

兰州理工大学材料科学与工程学院

材料成型原理

(铸造、焊接、金压)

实 验 指 导 书

2006. 3

实验一 铸造合金流动性的测定

一、概述

液态合金充填铸型型腔获得形状完整、轮廓清晰的铸件的能力称为液态合金的充型能力。它受合金性质、铸型性质、浇注条件和铸件结构四方面因素的影响。流动性是指液态合金本身充填铸型的能力。流动性好的合金，由于其充型能力强，因而容易充满型腔，有利于获得形状完整、轮廓清晰的铸件。流动性差的合金，充型能力就差，容易使铸件产生浇不足、冷隔等铸造缺陷。因此，流动性是铸造合金重要的铸造性能之一。

二、测试方法

流动性测试是将液态合金浇入专门设计的流动性试样沟道（型腔）中，以其停止流动时获得的长度作为流动性指标；也可以用试样尖端或织薄部分被充填的程度作为流动性指标。后者旨在研究液态合金充填型腔细薄部分及棱兔的能力。由于流动性的测定是在特定的铸型条件、浇注条件和试样沟道中进行的，所以，测定时必须稳定上述条件，才能保证测试结果有较好的再现性和精确度。

铸造合金种类繁多（铸铁、铸钢、有色合金、高温合金等等），各种合金的物理及热物理性质千差万别；所研究问题的侧重点又不尽相同。因此，流动性试样的类型很多，其中，绝大多数采用重力浇注方法，个别采用真空吸铸；沟道大多做成直棒形或弯曲成一定形状（如螺旋线形）。试样铸型大多为砂型和金属型，偶尔采用石墨型。

下面介绍几种常用或结构特殊的流动性试样：

1. 螺旋线形

螺旋线形应用最为广泛，目前已被建议为标准方法。螺旋线形流动性试样见图 1-1。

螺旋线形试样以采用阿基米德螺旋线和渐开线为多见。按内浇口位置又可分为内流式与外流式，内流式结构简单，造型方便，但由于流道曲折，局部阻力损失随流程的增大而增大，再加上沿程阻力损失，将使液态合金的流动条件的变化较大。外流式的结构较复杂，但局部阻力损失渐趋减少。沿程阻力损失逐渐增大，结果，流动“件“变化较小，测定结果的精确度较高。

由于铸型和浇注条件在每次测试由很难保持一致，特别是浇注时压头（浇注

速度、流量等)的波动对测试结果的影响很大。因此,采用这种试样取得满意结果的关键,在于稳定金属压头。目前,主要采取改进浇注系统结构,使浇注时金属压头尽可能稳定的措施来提高测试的精确度。

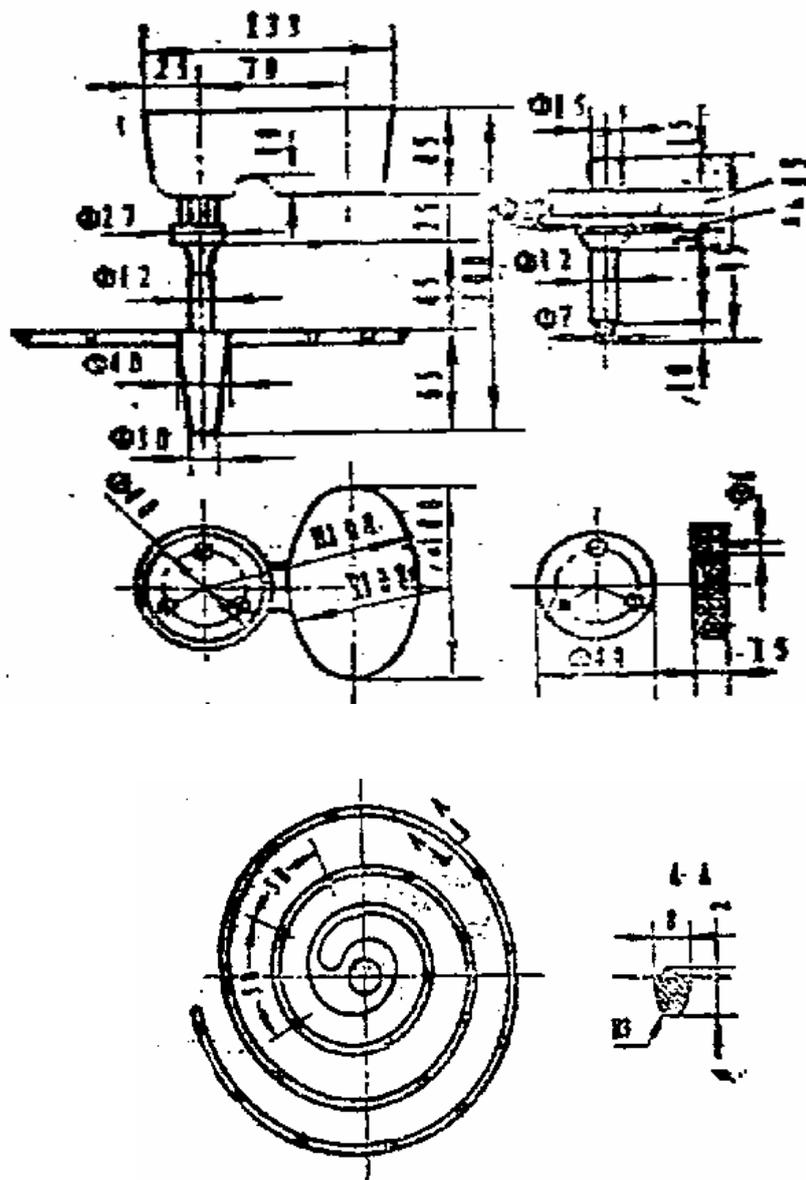


图 1-1 螺旋线形流动性试样

2. 真空吸铸流动性试样 (水平式)

水平真空吸铸式流动性测试装置见图 1-2

这种测试方法的优点是铸型条件和液态合金的充型压头稳定—真空度可随液态合金的密度不同而改变,能使各种合金在相同压头下充填铸型万提高了测定

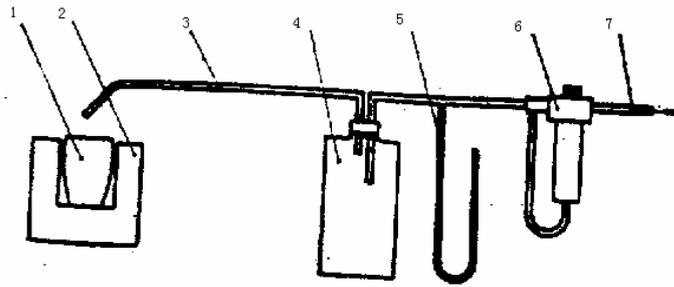


图 1-2 水平真空吸铸装置示意图

1. 坩埚 2. 电炉 3. 耐热玻璃 4. 真空室 5. 艾空计 6. 气压控制器 7. 抽气口
 结果的再现性，还可以观察充填过程，记录流动长度与时间的关系。这种测定装置比较复杂。

3. 花盘形流动性试样

试样流道截面积的选择，对流动性测量敏感性的影响很大；截面过小，浇注温度影响流动性的敏感性变差；而截面过大，液态合金的表面张力及氧化膜影响流动性的敏感性变差。花盘形流动性试样可同时浇注若干根粗细不等的沟道，排除了试样截面大小上选择的困难，又可反映充填细薄铸件的能力。

