

可控硅中频装置

译文集

第一机械工业部情报所编

机械工业出版社

可控硅中频装置

(译文集)

第一机械工业部科技司编



机械工业出版社

本译文集主要介绍了近几年来国外有关可控硅中频感应加热装置各种线路的设计、参数计算及应用等。

本书可供从事研制、生产、教学和使用可控硅中频感应加热装置的广大工人和科技人员参考。

可控硅中频装置

(译文集)

第一机械工业部情报所编

(只限国内发行)

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 $\frac{1}{16}$ ·印张 9 $\frac{5}{8}$ ·字数 229 千字

1975年7月北京第一版·1975年7月北京第一次印刷

印数 00,001—11,500·定价0.80元

*

统一书号: 15033·(内)653

前 言

可控硅中频感应加热装置是六十年代中期发展起来的新技术。它是一种利用可控硅把三相工频电能转变为单相中频电能的装置。

可控硅中频装置与旋转式中频发电机组相比，具有启动快，效率高，噪音低，自动调频，节省金属材料，重量轻，占地面积小，制造容易，安装简便，使用维护方便等优点。因此，可控硅中频装置在金属感应加热方面，如金属熔炼、透热、淬火及热处理、钎焊和弯管等方面得到越来越广泛的应用。

我国可控硅中频装置是在无产阶级文化大革命中发展起来的，在毛主席“**独立自主、自力更生**”的方针指引下，近几年来，可控硅中频技术又有了飞速的发展。

遵照伟大领袖毛主席关于“**洋为中用**”的教导，继1972年我所与一机部机械院机电研究所编译出版的“感应加热用可控硅变频器译文集”之后，我们又从近几年来国外一些书刊上收集了有关可控硅中频装置的线路设计、参数计算及应用等方面的资料共十八篇，整理出版，供有关单位参考。

参加本书译校工作的有上海市电动工具研究所、西安电炉研究所、湘潭电机厂、上海机电控制器厂、上海市电机综合研究所、浙江大学、一机部机械院机电研究所和一机部情报所等单位。

本译文集在选题和译文质量方面，如有错误或不当之处，望批评指正。

编 者

1974年8月

目 录

1. 国外可控硅中频装置及其应用·····	1
2. 感应熔炼和感应加热用静止变频器·····	13
3. 金属感应加热用高频可控硅变频器·····	25
4. 感应加热用振荡回路变频器·····	30
5. 感应加热用 10 千赫逆变器电源 ·····	42
6. 感应加热用的固体逆变器·····	50
7. 可控硅中频变频器的原理与应用·····	56
8. 变频器的设计·····	72
9. 感应加热用逆变器·····	75
10. 带有反向二极管的宽范围电压调节双桥串并联逆变器·····	80
11. 断续电流工作制逆变器主回路分析·····	84
12. 高频应用的可控硅电路的设计·····	92
13. 感应加热用高频电源的研究(一) ·····	100
14. 感应加热用高频电源的研究(二) ·····	112
15. 感应加热用的变频器与负载间的参数匹配 ·····	122
16. 感应加热用的高频电源与负载的匹配 ·····	128
17. 焊缝热处理用的感应加热退火设备 ·····	135
18. 富士 KGP22-13 快速可控硅 ·····	140

国外可控硅中频装置及其应用

概 况

用于感应加热的可控硅中频装置是一种将三相工频电能转变为单相中频电能的可控硅静止式变频器。

自 1892 年世界上第一台中频发电机组制成以来, 中频感应加热已在金属熔炼, 钢坯及钢板透热、淬火及热处理、钎焊、弯管、塑料涂敷等行业得到越来越广泛的应用。

虽然早在 1931 年^[1]就提到了静止变频器, 在 1948 年亦制成以汞弧整流器作为电子开关得到频率为 3000 赫的静止变频器^[2], 但在可控硅问世以前, 静止变频器并未得到广泛应用。直到 1958 年第一只 200 伏、50 安可控硅诞生以来, 随着可控硅容量的逐步增加和快速可控硅的出现, 可控硅变频器才得到了飞跃的发展。

