

# 高精度大型平台的铸造及热处理

黄述哲 王志林 刘景民

**摘要** 本文根据精密机械基础铸件的技术要求特点,以1200×1200毫米超0级平台为试验对象,从材质选择、铸造工艺及稳定化处理等方面进行了试验,并对试验大平台凝固过程中的温度场分布;铸件工作表面的组织、硬度分布;各次稳定化处理前后的残余应力值及处理过程中的应变情况等进行了实际测定。

试验结果表明,含C3.3~3.5% Si 1.5~1.8% C<sub>当量</sub>3.8~4.0%的铸铁采用Sn微量合金化、Si-Ca与Rc-Si-Fe复合孕育剂处理的孕育铸铁有较好的综合性能和均一性,工艺简单,适于做高均匀性高稳定性要求的精密机械的基础铸件。上述材质在一定工艺条件下浇注的1200×1200×350毫米重1.5吨的平台,在弹塑性转变区附近(500~700℃)心部与边角部位的冷速差18度/小时左右,最大温差120~140度,500度以下以9~14度/小时冷却至200度后打箱,在这种情况下工作表面石墨为A型,95%以上珠光体基体,硬度为HB181~211,最大硬度差30HB。铸件表面铸态残余应力为3.2公斤/毫米<sup>2</sup>左右。

铸件经缓慢加热至540度、保温、然后以低于20度/小时速度炉冷至200度以下的铸后时效处理消除应力80%左右,粗刨和精刨均使铸件表面产生较大加工应力,但分别经过540度/3小时、低于20度/小时冷速冷却和255度/4小时、低于20度/小时冷速冷却的时效处理后,几乎全部消除加工应力。铸件精刨后最终残余应力值为0.71公斤/毫米<sup>2</sup>。

## 一、前言

高精度平台属于精密机械的基础零件。研制大光栅刻划机所用的大型平台(1200×1200毫米)精度要求很高,工作面面形精度要求0.6微米。这样高的精度要求,除了结构设计、精密机械加工工艺外,平台的材质、铸造工艺及稳定化处理规范等也将予以极大的影响。为长久维持平台的高精度,铸件必须具有很高的稳定性。

高精度大型平台铸件应满足下列要求:

1. 应具有足够高的强度刚度,以使在工作负荷、偶然外力及其自重作用下产生的变形极小,不致影响平台平面的面形精度。
2. 应具有较高的尺寸稳定性,由于零件本身存在的残余应力松弛而产生的不可逆塑性变形应很小,不致因长时间放置而影响已得到的高精度。
3. 平台的减振性要好。
4. 材质均匀,有利于机械加工达到高精度。

平台的结构设计已充分考虑了强度刚度,结构是比较合理的(图1)。因此,获得高精度、高稳定性平台的关键是制造工艺。

根据资料对铸铁铸件的残余应力、残余应力松弛及铸件变形的分析认为,获得高稳定性铸件的基本途径是:

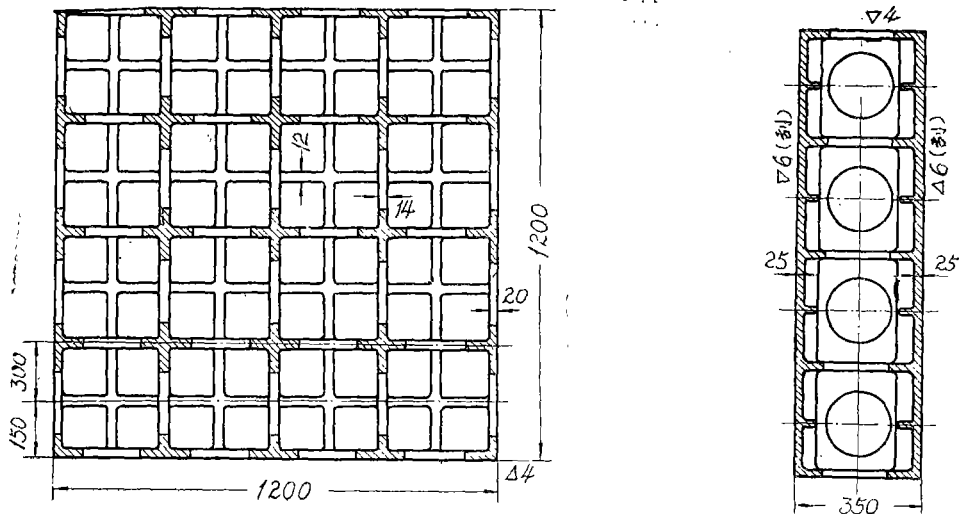


图1 铸件结构简图

1. 选择合适的材质。理想材料是孕育灰铸铁。具有一定数量的片状石墨，碳当量4%左右为宜，以保证良好的减振性能；石墨应为A型，且石墨尖角较圆滑，以减少石墨处的应力集中；基体为均匀的珠光体，以得到均匀的硬度；具有较高的强度，以获得较高的抗塑性变形能力（松弛强度）。

