

冶金科技消息

高温定向凝固合金译文集

40

上海钢铁研究所技术情报资料室

一九七九年一月

前 言

从1939年世界上第一架喷气式飞机问世以来,涡轮喷气发动机经历了约40年的飞速发展时期,使燃气涡轮前气体进口温度从最初的 780°C 左右提高到目前的 1370°C ,提高了大约 590°C ,为了进一步提高发动机的工作效率和推力,涡轮叶片温度仍然趋于逐年提高,要实现这个目标,除研究叶片冷却技术之外,还要求高温材料必须具有更高的高温强度和良好的综合性能,而用普通工艺方法(如变形加工和精密铸造等)生产的铁基、镍基和钴基高温合金,从本质上来说,已很难满足现代工业发展对高温材料所提出的要求。六十年代中期,一种崭新的冶金工艺——定向凝固结晶技术问世了,这对进一步改善高温合金的高温性能,提高材料的使用温度,带来了新的希望,从我们这次翻译和汇编的资料中可以看出,由于定向凝固合金的优异性能,它已和高温合金粉末冶金技术一样,成为当前世界各国集中主要技术力量研究的领域之一。正象美国空军材料实验室高温材料技术负责人诺尔杰耶尔所说的那样:用 γ' (Ni , Al) 相强化高温合金的工作差不多快要结束了,高温合金的未来希望在于另一种强化方法——定向凝固共晶,这种材料将在 1093°C 下顺利使用,并将在1982年前采用。他说:这代表着技术上的一次巨大跃进。

采用定向凝固技术,通常可以生产出具有严格结晶位向 $\langle 001 \rangle$ 的柱状晶,单晶和共晶组织的叶片零件。这种结晶组织从根本上改变了普通铸造合金所存在的先天性缺陷,如疏松、夹杂、区域性偏析(或枝晶偏析)以及存在着造成叶片过早破坏的横向晶界等。因而显著地提高了材料的抗热冲击性,蠕变性能和中温持久性能。其中抗热冲击性能和持久塑性的改善是十分突出的。高达3-4倍之多,应用定向凝固技术发展的共晶合金,打破了高温合金常规的强化途径,它主要依靠自生纤维(或片层)强化基体,强化相(或增强纤维)和基体金属是在熔体中原位生长的,因此,在更高的使用温度条件下,其组织稳定性优于其他任何金属间化合物强化相。例如, $\gamma'-\delta(\text{Ni}, \text{Nb})$ 增强的 $\text{Ni}-20\text{Nb}-6\text{Cr}-2.5\text{Al}-0.06\text{C}$ 共晶合金,在 1038°C ,

应力为 15.4 kg/mm^2 的持久寿命高达 189-354 小时。正因为这样，近些年来这种新技术在国外发展很快。

最早发展的定向凝固技术为功率降低法（简称 PD 法），这是第一代也是比较落后的一种工艺方法，后来由第二代——高速凝固法（简称 HRS 法）所取代，当前国外正在给予极大重视的液态金属冷却法（简称 LMC 法）是定向凝固技术的第三代，它标志着这一最新技术已经发展到了相当成熟的阶段。在国外，用电子计算机控制的 HRS 法和 LMC 法已投入使用。壹台电子计算机同时操作八组 LMC 法的生产线已经建成。

由于这项新技术的高速发展，使航空工业跨入了一个新的时代。高推力、长寿命、更加安全可靠的发动机。如美国的 TF-30-100, J58, JT9D 型，苏联的 AI-20, AI-24 型发动机都相继采用定向凝固技术生产的涡轮叶片或导向叶片。最近以 Ni-Al-Mo 系统为代表的第二代共晶合金已经出现，肯定地说，在不久的将来，定向凝固涡轮叶片，将占应有的重要地位。当然事物总是一分为二的，目前定向凝固涡轮叶片成本较高，这种工艺对合金的选择性比较强，不同的合金得到的效果差别大。同时进一步提高共晶合金的延性，有待作深入细致的研究工作。

