

高温合金定向凝固技术发展动向

——兼谈赴英考察见闻

孙传棋

高温合金定向凝固技术, 已从六十年代初期的探索研究进入到八十年代的大规模生产应用, 有人称八十年代是定向叶片的年代。单晶涡轮叶片的研究也颇有进展, 发展最快的美国已开始装机使用, 其它一些国家亦会在二、三年后突破这一技术。随着定向叶片的大量投入航线使用, 优质、多产、低成本成了现代定向凝固技术的中心问题, 并研究发展了上述问题的许多新技术。本文就其中的某些技术并结合赴英考察中的定向凝固技术见闻略加评述。

一、实现程序和操作的自动化

八十年代初, 美国普·惠公司一台电子束熔化浇注全自动定向炉问世, 它可以生产多种形状的定向叶片和单晶叶片。这台设备年产九万件叶片, 叶片质量得到了保证。之后, 苏联又报道^[1]了一台高生产率的自动化定向设备, 可年产十八万件叶片。我们在英国参观罗·罗公司的定向凝固技术时, 看到该公司拥有12台全自动的定向炉, 仅有两个人监视(图1), 年产三十万件定向叶片, 据说这是目前世界上产量最大的一个定向叶片生产车间。罗·罗公司采用电子计算机实现程序和操作的自动化, 带来了产品的高质量, 叶片的合格率可达80%, 比普通精铸叶片的合格率约高20%, 另一方面劳动量大大减少, 自动化提供了大规模生产和高质量的前提, 并导致成本的降低。传统叶片成本的计算为精铸叶片: 定向叶片: 单晶叶片=1: 2: 5; 其使用寿命为1: 5: 10, 可见罗·罗公司自动化的实现, 提高了质量, 降低了成本, 现在生产的定向叶片成本却略低于普通精铸叶

片的成本。

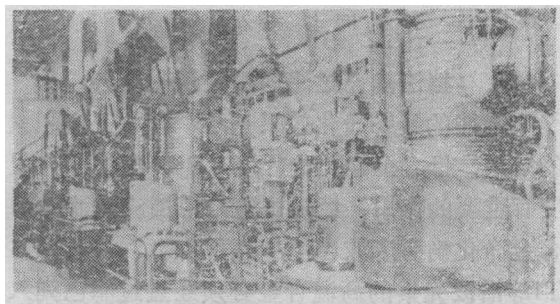


图1 罗·罗公司全自动定向凝固炉

在罗·罗公司的定向凝固技术中还实现了其它工序的自动化, 例如制壳的涂料均由机械手操作; 叶片的加工是无人操作的自动线(见图2), 无损检验只需将叶片放入圆盘自动检验盘中, 自动报出有缺陷叶片的形貌和尺寸; 值得一提的是罗·罗公司的快速自动取向测定仪, 能够快速地测出定向和单晶叶片的取向并进行数据处理。目前, 计算机在定向凝固技术中的应用还在深入。据罗·罗公司介绍, 现正进行凝固过程晶粒和取向的控制, 不是预编程序而是过程进行中自动校正。例如监控凝固中

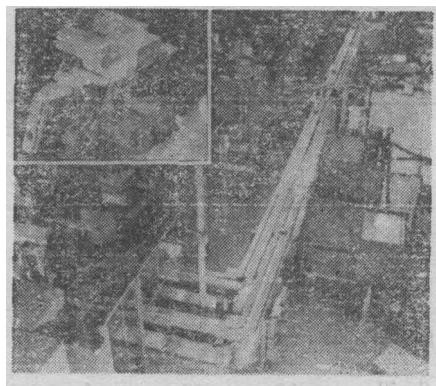


图2 罗·罗公司叶片加工自动线

的叶片,由于某种因素影响,凝固中晶粒或取向将要超差时会输出信号,由计算机自动调节参数给予纠正,像这样的质量监控用在零件产生缺陷之前,必然会有效地降低生产中叶片的报废率。总之,计算机在定向凝固技术中的应用有其广阔的前景。八十年代的定向设备,能进行半自动或程序操作已经是先进的设备了,而如今的先进定向炉设备都配有较高水平的自动程序控制。