2. 采取合理的铸造工艺，使铸件在冷却过程中温度分布尽量均匀，以使铸件组织均匀，硬度均匀，减少铸造应力。

3. 铸件进行充分的、合理的稳定化处理，使其铸造及加工应力得到充分释放，而且使材料的松弛强度不致有较大降低。

为了弄清材质及各工艺环节对获得高精度基础铸件的高稳定性的影响，在我所多年生产的Si-Ca孕育处理的孕育铸铁基础上，进行了一系列试验，以求得到更高均一性的孕育铸铁材料，并在我所的现有工艺条件下，浇注了1200×1200毫米重1.5吨的试验平台。测定了铸件凝固过程的温度分布及其变化，检查了大平台工作表面的硬度分布及金相组织情况，又测定了铸态、热处理及各次机械加工后的铸件残余应力值，测定了热处理过程中铸件的应变情况。

本文仅就上述几方面的试验、工艺及测试结果加以介绍和分析。

## 二、材质的选择及其熔化浇注

我所工厂生产中一般采用Si-Ca处理的HT25—47孕育铸铁浇注仪器铸件，可满足一般要求。但这种铸铁的碳当量较低（ $CE \approx 3.5 \sim 3.7\%$ ），比较强度（RG）较低，比较硬度（RH）却较高，使得壁厚相差较大铸件不易得到均匀的组织 and 硬度；含碳量较低，也使减振性能变坏；并且用Si~Ca处理需要铁水有较高温度，含Ca量多，生渣多。我们通过试验表明，用Sn微量合金化的、Si-Ca与Re-Si-Fe联合孕育处理的孕育铸铁有更好的综合性能。

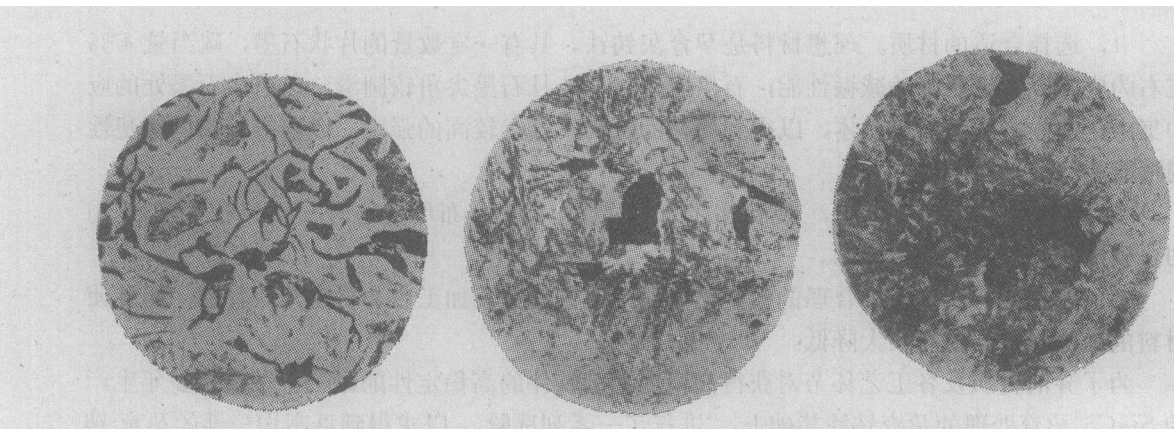
加入微量Sn可显著改善铸铁的性能。在加入量合适的情况下，即使铸铁的 $C_E$ 很高，也能获得高珠光体含量的组织，并使铸铁的硬度、硬度均一性和强度都有所改善。表1是化学成分为3.56% C、2.28% Si、0.65% Mn、0.02% S、0.075% P的过共晶铸铁分别加入1% Cu和0.1% Sn后的组织性能比较，图2为其相应的金相照片。从中不难看出，加入微量Sn对强度、硬度、硬度均一性均有提高，并且对组织珠光体化、提高硬度及其均匀性的作用比10倍含量的铜的作用还强烈。但加入Sn对石墨的分布和形态基本不产生影响。

表 1

序号	铁水状态	$\sigma_{bb}$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	平板试样硬度*HB.		珠光体 含量%**	珠光体分散度
			范围	最大差值		
1	原铁水	22.8	116~131	15	~25	细片状
2	加入1% Cu	30.6	132~146	14	~90	细片+薄片+少量索氏体
3	加入0.1% Sn	28.3	137~143	6	>95	细片+薄片+索氏体

\* 平板尺寸为80×75×35，沿中心线剖开测量硬度

\*\* 在 $\phi 30$ 试棒心部测定。



原铁水

加入1.0% Cu

加入0.1% Sn

图2 加入Sn、Cu对过共晶铸铁组织的影响

亚共晶铸铁加入微量Sn也同样获得良好的效果。用同一成份的原铁水(3.3% C 1.2% Si 0.95% Mn 0.055% P 0.038% S)加入不同孕育剂及合金元素进行比较试验，其结果列于表2和图3。试验结果表明，用Si, Si-Ca, Re-Si-Fe, Si-Ca+Re-Si-Fe, Cr+Si-Ca, Sn+Si-Ca+Re-Si-Fe这些孕育剂处理后，以Sn+Si-Ca+Re-Si-Fe复合孕育剂处理的铸铁的性能最好，特别是大大提高了铸铁硬度的均匀性，这对获得高稳定性的铸件十分有利。

