

国产高温梯度单晶炉

北京航空材料研究所

郎业芳

介绍了高温梯度单晶炉的设计要点和主体结构以及国产单晶炉与国外几种工业型单晶炉主要性能比较。

Domestic Single Crystal Furnace with a High Temperature Gradient

Lang Yefang

(Beijing Institute of Aeronautical Materials)

Design highlight and main structure of domestic single crystal furnace with high temperature gradient is introduced and compared with several commercial single crystal furnaces abroad.

国产高温梯度单晶炉是由北京航空材料研究所和绵州真空设备厂于1993年共同研制成功的产品。该产品突破两区加热、辐射挡板、冷却水套等科学结构设计和制造技术;计算机实时数据采集和处理,用于热分析工艺试验,在工业型单晶炉上建立集分析研究和自动控制于一体的微机系统,在计算机领域中是一个创新。

根据91炉的测试和工艺,其中包括15炉温度场测试、65炉单晶试板、11炉单晶叶片测试,所获得的400根单晶性能试棒及单晶叶片样件的检验结果表明,由于该炉具有的高温梯度,显著地提高了单晶成功率(仅根据34炉难度较大的DD2单晶试板统计,也达到了75%以上),改善了单晶微观组织,提高了单晶叶片的性能。

该炉的研制成功,使目前国内单晶炉水平上了一个新的台阶,在国内居领先地位,其主要技术性能达到了80年代的国际先进水平。

该设备的价格明显低于国外同类产品,在航空和地面燃气涡轮工作叶片、导向叶片的科研与生产中有广泛推广价值,具有显著的社会效益和经济效益。本文介绍设备主体结构、国产单晶炉与国外几种工业型单晶炉主要性能对比。

1 设备的主体结构

国产高温梯度单晶炉主要有两区加热装置、炉体、真空系统、水冷系统、电气控制系统和微机控制系

统。

1.1 两区加热装置

(1) 加热器安装在熔炼室的底板上。加热器由两段石墨加热器组成,上、下段高度合理匹配,加热器内径 $\phi 250\text{mm}$,上、下段最大功率分别为30kW、63kW。上、下段加热器分别由30kVA、63kVA磁性调压器供电,输出电压0~35V范围内可调。上、下两区分别采用钨-铍热电偶,由SR25控温仪表实现自动控制。

(2) 辐射挡板安装在石墨加热器与水冷结晶器之间。该挡板采用复合式辐射挡板,辐射挡板的圈口尺寸在能满足型壳顺利通过的条件下越小越好,本设计为 $\phi 150\text{mm}$ 。

(3) 水冷结晶器上端支承型壳,型壳下端有孔与水冷结晶器直接接触,其结构、尺寸对炉子温度梯度有重要影响。

(4) 多圈冷却水套设在辐射挡板下部,以加快刚凝固金属的冷却,促进散热,可以提高凝固前沿的温度梯度。

两区加热装置使得加热区下部由一段加热器时的1400℃提高到1600℃以上,可大大提高铸件结晶前沿的温度梯度。

1.2 炉体

炉体由一个熔炼室和一个铸造室组成,可用大转阀将两室分开。两室炉壁均采用双层水冷炉壁结构,内壁为非磁不锈钢,外壁为普通钢组成。为使操作、维护方便,两室均设有侧门。

(1) 熔炼室，其坩埚采用翻转浇注感应熔炼，电源为可控硅变频器，额定功率100kW，频率2500Hz，工程容量8kg。引电采用同轴水冷电缆接头，炉外部分与铜汇流排连接中频电源，炉内部分连接感应线圈两端，同轴电接头用手工控制翻转。