这本文集共汇编了九篇文章，第一篇为综合性评述，第二至第七篇译文，最后两篇为摘要。其中既有工艺、设备方面的文章，也有材料组织和性能方面的文章，既有柱状晶方面的研究工作，又有共晶方面的研究工作，由于水平有限，

高温合金的定向凝固技术

张慕熊

摘 要

本文介绍了三种定向凝固设备和方法,即功率降低法(PD法)、高速凝固法(HRS法)和液态金属冷却法(LMC法),比较了它们的优缺点。再简要介绍了美国普拉特惠特尼航空公司主要用于共晶的实验室装置。随后扼要介绍了计算机在测定凝固参数上的应用。最后对定向凝固柱晶,定向凝固单晶和定向凝固共晶作了简要介绍,重点是定向凝固共晶。

高温合金的定向凝固译文集目录

一	高温合金的定向凝固技术 - - - - -	1
二	定向凝固高温合金的铸造和性能 - - - - -	37
三	液态金属冷却——一种新的凝固技术 - - - - -	59
四	定向凝固合金铸件 (LMC 法) - - - - -	78
五	燃气涡轮高温材料的单相凝固 - - - - -	90
六	钴基高温合金的定向凝固 - - - - -	108
七	计算机在定向凝固加工中的应用 - - - - -	119
八	Ni, Nb 增强共晶涡轮叶片的定向凝固 - - - - -	144
九	定向凝固 Ni, Nb 增强共晶涡轮叶片制造方法的研究 - -	166

目 录

一 引 言	1
二 定向凝固工业性生产设备和方法	2
1. PD法	2
2. HRS法	4
3. LMC法	5
三 实验室用共晶定向凝固设备	8
1. 实验室电阻加热 Bridgman 炉	8
2. 实验室水淬 Bridgman 炉	8
3. 改进的 Bridgman 炉	11
4. 实验室液态金属冷却装置	11
四 凝固参数的测定及计算机的应用	13
五 定向凝固柱状晶高温合金	20
1. 机械性能	22
2. 枝晶偏析	23
六 定向凝固单晶高温合金	25
七 定向凝固共晶	25
1. 熔炼工艺	28
2. 定向凝固共晶中的两条主要规律	28
3. $\gamma/\gamma'-\delta$ 涡轮叶片的定向凝固工艺	29
① 定向凝固设备	29
② 对原 LMC 法的改进措施	30
③ $\gamma/\gamma'-\delta$ Ni20Nb6Cr2.5Al 共晶叶片的定向凝固研究	31
八 结 语	34
九 参考文献	35

一 引言

目前高温合金工艺的发展方向有两个：一个是获得定向组织的定向工艺，一个是粉末冶金工艺。定向组织可用三种方法获得^{〔1〕}①精密铸造的定向凝固可生产柱状晶、单晶或共晶涡轮叶片；②固态再结晶法（定向再结晶和晶粒长大）；③定向复合材料制作技术即将高强度难熔金属丝增强高温合金基体制备人造复合材料。第一种涉及液相和固相，第二、第三种仅涉及固相。本文介绍的是精密铸造的定向凝固技术。

精密铸造的定向凝固是国外航空工业七十年代的先进技术。美、英等国对高温合金的定向凝固作了比较系统的研究，结果表明，定向凝固技术能大幅度提高材料或零件的综合性能延长使用寿命。

近几年美国已将定向凝固涡轮叶片、导向叶片投入航线使用。例如TF-30-100发动机以及马赫数 $M=3$ 的YF-12、SR71飞机的J58发动机，并已累积了几万小时的飞行时间。最近JT9D发动机也正采用定向凝固的PWA 1422合金即DSMAR-M200+2%Hf使发动机寿命延长到9600小时以上。

为F15战斗机研制的F100/401发动机比F-111飞机的TF30发动机要小得多，但推力F100为25000磅而TF30仅18500磅，这种改进主要是由于①用了定向凝固高温合金涡轮叶片；②用了等温锻造超塑性成型的轻重量粉末涡轮盘^{〔2〕}。

