

超大型井式气体渗碳炉的研制和应用

湛宪宪¹,汪正兵²,湛莉莉¹,李更生²,陈德义¹,刘臻²,孙一凡¹

(1. 爱协林工业炉工程(北京)有限公司,北京 102200;2. 南京高精齿轮股份有限公司,江苏 南京 210012)

摘要:对超大型井式渗碳炉设计制造中的难点,如温度均匀性、碳势均匀性、大型炉内结构件的热畸变、炉温及碳势的精确控制等进行了分析,并提出了一系列的技术措施和设计方案。通过试验和生产实践取得了成功,并获得较好的经济效益。

关键词:超大型渗碳炉;炉温均匀性;碳势均匀性;热畸变;控制系统

中图分类号:TG155.1 **文献标识码:**A **文章编号:**0254-6051(2003)11-0052-05

Development and Application of the Huge Pit Furnace for Gas Carburizing

ZHAN Xian-xian¹, WANG Zheng-bing², ZHAN Li-li¹, LI Geng-sheng², CHEN De-yi¹, LIU Zhen², SUN Yi-fan¹

(1. Aichelin Industrial Furnaces Engineering(Beijing)Co. Ltd., Beijing 102200, China;

2. Nanjing High Speed & Accurate Gear Co. Ltd., Nanjing Jiangshu 210012, China)

Abstract: The difficulty in designing and making a huge pit furnace, such as the uniformity of temperature and carbon potential, the heating distortion of the framework and the control of the temperature and the carbon potential in the furnace etc., were analyzed, and a series of the technical measures and the design scheme were put forward. It was proved to be success in test and manufacture, and a good economy benefit was obtained.

Key words: huge carburizing pit furnace; uniformity of temperature; uniformity of carbon potential; heating distortion; control system

大型重载齿轮在冶金、矿山、建材、起重、运输等

重型机械传动中占有重要的地位。硬齿面大型齿轮可以减小传动所需功率、增大承载能力、降低成本、提高使用寿命。气体渗碳淬火是实现齿面硬化的主要方法,大型井式渗碳炉是大型重载齿轮、盘类、筒状工件的渗碳及碳氮共渗的关键设备。

目前国内的井式渗碳炉结构及其控制技术大多

作者简介:湛宪宪(1954.8—),男,湖北黄梅人,工程师,长期从事热处理设备设计工作,曾获省、部级科技进步奖多项,发表论文4篇。联系电话:010-60774342, 0510-5342926, 13814203627

收稿日期:2003-01-22

stresses reach 640 MPa if the same probe are quenched in water).

(4) The combination of INC-PHATRAN and ABAQUS/Standard softwares are very valuable for the determination of residual stresses and distortion in heat treatment of steels pieces having arbitrary geometries.

Acknowledgements: The authors thank the support given by Universidad de Buenos Aires, Argentina, through the Grant UBACYT TI035(1998-2000).

References:

- [1] G. Sánchez Sarmiento Y C. Barragán, "INC-PHATRAN: A computer model for the simulation of heat-treating processes, User manual", SOFT-ING Consultores, Abril de 1997.
- [2] G. Sánchez Sarmiento, C. Barragán y J. Vega: "Prediction hardness distribution after heat treating processes of steels by finite element simulation combined with the SAE Standard J406". Milam et al, Eds: HEAT TREATING-Proceedings of the 17th Heat Treat EX-PO & Technical Conference, ASM-Heat Treating Society, Indianapolis, USA, 15 al 18 de septiembre de 1997, pp 347-354.
- [3] G. Sánchez Sarmiento, A. Gastón y J. Vega: "Inverse heat conduction coupled with phase transformation problems in heat treating process". E. Oñate and S. R. Idelsohn, Eds.: COMPUTATIONAL MECHANICS-New Trends and Applications. CIMNE, Barcelona, España, 1998. CD-Book. Part VI, Section 1, Paper 16.
- [4] G. Sánchez Sarmiento, M. A. Morelli y J. Vega: "Improvements to the SAE J406 Hardenability Predictor" R. Colás et al, Eds.: Proceedings of the 1st International Automotive Heat Treating Conference, ASM International, Puerto Vallarta, México, 13 al 15 de julio de 1998, pp 401-414.
- [5] G. Sánchez Sarmiento, J. Vega, M. A. Morelli, J. C. Cuyás. A. I. Ledesma y M. J. A. Solari: "Predicting hardness of stainless steels in tempering cycles with variable temperature". Proceedings of the 19th ASM Heat Treat Expo & Technical Conference, Cincinnati, OH, Nov. 1-4, 1999.
- [6] G. Sánchez Sarmiento y J. Vega: "Calculation of the hardness space distribution in the as quenched condition of a medium hardening tool steel". 1st International Conference on Thermal Process Modeling and Computer Simulation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, 28 al 30 de marzo de 2000.
- [7] Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc: "ABAQUS/Standard. User's Manual". Versión 6.2. 2001.

