“独立自主、自力更生”的伟大方针指引下，我国光亮热处理技术发展更为迅速。当前，面对抓革命、促生产，为社会主义大干快上的一派大好形势，如何根据我国的具体情况，更快地发展先进的光亮热处理技术，是有待我们努力的一个课题。

为了满足有关专业人员的需要，我们搜集了国内外有关文献中关于光亮热处理方面的一些技术资料，编译成本书，以便参考。光亮热处理技术在工业生产中应用的范围很广，本书主要只包括金属材料的光亮热处理，在介绍国外发展动态时，我们尽量结合国内的具体情况和实际需要。有关保护气体热处理部分，由于国内已有专门的译著出版，本书就不多加编入。

本书在编译过程中，得到了上海市冶金工业局、上海冶金设计院、上海钢铁研究所、上海有色金属研究所、上海科学技

目 录

第一部分 真空热处理

第一章 真空热处理基本原理	1
第二章 真空在热处理中的应用	4
第三章 真空热处理的设备及工艺	20
整筒式真空热处理炉	20
铜丝罩式真空热处理设备	21
惰性真空热处理炉	24
升降式真空热处理炉	30
料箱式真空热处理炉	35
立式真空热处理炉	37
连续式多段高真空热处理炉	39
CKB-5132 型连续式真空热处理炉	41
半连续式管材真空热处理炉	41
热罐式真空热处理炉	43
合金丝材连续式真空热处理炉	44
真空冷壁管材退火炉	49
用电子束加热的连续式退火炉	51
苏制无惰性高真空热处理炉	52
美制无惰性高真空热处理炉	54
冷罐式或内热元件式真空热处理炉	57
冷却室冷却型真空热处理炉	59
油淬真空热处理炉	62

多用途真空淬火炉	64
离子氮化炉	65
第四章 辐射屏式真空热处理炉的热工计算	68
通过多层金属辐射屏总热损失的计算	68
导来辐射系数的计算	70
炉壳用冷却水消耗量的计算	70
计算例题	71
第五章 真空热处理炉的设计与计算	74
炉子真空系统设计的基本要求	74
炉子一般所采用的真空系统	75
炉子真空系统布置应考虑的几个主要问题	77
真空管道	78
真空卫生及其他	79
真空热处理炉用真空系统的计算	80
真空热处理炉用真空系统计算举例	90
第六章 真空热处理炉几个主要部件的讨论	95
电加热器	95
炉衬	109
炉壳	119

第二部分 保护气体热处理

第七章 保护气体热处理基本原理	123
第八章 保护气体在热处理中的应用	129
第九章 保护气体热处理的设备及工艺	153
钢丝网带式炉	153
线材光亮退火用的井式炉	154
带油封-水封单梁罩式炉	155

用于电工硅钢带光亮热处理的塔式炉及其连续作 业线	160
用于电工硅钢带光亮热处理的卧式炉及其连续作 业线	167
用于冷轧钢带在镀锡前的连续光亮退火的塔式炉	172
用于铜和黄铜带光亮退火的立式炉连续作业线	174
用于电工硅钢、低碳钢、不锈钢带光亮热处理的立 式连续式炉	174
不锈钢带立式连续式有马弗光亮淬火炉连续作业 线	176
不锈钢带立式连续式无马弗光亮淬火炉	177
冷轧热镀锌钢带连续作业牵引式炉	184
蓬松状态钢卷材的退火	187
用于高铬合金制件的光亮铜焊室式炉	188
附录	190
软磁合金真空热处理炉的技术规格	190
美、英、法航空部件部分真空热处理炉的主要技术 性能	191
钢带的喷吹冷却计算	193
摄氏与华氏温度对照表	199
压强测量单位	205
若干气体常数	206