定向共晶材料也早已在美国进行了发动机的台架试车。

英国燃气轮机研究所研制出了斯贝发动机的定向凝固二级涡轮叶片。

苏修也研制出了AIИ-20、AIИ-24发动机的单晶涡轮叶片。

此外，高温合金的定向凝固技术不但用于航空涡轮发动机，同时它还用于非航空的燃气轮机等方面。

进行高温合金的定向凝固最重要的是定向凝固方法及其设备。国外已发展了三种方法，分别成为三代设备。第一代是功率降低法，简

称PD法；第二代是高速凝固法也有称之为辐射冷却法或Bridgman下抽法，简称HRS法，第三代是液态金属冷却法简称LMC法。这三代方法和设备的主要标志是温度梯度。温度梯度随方法的改进而增加。定向凝固技术的发展历史和温度梯度的关系可见图1。〔3〕从图1可列成下表

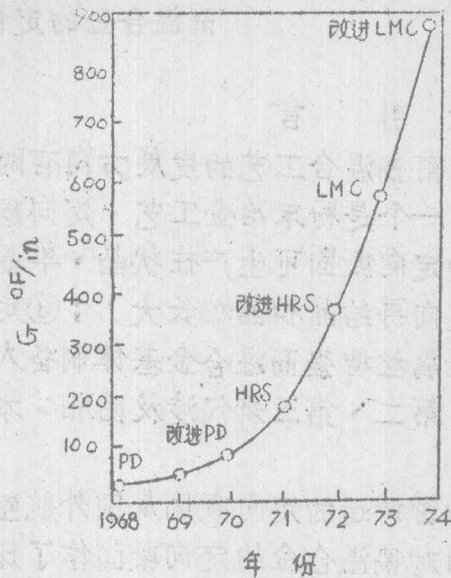


图1 定向凝固法的发展史和热梯度 G 的关系

年 份	1966	1969	1970	1971	1972	1973	1974
方 法	PD	PD	改进的 PD	HRS	改进的 HRS	LMC	改进的 LMC
温度梯度 °F/in	20	50	90	200	350	550	900
温度梯度 °C/cm	4	11	20	44	77	110	198

三 定向凝固工业性生产设备和方法〔4〕

三种定向凝固工业性生产设备的示意图分别见图2，3和4。

1. PD法

在PD法中模壳是静止的，在HRS和LMC法中模壳和加热装置都是相对移动的。

PD法中铸件的热量主要靠传导至冷却底板来除去。随着柱晶的

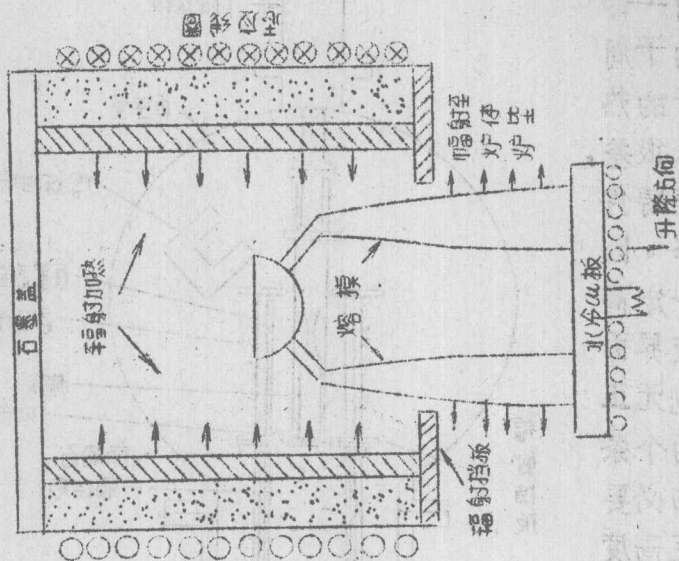
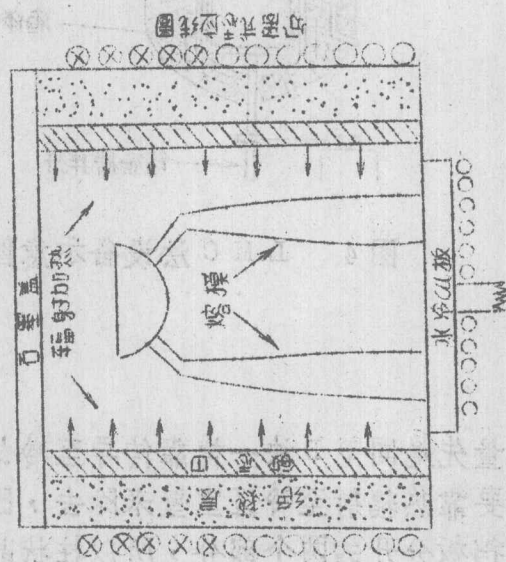