处于先进国家 20 世纪 80 年代的水平,其最大有效工作直径为 $\phi 2800\text{mm}$ 。随着我国经济的发展,现有的井式气体渗碳炉已满足不了特大型、高质量渗碳件的要求。研制高水平的超大型井式气体渗碳炉对我国重型机械制造业发展有着重要意义。图 1 为 $\phi 4000\text{mm} \times 2000\text{mm}$ 井式气体渗碳炉的外貌图,它是国际上罕见的特大井式炉。为解决其炉内结构件的热畸变、炉温均匀性和碳势的高精度控制等问题,在设计和制造上进行了大量的试验研究,并取得了良好的效果。表 1 为该设备的主要技术性能指标。

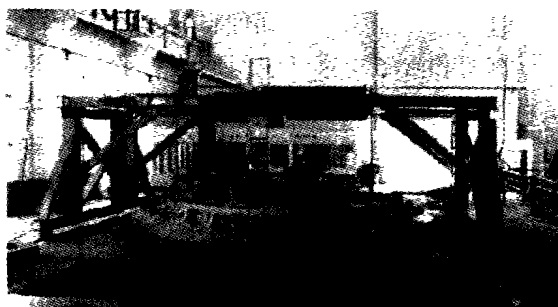


图 1 $\phi 4000\text{mm} \times 2000\text{mm}$ 超大型井式渗碳炉外貌图

Fig.1 Appearance of the huge carburizing pit furnace with the size of $\phi 4000\text{mm} \times 2000\text{mm}$

表 1 $\phi 4000\text{mm} \times 2000\text{mm}$ 大型井式炉的主要技术性能指标
Table 1 Specification of the equipment with the size of $\phi 4000\text{mm} \times 2000\text{mm}$

项目	技术指标	项目	技术指标
加热功率	900kW	渗碳层深范围	1.5mm~6.5mm
有效工作区尺寸	$\phi 4000\text{mm} \times 2000\text{mm}$	渗碳层深偏差	$\leq \pm 10\%$
炉温均匀度	$\leq \pm 7^\circ\text{C}$ (800~900) $^\circ\text{C}$	淬火硬度	(58~62)HRC (低温回火后)
控温精度	$\leq \pm 1^\circ\text{C}$	硬度偏差	45HV/0.1mm
碳势控制范围	0.6%~1.5%	空炉升温时间	$\leq 5\text{h}$
碳势控制精度	$\leq \pm 0.02\%$	最大装载量	40t
碳势均匀度	$\leq \pm 0.05\%$		

1 研制重点及技术措施

(1) 炉内钢结构件的设计 在长期高温下,井式气体渗碳炉炉内钢结构件的热变形是不可避免的,如何将热变形控制在不影响设备正常使用状态,是特大型井式炉设计的关键问题之一。我们对结构作用力、热应力变形等问题进行分析研究,并采用柔性联接和非刚性设计、悬浮吊挂安装等措施,较好地解决了这一难题。

(2) 控制系统自动化 渗碳工艺的正常运行和渗碳产品的质量,依赖于碳势控制的精确性、稳定性和可靠性。温度控制的精度和炉温均匀度的水平将严重影响碳势控制的水平。为此对炉内结构件和炉

气循环系统进行了优化设计,对温度控制和碳势控制进行了高水平的系统配置,并采用高智能自动化控制技术,构成一套先进的计算机控制系统,见图 2。

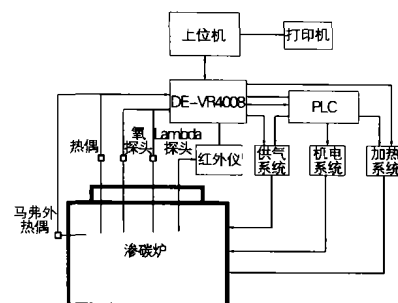


图 2 井式渗碳炉控制系统方框图

Fig.2 Flow chart of the control system for the carburizing pit furnace

控制系统由 PC 机、高智能自动化仪表 DE-VR4008、PLC 程序控制器等组成,通过通讯进行实时信息交换和控制。PC 机作为上位主控制站,可进行渗碳工艺计算机模拟、工艺程序优化设计、渗碳工艺动态控制以及对 DE-VR4008 表的指令和监控。DE-VR4008 表作为下位控制台,负责对各种温度、碳势、PLC 的信号进行处和对工艺过程的控制。PLC 按 DE-VR4008 表的指令,负责全部工艺程序的执行和过程信息的反馈。