可控硅变频器最早在欧洲出现。1966 年瑞士 BROWN BOVERI 公司发表了第一台功率为 750 千瓦、频率为 1000 赫的可控硅中频电源, 供瑞士一家翻砂厂应用, 采用并联逆变线路, 炉子电压为 1400 伏^[3]。与此同时, 西德 AEG 公司在 1966 年制成了 840 千瓦、500 赫的串联逆变器, 炉子电压为 3000 伏^[4]。1967 年, 法国来克西 (LEXY) 一家钢管厂安装了由西德西门子公司生产的 12 台功率为 700~1500 千瓦、频率为 500~1000 赫的可控硅变频器, 供钢管加热用, 其总容量为 10000 千瓦。到 1968 年大约已有 15 台大小不同的可控硅变频器投入实际应用, 工作频率最高达到 4000 赫。据介绍在 1969 年 8 个月中就生产了 20 多台频率为 500~4000 赫的可控硅变频器^[5]。到 1972 年, 瑞士 BBC 公司及西德 AEG 公司均已制成了可控硅中频感应加热装置的系列产品^[6, 7]。在 1970 年 BBC 公司制成了两台单机容量为 2200 千瓦、频率为 500 赫的可控硅变频器, 其中一台已在 1970 年 5 月投入工业运行^[8]。

日本在发展可控硅中频装置方面虽较瑞士、西德为迟, 但近几年来发展很快。据不完全统计, 目前日本有十家公司在制造可控硅中频装置。三菱电机公司在 1971 年就完成了 500~3000 赫的可控硅中频装置系列, 据 1974 年报导该公司又完成了频率为 3000 赫、功率为 100~1100 千瓦的系列产品, 并已生产了单机容量为 1000 千瓦、频率为 3000 赫的可控硅中频装置, 开展了将三台 3000 赫、600 千瓦可控硅中频装置并联运行的应用^[9]。东芝公司在 1969 年已能制造 1200 千瓦、频率为 500 赫的大功率可控硅中频装置, 到 1971 年又制成了单机容量为 1800 千瓦的可控硅中频装置, 并已完成了频率从 500~3000 赫, 功率从 150~1800 千瓦, 电压为 1100 伏的产品系列^[10, 11]。日本高周波热炼公司在 1973 年前完成了频率为 1000 赫、3000 赫、10000 赫, 功率从 25~720 千瓦的可控硅中频装置系列, 并制成了 10000 赫、100 千瓦的可控硅中频装置, 其外形尺寸为 1000×2000×1200(毫米)^[12]。

日本富士电机公司 1973 年报导已完成了从 20 公斤, 30 千瓦, 500 伏, 3000 赫到 4 吨, 3500 千瓦, 1000 伏, 1000 赫共计 24 种规格的可控硅中频装置系列^[13]。

日本电气兴业公司 1973 年报导与西德 EMA 公司合作完成了 500~10000 赫, 功率从 10~3000 千瓦的可控硅中频装置系列^[14]。

美国在发展可控硅中频装置方面较西欧、日本为迟，到1968年才有较显著的发展。但据1970年报导已完成了功率为250千瓦、频率为180~1000赫的并联逆变器；功率为200千瓦、频率从2000~3300赫的串并联逆变器；功率为120千瓦、频率从8000~11000赫的时间分割式逆变器^[15]。1969年又报导采用交流——交流的直接变频线路制成了功率为100千瓦、频率为700~1000赫的可控硅中频装置^[16]。

美国BANYARD METALHEAT公司在1972年报导已制成频率为150~1000赫、功率为200~3000瓦；频率在10000赫、功率为25~500千瓦的可控硅中频装置产品系列；同时又研制了50~100千赫可控硅感应加热装置^[17]。

苏联到七十年代初才报导采用倍频线路制成了2500赫、100千瓦的可控硅中频装置^[18]。并在进行以四串联桥线路来进行10~20千赫可控硅中频装置的研究^[19]。

国外在开始发展可控硅中频装置时，由于当时可控硅关断时间较长，大容量元件还很少，因此在1970年以前有些国家认为可控硅变频器的经济频率在4千赫以下，单机的经济容量在2000千瓦左右。但随着快速可控硅及大容量可控硅的出现，同时随着可控硅中频技术的不断完善和提高，因此近年来，国外在发展可控硅中频电源时出现了两个特点：一是低频大容量，主要是用于金属熔炼及锻造，钢板透热，其单机容量在1000~4000千瓦^[8, 11, 13, 14, 17, 18, 20, 21, 22]，频率一般在1000赫以下，但用作透热的频率则在2~3千赫左右。如瑞士BBC，日本富士电机、电气兴业、东芝、富士电子公司，美国，英国，苏联等相继制成了1000~4000千瓦大容量中频装置。另一个特点主要是用于热处理、焊接及特种电源（如超声）等，其频率在8~25千赫，功率在500千瓦以下，如BBC公司、AEG公司、日本高周波热炼