Sn的上述作用是由于其溶于奥氏体中，使奥氏体中碳的溶解度提高，而且它又降低了铸铁的共析转变温度，使铸铁获得高珠光体含量，但对石墨形态和分布不产生影响<sup>[1][2]</sup>。

上述试验结果表明，为提高仪器用铸铁的均一性在合金中加入微量Sn (<0.1%)是有利的。

表 2

孕育剂成分 及加入量 %	白口宽度 毫米	机械性能				化学成份%									
		$\sigma_b$ 公斤/ 毫米 <sup>2</sup>	$\sigma_{bb}$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	f 毫米	HB* 公斤/毫 米 <sup>2</sup>	C <sub>总</sub>	C <sub>化</sub>	Si	Mn	P	S	Re	Sn	Cr	CE
0	>15	—	40.15	3.0	—	3.30	—	1.20	0.95	0.055	0.038	—	—	—	3.72
Si 0.6	5	31.90	55.81	4.8	179~207	3.38	0.77	1.68	0.96	0.057	0.038	—	—	—	3.96
30Ca-Si 0.6	8	35.57	69.53	6.1	197~217	3.32	0.75	1.42	0.95	0.055	0.037	—	—	—	3.81
2*ReSiFe0.6	5	31.53	61.51	5.0	179~207	3.38	0.78	1.42	0.98	0.056	0.037	0.074	—	—	3.87
2*ReSiFe0.3 30Ca-Si 0.3	6	36.37	64.87	5.6	187~217	3.36	0.77	1.50	0.99	0.053	0.036	0.018	—	—	3.88
2*ReSiFe0.3 30Ca-Si 0.3 Sn 0.05	7	36.43	67.74	5.2	207~223	3.35	1.04	1.50	0.94	0.056	0.034	0.035	0.04	—	3.87
30CaSi 0.4 65Cr Fe 0.2	10	35.76	65.89	5.6	187~217	3.34	0.80	1.40	0.95	0.052	0.035	—	—	0.17	3.82

\* 此为阶梯形试样60毫米和10毫米阶梯心部硬度

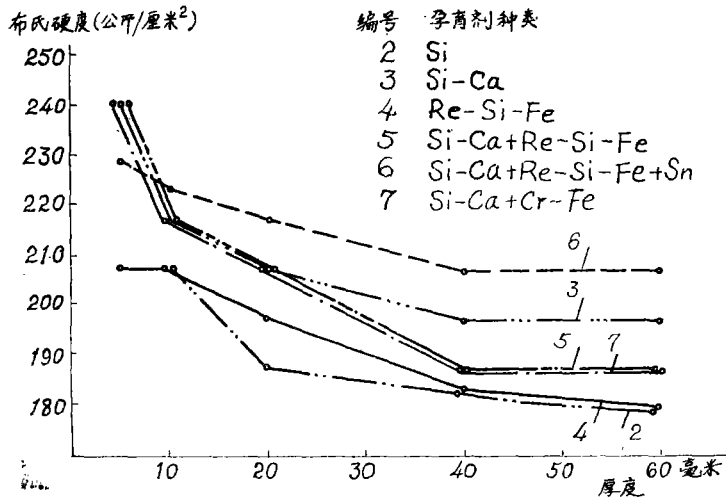


图 3 不同孕育剂处理的铸铁阶梯试样心部硬度分布

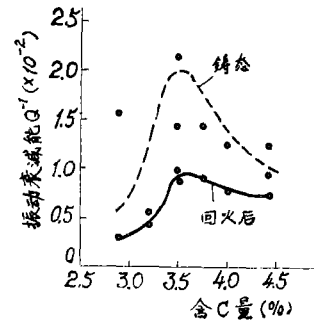


图 4 振动衰减能与含C量的关系

此外,为提高铸件的减振性能,原铁水的碳当量不应过低。图4为资料[3]提出的振动衰减性能与含碳量的关系。从图可见,当含碳量从3.0%增加至3.5%,减振性能提高一倍多。因此,从保证良好的减振性能角度,含碳量应高一些,再考虑强度刚度的要求,使碳当量控制在3.9~4.1%较为合适。

为使铸铁的石墨呈均匀分布的A型,为了减小石墨尖角处的应力集中,使石墨尖角处应圆滑些,根据资料[4][5]等的介绍,认为采用Si-Ca和Re-Si-Fe复合孕育剂处理的效果好。

根据上述试验及分析,试验大平台采用下列合金成份:原铁水为3.3~3.5%C、1.2~

1.3%Si、0.8~1.0%Mn<0.1%P <0.1%S，加入微量Sn(0.03~0.05%)合金化，用Si-Ca与Re-Si-Fe（比例为1:1）复合孕育剂孕育处理。