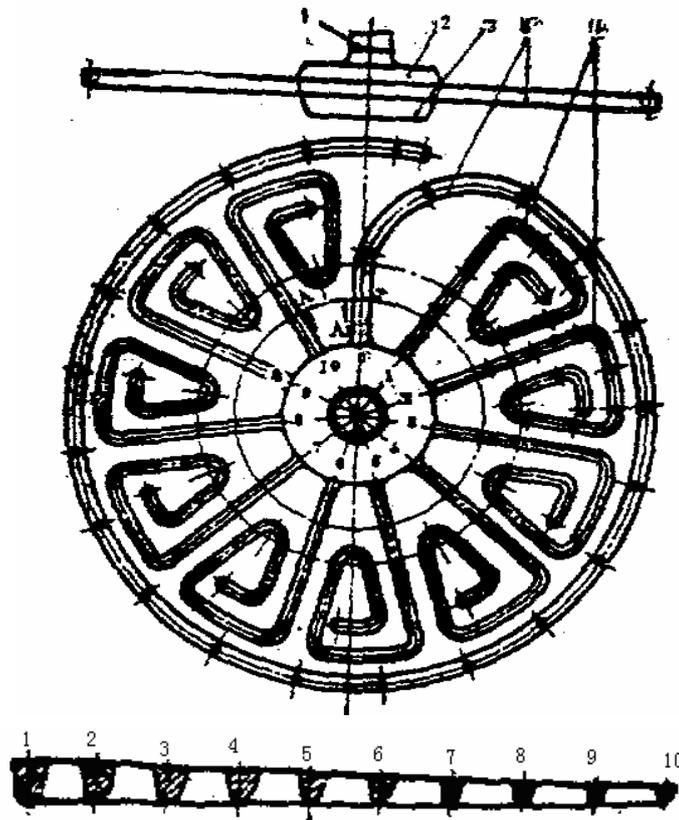


图 1-3 花盘形流动性试样

1. 直浇道 2、3. 内浇道 4. 充型能力的测定沟道 5. 流动性的测定沟道

图 1-3 为花盘形流动性试样, 其中 0 号沟道具有和普通螺旋试样相同的断面和长度, 用于测定合金熔液的流动性。1 号至 10 号沟道的长度相同, 但截面积依次递减 10%, 并在每根沟道上做出等分的 10 个凸点, 其中充满的根数为基数, 次一根充到的点数为小数点后的数, 这一数值表示了充型能力。例如前 5 根充满, 第 6 根充到 8 点处, 则充型能力为 5.8 级。

花盘形试样的特点是结构紧凑, 辐射状的排列可以保证充型条件相近。但花盘形试样存在同螺旋试样相似的缺点

4. 立柱形流动性试样

立柱形流动性试样实际上反映了液态合金的充型能力。图 1-4a 是浇柱立柱形试样的铸造型。

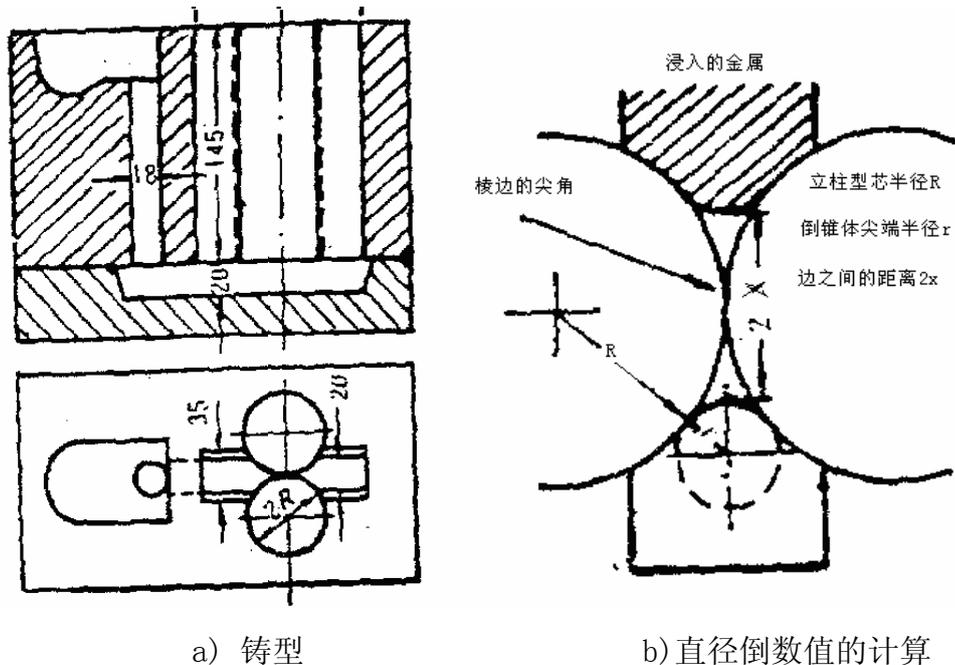


图 1-4 立柱形试样

在直径相等且相切的两个圆柱形立柱间形成一个棱边尖角, 液态合金因毛细管作用而充入其间, 只要测出浇成试样倒锥体尖端的直径, 就可以用此直径的倒数表示充型能力。如图 5-7t, 此直径 d 可按下式计算

$$d = \frac{x^2}{R - x}$$

式中: R 为圆柱形立柱的半径; x 为试样两尖端间距离之半。上式是在液态合金

浸润角为 180° 时的计算式，这表明浸润角小于此值时，对测试结果的影响不大。所以，当圆柱形立柱的尺寸选定时，只要测定试样两失端间的距离 $2x$ ，就不难通过上式计算充型能力 F

$$F = \frac{1}{d}$$

这种试样的充型能力与压头 h ，液态合金的密度 ρ 、表面张力 σ 间的关系是

$$F = \frac{\rho gh}{2\sigma}$$

式中， g 为重为加速度。

圆柱形试样的优点是直观，测量方便，且给出整个液柱高度范围下的许多测量值它既可测定纯液态合金性质对充型能力的影响，又可说凝固特性对充型能力的影响。

三、主要影响因素及其控制

影响液态合金流动性的因素很多，其中主要有合金成分，浇注温度、铸型条件和压力等，一般说来，这些因素是保证测试精确度，使测定结果具有良好再现性的关键。

1. 合金成分的影响

不同成分的合金具有不同的结晶方式，结晶温度范围窄的合金倾向于逐层凝固，流动性好。结晶温度范围宽的合金倾向于糊状凝固，流动性差。易形成低熔点夹杂或降低熔液粘度及减小合金结晶温度范围的元素，对提高流动性有利，反之则不利。

合金成分作为实验研究内容，一般是确定的。这样，从实验角度看，影响流动性测试精度与再现性的主要因素为微量固体夹杂。这就需要严格掌握熔炼操作。如，选用干净、干燥、没有遗传性的原料；熔炼过程中尽量避免熔液氧化和吸气；对某些合金要充分脱氧或精炼除气，减少熔液中的固体夹杂物及气体。此外，对某些合金还要控制残留夹杂物的类型，如对钢液进行脱氧时，先加硅铁后再加锰铁会形成大量细小的高熔点尖角形 SiO_2 ，难以去除，钢液流动性变差，但如先加锰铁后和硅铁，脱氧产物主要是低熔点硅酸盐，容易去除，有利于钢液的流动。

2. 铸型条件的影响

铸型条件的影响体现在两个方面：

(1) 铸型的机械阻力对液态合金充型速度的影响；

(2) 铸型与液态合金的热交换强度对其保持流动能力的的影响

影响充型速度的有沟道的沿程阻力和局部阻力及沟道中气体的反压力等。沟道的沿程阻力与铸型的表面状况有关，局部阻力与试样的形式、浇注系统的结构等因素有关，而沟道中的气体反压力则主要取决于型砂水分等发气物质的含量、铸型透气性和排气孔的开设。在实验中上述因素的影响机制是十分复杂的，例如，铸型具有一定的发气能力时，能在金属液与铸型之间形成气膜，从而减小流动的沿程阻力损失总之，在实验中应努力保证这些因素不变。