(3) 炉气的流动和循环 在直径与高度之比大于 1 且直径 $> 2\text{m}$ 的大型井式炉中,为保证炉温均匀性,炉气流动和循环系统的优化设计尤为重要。首先,我们根据热流场动力学数值模拟结果,在 $\phi 4000\text{mm} \times 2000\text{mm}$ 渗碳炉上配置了三台高效、大风量循环风机,各台风机所循环的炉气顺序均匀交换,三台强循环风机均采取 5 档变频调速,马弗内的温度信号经 DE-VR4008 温度碳势控制仪和 PLC 程序控制器发出指令,自动控制其换档调速。其次,使马弗和导风筒间流动的炉气在内外壁上呈紊流状态,以增强对流换热;优化的导风板布置使大容积的有效工作区内炉气呈等速流动。最后,根据炉内温度场的分布及计算,合理地进行了加热功率的匹配和布置。以上措施对改善炉温均匀性、碳势均匀性有着重要作用。

为保证炉气碳势的均匀性,除了炉气的均匀流动外,还在大平面上均布了多通路供气口,并采取时序供气控制方式进行供气。

(4) 炉温控制 一般井式渗碳炉只对马弗外加热区进行控温,而马弗内工件与马弗外形成很大的温差。大型井式渗碳炉的这种温差更大,它将严重

影响炉内实际碳势和马弗内炉温的均匀性、稳定性,并极易出现加热元件的超温。我们采用马弗内温度主控和马弗外加热辅控及监控等三种温度控制装置,组成一套完整可靠且互相联锁的控温系统。马弗内主控温度给工件加热控制和渗碳碳势计算及控制提供了准确的基本参数,马弗外加热辅控通过程序设定并与马弗内主控的温差范围建立联锁关系,监控装置对马弗内主控和马弗外各加热区实行监控联锁,以确保炉温的准确和稳定。炉温采用 PID 模拟量输出可控硅过零触发调节控制,配置合理的 PID 调节参数,以实现超大型气体渗碳炉炉温的惯性抑制以及精确控制。实践证明:这种温度控制模式,对超大型气体渗碳炉的温度控制和改善炉温均匀性发挥了重要作用。

(5) 炉气控制 超大型井式渗碳炉装炉工件达数十吨,渗层深达 6.5mm,渗碳时间长达 100 多个小时,炉子运行时必须确保工件质量和长周期渗碳过程中的万无一失。我们配置了氧探头、Lambda 探头和 CO₂、CO 红外线分析仪三套碳势控制系统。通过切换,可方便的实现氧探头、氧探头 + CO、Lambda 探头、Lambda 探头 + CO、CO₂、CO₂ + CO 六种控制方式。渗碳富化气的供给量通过比例阀、计量泵进行调节,采用高精度智能化仪表、合理的 PID 调节参数和碳势动态趋势跟踪控制技术。从而保证了大型深层渗碳工件在工艺全过程中碳势得到准确、稳定、可靠的控制。

采用德国 Mesa 公司新推出的 Lambda 探头,其传感器安装在炉外,通过恒温测量室对炉气进行氧分压测定。这种探头的优点是使用寿命长、不需参比气和吹扫气、运行稳定可靠。

(6) 其它系统控制 供气、水系统包括:安全氮气、吹扫氮气、工艺氮气、甲醇、异丙醇、氧探头参比和吹扫气、碳势调节用空气、冷却水等的流量和压力调节、控制和联锁报警装置。