表1 各国可控硅中频装置发展概况

国	别	容 量 (千 瓦)	频率(千赫)	备 注
瑞 士	BBC公司	40, 60	10	〔6〕
		65	4	
		110, 165, 280	2	
		410, 1000	1	
		2200, 920	0.5	〔8〕
	ASEA公司	600	0.6	
西 德	AEG公司	67, 100, 134, 200, 300, 400, 500	10	〔7〕
		60, 100, 120, 180, 270, 360, 450	4	
		65, 100, 130, 200, 300, 400, 500	3	
		70, 110, 140, 220, 330, 440, 550	2	
		80, 120, 160, 240, 360, 480, 600	1	
		1000	0.5	〔28〕
		100	25	〔26〕
	西门子公司	700~1500	0.5~1	
600		0.3~2		
	EMA公司	10~200	4~10	〔29〕
		80~1200	2~4	
		140~2500	0.5~1.2	

(续)

国	别	容 量 (千瓦)	频率(千赫)	备 注
日本	三菱电机	100~1100	3	[9]
	东芝	150	0.5(0.43~0.52) 或 1(0.86~1.04)	[11]
		300		
		600		
		1200		
		1800		
	高周波热炼公司	25~720 100	1, 3, 10 10	[12]
富士电机	30~3600	1~3	[13] 共有24种规格 品种	
美国	电气兴业	10~3000	0.5~10	[14]
	富士电子工业公司	10~3000	0.5~4	[20]
	神钢电机	80	10	[23]
150		1.5		
300		1		
英国		225/250	0.18~1	[15]
		200	2~3.3	
		120	8~11	
英国	BANYARD 金属加热公司	25~500	50~100	[17]
		200~3000	10	
			0.15~1	
英国	感应加热设备公司	1~600	各种频率	[30]
		25~600	1, 3, 10	[25]
	RADYNE公司	75~2000	0.35~10	[21]
苏联		50~100	8~10	[22]
		120, 250	2.5	
		1000	1	
法国	TOCCO-STEL公司	25	50	[48]
		25, 50, 75, 100, 150, 200, 225, 300, 450, 600	10	
		33, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 800, 900, 1200	3	

公司、神钢电机、英国、美国、苏联等相继在制造和研制 10 千赫左右的可控硅中频装置^[6, 7, 12, 14, 17, 19, 23, 24, 25]。西德的 AEG 公司在 1971 年就报导采用时间分割法, 用关断时间在 30 微秒以下的可控硅制成了 25 千赫、100 千瓦的可控硅变频器^[26]。美国 INTERNATIONAL RECTIFIER 公司在 1967 年报导用 8 安、600 伏、关断时间为 3 微秒的快速可控硅制成了 25~60 千赫、10 千瓦感应加热装置^[27]。

各国可控硅中频装置的发展概况列于表 1。

可控硅中频装置和中频发电机组相比具有效率高、噪音小、重量轻、占地少等优点, 特

别是随着负载变化能自动调频而不需切换电容器，这是中频机组所无法比拟的。可控硅中频装置不需工夹模具，基本上由一些电器元件组合而成，因此制造方便，而中频发电机则由于需要大量的工夹模具，因此制造周期就长得多。而在制造成本方面，据介绍在 300 千瓦以下的小容量产品，机组成本比可控硅便宜；而在 500 千瓦以上的大容量及频率高于 8 千赫的产品，则可控硅的成本要比中频发电机组便宜^[31]。因此最近国外正在大力发展可控硅中频装置，大有替代机组之势。可控硅中频装置与中频发电机组性能对比见表 2。

表 2 中频电源装置比较表

比 较 项 目	可 控 硅 中 频 装 置	中 频 发 电 机 组
起 动	可瞬时起动	容量越大，起动越麻烦
停 止	一有故障能在几毫秒内关断	惯性大不易停止
负载功率因数	自动调整	需要切换电容器
效 率	90~95%	80~85%
空 载 损 耗	0.5~1%	5~10%
噪 音 及 振 动	小	大
重 量	为机组的40~50%	重
占 地 面 积	小	大
搬 移	容 易	困难
安 装 工 程	容 易	比较困难
维 修	方便，无磨损件	有磨损件