二、金属和零件的净化

1. 挡渣陶瓷过滤器的应用

零件的最终净化效果是各个相关工序积累的结果,母合金净化的程度对零件最终净化程度有重要的作用,经过试验采用挡渣过滤对母合金净化确有成效,美国和英国对含有高Al、Ti等活泼元素的高温合金必须经过过滤已列入技术规范。所谓挡渣过滤技术就是将金属液浇入锭模之前通过如图3所示的机构,由于夹渣和金属液比重的不同,挡渣孔流过金属液时挡住部分夹渣,金属液再通过陶瓷过滤器,弥散细小氧化夹渣被吸附并捕获,母合金经过挡渣过滤后的去渣率可以达到70~97%^[2],也有的试验结果为60%^[3]。这种挡渣过滤效果主要取决于合金成分、过滤和挡渣方式、熔体中初始渣粒的浓度和熔体的流动性等^[2]。

零件的净化更重要,直接关系到报废率和使用状态的质量。喷气发动机所用的较新合金比早期的合金承受更高的应力和温度,高应力

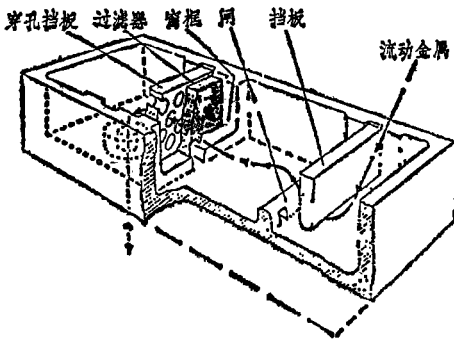


图 3

低周疲劳条件工作的高温合金缺陷的临界尺寸是0.05~0.76mm。为此,近年来对零件的缺陷要求更为严格。Narder和Kortorich^[2]在描述定向凝固合金铸件中缺陷特征时指出:氧化夹杂是引起铸件报废的最主要原因,使用各种类型的陶瓷过滤器进行金属过滤被认为是一种控制非金属夹杂含量的有效手段。过滤器从熔体中去除非金属夹杂的能力取决于过滤器材料和非金属夹杂物的相对表面能,而且也决定于金属熔体的表面张力以及被过滤金属的成分;在力学性能方面要求过滤器能抵抗操作产生的破碎,能承受热冲击造成的剥落和在1700℃高温下金属流载荷下的蠕变变形。现在已经投入使用的各种过滤器的典型化学成分和要求的性能见表1^[2]。过滤器在铸件中放置的位置亦是影响过滤效果的重要因素,图4是过滤器在铸件中的通常放置位置。

表 1 陶瓷过滤器(20ppi)的组成和性能

材 料	成 分 , %					热膨胀系数 $\times 10^{-6}$ cm/ $^{\circ}$ C	密度 mg/ml	气孔率 %	横向强度	
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	ZrO ₂	Y ₂ O ₃				MN/m ²	MPa
NCL—莫来石	65	35	—	—	—	4.30	0.56	79	2.34	22.9
稳定氧化锆	—	—	—	97	3	4.92	0.59	89	—	—
硅 酸 锆	—	33	—	67	—	4.40	0.58	81	0.34	3.33
氧 化 铝	92	7	1	—	—	7.89	0.58	80	2.62	25.6