液态合金与铸型的热交换强度和铸型的蓄热系数及铸型的温度有关，而这些因素对流动性的影响也是十分复杂的。实验中应尽可能使涂料、型砂成分、砂型的紧实度以及铸型的温度等因素保持不变，或将其影响减至最小

流动性试样如在金属型内浇注，主要控制因素是金属型的预热温度。在使用涂料的情况下，涂料的成分及涂料层厚度应保持一致。

3. 浇注温度的影响

浇注温度对液态合金流动性的影响很大，一般在流动性实验中将其作为主要的研究内容之一。从实验角度来说，重要的是如何控制进入沟道的熔液温度恰好是实验方案规定的浇注温度一般情况下，浇包与浇口杯中熔液的温差是很大的因此为了保证实验精度与再现性，应当直接测定进入沟道时的熔液温度。目前一般采用在有问门的浇口杯中测温的办法，待温度达到实验方案的规定温度时，迅速开闸浇注。当然浇口杯中的液态合金在浇注过程中还会继续降温，分析实验结果时，应考虑这一因素。

4. 充型压头的影响

充型压头是液态合金在沟道中流动的动力，必须保证充型压头稳定。稳定充型压头必须考虑静压头的控制与动压头的控制，目前主要在浇口杯上采取措施。图 1-5 所示侧挡板定量浇口杯，可以消除由于浇注速度不稳定而造成的动压头波动。侧挡板与塞杆相比，在提起时对液态合金的扰动较小，并且便于观察提起前有无液态合金的渗漏。在浇口杯侧面所高的溢流槽，用以控制定量浇口杯中金属液面的高度但这种方法仍难排除充型过程中静压头的变化，流动性差，液面下峰少。

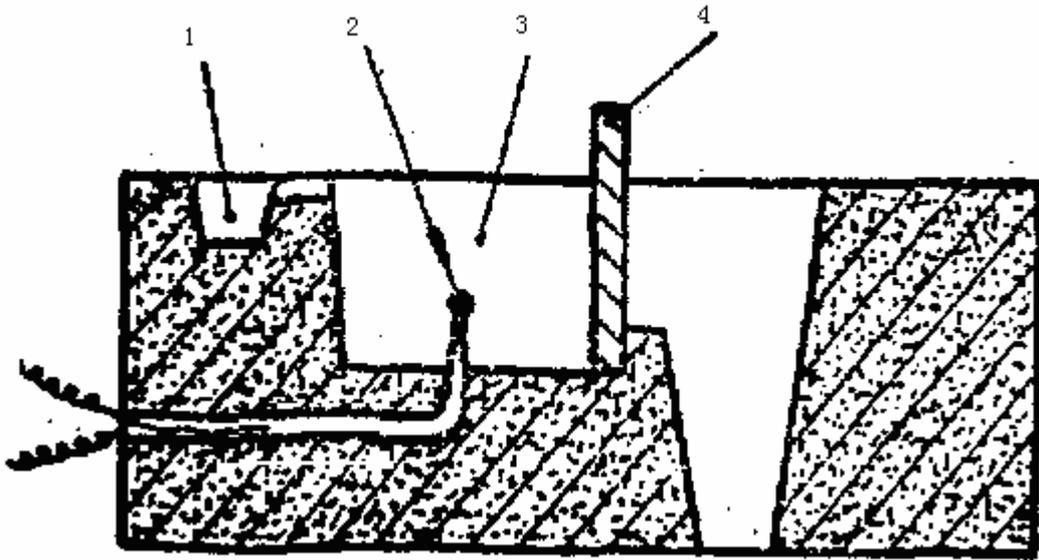
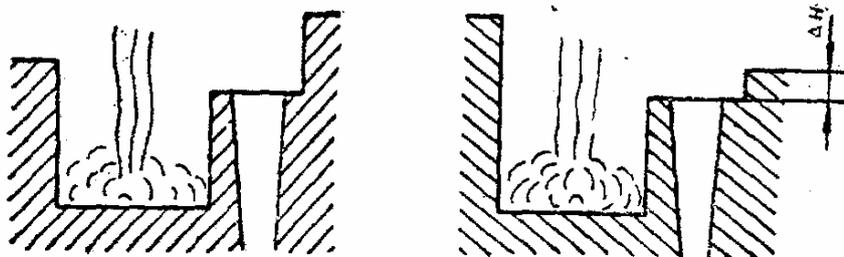


图 1-5 测挡板浇口杯

1. 溢流槽 2. 热电偶 3. 浇口杯 4. 侧挡板

图 1-6 所示堤坝式浇口杯, 可以稳定静压头。图 1-6a 的结构由于液流居中, 有可能削弱或干扰高坝的作用, 故以图 1-6b 的结构为好。这类浇口杯对稳定静压有一定的作用, 但仍有一定的波动, 为了尽量减少这种波动, ΔH 宜小, 但 ΔH 过小时溢流将过多, 一般取 $\Delta H = 1.0\text{cm}$ 比较适当。



a)

b)

图 1-6 堤坝式浇口杯

为使试样沟道中一有流动, 即处于 $H + \Delta H$ 的全压, 可以在直浇道下设置一容积足够的积液坑 (全压), 其结构见图 1-7。

积液坑的容积 V_1 可由下式确定:

$$V_1 = \int_0^{V_2} Q_1 dt$$

式中 V_2 —直浇道容积

T_{V_2} —直浇道充满时间, $T_{V_2} = V_2 / (Q_2 - Q_1)$; Q_2 、 Q_1 分别为直浇道出、入口

处流量。

若近似认为 Q_1 不随时间变化，则上式可写作：

$V_1 \geq Q_1 T_2$ ，由于 $Q_1 = \mu_1 F_1 \sqrt{2g(H + \Delta H)}$ ， $Q_2 = \mu_2 F_2 \sqrt{2g\Delta H}$ ，所以有

$$V_1 \geq \frac{\mu_1 F_1 \sqrt{H + \Delta H}}{\mu_2 F_2 \sqrt{\Delta H} + \mu_1 F_1 \sqrt{H + \Delta H}} V_2$$

式中， k 、 u ——分别为直浇道出口截面与入口截面的流量系数；

F_1 、 F_2 ——分别为直浇道出、入口截面积。

为了避免 V_1 过大，可适当加大 $(Q_2 - Q_1)$ 。

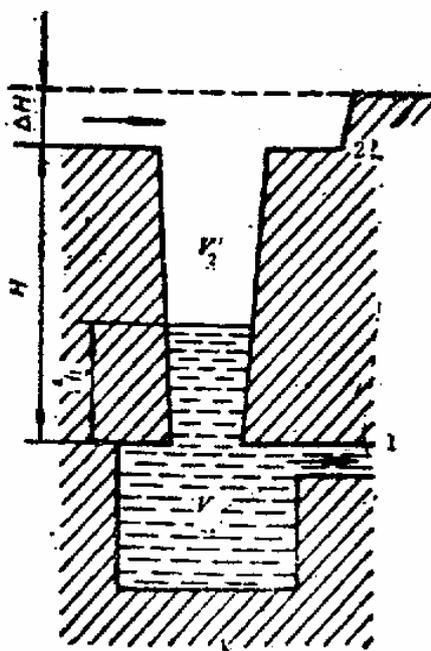


图 1-7 积液坑

四、实例

沈阳铸造研究所草拟的合金流动性测定规范为螺旋形试样，规范主要内容如下：

1. 试样及铸型见图 1-8。一个外浇口箱同时浇注三个螺旋试样，取其平均值表示流动性。

2. 型砂配制：采用 40-10 目石英砂 100%，粘土 18%，水分 5.5%，干混 5-10min，湿压强度 $(0.4-0.5) \times 10^5 \text{Pa}$