可控硅中频装置的应用

由于可控硅中频装置具有上述许多优点，因此近几年来，可控硅中频装置已广泛应用于金属感应加热如熔炼、透热、热处理、钎焊、弯管等方面。

1. 在熔炼方面的应用

国外在发展可控硅中频装置时，一开始就是用于熔炼。如 BBC 公司在 1966 年制造的第一台 750 千瓦、1000 赫可控硅中频装置即用于熔炼，平均熔化一吨铸铁的耗电量为 500 千瓦·小时左右。目前各国在化铁方面正在以感应炉代替冲天炉，以感应炉或真空感应炉来熔炼各种合金钢和特种钢。在 1970 年，据 BBC 公司介绍：在生产的电热装置中有 20% 为感应熔炼炉，其产量约为冲天炉的三倍^[32]。法国 1970 年生产的感应加热装置容量比 1966 年增长 40%，而同期电弧炉增长率仅 5%。据 1973 年工业加热报导^[33]，日本 1969 年感应炉产量为 65 年的 450%，而同期各种电炉的总产量为 1965 年的 340%，各种工业炉的总产量为 1965 年的 290%。中频感应炉与电弧炉相比，由于资源利用及劳动环境较好，正在以中频感应炉来代替 3~10 吨中小容量的电弧炉，因此日本中频感应炉的发展趋势是从过去的半吨、一吨逐步向 3~12 吨方向发展^[34]。为此，日本富士电机公司制成了 4 吨 3600 千瓦的可控硅中频熔炼炉（据 1973 年报导）。日本特种制钢公司于 1973 年安装了一台 2 吨真空感应熔炼炉，其电源采用东芝公司生产的 500 赫、900 千瓦可控硅中频装置，该装置已于 1973 年 3 月投入生产^[35]。据东芝公司预料随着可控硅的不断发展，可控硅中频装置今后将进入一个全盛时期。

一般在以坩埚式熔炼炉熔炼金属时，通常根据下式来选择最低频率：

$$f_{最低} = \frac{25 \times 10^3 \rho}{d^2} \quad (1)$$

式中 d —— 坩埚炉直径 (厘米);
 ρ —— 金属电阻率 (欧-厘米)。

由上式可知, 熔炼金属时所需要的频率与坩埚炉直径的平方成反比, 即坩埚炉直径愈大其频率愈低。一般, 国外在 2 吨以下都采用中频感应炉, 而在 10 吨以上则都采用工频感应炉。国外中频感应熔炼炉的频率与功率的关系见表 3。

表 3

功率 (千瓦)	0.5	1	2	4	10
16					
25					
30					
50					
75					
100					
150					
200					
250					
300					
350					
400					
500					
600					
800					
1000					
1600					
2000					
3000					
4000					
6000					

国外不少公司在制造中频装置的同时, 都完成了中频感应熔炼炉的系列。如瑞士 BBC 公司中频感应熔炼炉的系列从 6 公斤到 8 吨。西德的 AEG 公司完成了从 5~10000 公斤的中频感应炉系列, 日本神钢电机公司亦参照 AEG 公司的系列, 见表 4^[89]。

表 4 AEG 公司中频感应炉系列

型 式	容 量(公斤)	所需功率(千瓦)	所需频率(千赫)
MTL	5~25	10~30	5~10
MTH	50~150	50~200	2~4
MTM	50~150	50~200	2
MTK	100~500	100~700	1~2
MTG	630~10000	400~3000	0.3~0.6

HERAEUS 公司完成了从 25~5000 公斤的真空感应熔炼炉系列^[87], 见表 5。

表 5

熔炼量(公斤)	单位功率(千瓦/公斤)	所需中频功率(千瓦)	所需频率(千赫)	电 压 (伏)
25	1.2	30	10	125~250
50	1.0	50	4	250
100	0.75	75	4	250
250	0.70	175	2	250
500	0.60	300	2	250~500
1000	0.45	450	0.5~1	500~600
2000	0.33	660	0.5~1	500~600
5000	0.3	1500	0.5~1	500~600

可控硅中频装置输出功率和熔炼特性见表 6。

表 6

功 率 (千瓦)	容 量 (公斤)	熔 炼 钢		熔 炼 铸 铁	
		熔炼时间(分)	耗电量(千瓦·小时/吨)	熔炼时间(分)	耗电量(千瓦·小时/吨)
300	500	75	700	70	620
	750	120	740	105	640
	1000	170	800	150	680
600	1000	70	640	60	560
	1500	105	670	90	570
	2000	160	720	130	600
900	1500	65	610	60	530
	2000	90	640	80	540
	3000	150	690	120	570
1200	2000	65	600	55	520
	3000	125	640	90	540
	5000	180	680	150	560
1500	2000	50	580	45	510
	3000	80	600	70	530
	5000	140	640	120	550
1800	3000	65	580	55	510
	5000	105	600	95	520
	8000	180	640	160	540