机电系统包括:循环风机、快冷供风和排风风机、炉盖升降和平移机构等的控制调节和联锁报警装置。

为保证设备的安全可靠运行,全部机电、炉温、碳势、供气、供水、压力系统的控制互相联锁,各项功能及动作均设有监控、超越控制、安全控制和报警。

(7) 其它 配有对热处理工艺过程控制的程序控制器、可靠的 PLC 程序自始至终协调炉子、供气、炉温、碳势控制及其它设备的正常运行。

配置德国 Demig 公司生产的 DE-VR4008 温度碳势控制仪作二次仪表,该仪表集温度控制和碳势控制于一体,具有很高的控制精度和强大的功能。包括:渗碳等工艺程序的编制、渗碳气氛的选择和供给的设定、循环风机变频调速换档温度的设定、各类 PID 参数的设置、温度和碳势补偿修正、炉温和碳势动态趋势的跟踪、多种碳势控制方式的配置和选择、各种输入和输出状态显示、全部信号和数据的数字或曲线图表显示、短期的记录和查询、窗口和菜单的人机对话界面等,对渗碳等工艺提供较高的控制精度、迅速的时间响应、高度的可靠性和方便的可操作性。

计算机和渗碳专家系统组成强大的多功能上位控制系统,它包括 DE-VR4008 的全部功能,可进行各类工艺程序的编制、渗碳工艺仿真设计、工艺过程的动态控制、工艺过程的实时记录和长期存贮、打印等。

2 试验结果

2.1 炉温、碳势、渗层深度的均匀性

为了测试炉子的均匀性,在炉子的上、中、下三层分别设置 15 个点,将测温热电偶、氧探头及渗碳试样布置在这 15 个位置上,具体位置见图 3,用来检测炉温及碳势的均匀度,并进一步检测炉中各处实际试样的渗碳层深和碳浓度梯度偏差。具体试验结果见表 2。

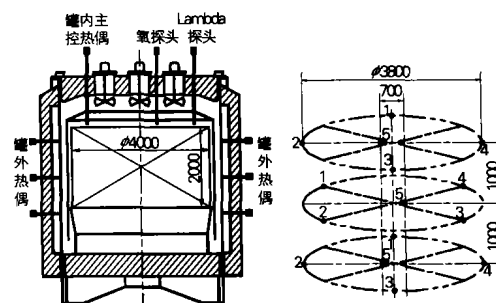


图 3 炉温和碳势控制及检测用探头及试样布置位置示意图

Fig.3 Schematic of the positions of probes and samples used for control of the temperature and carbon potential

炉温的检测方法参照了标准 GB 10066. 4—1988,表 2 中的温度数据为升温到 580℃保温 90min 时、升温到 830℃保温 120min 时、升温到 930℃保温 120min 时测得的。测试结果表明,炉温均匀度在 580℃时为 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 、在 830℃时为 $+2^{\circ}\text{C} \sim -5^{\circ}\text{C}$ 、在 930℃时为 $+5^{\circ}\text{C} \sim -6^{\circ}\text{C}$ 。在超大型炉子上炉温均匀度达到如此高的水平,说明炉子结构设计合理,控制系统配置得当。

碳势均匀度的检测方法参照了标准 JB/T 8929—1999。测量结果表明,在有效工作区内碳势

表 2 $\phi 4000\text{mm} \times 2000\text{mm}$ 大型井式炉的均匀度检测结果

Table 2 Test result of the uniform about furnace

位置			上层					中层					下层					偏差
			1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
温度 ℃	主控	580	583	577	580	583	578	579	581	580	582	577	581	582	580	581	578	-3~+3
	温度/ ℃	830	832	828	828	829	829	831	831	826	825	827	828	832	827	828	831	-5~+2
	℃	930	935	931	927	929	932	934	934	930	930	924	928	935	928	927	934	-6~+5
碳势(%)			0.84	0.88	0.84	0.85	0.87	0.84	0.86	0.86	0.82	0.87	0.88	0.85	0.86	0.85	0.86	± 0.03
渗碳层深/mm			5.0	5.2	5.0	5.0	5.1	5.0	5.1	5.1	4.9	5.1	5.2	5.0	5.1	5.0	5.0	± 0.15
			2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.3	2.3	2.3	2.4		2.3	2.4	± 0.1
表面硬度(HRC)			58.5	60.0	58.5	59.0	59.5	58.5	58.5	58.5	58.0	59.5	60.0	59.0	59.5	59.0	59.5	± 1.0

均匀度为 $\pm 0.03\%$, 这一结果进一步说明炉子结构和碳势控制系统的设计是合理的。

为检测炉中不同位置处试样的渗碳层深度, 分别做了要求不同渗层深度的两组试验, 检测方法参照标准 GB/T 9450—1988。表 2 的试验结果表明, 层深为 5.0mm 时, 各处试样的层深偏差为 $\pm 0.15\text{mm}$; 层深为 2.3mm 时, 其偏差为 $\pm 0.1\text{mm}$ 。