铸铁在2吨热风冲天炉内熔化，配料为40%废钢、30%Z15生铁、30%回炉铁、1.1%75Mn-Fe。

孕育剂中的Si-Ca(30%Ca)和2\*合金（Re20~25%Si~40%Ca1~3%）粉碎成2~5毫米，用前预热到200℃。

要求铁水出炉温度高于1400℃，原铁水白口宽度大于15毫米。当出铁三分之一左右在出铁槽徐徐加入孕育剂，然后在包内充分搅拌，取三角试片，白口宽度6毫米。

1360℃开始浇注，从孕育处理至浇注完成共用10分钟。

### 三、铸造工艺及铸件凝固过程的温度分布

铸造工艺考虑的核心问题是使铸件在浇注和凝固过程中各部位的温度差和冷速差减小，减少型芯阻力，保证铸件壁厚尺寸。以期得到组织、硬度均匀，铸造应力小的铸件。

图5为铸件的铸造工艺简图。考虑了以下几点：

1. 为使进入型腔内铁水温度尽量均匀，采用一个浇口盆通过两个直浇道、分上下两层每面八个内浇口从铸件两边进入铁水，并且内浇口有一定角度，以使铁水进入型腔有一定转动，对铁水温度有一定的均匀作用。

2. 未设置内浇口的另外两边设置侧冒口六个，除排渣气和补缩外，主要使铸件热量分布均匀。

3. 为保证工作面质量，不下卡子，故此芯铁刚度较大，防止型芯变形。

4. 为减少芯子对铸件的收缩阻力，芯砂中加入1.5%木屑，以增加芯子退让性。

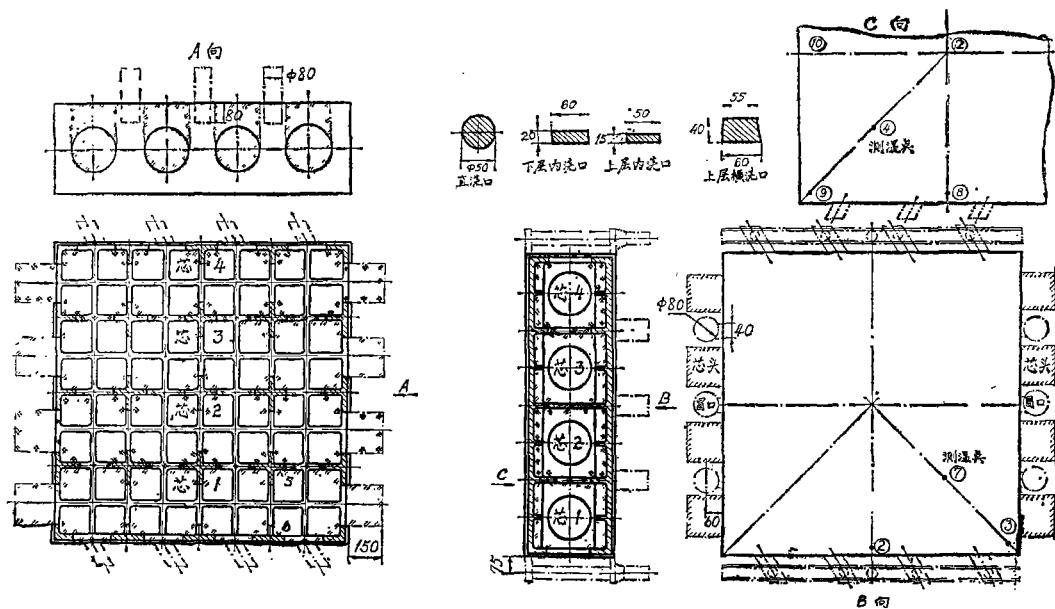


图5 铸造工艺图

5. 制作型芯时, 按图所示位置设置测温热偶的石英保护管。

浇注及凝固过程中铸件温度的测量是通过插入图 5 所示位置的石英管中的铂铑—铂热偶进行的, 用两台 6 点 XWD 自动平衡记录仪进行连续记录, 使用前热偶均经过校准, 测量时热偶冷端分组集中。热偶 5、6、13 插入型芯中测量铸件内表面温度变化, 热偶 2、3、7 测量铸件上表面温度, 热偶 4、8、9、10、12 测量铸件下表面温度。铸件在铸型中冷却 48 小时。测量结果表示于图 6。