熔炼特性是按钢水温度 1600℃, 取铸铁温度为 1450℃, 均不包括保温及出钢出铁的时间在内。

从表中可以看出, 随着感应炉功率的提高, 熔炼时的单位耗电量均有所降低, 但功率进一步增加, 其单位耗电量降低不大, 因此当前国外中频感应熔炼炉一般都在 8 吨以下, 功率都在 500~3000 千瓦, 而频率在 500~1000 赫左右。

由于中频炉熔炼起动时不需开炉块, 同时涡流搅拌小, 熔炼的质量比较好, 因此国外在熔炼各种合金钢, 贵重金属, 有色金属及各种特种钢材时都利用中频感应炉。据 BBC 公司介绍, 一台 1 吨中频炉相当于一台 3.2 吨的工频炉, 其经济比较见表 7^[88], 从表可知中频炉的熔炼费用比工频炉略低一些。

表7 一台1吨中频炉和一台3.2吨工频炉的经济比较

熔炼品	GGG
浇铸温度	1550℃
每炉熔融金属量	8吨
操作	一班制

炉 别	中 频	工 频
炉子容量	1000公斤	3200公斤
频 率	500赫	50赫
炉 子 数	1 台	1 台
变频器功率	970千瓦	—
炉子功率	920千瓦	890千瓦
装置费用(包括建筑及安装费用)	约465000马克	约400000马克
年 产 量	2000吨	2000吨
起动钢锭量(每日炉子容量的20%)	—	150吨
每年需熔炼金属量	2000吨	2150吨
A. 每年折旧费(为装置费用投资的20%) 年产量为2000吨的单位投资	93000马克 46.50马克/吨	80000马克 40马克/吨
B. 运行费用		
1. 电能		
连续运行时消耗的电能	610千瓦-小时/吨	570千瓦-小时/吨
电能消耗年平均值 ⁽¹⁾	695千瓦-小时/吨	750千瓦-小时/吨
单位电能费用(以每千瓦小时10分尼计算)	69.50马克/吨	75马克/吨
2. 工资费用		
操作人员数	2 人	2 人
每天工作时间 ⁽²⁾	8 小时	10小时
年工资费用, 包括辅助费用 (工资1马克/小时)	48000马克	60000马克
单位工资费用	24马克/吨	30马克/吨
3. 其它费用(冷却水、薪金、试验部分、耐火材料、辅助电流等)	10马克/吨	10马克/吨
总运行费用	103.50马克/吨	115马克/吨
总费用(A项 + B项)	150马克/吨	155马克/吨

注: (1) 能量消耗的年平均值包括停歇时间炉子的冷却、保温以及打开炉盖时的损耗在内。

(2) 工频炉要延长2小时这一缺点是由于工频炉起动时间大大延长的缘故(起动时间: 工频炉3.5小时, 中频炉1.5小时)。

2. 在透热方面的应用

国外在锻坯透热及钢管、钢板再加热方面亦很早就采用可控硅中频装置。如法国来克西(LEXY)钢管制造厂在1967年就安装了西门子公司生产的12台可控硅中频装置, 用来加热直径为172毫米、管壁4毫米的钢管, 最高加热温度为1100℃, 生产能力为30吨/时^[89]。

又如 1970 年报导^[5] 一台 1760 千瓦、2 千赫的可控硅中频电源, 一小时能加热 4.4 吨 $80 \times 250 \times 900$ (毫米) 和 $40 \times 200 \times 900$ (毫米) 的合金钢扁钢坯。在该文中又介绍了 3 千赫、1200 千瓦的锻造连杆用加热装置及 50/3000 赫双频加热装置。据 1974 年报导富士电子工业公司生产了一种加热棒料的可控硅中频装置, 其频率为 2 千赫、功率为 2000 千瓦。由于中频感应加热装置加热时间短, 由氧化皮造成的重量损失少于 0.5%, 废品率少。而采用煤气炉或重油炉加热时其氧化皮损失多达 2.5%。同时由于没有污染、劳动条件好, 因此日、英、美、西德等国建议在锻造和钢板透热方面, 以中频感应炉代替燃烧炉。中频感应加热炉与燃烧式加热炉的技术经济指标比较见表 8^[5]。