第一部分 真空热处理

第一章 真空热处理基本原理

真空，严格地说来，是指压力较常压为小的任何气态空间。完全没有任何物质的“绝对真空”是不存在的。

真空的单位，在工业上常常用一个“相对值”表示，即“毫米汞柱”，或者称为“托”(Torr)。

根据低气压的不同程度，在工业实际使用中，把真空划分为三种：

低真空： $10 \sim 10^{-2}$ 托；

中真空： $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 托；

高真空： $10^{-5} \sim 10^{-7}$ 托。

这里必须注意：所谓气压越“低”，亦即真空度越“高”；反之，气压越“高”，意味着真空度越“低”。低气压和高真空是同义的。

目前，在大多数真空热处理过程中，气体的压力一般是在 $1 \sim 10^{-6}$ 托范围内。

在 1 托压力下，气体分子浓度约为 3×10^{16} 分子/厘米³。在 10^{-6} 托压力下，气体分子浓度约为 3×10^{10} 分子/厘米³。

随着真空度提高，氧的分压降低，因而能够利用真空进行热处理，使金属在氧的分压极小的气氛中加热，防止金属在高温下发生氧化。该分压的理论值应该小于或等于氧化物的分

解压力。但实际上有时并不需要这样严格。氧的分压值小的时候,金属氧化的速度是极低的。因此,即使是在氧的分压稍高于氧化物分解压力的气氛中,也不会有形成可见氧化物的危险性。由于这个原因,铁可以在氧的分压不低于 10^{-5} 毛的一般真空中实现无氧化加热,虽然氧化铁的分解压力比 10^{-5} 毛要低得多。

总之,高真空具有两个特点:第一,高真空气氛的化学活性极低,因此,利用真空进行热处理时,气相与固相界面上发生的反应,如氧化、还原、渗碳或脱碳等,不会进行到有影响的程度;第二,高真空气氛使气体体积增大的变化非常迅速,可导致金属或合金放出溶解的气体或金属氧化物发生分解。

真空系统的最终含氧量与许多因素有关。尤其是水蒸气等,不能象其他气体那样,由普通真空泵迅速排出。在 10^{-3} 毛压力下,对真空系统中的残余气体进行分析的结果表明,0.5% 以下的原始空气仍含有 70% 的水蒸气。在真空热处理技术中,水蒸气含量通常用露点来表示。

普通的惰性气体,约含有 0.1% 的杂质,在这样的气体中仍会引起氧化;若要精制至含杂质 1ppm 以下,则无论从精制费用,或从保持精制气体的纯度来看,都是很困难的。表 1 表明,其杂质含量和露点与含 1ppm 杂质的惰性气体相当的真空度只不过是 10^{-3} 毛。在采用现代真空技术的情况下,要在

真空度及与之相应的杂质含量和露点 表 1

真空度 (毛)	100	10	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
相应的杂质 (%)	13.4	1.34	0.134	0.0134				
相应的杂质 (ppm)					13.4	1.34	0.134	0.0134
相应的露点 (°C)		+11	-18	-40	-59	-74	-88	-101

很大的装置中产生 10^{-3} 托的真空度是比较容易的。就是说, 采用真空热处理, 可以得到廉价的无氧化中性保护气氛, 能得到不脱碳、不渗碳的光亮表面, 而且还可以除去金属表面的鳞屑, 以及具有脱气作用。

表 2 指示了不同压力下, 空气分子的平均自由程。由表可知, 在低压下, 气体分子具有更多的运动机会, 也就是空气越稀薄, 分子的自由程就越大。因此, 在低压下, 气体的扩散非常迅速。

不同压力下, 空气分子的平均自由程* 表 2

压 力 (托)	平 均 自 由 程 (厘米)
760	6.5×10^{-6}
1	5×10^{-3}
10^{-3}	5
10^{-6}	5×10^3

* 在常温下, 平均自由程与压力成反比。

第二章 真空在热处理中的应用

在真空热处理工艺中,钼、钽、铌、钛、锆、铪、铍、钒等金属的真空热处理占有重要的地位。这些金属的熔点都很高,化学性质又很活泼,在高温下易氧化,易受与之接触的耐火材料沾污;并且这些金属及其合金在进行压力加工时,其机械强度及硬度大大增加,尤其是溶解于其中的气体(如氢、氮、氧),常常使其延展性降低,并且在拉、压应力作用下,使部分晶体结构受到破坏。这决定了这些金属及合金必须进行真空退火。

在真空中进行退火时,由于热量以辐射方式传给金属,因而金属表面可保持洁净;并且不需任何还原剂,即可将上述气体迅速排除。真空退火时,变形晶粒得到恢复,同时产生新的晶粒,均化金属组织,从而改善金属的机械性能。此外,金属在退火以后,其表面没有润滑剂痕迹,而且非常干燥,为以后的加工工序,如镀锌或镀锡创造良好的条件。采用真空退火,可以取消酸洗工序,从而大大节约金属并改善其表面质量。

钛及钛合金已经在国防、尖端工业有广泛的应用。钛在高温条件下,其化学性质非常活泼,很容易与炉内气体如氧、氮和氢化合,并能与气体化合物 CO_2 、 CO 、 H_2O 、 NH_4 和很多挥发性有机物发生反应,为它们所沾污。钛同这些气体反应的结果,要比很多其他金属严重得多,而且能穿透金属点阵。所有这些都会引起材料的性能降低。正因为这个缘故,所以钛及钛合金必须在洁净的气氛条件下进行热处理,即只能用真