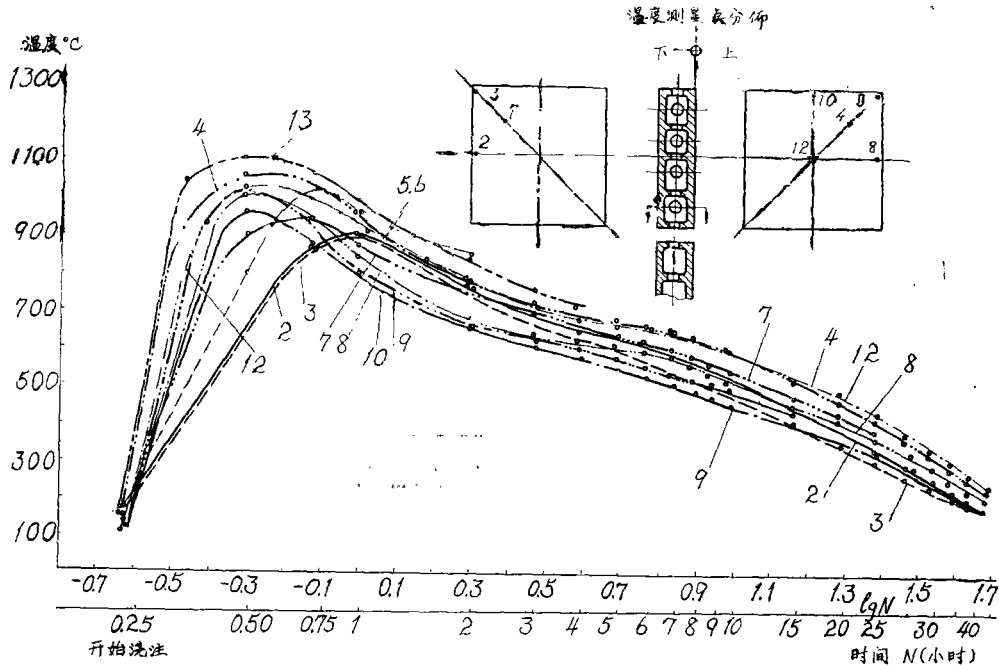


图 6 浇注及凝固过程中铸件温度变化

测试结果表明:

1. 在本试验的工艺条件下, 冷速最慢的为型腔内部 (5、6、13点), 冷却速度最快的为上下平面的边角部位 (3、9点), 最大温差达 200℃。

2. 不同温度范围内各点平均冷速表示于表 3。可见, 在 700~900℃ 范围内, 各部位冷速差较大, 冷速最快的边角部位达 150~200 度/小时, 而型腔内表面铸件冷速仅为 80 度/小时

表 3

温度范围℃	平均冷速度/小时											
	型腔内			上平面			下平面					
	13	5	6	3(角)	2(边)	7(次中)	9(角)	10(边)	8(边)	4(次中)	12(中)	
900~700	~80	~80	~80	~150	~100	~100	~200	~200	~200	~100	~100	
700~500	—	—	—	~30	~22	~22	~35	~25	~20	~15	~12	
500~400	—	—	—	~14	~13	~9	~11	—	~10	~10	~9	

左右。下平面中心部位冷速为 100 度/小时左右。但当铸件进入 700~500℃ 范围内, 即产生应力的温度范围, 各部位冷速差有所降低, 冷速大大减慢, 平面部分心部冷速为 12~15 度/小时, 而边角部位为 30~35 度/小时。当冷却到 500℃ 以下, 冷速更趋于一致, 冷速最快的边角

部位为14度/小时左右，中心部位为9度/小时左右。

3. 铸件下平面中心部位(12)和边角部位(9)在600~400℃间最大温差120~140℃，随温度下降温差减小，当铸件达到200℃时上述两点最大温差为60℃。

从上述结果可见，只从浇冒口系统入手来调整铸件温度分布的效果是有限的，使铸件温差及冷速差还是较大的。

#### 四、铸件性能检测

化学成份(表4)

表 4

元 素	C	Si	Mn	S	P	Re	Sn	CE
含 量%	3.52	1.60	0.96	0.085	0.056	0.033	0.035	4.05

机械性能(表5)达到HT25—47性能指标。

表 5

抗拉强度 $\sigma_b$ , 公斤/毫米 <sup>2</sup>	抗弯强度 $\sigma_{bh}$ , 公斤/毫米 <sup>2</sup>	挠 度 f 毫米
25.02, 25.04, 24.96 平均25.01	51.0, 47.0, 51.7 平均49.9	5, 5, 5 平均5

铸件工作表面硬度分布。表6为按图7位置用大工件硬度计每点测量三次的硬度平均值。最高硬度值为HB215，最低为HB181，硬度最大差值34HB。将对角线方向各点硬度值画成图8，由图中可见，中心部位的8、9点硬度值最低向边角处硬度逐渐增高。

表 6

位 置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
HB 平均值	197	204	188	186	196	182	190	185	181	185	193	182	186	185	204	215	192	211	191

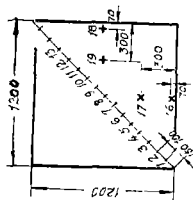


图 7 测量硬度位置

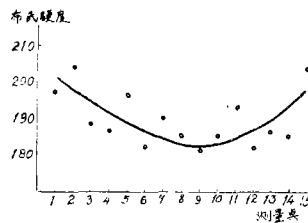
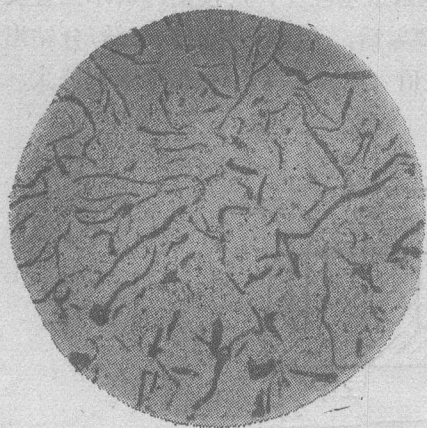
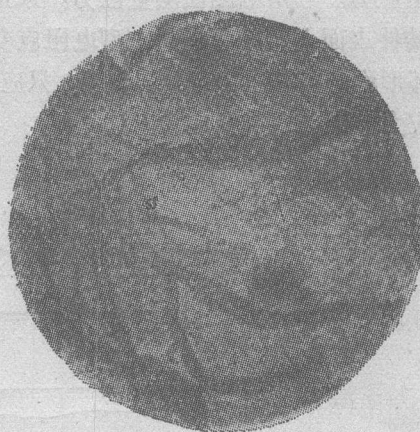