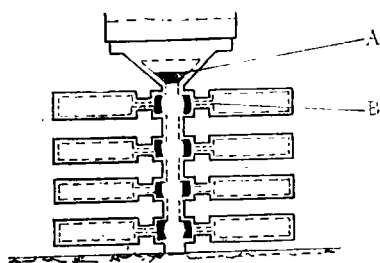


图 4 陶瓷过滤器在铸件中的放置
A—顶放；B—侧放

过滤器按照每英寸线性长度上孔洞数量和整个泡沫的孔洞直径来分类(ppi), 10ppi 的泡沫其孔洞平均直径为 $1778\mu\text{m}$, 30ppi 的泡沫孔洞平均直径是 $711\mu\text{m}$, 已经公开使用发表的过滤器洞径尺寸都在10~30ppi之间。最近罗·罗公司为进一步提高过滤效率, 用在定向和单晶铸件的洞径尺寸以25~45ppi为更佳, 而且在单晶铸件上100%使用过滤器, 定向铸件上绝大部分使用过滤器, 一般精铸件的使用则要少于上述二者, 其原因是单晶和定向铸件带有过滤器的壳型温度高达 1500°C 左右, 使用洞径更细的过滤器效果更佳。反之, 一般精铸件因壳型温度约为 $800\sim 900^{\circ}\text{C}$, 如果采用洞径更细的过滤器, 则会导致金属液的堵塞, 只得使用粗洞径的过滤器, 效果当然就差些。罗·罗公司的单晶和定向采用过滤器后, 其零件的合格率提高15~20%, 我国南方动力机械公司使用过滤器后使精铸件合格率提高11.9%。

2. 软质坩埚的应用

定向凝固用的金属熔化坩埚, 目前以氧化镁和尖晶石的等静压成型坩埚最为普遍。这种坩埚适合于真空炉的连续或半连续工作(即熔化室在生产过程中不破真空), 但坩埚的连续使用不能及时清除上一炉的残渣和氧化皮, 将沾污下炉熔炼。四十余批近五千件涡轮叶片的浇注统计报道^[3], 每批第一炉叶片质量较好, 报废率平均为8.1%, 第二炉上升到16.2%, 第十炉为31.9%, 比第一炉增加四倍(图5)。英国Morgan耐火材料公司研制成一种一次性使用

的软质坩埚, 由硅酸铝陶瓷纤维经真空吸铸成型, 其成分由67~75% Al_2O_3 和30~35% SiO_2 及少量粘结剂组成。这种坩埚由于柔软, 抗热冷激热性能好, 耐火温度可达 $1600\sim 1700^{\circ}\text{C}$ 。软质坩埚成本为 MgO 等静压坩埚的1/5, 积累成本略高于 MgO 坩埚, 而由于零件收得率提高, 换取的收益远大于前者。采用软质坩埚从根本上解决了由于坩埚连续使用所带进的氧化皮和夹杂。此种坩埚首先由罗·罗公司使用在全自动的定向炉上, 成了罗·罗公司定向凝固技术的一部分, 美国TRW等公司亦已采用了这种坩埚。软质坩埚使用一次就要更换, 定向炉就要有迎合更换坩埚的设计构造, 图6是罗·罗公司由底注法使用软质坩埚的示意图。被浇注的壳型对准底注口, 注口由同一熔化金属材料做的塞子堵住, 上面放一同样材料的金属片, 再装入被熔化金属锭, 高频半悬浮熔化, 金属液与坩埚接触很少, 坩埚底部的金属片和塞子熔化完时, 金属温度正好到达预定的浇注温度, 底注入壳型, 结晶器开始向下移动, 关

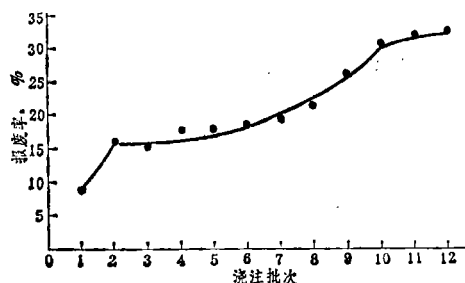


图 5 MgO 等静压坩埚使用次数与零件报废率之间的关系

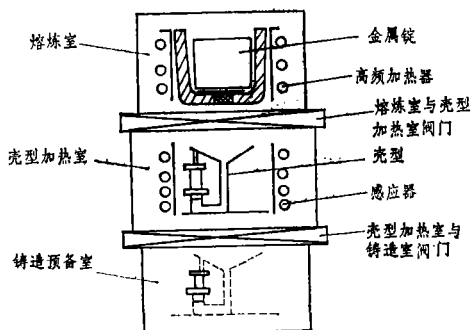


图 6 罗·罗公司采用软质坩埚底注示意图

闭熔炼室与加热器室阀门，熔炼室破真空，更换软质坩埚并装料，熔炼室抽真空准备下一炉熔化。罗·罗公司的这种技术已大规模投入生产并证明是有效的，经过严格的质量检验与控制，达到的合格率为80%。