将渗碳层深度为 5.0mm 的试样经淬火和低温回火后进行表面硬度检测, 检测方法依照标准 JB/T 6052—1992, 表 2 中的检测结果表明, 炉中不同位置处的渗碳试样的表面硬度偏差仅为 $\pm 1.0\text{HRC}$ 。

2.2 炉温及碳势的稳定性

图 4 是 $\phi 4000\text{mm} \times 2000\text{mm}$ 超大型井式渗碳炉在工业生产条件下, 实际运行的温度和碳势的计算机记录曲线。图中曲线自上往下, 第一条为马弗外六个加热区的温度记录曲线, 六线聚合。第二条为马弗内炉温的设定曲线和运行记录曲线, 运行记录曲线与设定曲线基本重叠, 工艺运行控温精度和炉温稳定度 $\leq \pm 1^\circ\text{C}$ 。第三条为碳势的设定曲线和运行记录曲线, 运行记录曲线与设定曲线基本重合, 工艺运行碳势稳定度 $\leq \pm 0.02\%$ 。等距离的节线为氧探头吹扫记录。记录曲线进一步验证了我们的试验研究工作的成效。

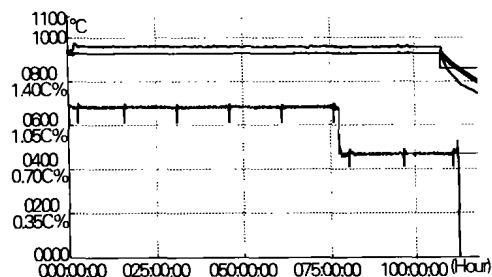


图 4 渗碳炉温、碳势记录曲线(炉号:030115)

Fig.4 Track record of the furnace temperature and carbon potential(the number of the furnace:030115)

2.3 试样的硬度分布

炉号为 030115 中的某一试样, 其渗碳层深

5.5mm, 由表面向心部打维氏硬度, 检测结果见图 5。检测结果表明: 有效层深范围内硬度最大偏差为 HV12/0.1mm, 有效层深与控制层深偏差为 +0.112mm。由于采用了合理的炉子结构和先进的控制技术, 从而可靠的保证了大型工件的渗碳产品质量。

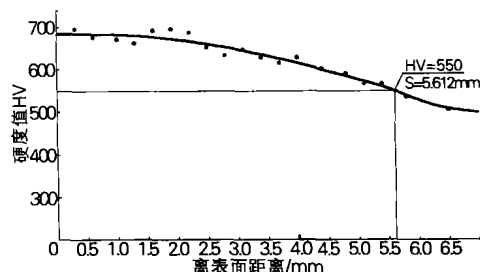


图 5 硬度梯度分布曲线

Fig.5 The curve of the hardness distribution

2.4 生产应用

采用氮-甲醇作载气, 异丙醇作富化气, 换气和安全用氮气最大耗量为 $80\text{m}^3/\text{h}$, 渗碳工艺用氮气耗量为 $9\text{m}^3/\text{h}$, 甲醇消耗量为 $8\text{L}/\text{h}$, 建立强渗碳势时异丙醇最大耗量为 $7\text{L}/\text{h}$ 。设备自 2002 年 3 月 13 日投入运行至 2002 年 12 月 26 日, 运行总炉次为 66 次, 工件渗碳 + 高温回火总重量达 833.6t , 工件淬火总重量达 447.7t 。在运行初期有两炉渗碳工件碳化物组织超标, 经球化退火处理后合格, 以后的全部渗碳淬火工件均符合各产品质量要求, 其中包括武钢二热轧 $\phi 3216\text{mm}$ 焊接齿轮, 鞍钢、唐钢、太钢、宝钢大型轧机齿轮、大型水泥磨齿轮等的渗碳淬火, 最大渗碳有效硬化层深达 7.5mm, 单件最重齿轮达 30t, 最大一次渗碳装炉量达 65t, 产品质量达到了德国 SMS、英国 VAI、日本三菱等的标准要求。

3 结论

本试验成功地解决了超大型井式渗碳炉的炉温均匀性、碳势均匀性、炉温、碳势自动控制和超大型炉内结构件的热变形等问题。所生产的 $\phi 4000\text{mm} \times$