图 8 平台表面硬度分布

金相组织。对平台工作表面粗加工后在对角线方向从中心向边角进行逐点观察显微组织。结果表明，中心与边部组织基本一致，基体95%以上为珠光体，石墨为A型，石墨片长度大多数为100~150微米。图9为平台表面加工掉1毫米和10毫米及 $\phi 30$ 试棒的金相组织照片。比较这三组照片的石墨及基体说明，平台表面加工1毫米和10毫米处的基体组织基本一致，但石墨内部的稍长， $\phi 30$ 试棒的石墨也更细小些。这表明，冷速差反应在金相组织上的一定差别，但总的看来，差别还是不大的，比较均匀的。



石墨  
×100

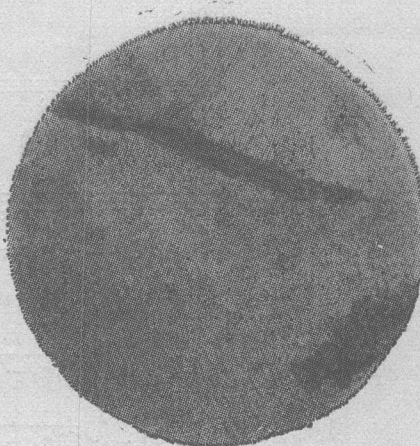


基体  
×500

A.  $\phi 30$  试棒心部

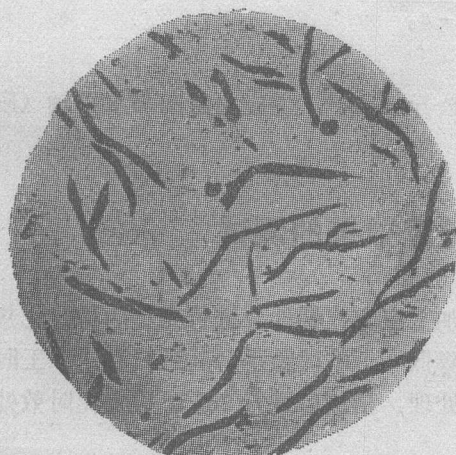


石墨  
×100



基体  
×500

B. 平台表面加工掉 1 毫米



石墨  
×100



基体  
×500

C. 平台表面加工掉 8 毫米

图9 试样及平台表面显微组织

铸造应力。利用电测法测量应力，采用 $3.0 \times 12$ 毫米纸基应变片，按图10所示位置及方法贴在铸件表面上，用YJD—1型电阻应变仪测量，调零后，用环形钻以11.2转/分钻出深20毫米环形沟，使其应力释放，测量3只应变片的应变值 $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$ 。并根据下列公式，计算出主应力方向的应变及应力<sup>[5]</sup>。

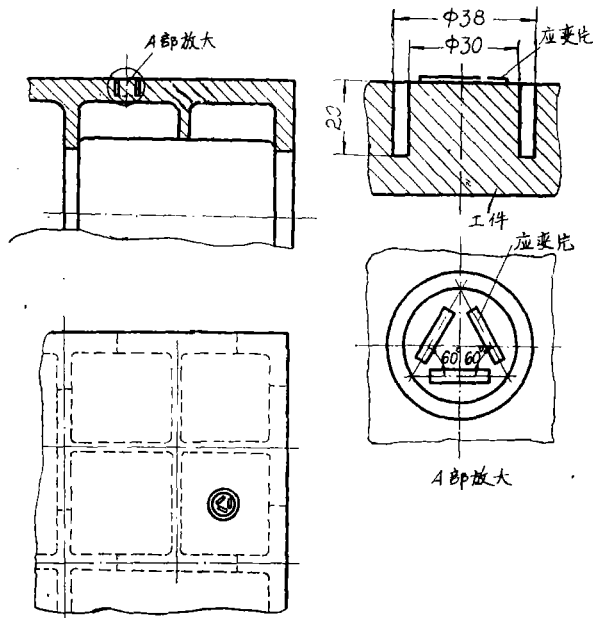


图10 常温应力应变测试位置及方法

$$\varepsilon_x = \frac{1}{3} \left\{ (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) + \sqrt{[3\varepsilon_1 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)]^2 + 3(\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} \right\}$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{3} \left\{ (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) - \sqrt{[3\varepsilon_1 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)]^2 + 3(\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} \right\}$$

$$\sigma_x = \frac{\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y}{1 - \mu^2} E$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sqrt{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_x)}{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}$$

$$\sigma_y = \frac{\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x}{1 - \mu^2} E$$

测试结果，铸件平面所测部位的铸造应力为3.2公斤/毫米<sup>2</sup>。主应力方向与水平轴（应变片1方向）成72°角。

## 五 铸件稳定化处理及其处理效果的测试

为最大限度的消除铸造应力及机械加工后产生的加工应力，铸件要进行充分的稳定化热处理。同时，处理过程中尽量减少对材料松弛强度的降低<sup>[5]</sup>。本试验平台共进行三次人工时效处理：铸后及粗加工后分别进行540℃稳定化时效处理，精刨后进行255℃稳定化时效处理。