表 8 中频感应加热炉和燃烧式加热炉的比较

计算根据:	产 量	4850 吨/年
	操作时间	4000 小时/年 (以二班计算)
	工作率	80%
	单位时间产量	$4850/4000 \times 0.8 = 1.51$ 吨/小时
	燃烧炉升温时间	400 小时/年 (全部浪费)
	在燃烧炉中保温时间	2400 小时/年 (其中 40% 浪费)
	材料费	700 马克/吨
	制品成本	1600 马克/吨
	煤气	4 兆卡/米 ³
	重油	10 兆卡/公斤
	每年折旧 10%	

	感 应 加 热		煤 气 炉		重 油 炉	
1. 燃料消费量 (加热到 1200°C) 兆卡/吨	375.0		700.0		800.0	
燃料费单价 分尼/兆卡	8.1		1.6		1.1	
工作直接加热费 马克/吨		30.4		11.2		8.8
炉子升温、保温的能量 兆卡/年		—	1454×10^3		1673×10^3	
炉子升温、保温费用 马克/吨		—		4.8		3.8
总加热费用 (包括升温、保温) 马克/吨		30.4		16.0		12.6
2. 设备费 马克	350000		175000		175000	
十年偿还, 每吨折旧费 马克/吨		7.2		3.6		3.6
3. 氧化皮损失 (占处理量的%) 马克/吨	0.5	3.5	2.5	17.5	2.5	17.5
4. 次品 (占总产量的%) 马克/吨	0.5	8.0	2.0	32.00	2.0	32.00
总费用 马克/吨		49.1		69.1		65.7

从表中可以看出, 虽然中频感应加热设备及工件直接加热费较燃烧炉贵得多, 但由于它不需升温, 特别由于次品及氧化皮损失大大减少, 因此中频感应加热炉的成本分别比煤气炉或重油炉加热降低 40% 或 34% 左右。

在感应加热时, 由于高频集肤效应, 感应电流的密度从表面到内部逐步减少, 同样的材料, 若频率越高, 减少得越快, 其渗透深度 δ 可按下式近似计算出来。

$$\delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \text{ 厘米} \quad (2)$$

式中 μ ——工件的导磁率;

ρ ——工件的体积电阻率 (欧-厘米)。

不同频率时的渗透深度见图 1 及表 9^[40]。

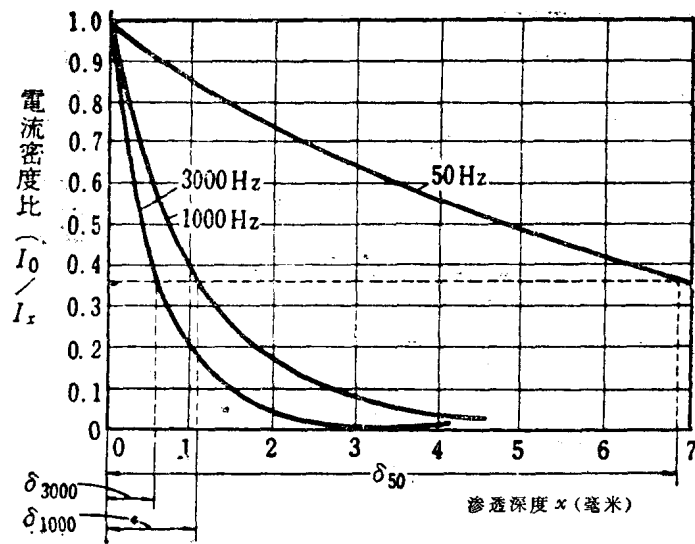


图 1 感应加热时电流分布
 I_0 —表面的电流密度； I_x — x 点的电流密度

表 9 电流渗透深度 (厘米)

		频 率 (赫)			
		50/60	1000	3000	10000
钢	常 温	0.3	0.08	0.04	0.02
	1200°C	8.1	1.7	1.05	0.58
	熔融时	9.0	2.2	1.3	0.7
18-8 不锈钢	常 温	5.7	1.39	0.8	0.44
	1200°C	8.3	1.85	1.06	0.59
	熔融时	9.1	2.22	1.31	0.71

对于圆柱形的小钢坯、扁钢坯、钢板等在采用感应加热时其合适频率见表 10^[40]。

表10 加热圆柱形钢坯、扁钢坯、钢板时 (1250°C左右) 的合适频率

频 率 (赫)	钢 坯 直 径 (毫米)	扁 钢 坯 及 钢 板 厚 度 (毫米)
50/60	200~600	150~600
500	75~200	50~200
1000	55~150	35~150
3000	30~80	20~80
10000	16~45	10~45
400×10^3	<8	<7