图 3 HRS 法设备示意图



(x 表明已通电的感应线圈)

图 2 PD 法设备示意图

生长，固液界面离冷却板愈来愈远，冷却效果愈来愈差，虽也有一部分辐射散热，但由于周围环境是原来炉子的热区，辐射散热效果很差，且这种辐射热量随铸件的冷却而急剧下降。因此柱状晶生长到一定高度，就几乎无固液界面间的定向热流，也无正的温度梯度而这两个条件都是定向液固的必要条件，结果在一定高度以上铸件的晶粒就成为等轴晶而不是柱状晶。温度梯度 G 极小仅 $4 - 20^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 。凝固参数随离冷却板的距离而变。要增加 G 只能靠减少凝固速度 R 来获得。因此 G 和 R 是“耦合”的。

2. HRS 法

HRS 法中铸件的热量先是同 PD 法一样靠传导至冷却底板来除去，但后来下抽至冷区主要靠热辐射至冷区室壁来除去，因为在 HRS 法中热区和冷区是用辐射挡板分开的两个部分，所以柱状晶的生长高度要比 PD 法高得多。

HRS 法比 PD 法好的几个优点如下：

① 固体中有较高温度梯度约 3 倍以上（见图 1 附表）。

a. 有较狭糊状区给出较好补缩性能可免除“雀斑”。

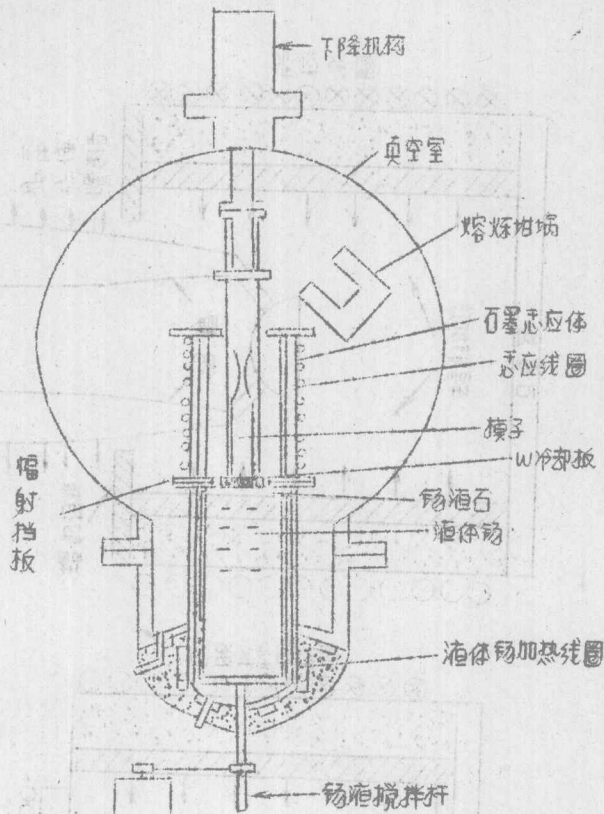


图4 LMC 法设备示意图

b. 显微组织细化。

② 增加凝固速度至少4倍。

a. 提高生产率

b. 显微组织细化。

③ 维持稳定状态，可最大限度地控制组织。PD法中温度梯度和凝固速度有变化，HRS法中起始后可保持稳定状态。

④ 容易铸成较大尺寸，例如3" 锭，PD法冷却板上6" 以上即成等轴晶，而HRS法柱晶区可达12"以上。

⑤ 操作更简便。

⑥ 界面曲率减小，有较好晶粒排列。

⑦ 模壳设计比较灵活。

增大温度梯度G和凝固速率R的良好后果如下表所示。

参 数	优 点
在凝固界面处固体内的 温度梯度 (G)	① 消除雀斑 ② 改进补缩 ③ 有比较大的热传递能力
凝固速度 (R)	① 增加生产率 ② 组织细化 ③ 减少陶瓷模壳与金属接触的时间

HRS法中，R和G仍有依赖性，但耦合得不如PD法那么强烈。

3. LMC法