### 1. 热处理条件、检测内容及方法

稳定化时效处理是用Z144鼓风式电炉内进行，炉膛内尺寸5×3米，炉内用5只热偶

监测温度。炉内最大温差 24℃。装炉时为防止铸件自重变形，使各部位受热均匀，将铸件沿刚度最大方向立放。

#### 检测内容及方法：

〈1〉测定处理前后对应部位的应力值，判定经过处理残余应力消除情况。每次测量部位均为图10所示的对应部位，这些部位的工艺条件是一致的。

〈2〉测定稳定化处理前后铸件平面面积变化，以判定热处理使铸件产生变形大小。在铸件表面首先加工出基准测量槽，按图11标定的位置用水平仪或在导轨磨床上用百分表作相应测量。

〈3〉测量热处理过程中某一部位应变情况，以判断保温时间的合理性。采用 HG600 高温应变片、用 WD—1 微型点焊机将应变片焊在要测试部位，并且放好补偿应变片，从炉内引线至炉外连接应变仪，调零后，随温度升高，不断按试验曲线修正应变片的灵敏系数 K 值，读出相应温度下的应变值，如果应变值基本不变了，表明所测部位应力基本停止释放，此时应停止保温，开始降温。

## 2. 热处理规范

三次稳定化处理的规范列于表7。第一次时效处理为铸后的消除铸造应力处理。在试验过程中由于炉子故障而使保温时间缩短。第二次时效为消除粗加工应力处理，第三次时效为精加工后的最后稳定化时效处理，处理后直接进行刮研。

## 3. 测试结果及讨论

表 7

状 态	升温速度 度/小时			保 温		降温速度 度/小时			出炉 温度℃
	20℃~200℃	200~400℃	>400℃	温度(℃)	时间(小时)	540~500℃	400~200℃	250~100℃	
铸后	25	20	10	540	0.5	20	12	—	95
粗加工后	25	20	10	540	3	15	10	—	108
精加工后	—	—	—	255	4	—	—	15~10	<100

〈1〉各工序间铸件相应部位的表面应力测试结果列于表8。从表中可见：

表 8

状 态	铸态	第一次时效后	粗加工后	第二次时效后	精刨后	第三次时效后
主应力方向最大应力绝对值公斤/毫米 <sup>2</sup>	3.20	0.69	2.30	0.60	1.80	0.71

① 三次时效都有比较明显的消除应力效果。第一次时效，由于炉子出现故障，仅保温半小时情况下，由于严格控制冷速，仍能消除大部分残余应力，消除应力79%。第二次消除加工应力处理也得到良好效果，消除应力74%，第三次低温时效，使残余应力从1.8公斤/毫米<sup>2</sup>降至0.71公斤/毫米<sup>2</sup>，也是令人满意的。