英国Consarc公司为使使用软质坩埚而设计制造的定向炉如图7所示。它的特点是软质坩埚底部不开洞，由倾动坩埚浇入壳型，熔化坩埚和壳型加热装置都在同一熔化室内，也就是说不像罗·罗技术那样每熔炼一炉，熔炼室需破真空一次，而是借助于横向加料器来完成更换坩埚的动作，这种设备与一般用的定向设备很相近，只是熔炼坩埚可以在两个90°方向都能倾动，并且多一横向装料机构。此种使用软质坩埚的定向炉已投入生产。

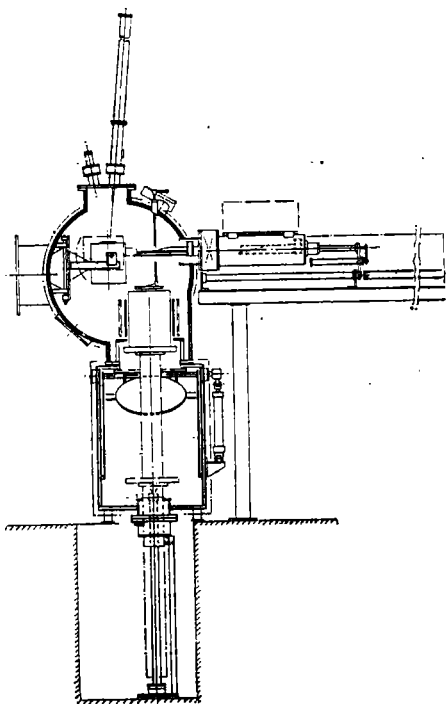


图7 Consarc公司为使使用软质坩埚设计制造的定向炉

总之，就定向凝固技术而言，有许多技术例如高梯度的定向炉、单晶叶片和两半分液相瞬间焊接定向单晶叶片正在开发研究。本文评

述的电子计算机和金属净化技术已经投入生产应用，转化为生产力。

参 考 文 献

- [1] Кишкин, С.Т. и др., Конструкционные жаропрочные материалы для новой техники, М. НАУКА, 1978, 319.
- [2] Apelian, D., Suttan, W. H., Superalloys, 1984, Proc. 5th Int. Symp. on Superalloys, 1984, 421~432.
- [3] 南方动力机械公司, 西北工业大学, 泡沫陶瓷过滤器研制及应用试验总结, 1986年3月.

(*)

(*)

(*)

(上接第54页)

2. 工厂违反YB635-67标准规定,改热轧状态供应为冷拉状态供货,容易引起微裂纹,随后的冷切断下料和热处理使裂纹扩大。供应状态由冷拉改回热轧状态,这对减少在工艺过程中由于开裂引起的报废是有益的。

3. 216-843 炉的持久性能和高温拉伸性能已符合现行标准,虽然室温力学性能较差,但考虑到该材料主要用于高温(800℃)环境,只要在加工、制造零件过程中将表面层0.5mm的细晶加工掉,不再出现类似开裂现象,是可以满足使用标准YB635-67要求的。建议工厂将现存的材料加工成结构简单、应力集中因素影响小的一般销、铆钉紧固件。

参 考 文 献

- [1] 宋维锡主编,金属学、冶金工业出版社,1985年5月.
- [2] 顾德骥,周家培,尤云龙等译,耐热合金,上海科学出版社,1962年4月.
- [3] W. 贝脱立治著,梁学群译,尼莫尼克镍铬耐热合金,中国工业出版社,1964年11月.
- [4] 郝应其,薛永春编译,航空材料手册,耐热钢及合金,1965年8月.