3. 造型：手工造型。螺旋线试样模板起模时要平稳，尽量不修型。铸型紧实

度用硬度计检验。注意在沟道末端处开设排气孔。

4. 合箱:放置铸型的地面应使用水平尺检查以保证铸型呈水平。热电偶安放在浇口杯内,距杯底约 10mm,伸出 15 - 20mm。

5. 浇注:浇注前先在浇包中侧温,严格控制浇注温度。浇注要平稳,流股大小要适中。

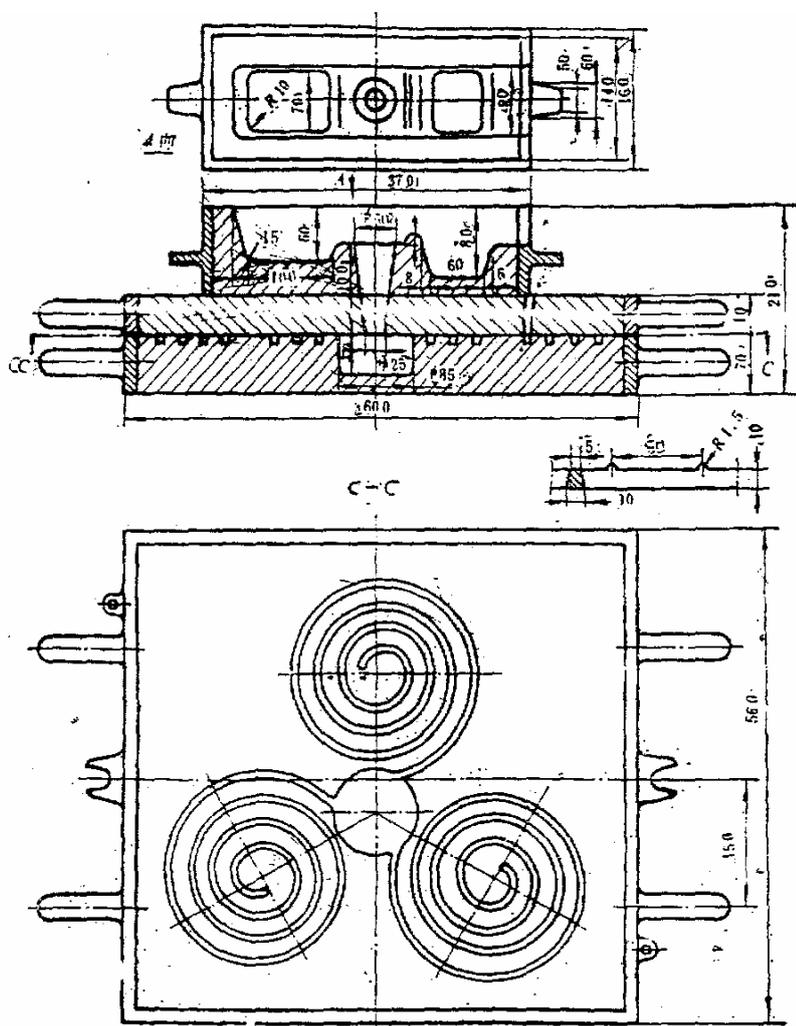


图 1-8 螺旋形流动性试样的铸型图

实验二 合金铸造应力的测定

一、概述

合金在凝固后的冷却过程中，由于铸件各部分冷速不均或受机械阻碍，或相变不同步时，都会使其线收缩受阻而产生铸造应力。铸造应力按其成因，相应有关有热应力、机械阻碍应力和相变应力。

形成铸造应力的原因去除后，若应力随即消失，则称作临时应力，而若保留在铸件中，则为残留应力。一些部位的残留应力是拉应力，另一些部位则受压应力，它们在铸件内达到暂时的平衡。

铸造应力是铸件产生变形或冷裂的主要原因，对铸件质量影响很大。因此，研究铸造应力，对于减小应力措施的制定及其效果的检验，具有重要意义。

有关铸造应力的试验研究，目前主要有以下三个方面。

1. 测定铸件残留应力的数值，以研究各工艺参数对铸件残留应力大小的影响；
2. 测定铸件退火过程中的应力变化曲线，以研究制订消除铸造应力的最佳退火工艺；
3. 测定铸件冷却过程中应力的产生及变化过程，以探讨应力形成机理及其影响因素；

由于铸造应力是在长时间地从高温冷却到室温过程中形成的，与承载构件中的应力分析测试技术相比，铸造应力的测试更为困难，目前还只能做到有条件的比较。在铸造应力的测试中引用新技术，不断提高测试精度，乃是当前一项重要的研究工作。

二、测试方法

1. 应力框法

三杆式应力框试样见图 2-1 在试样浇注后冷却过程的后期，粗杆温度比细杆冷却快。这一时期进行冷却时，两杆温差逐渐减小乃至消失。由于粗细两杆温度不同。冷却过程中的绝对线收缩也就不同。但粗细两杆受两端横梁的制约，不能自由线收缩，应力逐渐增大，因而使在三杆中残留了应力：粗杆残留拉应力，细杆残留压应力。

测试时，先将粗杆上凸台两端铣平，测出AB间尺寸玩。然后在图 2-1 中X-X

位置用钢锯锯断。测出这时凸台两端距离 L_1 ，则中间杆所受拉应力便可计算得到。

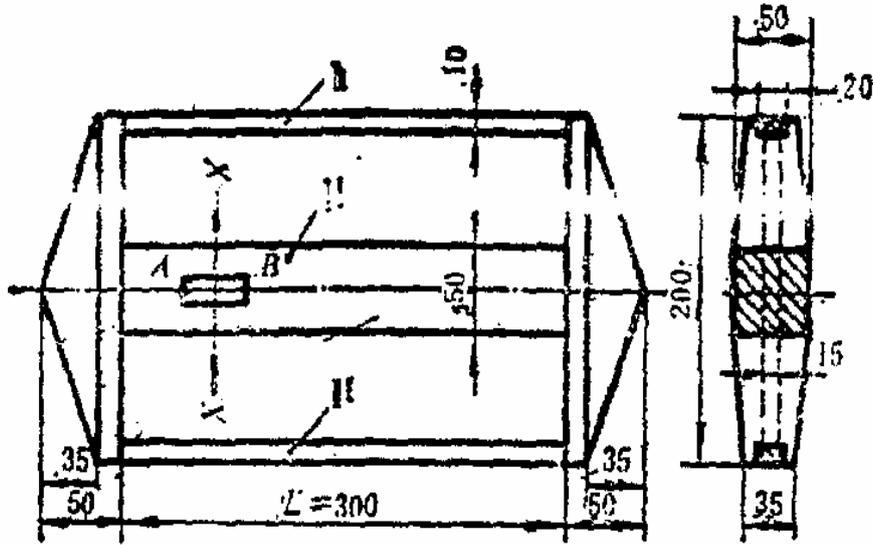


图 2-1 三杆式应力框

在不考虑横梁及粗细杆弯曲变形的情况下，在锯断前，中间粗杆中的力 F_1 与两边细杆中的力 F_{II} 之间的关系为： $F_1 = 2F_{II}$ 。如粗、细杆的截面积分别为 A_1 、 A_{II} ，应力为 σ_1 、 σ_{II} 则 $\sigma_1 A_1 = 2\sigma_{II} A_{II}$ ；锯断后，粗杆的凸台长度由锯断前的 L_0 变为 L_1 ，而 $L_1 - L_0$ 是由粗杆因拉应力及细杆因压应力而合成的弹性变形量，计算方法为

$$l_1 - l_0 = L\delta - (L - l_0)\delta = L\frac{\sigma}{E} - (L + l_0)\frac{\sigma_1}{E_1}$$