② 每次机械加工都使零件表面应力急剧增加，吃刀量越大，产生应力越大。加工产生的表面应力较易消除，即使在255℃温度下时效也能全部消除加工产生的应力。

③ 各次稳定化处理，均保留0.6~0.7公斤/毫米<sup>2</sup>的残余应力。这部分应力为此种热处

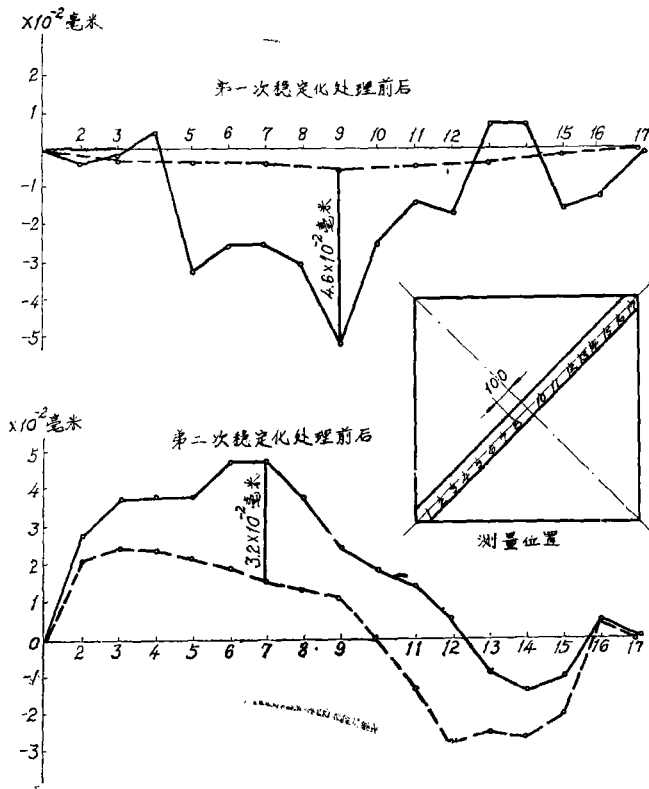


图11 稳定化处理前后铸件变形情况

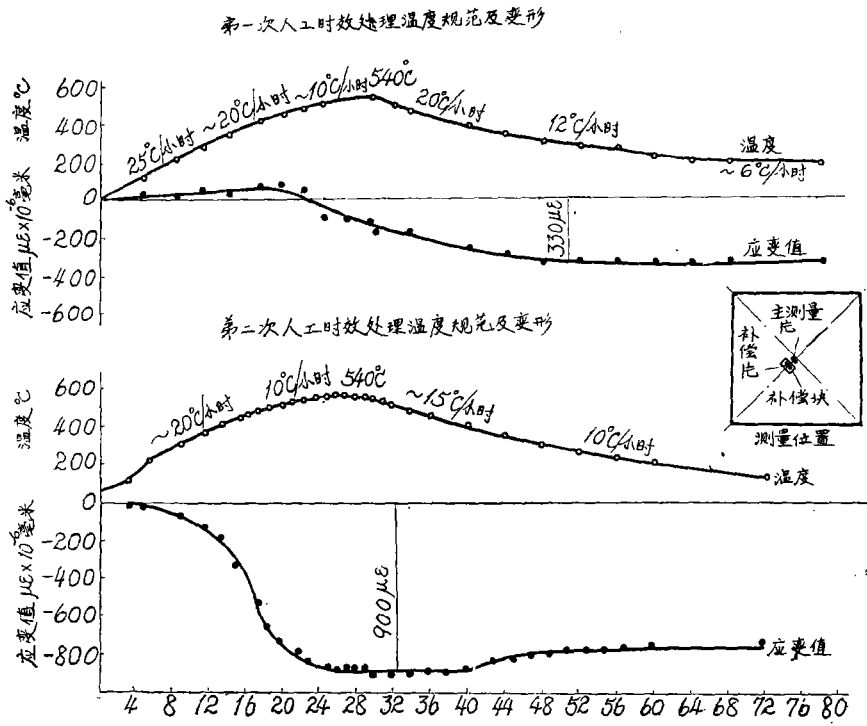


图12 稳定化处理规范及处理中变形情况

理条件下无法消除的残余应力。因为降温时，铸件各部位总是存在温差及冷速差，做不到完全均衡冷却，因而势必产生一定的残余应力。

〈2〉铸件稳定化处理前后铸件变形情况。测量结果表示于图11。结果表明，变形最大的位置在平台中心附近，第一次时效后铸件最大变形值为  $4.6 \times 10^{-2}$  毫米，第二次处理后为  $3.2 \times 10^{-2}$  毫米。这种变形除由于铸造应力释放引起的外，高温下铸件亦产生一定的自重变形。第一次时效由于铸造应力释放量较大，故整体变形较大。第二次时效主要释放的为表面加工应力，所以变形量小。

〈3〉图12为时效过程中平台中心部位应变曲线。由图可见：

① 200℃以上就有消除应力作用，400℃左右开始应力释放大大加速。

② 第一次时效时（图12—A）由于保温时间短，在冷却过程中应力继续释放，达到300℃左右时应变值不再变化，应力停止释放，而通过常温下应力测试表明（表8），应力基本清除。第二次时效时要消除的应力为表面加工应力，从200℃开始，应变值就有所变化，表明应力开始释放，在400~500℃间缓慢加热过程中应力就已基本释放，在540℃保温及降温过程中应变值基本恒定不变，表明已基本无应力释放。这说明，铸造产生的残余应力的消除比表面加工应力的消除要困难些。对于加工产生的表面应力采用250~300℃的时效处理，保温适当的时间就能全部消除其加工应力。

## 六、初步结论

1. 含C3.3~3.5% Si 1.5~1.7% CE3.8~4.0%的铸铁加入微量Sn（0.04%左右）并用Si—Ca与Re—Si—Fe复合孕育剂孕育处理的灰铸铁综合性能好、均一性好、工艺简单，适于作为高稳定性高均匀性要求的精密机械的基础铸件。

2. 采用上述材料，按图5工艺浇注的1200×1200×350毫米的平台，在铸铁的弹塑性转变的温度范围内（500~700℃）冷速为30~12度/小时，铸件平面中心部位与边角部位的冷速差达18度/小时，最大温差为120~140℃。低于500℃冷却缓慢（9~14度/小时），低于200℃打箱。此种情况下测得铸件平面铸造应力为3.20公斤/毫米<sup>2</sup>。工作表面加工掉10毫米后基体组织为95%以上珠光体，石墨片较大，硬度为HB181~215，心部与边角部位最大硬度差值34HB。

3. 高精度要求的铸件需进行消除应力稳定化处理，在缓慢加热（≤25度/小时）及缓慢冷却（≤20度/小时）情况下，可消除残余应力70~80%。此件经过两次高温（540℃）时效，一次低温（255℃）时效后，最后残余应力为0.71公斤/毫米<sup>2</sup>。

下一步工作是将此试验平台刮研到0.6微米精度后，封存起来，在恒温条件下定期测量其尺寸变化。

### 参 考 文 献

〔1〕马大观；《机械工程材料》，1980年，4，32~35页。

〔2〕Д.П.Иванов и Т.Д.；《Литейное Производство》，1974，7。

〔3〕植日昭仁など；《铸锻造と热处理》，1979，6，5~12页。

〔4〕木下禾大；《铸锻造と热处理》，1979，9，1~9页。

〔5〕О.Ю.Коцюбинский；《Стабилизация Размеров Чугунных отливок》，1974。