熔炼室上方装有转塔装置，并通过阀门与熔炼室分开，转塔上的加料装置和浸入式热电偶，在打开阀门的可交替进入熔炼室进行加料测温。

(2) 铸造室与熔炼室焊成一体，并用转阀分开。铸造室设有侧门，便于型壳送入和取出。型壳放在水冷结晶器上，用升降机构送至铸造位置。

抽拉系统采用三根光杠和两根滚珠丝杠结构，由TS-2型直流调速装置控制。具有电流、电压及速度反馈，调速精度为1%。

1.3 真空系统

高真空系统由一台H-150滑阀真空泵、一台ZJ-600罗茨泵及一台ZKY-13油增扩泵组成，并配有真空气动挡板阀、盒式过滤器、真空继电器和真空测量仪表。

低真空系统由一台H-150滑阀真空泵和一台ZJ-1200罗茨泵组成，并配有真空蝶阀、盒式过滤器及真空测量仪表等。

1.4 水冷系统

炉体双层水冷壁、感应线圈、水冷结晶器及冷却水套等水冷部件分别由集水器集中供水，回水返回集水管。由循环水泵将储水池中的水传输到上集水器供给各冷却部件，回水经下集水器回到储水池，构成循环系统。在各水冷回路中装有流量继电器、压力表。当中断水和水压不足时产生音响及灯光报警。

1.5 电气控制系统

本系统由真空控制系统、中频感应熔炼系统、液压系统、型壳两区加热系统等参数的测量、控制及报警系统等组成。各系统间设有联锁保护线路，操作方便，工作可靠。

1.6 微机控制系统

(1) 微机系统硬件配制，电源为LC-系列交流稳压净化电源+UPS-500不间断电源。采用Super 386/33微机，硬盘100MB，软盘1.2MB+360KB，显示器为14英

寸彩色显示器；24针彩色打印机；A/D，D/A接口板型号为：PS-2119光隔离A/D接口板，PS-2123 8位多功能AD/DA板。系统组成框图如图1所示。

(2) 软件组成：系统软件为DOS3.3操作系统软盘；数据采集、处理及控制软盘一张，选用GW BASIC高级程序语言编制。

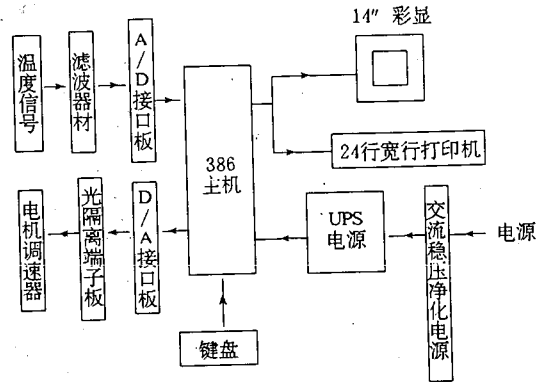


图1 微机系统组成框图

(3) 功能：①可测定凝固过程≤16个测点温度场的变化；②可用于单晶合金凝固过程的现场分析计算、能迅速获得各种热参数，并通过动态模拟图、曲线和数据等形式显示凝固过程；③可对凝固过程中重要凝固参数（温度梯度、界面位置、G/R比值）进行闭环控制试验研究，将控制试验结果自动模拟于生产过程；④可自动执行各种预定工艺方案的开环控制；⑤重新显示、打印试验结果，并可再显示凝固过程。

该微机系统集成分析和过程自动控制为一体，实用性强，有较强工艺试验分析功能，系统软件操作均采用人-机对话和菜单显示的方式进行，操作方便。在生产型单晶炉上建立这样的微机系统，在国内属首创。据目前了解资料来看，国外也未有报导。

2 国产单晶炉与国外几种工业型单晶炉重要性能对比

经现场测试和工艺试验的结果，国产单晶炉与国外单晶炉在工程容量相当的情况下，各主要性能对比列于表1。可以看出，国产高温温度梯度单晶炉各项主要性能已达到了国际80年代先进水平。

表1 国产单晶炉与国外几种工业型单晶炉主要性能比较

主要性能	国产	ISP05/DS	ISP2 III /DS	YBHK-8Π
1. 极限真空度	1.05×10^{-2} Pa 抽空3:20实测	$<5 \times 10^{-3}$ Pa (设计指标)	10^{-3} Pa (设计指标)	6.7×10^{-1} Pa (设计指标)
2. 漏气率	$5.5 \mu\text{l/s}$	$1.5 \mu\text{l/s}$ (设计指标)	$1.5 \mu\text{l/s}$ (设计指标)	$25 \mu\text{l/s}$ (设计指标)
3. 工作真空度	3×10^{-1} Pa	$<5 \times 10^{-1}$ Pa (设计指标)	$<5 \times 10^{-1}$ Pa (设计指标)	6.7×10^{-1} Pa