式中： σ_1 、 σ 分别为粗杆、细杆的应变； E_1 、 E 粗杆、细杆的弹性模量，设 $E_1 = E_2 = E$ 。

将 (1) 代入 (2)，整理后得粗杆内的拉应力 σ_1 为

$$\sigma_1 = \frac{E(l_1 - l_0)}{L(1 + \frac{A_1}{A}) - l_0}$$

细杆中的压应力 σ_0 可用同法求得为

$$\sigma_0 = \frac{E(l_0 - l_1)}{L + \frac{2A}{A_1}(L - l_0)}$$

$$\delta = (l_1 - l_0) / L$$

由此可见，只有当两细杆截面积之和等于粗杆截面积时，拉应力和压应力才

相等，否则粗杆中测得的仅代表试样中的残留拉应力，并且该数值随试样各杆截面尺寸的不同而不同。所以，应特别注意的是，不同应力框测得的数据不具有可比性。

双杆式应力框见图 2-2, 测试时，将细杆上两凸台的端面铣平，测量两端面距离为 L_0 ，然后在图 2-2 中X-X位置用钢锯锯断，再测两端面距离为 L_1 。类似式 (5-11) 及式 (5-12) 的推导方法，可以求得粗杆中的残留拉应力 σ_1 和细杆中的残留压应力 σ 分别为

$$\sigma_1 = \frac{E(l_0 - l_1)}{L + \frac{A_1}{A}(L - l_0)}$$

$$\sigma = \frac{E(l_0 - l_1)}{L(1 + \frac{A_1}{A}) - l_0}$$

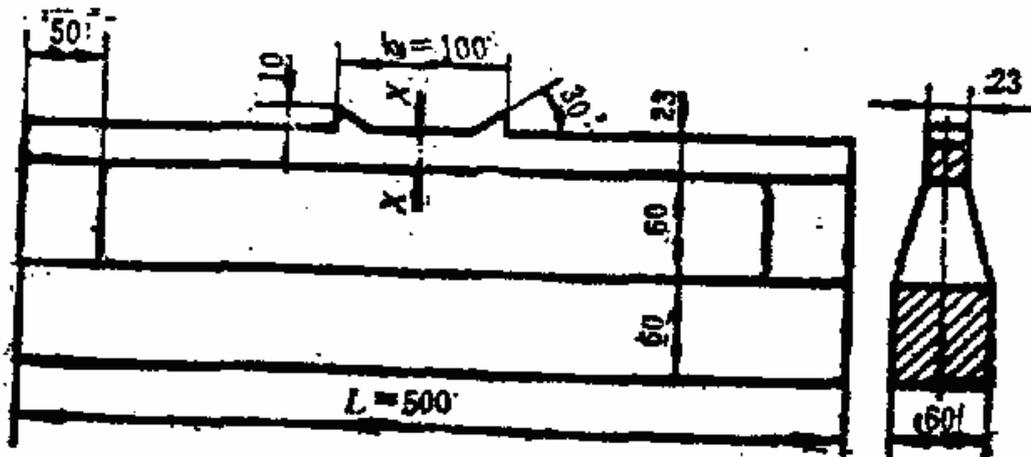


图 2-2 双杆式应力框

在设计应力框的浇注系统时，应使合金熔液均匀流入各杆。以保证各杆中液态合金的初始温度尽可能一致。

应力框测定法的优点是不破坏铸件，测量方便，用与铸件留应力情况相当的一批应力框，进行不同条件的退火，还可以研究制定消除应力的最佳退火工艺，所以目前在生产与研究中的应用比较广泛。这种方法的缺点是应力框结构和铸件结构相差较大，所测数值对铸件只有一定的参考价值。其次，这种方法本身的准确性也不高。

2. 直接测量法

为了测得机床床身、飞轮等铸件的残留应力，也可将这些铸件作破坏试验，直接测量其残留应力的大小。通常采用电阻应变测量方法，即用电阻应变片测定铸件释放残留应力后产生的表面应变，再根据应力、应变的关系式，确定该残留应力值。电阻应变测量技术，除需熟悉测量系统之外，还应正确掌握贴片技术。一个测点上的贴片数和方位问题，由估计该点的应力状态而定。

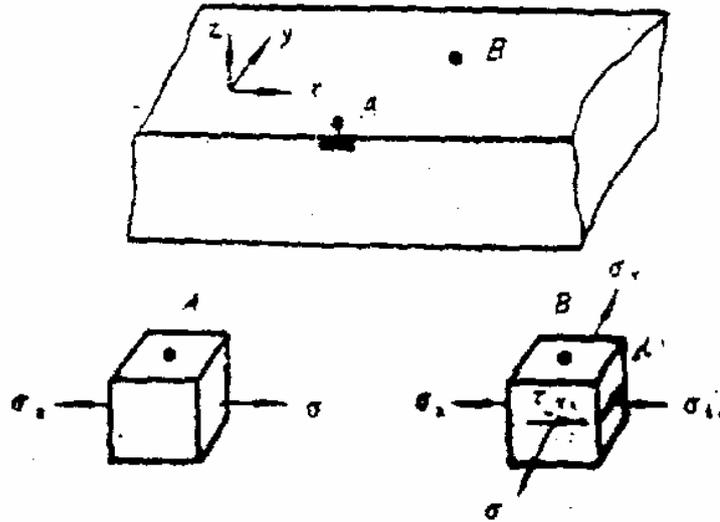


图 2-3 测点的应力状态

如能明确断定测点是单向应力状态，则只要沿应力方向贴一个应变片就够了。无论铸件其他处应力状态如何，铸件棱边上的测点，如图 2-3 的 A 点，却永远处于主方向平行于棱边的单向应力状态。测得主应变后，测点的应力由单向应力状态的虎克定律： $\sigma = E\delta$ 决定。铸件表面上的点如处于双向应力状态（图 2-3 中的 B 点），则其应力—应变关系为

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2}(\delta_x + \mu\delta_y)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2}(\delta_y + \mu\delta_x)$$

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy}$$

式中 μ — 泊松比

G — 剪切模量

δ_x 、 δ_y 、 δ_{xy} — x 、 y 向的应变及 xy 平面内的扭曲应变。

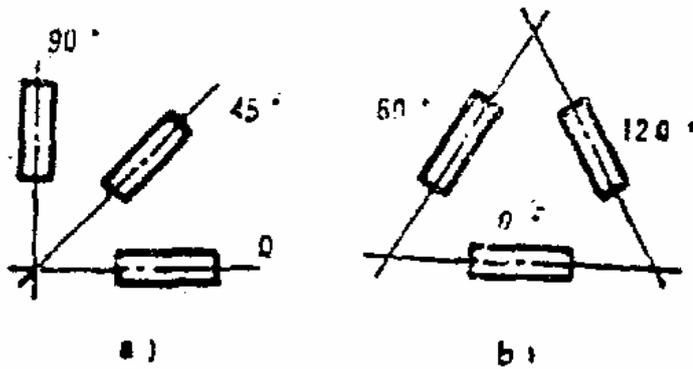
如果主应力方向可以断定，则可令式 (5-16) 中的 $\delta_x = \delta_1$ 、 $\delta_y = \delta_2$ $\delta_{xy} = 0$ ，得到

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2} (\delta_1 + \mu\delta_2)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2} (\delta_2 + \mu\delta_1)$$