HRS法比PD法好是因为前者有显著的辐射热传递散热和更有效的传导散热。但两种方法中热传导通路在凝固进行时都变得较长。要改善这种情况，可在凝固时将铸件逐步浸入热传导介质以提供热流的恒定通路。这就产生了LMC法。

LMC法中采用液态Sn作传导介质，这是因为①Sn的熔点低；②2000°F(1093°C)时Sn的蒸气压很低；③Sn的沸点高；④Sn

成本适中。

现普拉特惠特尼航空公司已逐步将HRS炉改建成LMC炉，以便在工业生产上用LMC法定向凝固高温合金叶片。

在LMC炉中，过热的合金浇入予热的开口模壳（底部放在W冷却板上）后，将模壳下浸入锡浴中。锡溢入收集器中让锡液面保持恒定。当凝固界面远离冷却板时，锡液面逐步沿铸件相对地上升，这样可以保证：

① 使热传导热流通路紧密与凝固界面接近。

② 加大温度梯度。

③ 在铸造早期即给出稳定状态热传递条件凝固界面可在较大下浸速度范围内保持在锡液面上面。与PD，HRS法相比能提供较平的凝固界面，促使部件在轴向上的晶界排列生长得更好。

模壳用 $ZrSiO_4$ 能成功地浸入锡液中，但模壳材料仍须向最佳化方面发展。冷却板用Cu会溶介在Sn中，可用W或其它适当材料。

LMC法的G约为HRS法的2倍多（见图1附表），R也比HRS的大几倍。LMC法用 $R 50.8 \text{ cm/m}$ 可得有满意显微组织的叶片约为常用的HRS法的R的2倍。〔4〕目前LMC法试验所得的最大R已高达 760 cm/hr 〔5〕正在分析影响凝固界面曲率的因素以便能保持尽可能平的界面至最长时间。

当合金凝固时，它因收缩而会离开模壁，这会影晌热传递条件。必须加以考虑。

在没有冷却板或其它外部冷却液时，Sn与合金的重量比，忽略模壳和包套的直容量，符合下列热平衡：〔6〕

$$M_{Sn} \times C_{Sn} (T_{\infty} - T_{Sn}) = M_{合金} \times C_{合金} (T_{合金} - T_{\infty})$$

这里C是比热容量， T_{∞} 是最终平衡温度。这个重量比是所需最终温度(T_{∞})的函数如图5所示。相应的体积比约大25%。

T_{∞} 可用来作为冷却浴的设计准则，人们常用增加冷却剂量的方法在高的入浸速度或突然的混和情况下预防一个过高的 T_{∞} 。如锡浴有强制冷却和激烈的搅拌，则Sn的需要量可以大大减少。估计结果