续表 1

主要性能	国产	ISP05/DS	ISP2 III /DS	YBHK-8II
4. 浇注方式	翻转	底注	翻转	翻转
5. 铸型加热器	二区	二区	单区	二区
内径	φ250mm	φ200~250mm	φ320mm	
高度	300mm	300mm	380mm	
6. 挡板内径	φ150mm	φ150~230mm	φ180mm	
7. 水冷套	螺旋管水冷管	单环式水冷套	单环式水冷套	
内径	φ250mm	φ250~300mm	φ275mm	
高度	60mm	15mm	15mm	
8. 工程容量	8kg	5kg	8kg	10~20kg
9. 结晶器直径	φ130mm	φ100~200mm	φ160mm	
10. 抽拉速度范围	0.5~10mm/min	0.5~20mm/min	0.25~10mm/min	1~20mm/min
11. 热偶插座	16 对	20 对	4 对	9 对
12. 温度梯度	64~94℃/cm	60~100℃/cm	20~40℃/cm	70~80℃/cm
13. 自动控制	计算机控制抽拉速度, PLC 备用	PLC 程序控制	PLC 程序控制	仪表及手动
14. 其它功能	配置计算机可进行凝固过程热分析计算, 抽拉速度自动控制, 画面显示, 测量、计算结果打印	无	无	无

参考文献

1. LEYBOLD-HERAEUS SPEIFICATION about Vavcuam Induction Furnace ISP05-DS Hanan 15. 8. 1986
2. Furnace for directinal Solidification oasting especially for casting gas

turbine blades made form Cobalt and nickel Superallys
USP0.4178986

3. M. 麦克莱恩著, 定向凝固高温材料, 陈石卿等译, 航空工业出版社, 1988

* * * * *

(上接第 11 页)

平面向胞状进而向树枝状的转变, 而在快速 ($>10\text{K/s}$) 范围内再度恢复平界面生长。而在亚快速范围 ($1\sim 10\text{K/s}$), 当 G_1 高时晶侧分枝时空大大受限而易形成柱状晶, 且存在着树枝状向胞状的转变。在籽晶法制单晶的初始引晶阶段, 凝固冷速实质上是从零向某工艺对应冷速的跃迁式变化, 这一过程及最终冷速值决定了最终单晶的亚结构特色。因而初始过程对单晶制备非常重要, 同时顺应上述规律, 在本工艺条件下, 当 $G_1 \cdot V$ 较低时可出现平界面生长和胞状生长, 而且因 G_1 较高随 V 增加, 使 $G_1 \cdot V$ 很快进入亚快速范围, 图 2d 的柱状晶 (侧枝不发达树枝晶) 得以形成。柱晶生长抽拉速度上限向高速区扩展。由于这种柱晶亚结构无发达侧枝, 因而可望大大降低枝晶与枝晶间的偏析程度和因补缩引起的疏松, 有利于单晶性能的充分发挥。又由于 G_1 提高有利凝固界面稳定性, 因而使柱晶生长速度范围下限也有所降低, 因而亚结构尺度大大细化。

4 结论

(1) 在 ZMLMC 装置上可利用籽晶法制备出亚结构大大细化 (5~10 倍) 的 DD3 合金单晶棒 $\phi 7 \times 40 \sim 80\text{mm}$ 。

(2) 定向凝固界面温度梯度大大提高, 易使单晶凝固呈亚快凝特征, 因而单晶结构具有细化、均化和完善化的快凝组织特征。

(3) 该技术是单晶制备技术从 HRS 法向前迈进的重要一步。可望有助于单晶高温合金铸件性能的进一步提高。

参考文献

1. 何国, 西北工业大学博士学位论文, 1994
2. 航空工业总公司 621 所 DD3 合金鉴定材料 (交流资料), 1995
3. 西北工业大学, 国家自然科学基金重大项目《非平衡凝固若干理论及应用研究》, 研究报告 (内部交流资料)
4. 傅恒志, 全国首届相变会议特邀报告, 1993.11