3. 在热处理方面的应用

国外不少钢管生产厂为了提高钢管的机械性能，通常采用淬火和回火等工艺，其设备采用连续感应加热装置。感应加热装置的频率则由于钢管的直径及管壁厚薄而不同。一般，当钢管直径一定时，管壁愈薄，所需频率愈高；而当管壁一定时，钢管直径愈小，感应加热的

频率就愈高。日本有的厂认为：对于直径为 508 毫米，管壁在 5.08 毫米以上的大直径管采用工频加热较好；对于直径为 100~125 毫米，管壁为 6.25 毫米的钢管，采用 150/180~500 赫较合适；对于 50 毫米以上的小直径管采用 1000 赫；直径在 50 毫米以下，管壁小于 3 毫米，则根据管子直径及管壁的厚薄，采用 3 千赫或 10 千赫的中频电源^{〔41〕}。

而 BBC 公司认为在热处理大直径管子时采用频率从 500~1000 赫的中频装置。管端的热处理，则根据管端的大小及生产率采用频率从 1000~4000 赫、功率在 300~1500 千瓦的中频装置^{〔42〕}。

对于主轴的热处理和齿轮的淬火，则根据不同的淬硬层深度采用不同的频率见表 11 和表 12。

表11 主轴热处理时的淬硬层深度与频率的关系

淬硬层深度(毫米)	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	10
合适频率(千赫)	60	25	15	8	4	1.5	0.5

表12 淬火齿轮时频率与淬硬层深度的关系

频 率 (千赫)	2.5	8	250
淬硬层深度(毫米)	2.4~10	1.3~5.5	0.7~0.9

齿轮整齿淬火时加热电源的频率按下式选择：

$$f = \frac{6 \times 10^5}{m^2} \text{ 赫} \quad (3)$$

式中 m —— 齿轮模数。

在淬火时，如使用的频率比合适频率高，则齿顶、齿表面的淬硬层深，而齿底的淬硬层浅；若频率选得太低，则与此相反。因此为了提高齿轮淬火的质量采用双频淬火（例如 10 千赫和 400 千赫），在齿底采用低的频率，而在齿顶及表面采用高的频率。而对于内燃机车车辆上用的大型齿轮，就需要采用 3~10 千赫、500 千瓦以上的大容量中频电源对这种大齿轮进行一次淬火^{〔43〕}。

最近几年国外有些工厂，除了制造可控硅中频装置外，还制造了供热处理用的自动感应热处理装置，这样充分利用了可控硅中频装置的优越性，大大提高了劳动生产率，实现了自动化生产。如美国在 1973 年由感应设备公司生产了一台自动感应热处理机（从额定负载到空载），该机由传动系统、装卸料装置、淬冷系统及电源等部份组成，中频电源采用 9600 赫、100 千瓦可控硅变频器，每小时可热处理球形螺栓 2250 只^{〔44〕}。同年 8 月又报导该公司制造了自动感应热处理系统，它由两台机器组成，每台都有各自的电源及装卸料装置，可独立亦可合并运行，该装置的电源采用 600 千瓦、3000 赫可控硅中频装置。它可以热处理长为 7~14 吋（177.8~355.6 毫米）、直径为 1½~3 吋（38.1~76.2 毫米）的圆柱形棒料，又可以热处理长为 6 吋到 20 呎（152.4~6096 毫米）、直径为 1~4 吋（25.4~101.6 毫米）的任何棒料^{〔45〕}。

4. 在焊接方面的应用

由于感应焊接速度快，对周围的热影响小，不必用酸洗来清洗氧化皮，因此国外正在不断采用感应加热来焊接各种金属管。如 BBC 公司报导采用 10 千赫、60 千瓦可移动的感应加热装置来焊接汽轮发电机的水内冷管子^{〔46〕}。该公司认为，用于焊接的中频装置其功率在 20

~200 千瓦、输出频率在 1~10 千赫之间, 日本有人根据公式 (2) 计算了各种金属在不同频率时的渗透深度, 见表 13^[47]。

可控硅中频装置除了在上述几方面得到应用外, 另外在钢管涂敷塑料、弯管等方面亦得到了应用。今后随着可控硅制造工艺的不断发展以及可控硅中频装置应用经验的不断积累, 可控硅中频装置必将在各方面得到越来越广泛的应用。