可见，一个双向应力状态的点，当主方向已知时，必须用两个应变片，沿两个主方向粘贴，测出两个应变 δ_1 、 δ_2 ，才能算出主应力。

如果主方向无法预先断定，则由式 (5-16) 可知，必须有三个独立数据才能确定该点的应力状态，也就是要在该测点上沿不同方向贴三个应变片才行。为简化应力计算，三个应变片的方位一般取特殊角，如图 2-4 所示。三片 45° 贴法的主应变 δ'_2 和主应力 σ'_2 的计算公式为



a) 三片 45° b) 三片 60°

图 2-4 应变片的两种粘贴法

$$\delta'_2 = \frac{\delta_{0^\circ} + \delta_{90^\circ}}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\delta_{0^\circ} - \delta_{90^\circ})^2 + (2\delta_{45^\circ} - \delta_{0^\circ} - \delta_{90^\circ})^2}$$

$$\sigma'_2 = \frac{E}{2} \left[\frac{\delta_{0^\circ} + \delta_{90^\circ}}{1-\mu} \pm \frac{1}{1+\mu} \sqrt{(\delta_{0^\circ} - \delta_{90^\circ})^2 + (2\delta_{45^\circ} - \delta_{0^\circ} - \delta_{90^\circ})^2} \right]$$

其主方向角 ϕ (σ_2 与 0° 轴线的夹角) 的计算公式为

$$\phi = \frac{1}{2} \arctg \left[\frac{2\delta_{45^\circ} - \delta_{0^\circ} - \delta_{90^\circ}}{\delta_{0^\circ} - \delta_{90^\circ}} \right]$$

$$\delta'_2 = \frac{\delta_{0^0} + \delta_{60^0} + \delta_{120^0}}{2} \pm \sqrt{(\delta_{0^0})^2 - \frac{(\delta_{0^0} + \delta_{60^0} + \delta_{120^0})^3}{3} + \frac{(\delta_{60^0} - \delta_{120^0})^2}{3}}$$

$$\delta'_2 = E \left[\frac{\delta_{0^0} + \delta_{60^0} + \delta_{120^0}}{2} \pm \frac{1}{1+\mu} \sqrt{(\delta_{0^0})^2 - \frac{(\delta_{0^0} + \delta_{60^0} + \delta_{120^0})^3}{3} + \frac{(\delta_{60^0} - \delta_{120^0})^2}{3}} \right]$$

$$\text{主方向的}\phi\text{的计算公式}\phi = \frac{1}{2} \arctg \left[\frac{\sqrt{3}(\delta_{60^0} - \delta_{120^0})}{2\delta_{0^0} - \delta_{60^0} - \delta_{120^0}} \right]$$

式中 δ_{0^0} 、 δ_{45^0} 、 δ_{90^0} ——三片 45°贴法时相应应变片的应变值；

δ_{0^0} 、 δ_{60^0} 、 δ_{120^0} ——三片 60°贴法时相应应变片的应变值。

三片 45°法用于主方向大致知道的情况，将互相垂直的两片沿估计的主方向粘贴。三片 60°法用于主方向无法估计的情况。因为实际贴片方位和预定方位的角偏差对应力测量造成的误差与预定方位和主方向的夹角有关。夹角越大，角偏差造成的误差越大，这就导致了上述两种贴法

贴好应变片。待胶充分干燥后即可逆行测试。这时，逐渐在测点附近慢慢地钻去一薄层金属由于该点内应力被释放了，钻区附近产生的应变量由应变仪放大后由记录仪记录。如此反复进行到预定深度力止。前后两次的数据差即为该次钻孔所除去残留应力引起的应变，进而根据上面列出的公式求得相应的应力。

随着高温应变片的出现，电阻应变测量方法也可以用于高温应力的测试，以了解铸件退火过程中应力变化的情况。这时，只需将高温应变片焊在测量部位和引出导线即可，不须在铸件上钻孔，因为造成应变产生的应力释放是由温度造成的。

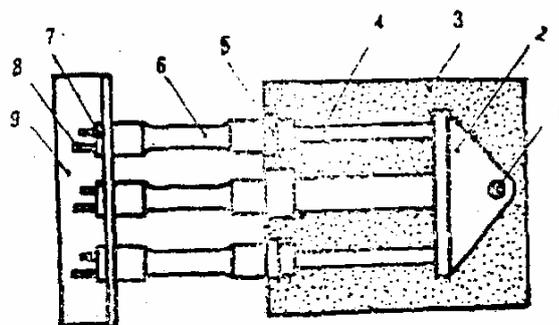
温测试的技术关键是高温应变片的制造，以及所采取的消除高温对测量结果影响的措施。一般，高温应变片用金属片作基底，用高温胶把合金丝粘在基底上。为消除温度变化对电阻值的影响，除工作片外，应增设补偿片，或用半桥自补偿应变片。此外，还应注意排除基底与被测工件因热膨胀系数不同而造成的影响，最简单的办法是采用同质材料作基底。

3. 动态应力测试法

在图 2-1 所示三杆式应力框中，每根直杆都串联一个测力传感器，就可以对杆内从形成应力到室温的拉或压应力的变化实现动态测试。

动态应力测试装置的原理见图 2-5。应力框 4 的两细杆直径为 8mm，粗杆直

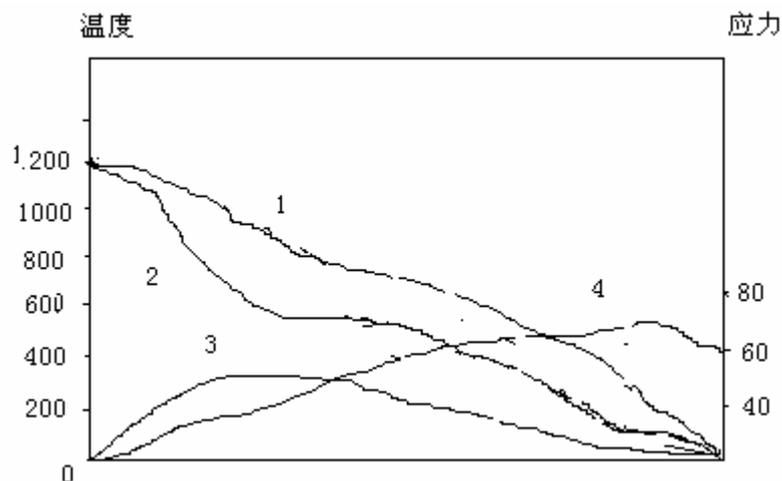
径 20mm 横梁厚度为 10mm。内浇道 2 也是横梁的加强筋，厚度为 3.5mm，浇注后，试样与测杆铸接，通过弹性元件 6 与固定端连在一起。弹性元件 6 上贴有应变片形成的测力传感器。传感器的最大测试应力应取传感器材料屈服强度的 1/3 左右，以保证良好的线性和灵敏度。



1. 直浇道 2. 内浇道 3. 铸型 4. 试样 5. 水冷端 6. 弹性元件 7. 固定端 8. 水冷管 9. 底座图 2-5 动态应力测试装置简图

传感器的应力信号及热电偶的温瘦信号都送到函数记录仪。即可将试样内的 f_0 力—时间曲线和温度—时间曲线自动记录下来。

图 2-6 所示为对灰铸铁的测试结果。冷却曲线在共晶转变时出现第一个平台。当细杆出现共晶平台时，粗杆仍处液态，因而不产生应力。温度继续下降，粗杆进入共晶转变，形成结晶骨架后，开始产生应力这时由于细杆收缩量大，粗杆收缩量小使细杆受拉，粗杆受压。随着温度的下降，粗细杆的温差增大，其内应力也不断增大。当粗杆凝固完了，粗杆温差最大，此时，粗杆受细杆的压力也最大。此后，粗杆的冷却速度大于细杆，粗杆的收缩速度就大于细杆，以至杆由受压变为受拉，细杆由受拉变为受压。



1. 粗杆温度 2. 细杆温度 3. 温度差 4. 粗杆应力

图 2-6 灰铸铁冷却曲线与应力曲线

温度继续下降，冷却曲线进入共析转变，出现第二个平台，重复前一过程。因而，粗杆的应力发展过程是压—拉—压—拉，最后残留拉应力。细杆的应力发展过程是拉—压—拉—压，最后残留压应力。