空热处理的方法才能达到。尤为突出的是，钛及钛合金最终机械加工成零件和薄壁结构件时，要长时间处于高温状态，并要求保持精密的尺寸公差，此时采用真空热处理就更为适合。此外，降低钛材料中有害的氢气含量的一种有效途径，就是在真空中保持一定的时间。在 $538\sim 760^{\circ}\text{C}$ 于 5×10^{-4} 托以下的压力下保持 $2\sim 4$ 小时，一般可使经化学铣切和被氢沾污（含量 550ppm）的 Ti-6Al-4V (α - β 合金) 的含氢量净化至 $25\sim 35\text{ppm}$ 。根据试验研究，钛(99.7%) 在 810°C 进行真空退火时，真空度为 10^{-2} 托，有可能消除钛中的氢；真空度达 10^{-5} 托，能获得光亮的表面。

铌有吸收氧、氮、氢的趋势，而且这种反应的速度大约在 200°C 时就迅速增加，氧化物被金属所吸收，使金属变脆。所以用铌制造的管材必须在真空度不大于 1×10^{-4} 托的真空中进行退火，热处理的温度为 $1100\sim 1200^{\circ}\text{C}$ 。

对于钽、钒、锆等稀有金属及其合金，需要在真空度为 1×10^{-4} 托的真空中进行退火。

现代工业，特别是电子工业及航空仪表制造工业，自动化及远动化领域方面，对于软磁合金提出了更高的要求。因此，软磁合金必须具有一定的均值性及稳定性。即当温度 ($-60\sim 400^{\circ}\text{C}$)、压力 ($760\sim 10^{-6}$ 托)、机械负荷(冲击、振动、铁心迭片张紧)及放射性照射发生变化时，仍应保持很高的磁性。要满足这些要求，除了采用真空熔炼和真空轧制外，更重要的是采用真空热处理。几种软磁合金的化学成分，热处理制度及磁性见表 3 及表 4。

对硅钢片进行真空退火时，将退火温度提高到 $1250\sim 1300^{\circ}\text{C}$ ，并把炉内压力降低到 $10^{-3}\sim 10^{-4}$ 托，可除去硅钢片中的气体 (H_2 、 CO 、 CO_2 及 CH_4) 和其他化合物(氮化物、硫化

软磁合金的化学成分

表 3

合 金 牌 号	化 学 成 分 (%)												熔 炼 方 法
	Fe	Ni	Si	Mo	Al	Co	C	O	N	H (厘米 ³ / 100 克)	S	P	
Э220	97.6	0.1	2.0	—	0.15	—	0.04	0.03	0.005	5.0	0.03	0.04	平炉熔炼
Э43А	95.4	0.05	4.5	—	0.01	—	0.015	0.02	0.01	2.0	0.005	0.01	电弧炉熔炼, 并 在盛钢桶内进 行真空处理
Э330А	96.95	0.01	3.0	—	0.01	—	0.015	0.01	0.005	1.5	0.003	0.005	
Ю16	84	—	0.008	—	16	—	5×10^{-5}	1×10^{-5}	3×10^{-4}	—	0.002	0.001	真空感应炉熔炼
50Н*	49												真空电弧炉熔炼
65НП	34	65	0.3	Mn 0.5	—	—	0.02	0.005	0.001	5.0	0.02	0.02	敞口感应炉熔炼
80НХС	16	80	1.5	0.5	—	Cr 1.5	0.02	0.005	0.001	5.0	0.02	0.02	
79HMA*													真空电弧炉熔炼

* 镍基。

软磁合金的真空热处理制度及真空退火磁性

表 4

合 金 牌 号	热 处 理 制 度				合金带 最 小 厚 度 (毫米)	磁 性						
	温度 (°C)	真空 度 (托)	保温 时间 (小时)	冷 却 速 度 (°C/小时)		B_r (千高斯)	H_c (奥斯特)	μ_0 (高斯· 奥斯特)	$\mu_{最大}$ (高斯· 奥斯特)	ρ (欧·毫米 ² /米)	$\bar{d}$ (克/厘米 ³)	
				1300~ 600°C								600~ 300°C
Э220	900	30	16	200	5~10	0.5	23.0	0.50	500	5×10^3	0.50	7.70
Э43A	1100	30	20	200	5~10	0.10	22.0	0.30	800	12×10^3	0.60	7.55
Э380A	1150	30	24	200	5~10	0.35	22.5	0.20	1200	15×10^3	0.45	7.65
Э370	1160	30	12	100	30 (在油中 淬火)	0.05	22.5	0.10	1500	20×10^3	0.55	7.65
Ю16	1050	—	4	100	(在油中 淬火)	0.10	9.5	0.05	4000	80×10^3	1.50	6.50
50H	1100	10^{-4}	3~4	50~100	(空冷)	0.05	15.0	0.05	5000	100×10^3	0.45	8.25
65HП	1100	10^{-4}	3~4	50~100	(在磁场 中冷却)	0.10		0.05			0.45	8.20
80EXC	1100	10^{-4}	3~4	50~100	(空冷)	0.05	7.50	0.01	20×10^3	300×10^3	0.60	8.20
79HMA	1300	10^{-4}	3~4	50~100	(空冷)	0.05	7.50	0.008	50×10^3	500×10^3		8.20