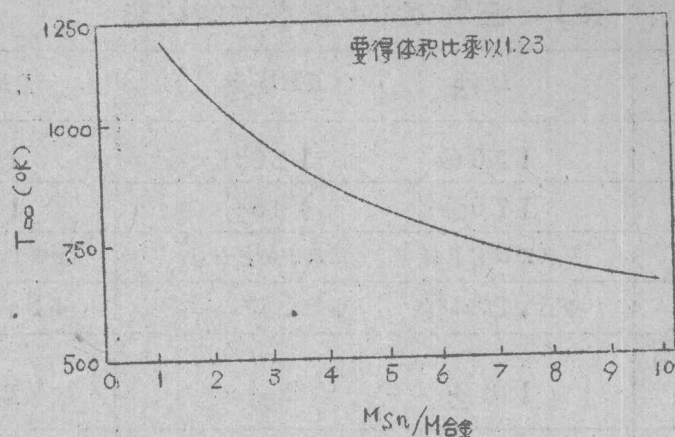


图5 平衡混和温度作为 Sn 与合金重量比的函数。
1566°C (2850°F) Ni 基合金和 260°C
(500°F) Sn 浴混和的情况。

表明中等速度搅拌的 Sn 浴中 (每分钟 20 转, h (热传递系数) $\sim 4.2 \times 10^4 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}$, 半径 $r = 10 \text{ cm}$) 有很大的热传递速度。

在模壳进入 Sn 浴时, 热流是轴向的, 如同采用冷却板一样。当模壳下浸到差不多一个半径的深度后, 则向底部和向侧壁的热流差不多相等。若固体高度进一步增长, 则底部的热流减少; 如果凝固界面超过锡液面 (即如果浸入速度不过大), 则热流将成一条稳定型曲线, 那里在凝固处的热流差不多是轴向的, 但实质上是与锡浴成放射线状的。

三种方法的凝固参数比较于表 1 中。〔6〕

从表 1 可看出 LMC 法的凝固参数比 PD 法和 HRS 法有显著改善, 如生长速度较快 (比较经济) 热梯度较高 (组织改善)。表 III 中的 LMC 法相应于 1 cm/分的浸入速度, 但碰到的梯度是下列速度 0.12 cm/分, 0.85 cm/分, 1.70 cm/分, 3.4 cm/分, 4.7 cm/分的典型。即使 $G = 200^{\circ}\text{C/cm}$, $R = 480 \text{ cm/小时}$, R 与 G 间也无耦合关系; G , R , ΔZ 和 Δt 都比 PD 和 HRS 法有所改进。

表1 三种方法凝固参数的比较

参 数	P D 法	HRS 法	LMC 法
过 热	120°C	120°C	140°C
持续周期	170分	4 5分	1 5分
合 金 牌 号	MarM200	MarM200	MarM200
模 子 直 径	$\phi 3.2\text{cm}$ 棒	$\phi 3.2\text{cm}$ 棒	$\phi 1.43\text{cm}$ 棒
时间阶段分析用的时间	1 0 分	2 分	1 分
时间阶段的数量	2 1	2 2	1 5
典型温度梯度 (G)	7-11°C/cm	26-30°C/cm	73-103°C/cm
典型生长速率 (R)	8-12cm/小时	23-27cm/小时	53-61cm/小时
糊状区的高度 (ΔZ)	10-15cm	3.8-5.6 cm	1.5-2.5cm
局部凝固时间 (Δt)	85-88分	8-12 分	1.2-1.6分
冷却速度 $\dot{T}$	90°C/小时	700°C/小时	4700°C/小时

三 实验室用共晶定向凝固设备 (都是 P W A 的设备)

1. 实验室电阻加热 Bridgman 炉 (7)

示意图见图 6

这种炉子是用电阻加热的, 这种炉子是低梯度炉 G 约 70°C/cm, 可用来研究共晶合金的发展及其特征, 也可研究型芯和合金的相容性。

2. 实验室水淬 Bridgman 炉 (8)

这种炉子用感应加热, 示意图见图 7。这种炉子是高梯度炉 G 约 360°C/cm, 下抽的模子用水喷环冷却。生产的共晶试棒 0.9-1.3 直径 20 cm 长, 在 99.8% 纯度再结晶 Al_2O_3 坩埚中定向凝固。试棒可做纵向试验。