试验表明，灰铸铁冷却过程中，粗细杆有两次温度差峰值，相应地，粗杆和细杆各有两次应力峰值。温度峰值对应粗杆是压应力峰值，对应细杆是拉应力峰值。室温数据即为残留应力。

用这种方法测得铝硅合金（亚共晶）的残留应力为 $2-8\text{N/mm}^2$ ，灰铸铁为 $50-70\text{N/mm}^2$ ，铸钢约 300N/mm^2 。

三、主要影响因素及其控制

1. 弹性模量 E

在应力框法中，必须已知 E 值才能算出应力。在式 (5-11) 中，假设 $E_{\text{拉}}=E_{\text{压}}$ 仅适用于铸钢，对铸铁则拉伸弹性模量与压缩弹性模量相差较大，故精确度要求高时应分别代入计算。此外，资料报道的 E 值和试样 E 值也有很大差别，例如：球铁因基体组织和球化率的不同，E 值在 $130000-186000\text{N/mm}^2$ 间变化，灰铁随孕育情况不同而在 $70000-110000\text{N/mm}^2$ 间变化。即使铸钢也因钢种不同而有很大变化。这些都给计算结果带来误差，使测试结果的可比性变差。如果减少这种误差，应使用同炉试样同时测定 E 值。

2. 试样尺寸的影响

如前所述，应力框甲粗细杆截面积不同，所测拉应力、压应力有不同的数值；

此外，随试样截面积不同，合金在相同铸型条件下的冷却过程出粗细杆间的温度差不一样，截面积差越大，温差越大，应力框中的残留应力越大另外，试样长度越长，绝对收缩量越大，残留应力也越大反之，残留应力越小因此，不同应力框所测结果并不具有可比性。

如试样长度过短，则粗杆切断后的伸长量很小，难以测准。铝合金残留应力很小，所引起的应变量也小，就较难测准。所以，应根据合金种类，统一制订应力框的尺寸标准。

根据铸件的壁厚、形状、尺寸等，自行确定试样尺寸，准确测定铸件中残留应力的数值，是解决生产问题的重要途径，但所得数据只是相对结果。

动态应力测试方法中的试样尺寸有类似影响，因此，也需根据具体条件确定。

四、实例

用图 2-5 所示动态应力测试装置，测试 Al-Si 合金应力框试样冷却过程中，粗细杆的热应力与时间、温度与时间、热应力与温度的动态曲线，了解铸造应力产生变化的过程和规律。

参考图 2-5 造型，分上下两箱，分型面要吻合，上型扎出透气孔。合箱时要仔细，并注意防止试样与拉压力传感器接合处的“跑火”。

在电阻增锅炉中熔制不同含硅量的各种铝合金，处理后进行浇注。当浇入的液态合金与测力装置铸接后，便形成了一个封闭的应力框。三根杆从浇注及随后的冷却至室温的热应力变化的全过程，由各自的传感器经应变仪送到函数记录仪记录下来。

实验三 铝硅 (ZL102) 合金的熔炼

一、概述

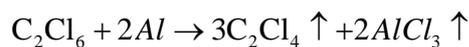
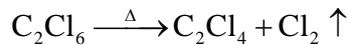
铝硅 (ZL102) 合金的熔炼工艺包括：配料、加料、熔化、精炼、变质及炉前检验等环节。掌握这些环节的操作要领，特别是其中的精炼、变质和炉前检验等生产工艺，对确保合金材料的机械性能有特别重要的意义。

本实验通过熔炼 ZL102 的操作，从实践上认识铝合金的熔炼工艺要点，掌握用第一气泡法测定铝合金液中的含氢量，学会判断铝液的吸气程度和变质效果，了解变质处理对 ZL102 合金的金相组织和机械性能的影响。

二、实验原理

精炼、变质及炉前检验是熔炼铝合金的三个关键操作。

精炼的目的在于除净铝液中的非金属夹杂及气体。精炼所用精炼剂有很多种，常用的有六氯乙烷。六氯乙烷为白色粉状晶体，压成块状使用。为了防止六氯乙烷吸潮，应置于干燥器中备用。一般用量为铝液总量的 0.3-0.6%。用钟罩将其压入铝液中后，产生如下反应



反应产物 Cl_2 、 C_2Cl_4 、 AlCl_3 ，在上浮过程中都可起到精炼作用。ZL102 合金中含氢量与 C_2Cl_6 加入量间的关系见图 3-1

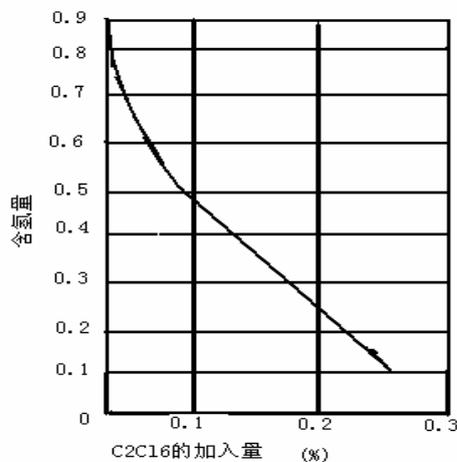


图 3-1 ZL102 合金中含氢量与 C_2Cl_6 加入量间的关系

使用六氯乙烷的缺点是它遇热分解出的氯是有毒气体，恶化劳动条件，腐蚀厂房、仪器和设备。近年来，国内外正在推广无毒精炼剂，且已取得了良好的效果，几种无毒精炼熔剂的配方见表 3-1

表 3-1 几种无铸精炼熔剂的配方

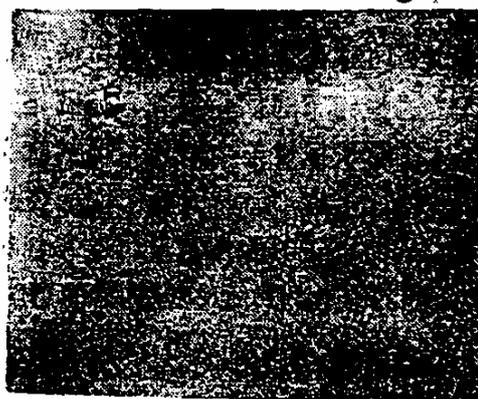
编号	组分(重量比)x100							
	硝酸钠	硝酸钾	石墨粉	六氯乙烷	冰晶石粉	氟铝酸钠	食盐	耐火砖屑
No1	34		6				24	32
No2		40	6	4			24	26
No3	34		6	4	20		10	30
No4		40	6		20	20	10	
No5	30		6				28	30

变质处理是改善铝硅类铸造合金机械性能的重要手段。ZL102 合金在砂型铸造时，铸态组织中粗大的针状和板状共晶硅和多角形的初晶硅块（图 3-2）都会严重割裂基体而降低机械性能。所以当硅的质量分数高于 6-8 并在砂型铸造时，必须经过变质处理。研究证明：钠、锶、铈、钙、铈、镨及混合稀土等元素对共晶硅都有良好的变质效果。变质的结果，使针状硅变成细点状，基体也发生了亚共晶转变，出现大量初生的 α 树枝晶（图 3-3）



(X400, 0.5%氢氟酸水溶液)

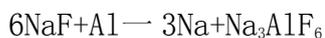
图 3-2 变质前 ZL102 金相组织图



(X400, 0.5%氢氟酸水溶液)

图 3-3 变质后 ZL102 的金相组织

表 3-2 列出了铝硅合金常用变质剂的成分和变质温度范围。氯化钾和氯化钠应经脱水处理，将变质剂压入铝液后，氟化钠与铝液产生下列反应



反应产生的钠盐溶入铝液而产生变质作用。这种变质工艺安全可靠，效果稳定，是目前使用的主要方法。

ZL102 合金中不含镁，可以采用熔点较高的二元变质剂，以提高钠的回收率。ZL101、ZL104 合金中含有镁，变质温度要低些，宜选用熔点较低的三元变质剂。当浇注要求致密的重要铸件时，常常选择泛用变质剂。