石墨电极的研究与实践

瞿 翌¹, 瞿国瑞², 胡冠昱¹

(1. 长沙大学 电子技术与应用物理系, 湖南 长沙 410003; 2. 长沙机床厂, 湖南 长沙 410009)

摘要:介绍了石墨材料的有关性能、石墨组合电极的结构形式和其在生产现场中的应用情况及注意事项, 并将石墨组合电极的性能特点与传统的钢质电极进行了对比, 从而达到推广应用的目的。研制了与以往启动装置完全不同的石墨启动电极, 为盐浴启动技术的发展, 提供了新的途径。

关键词:盐浴炉; 石墨电极; 熔盐; 熔损; 启动技术

中图分类号: TU155.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0254-6051(2003)11-0056-04

Research and Practice on the Graphite Electrode

QU Zhao¹, QU Guo-rui², HU Guan-yu¹

(1. Dept. of Electronics Technology and Application Physics, Changsha University, Changsha Hu'nan 410003, China; 2. Changsha Machine Tool Factory, Changsha Hu'nan 410009, China)

Abstract: The performance of graphite, the structure of the combinatory graphite electrode, its application in the salt-bath furnace and the notices in practice were introduced. A comparison between the combinatory graphite electrode and the traditional steel electrode was made. A start-up device with graphite electrode different from the traditional one provides a new approach for the development of the start-up technique in the salt-bath furnace.

Key words: salt-bath furnace; graphite electrode; melt salt; corrosion; start-up technique

电极是盐浴炉(简称盐炉)的核心部件, 盐炉是热处理中结构简单、使用维修方便、投资及维护费用少的一种加热设备, 有时也用于焊接。为了克服电极寿命短的弊端, 经过几年的摸索与实践, 研究成功了新型的“石墨组合电极”, 其寿命约为传统钢质电极的 10 倍。下面对这种电极作全面的介绍。

1 用石墨电极的依据

石墨具有如下特点:

(1) 耐高温性能好 石墨随温度的升高, 强度不会下降, 反而有所增加, 石墨在(800~1300)℃高温段工作, 能满足电极强度的需要。

(2) 稳定性能好 石墨在急冷急热条件下服役(如盐炉频繁启动与停炉), 不易因产生裂纹而断裂。

(3) 导电性能好 石墨随温度的升高, 导电性能也提高, 在高温段服役, 本身耗能少, 有利于节能。

(4) 导热性能特殊 在盐炉工作温度范围(800~1300)℃, 石墨的导热性能下降, 有利于炉子保温性能的提高。

(5) 化学稳定性好 石墨是碳最稳定的一种变体, 在(800~1300)℃范围, 石墨抗熔盐腐蚀能力强, 故石墨电极耐用, 寿命长^[1]。

2 石墨组合电极

在研究可调式石墨电极的基础上, 为解决可调式存在的问题, 研制了新型的石墨组合电极。将石墨组合电极分为单相两极和三相三极两种类型。

2.1 单相两极石墨组合电极

单相两极石墨组合电极如图 1 所示。

作者简介: 瞿 翌(1964—), 男, 湖南醴陵人, 副教授, 主要从事电子技术与应用, 研究领域为工业炉技术, 发表论文 30 余篇。联系电话: 0731-4483336 E-Mail: yuya@hncs.cnuninet.net
收稿日期: 2003-05-16

2000mm 井式渗碳炉各项技术指标达到世界先进水平, 满足了武钢、太钢、宝钢等多项国家重点工程的急需, 为亚洲地区重型机械行业提供一套优质、超大型、高技术水平的渗碳设备。

参考文献:

- [1] 阮 冬, 等. 特大型气体渗碳炉的流场动力学计算机模拟[J]. 金属热处理, 1999, 24(1): 37-40.
- [2] 陈汉平. 计算流体力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [3] 童钧耕, 等. 圆筒形井式渗碳炉炉内流场的数值模拟[J]. 热加工

工艺, 2001(3): 59-63.

- [4] 机械工程学会热处理专业分会《热处理手册》编委会. 热处理手册(第 3 版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001. 6: 第 3 卷(3), 第 4 卷(2)、(5)、(6).
- [5] 凌国平, 等. 气体渗碳动力学研究[J]. 金属热处理, 2000, 25(2): 36-39.
- [6] 刘兴江, 等. 井式炉炉壁砌体的优化设计[J]. 金属热处理, 2002, 27(3): 52-54.
- [7] 王振清, 等. 炉内气氛及计算机测控应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995.