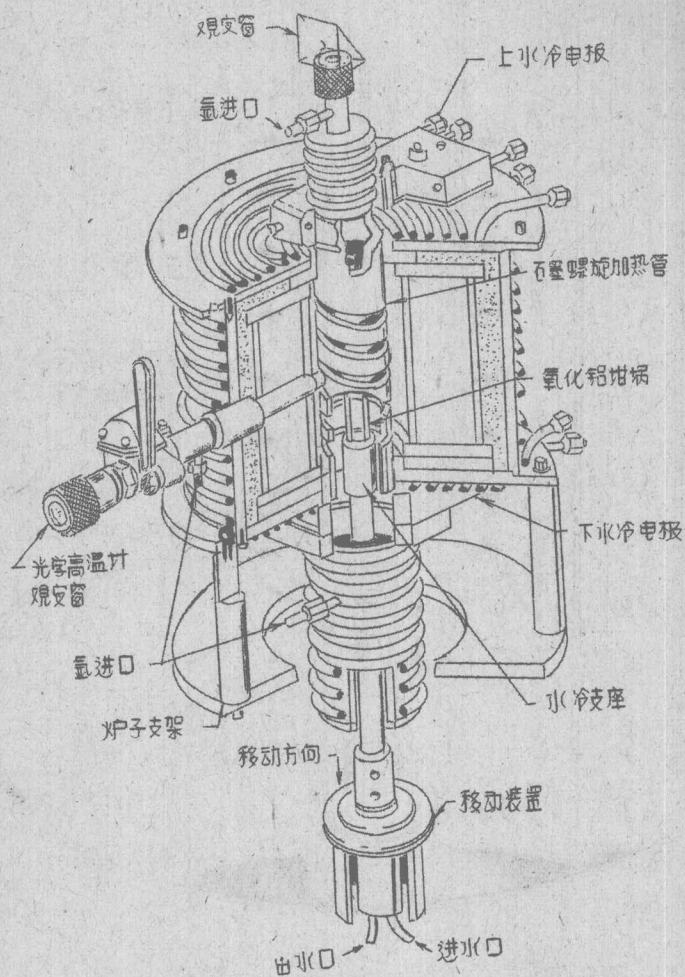


图6 实验室Bridgman炉示意图(1)