表13 不同金属不同频率的渗透深度

种 类	频率(千赫)	渗透深度(毫米)					
		10	100	200	300	400	500
软钢(居里点以下)		0.18	0.059	0.042	0.034	0.030	0.027
软钢(居里点以上)		5.3	1.591	1.125	0.918	0.795	0.711
18-8 不锈钢		4.264	1.350	0.954	0.779	0.675	0.604
铝		0.826	0.261	0.185	0.151	0.131	0.117
铜		0.656	0.207	0.147	0.120	0.104	0.093
七三黄铜		1.252	0.396	0.280	0.229	0.198	0.177

参 考 文 献

- [1] C. A. Sabbah, "Series-parallel type static converters" Gen. Elec-Rev. №5, №10, №12, 1931.
- [2] J. L. Boyer, "Inverters" in Industrial Electronics Reference Book, New York, Wiley, London, Chapman and Hall 1948.
- [3] Brown Boveri Review, Vol. 53, №10, 1966, P693~701.
- [4] AEG-Mitteilungen, 1966年7月.
- [5] Elektrowärme International, Vol. 28, №4, 1970, P213~219.
- [6] Brown Boveri Review, Vol. 60, №1, 1973, P30~34.
- [7] Elektrowärme International, Vol. 30, №1, 1972, P25~29.
- [8] Giesserei Praxis, 19, 10月, 1970, P297~305.
- [9] 三菱电机技报, Vol. 48, №1, 1974, P63.
- [10] 东芝评论, Vol. 25, №12, 1970, P1530~1536.
- [11] 东芝评论, Vol. 26, №6, 1971, P797~798.
- [12] 工业加热, Vol. 10, №2, 1973.
- [13] 铸锻造, №11, 1973, P90.
- [14] 特殊钢, Vol. 22, №7, 1973.
- [15] IEEE Transaction IECI, Vol. IECI-17, №4, 1970, P297~312.
- [16] IEEE Transaction IGA, Vol. IGA-5, №6, 1969, P321~326.
- [17] Industrial Process Heating, Vol. 12, №8, 1972, P19~22.
- [18] Электричество, №1, 1971, P60~62.
- [19] Известия высших учебных заведений энергетика, №12, 1970, P32~37.
- [20] 铸锻造, №1, 1974, B2.
- [21] Elektrowärme International, Vol. 31, №6, 1973.
- [22] «ТР. уфим. авиац. ин-та», вып. 48, сб. 3, 1973.

- [23] 神钢电机, Vol.18, №2, 1973, P34~39.
- [24] 特许公报, 昭44—961.
- [25] Industrial Process Heating, Vol. 12, 1972, P10.
- [26] ETZ-A, Jahrg 92, Heft 2, 1971, P108~113.
- [27] Electrical Review, Vol. 184, №3, 1967, P180~183.
- [28] Giesserei, Jahrg59, Heft 11, 1972, P365~369.
- [29] Elektrowärme International, Vol. 31, №2, 1973.
- [30] Electrical Time, 1972, 7月.
- [31] 1973年英国工业展览会技术座谈资料.
- [32] Elektrowärme International, Vol. 28, №5, 1970, P566~571.
- [33] 工业加热, Vol. 10, №1, 1973, P20~25.
- [34] 特殊钢, Vol. 22, 1973, 11月, P46~50.
- [35] 特殊钢, Vol. 22, 1973, 10月, P65~67.
- [36] 神钢电机, Vol. 17, №2, 1972, P2~6.
- [37] HERAEUS公司中频感应炉样本.
- [38] Elektrowärme International, Vol. 30, №5, 1972, P282~285.
- [39] Siemens Zeitschrift, 41, 1967, 7月, P626~634.
- [40] 工业加热, Vol. 8, №1, 1971, P17~26.
- [41] 工业加热, Vol. 9, №5, 1972, P20~25.
- [42] Brown Boveri Review, Vol. 59, №6, 1972, P288~293.
- [43] 钢の热处理, P258~259.
- [44] Industrial Heating, 1973, 4月, P666~667.
- [45] Industrial Heating, 1973, 8月, P1470~1475.
- [46] Brown Boveri Review, Vol. 59, №5, 1972, P231~235.
- [47] 溶接技术, №3, 1973, P63~70.
- [48] 1974年法国工业展览会感应加热用固体逆变器样本.

(上海市电动工具研究所编写)