物), 同时还可以消除内应力和晶格畸变。含 3~4%Si 的硅钢经过高温退火后, 其磁导率适中, 弱磁感应强度可提高 1~2 倍, 并可大大降低磁滞损失和矫顽力。但是, 热轧硅钢片采用真空罐退火, 且退火温度不超过 1100~1150°C, 把真空度从 50

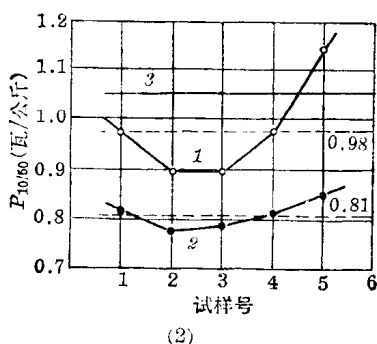
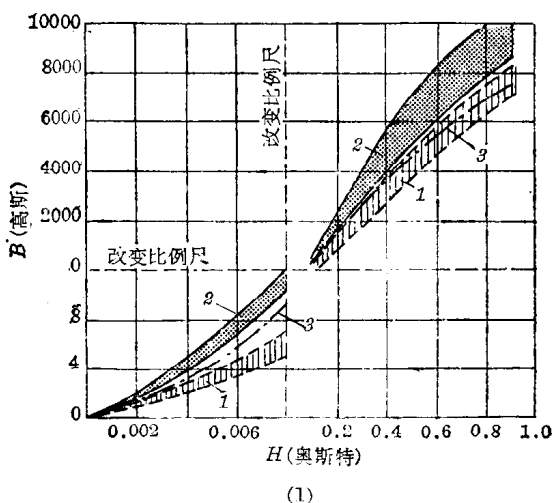


图 1 真空度对硅钢片磁感应强度(1)及单位铁损(2)的影响
1—在 VKP-035 罩式炉内退火, 真空度为 50 托; 2—在真空罐内退火, 真空度为 0.1 托; 3—ГОСТ 802 的要求 (У46 及 У43 号钢)

吨升高到 0.1 吨, 则可提高磁感应强度和降低单位铁损 20~30%, 因而具有很大的实际意义(图 1)。从表 5 可以看出, 在高真空罐内低温退火, 可以把热轧硅钢片单位铁损降低 5~10%。同时, 钢中有害杂质及气体越多, 则低温真空退火的效果越好。平炉硅钢在低温真空退火后的单位铁损可降低到电炉钢的单位铁损水平。因此, 最好采用罩式低温高真空炉来处理含硅 1.2% 及 3% 的热轧电机钢及变压器硅钢片。

0.35 毫米厚的热轧变压器硅钢片在罩式真空炉(50 吨)

及真空罐(0.5 吨)内低温退火后的磁性 表 5

退火号	真 空 炉			真 空 罐		
	$P_{10/50}$ (瓦特/公斤)	$P_{15/50}$ (瓦特/公斤)	B_{25} (高斯)	$P_{10/50}$ (瓦特/公斤)	$P_{15/50}$ (瓦特/公斤)	B_{25} (高斯)
	平 炉 钢			平 炉 钢		
1	1.32	3.03	14890	1.12	2.66	14500
2	1.33	2.89	14900	1.25	2.82	14800
3	1.34	3.14	14800	1.30	2.99	14900
平均	1.33	3.02	14800	1.22	2.82	14700
	电 炉 钢			电 炉 钢		
1	1.18	2.67	14400	1.14	2.55	14500
2	1.21	3.18	14500	1.13	2.69	14700
3	1.27	2.96	14700	1.19	2.77	14900
平均	1.22	2.93	14500	1.15	2.67	14700

铁镍合金虽然和铁硅合金一样是单相固溶体, 并属于同一级软磁合金范畴, 但其热处理却有它的特点。由图 2 可以看出, 真空电弧炉熔炼的 50H 合金在退火温度为 1200~1250°C 时, 其磁性最好; 真空电弧炉熔炼的 79HM 合金在退火温度