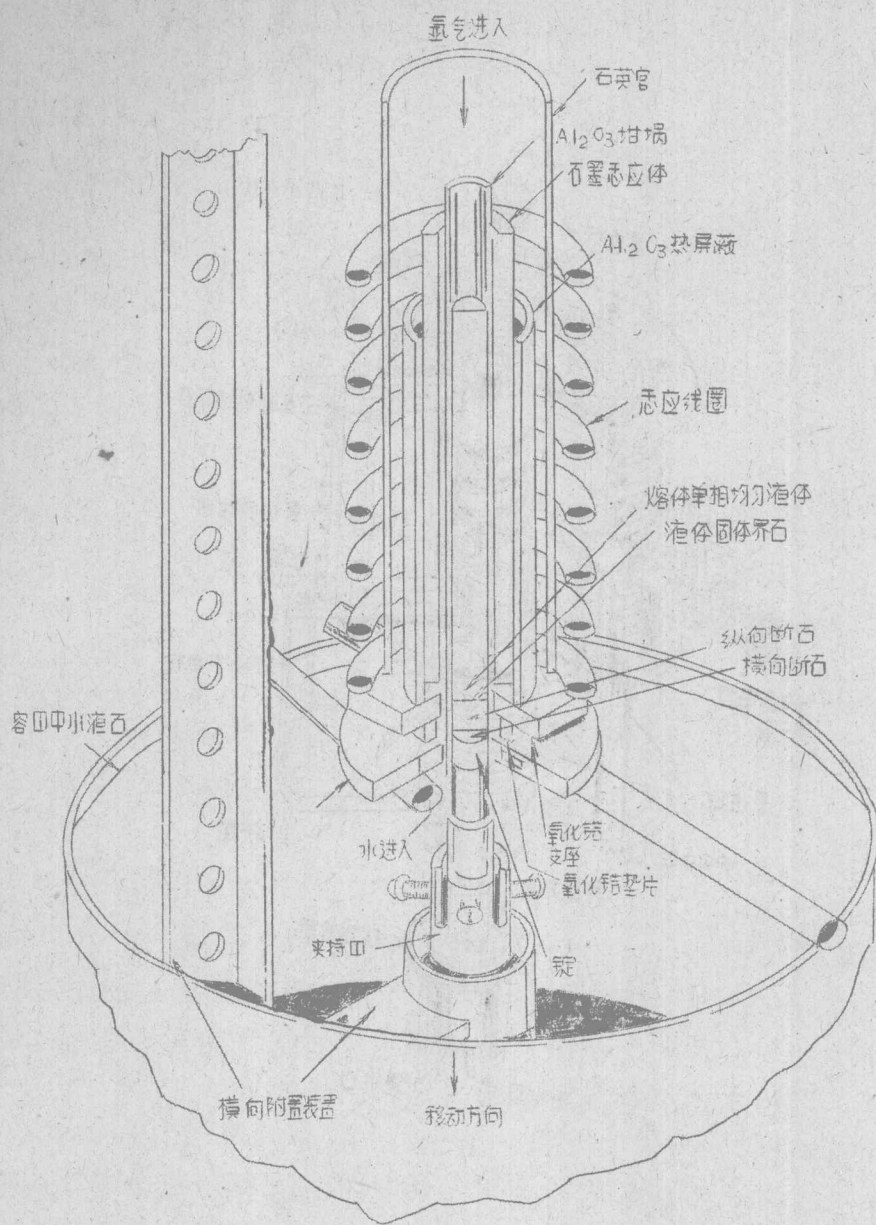


图 7 水冷实验室 Bridgman 炉的示意图

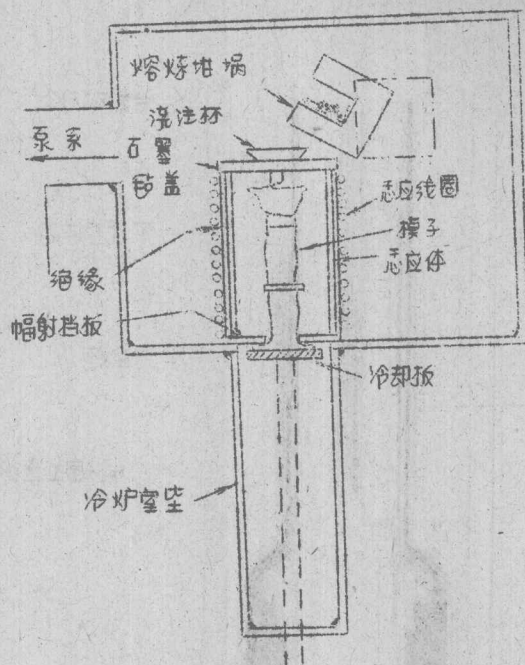


图8 改进Bridgman 炉的示意图

3. 改进的Bridgman 炉(8)

示意图见图8。这种炉子是中梯度炉 $G 75-125^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 。可定向凝固成 $0.3-2.5\text{cm}$ 厚， $5-10\text{cm}$ 宽 20cm 长的扁锭，凝固方向 平行于长的方向。纵向和非轴向试验都可在这种炉子的铸造材料上进行。

4. 实验室液态金属冷却装置(7)

示意图见图9

用 LMC 实验室装置可获得更多的关于共晶合金系中凝固和热传递关系的定量资料。用这些资料来证实预测的热传递分析和更好地了介实际叶片形状中的凝固条件。

在 LMC 实验装置中，共晶合金棒有中心孔以放置一套装在薄陶瓷保护管内的 5 只轴向热电偶。共晶合金棒放在陶瓷管里面并用感应加热元件熔化。高频感应发生器向装在派勒克斯硬玻璃心轴上的可变匝