为 $1100 \sim 1150^{\circ}\text{C}$ 时,其磁性最高。可是敞口感应电炉熔炼的 79HM 合金,只有在退火温度不低于 1300°C 时才能获得最高磁性。铁镍合金对于变形、冷却条件、最终退火及介质非常敏感。缓慢冷却可以提高铁镍合金的最大磁导率,而加速冷却则可提高初始磁导率。

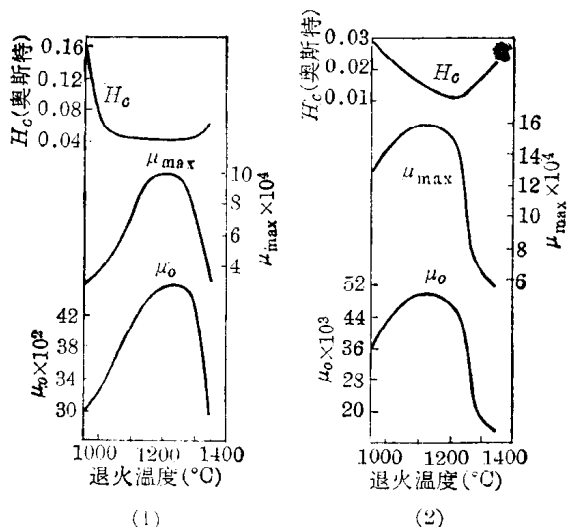


图2 高真空退火温度对 50H(1)及 79HM(2)

铁镍合金磁性的影响

(在 МПВ-2М 炉内退火, 10^{-4} 托)

真空还应用于高导磁性铁-铝合金的热处理。由于含铝的合金脆性很大,一般含铝超过 10% 以后,就不能承受冷加工。但是真空技术的应用,使这种情况得到了改善。含 12% Al 的铁-铝合金(其中加入 2~3% 的钴),采用真空退火后,可获得最大磁导率达 120000~150000 高斯/奥斯特的性能,而且加工性能也较好,并具有较高的磁感应值。其真空退火工艺为:退火温度 1250°C ,真空度 10^{-4} 托,按 $100^{\circ}\text{C}/\text{小时}$

的冷却速度冷至 600°C ，再按 $50^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ 的冷却速度冷至 200°C 。

对电工钢来说，真空与保护介质（分解氨和放热型气体）相比较，真空，甚至预真空，也能保证钢具有较高的塑性和较均匀的磁性。经验表明，对于部分脱碳和去硫以及防止氧化来说， $20\sim 30$ 托的真空度和炉子的小时漏气量不超过 10 托就足够了。在这种情况下，厚度为 0.35 毫米的热轧变压器钢板的平均单位铁损 $P_{10/50}=0.92$ 瓦特/公斤，而 $P_{15/50}=2.10$ 瓦特/公斤。

生产实践表明，对于重量为 $5\sim 10$ 吨的电工钢板垛的最终高温退火，真空度只为 $10\sim 50$ 托就能满足要求；对于装炉量不超过 500 公斤的电工钢冲压件和成品铁芯（导磁体）在小型马弗炉内和竖式炉内退火，真空度为 $10^{-2}\sim 10^{-6}$ 托。

变压器钢在高温高真空中进行热处理时化学成分有很大的变化，与普通退火相比较，脱碳尤为显著。如在退火前变压器钢板含碳量为 0.0147% ，经过高真空退火后降至 0.0068% ，而经过普通退火后则仅仅降至 0.0103% ；硅的含量自 3.31% 降至 3.16% ，硫自 0.0062% 降至 0.005% 。变压器钢板经过普通退火，将得到不均匀的组织，除了尺寸达 $5\sim 10$ 毫米的粗晶粒外，尺寸为 $1\sim 2$ 毫米小晶粒也大量存在。但经过高真空退火以后，晶粒尺寸在 $10\sim 15$ 毫米之间，组织变得均匀，小晶粒也消失了。这时其磁感应强度升高，单位铁损降低。最佳的电磁性能与 $\Phi 330$ 相符合（ $P_{10}=0.53$ 瓦特/公斤， $P_{15}=1.15$ 瓦特/公斤， $B_{25}=19200$ 高斯）；而经过普通退火的则仅与 $\Phi 320$ 和 $\Phi 310$ （ $P_{10}=0.64$ 瓦特/公斤， $P_{15}=1.4$ 瓦特/公斤， $B_{25}=18470$ 高斯）相符。

在国外，热轧硅钢片高温退火的工艺，有人提出用氢气和