表 3-2 铝硅合金常用变质剂

变质剂	组分 x100				熔点	配制方法	变质温度范围	用途
	NaF	NaCl	KCl	Na ₃ AlF ₆				
二元	67	33			810-850	机械混合	750-780	ZL102
三元(1)	25	62	13		600	熔化	730-750	ZL102
三元(2)	45	40	15		630-750	机械混合	740-760	ZL101ZL104
泛用(1)	60	25		15	750	机械混合	-800	浇注重要
泛用(2)	40	45		15	700	机械混合	<750	铸件,对铝
泛用(3)	30	50	10	10	650	机械混合	730-750	液要求高

变质处理工艺应控制四个参数：变质温度一般以稍高于浇注温度为宜；变质时间由覆盖时间（一般为 10-12min）和“压盐”时间（一般为 3-5min）两部分组成。变质温度越高，结壳越好，则时间可以适当缩短。采用搅拌法变质时，由于变质剂与铝液接触情况好，时间可以缩短；变质剂用量一般占炉料总重的 2-3%，就能够在铝液表面形成一层厚 5 - 10mm 的覆盖层；变质剂表面在高温铝液作用下形成一层硬壳后（图 3-4，Na₃AlF₆ 熔点 950-1000+°C），就应将其压入铝液中，使变质剂和铝液完全接触，保证反应充分进行，提高变质效果。

用钠盐变质的缺点是变质剂组成中的 Cl⁻、F⁻ 对铁质增锅有严重的腐蚀作用，腐蚀产物的清理也非常困难，钠易与铸型中水汽产生下列反应



反应结果使铸件产生皮下气孔。钠在高温下易于挥发，钠变质的有效时间只有 30-60min，重熔时必须重新变质，钠盐变质剂的制备和保存都比较麻烦。以上这些缺点对于连续大量生产、机械化和自动化浇注，以及低压铸造等均感不便。近年来出现了许多新的变质剂和变质方法，例如，含有镁粉和氧化剂（氯酸钾、硝酸钾等）的发热变质丸，具有变质温度低（700°C 即能变质）、变质反应快（数秒钟即有效果）、柑锅寿命较长等特点。

炉前检验是保证铸件质量的重要工序。炉前检验主要检查含气量、氮化夹杂

含量及变质效果。含气量检验方法有：常压凝固试样（又称为宏观试样法），一般认为在干砂型中浇注直径 40-50mm, 高度为 30 - 40mm 的圆柱形试样，当表面凝固时不冒小气泡，表面凹陷，即认为铝液的含气量合格（图 3-5）。

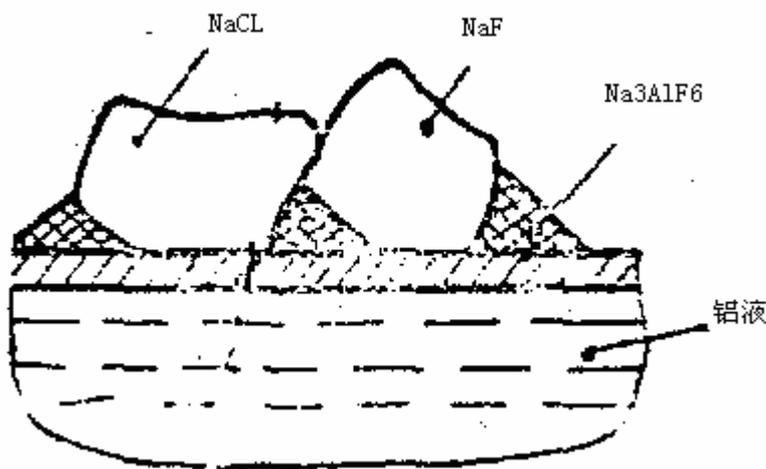


图 3-4 铝液和变质剂反应示意图

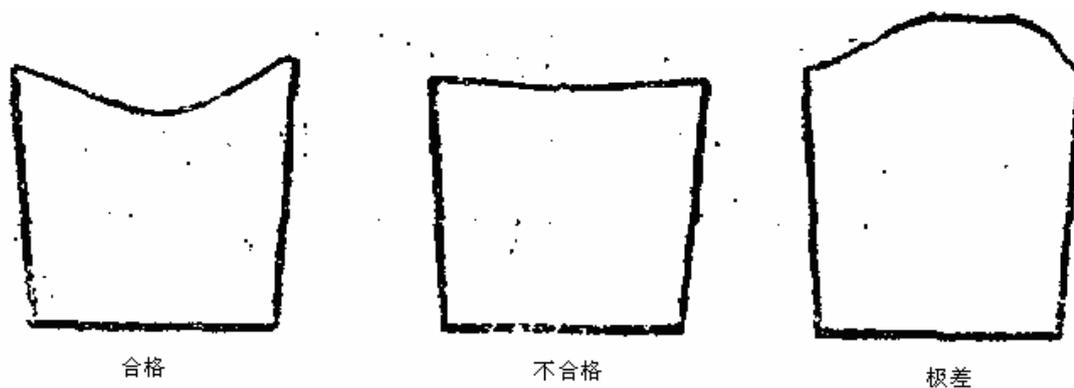
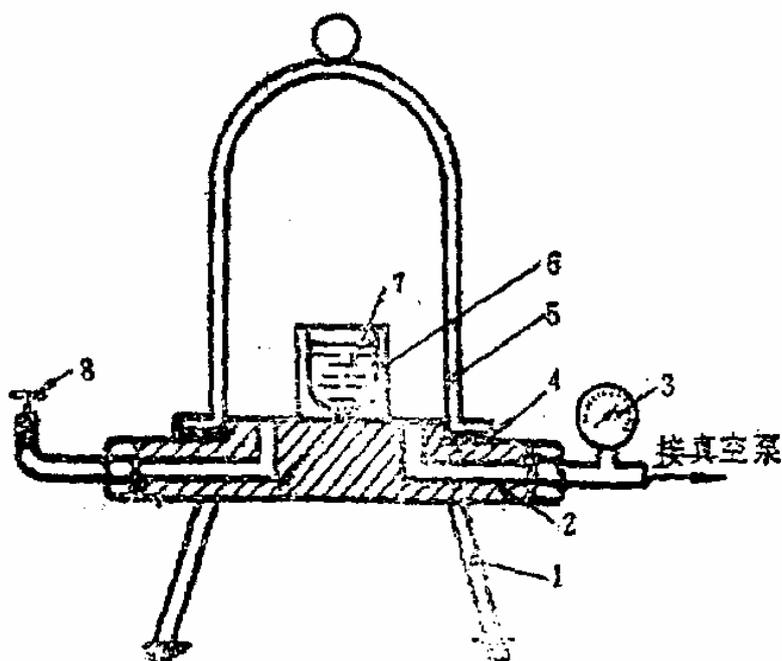


图 3-5 常压凝固试样含气量试验

浇注重要铸件时，需要采用灵敏较高的测定含气量的试验方法，减压凝固试样试验就是其中一种。试验装置见图 3-6 试验时，将精炼后的铝合金液，浇入试验柑锅，然后开启真空泵，使合金液在一定真空度（666.6- 19998Pa）下凝固，观察气泡析出和凝固表面状况。如真空度为 6666-13332Pa 下合金液凝固时无气泡析出，则可认为精炼合格。这种试验方法只有定性的概念而无定量的数据。以后对这种试验方法进行了改进，一方面固定凝固条件（浇注温度和压力），另一方面用标准壳型代替小柑锅，保证严格的有序凝固和良好的补缩。试样凝固后，切去冒口，加工到一定尺寸，分别在空气、蒸馏水中称出重量，求得试样的密度。密

度越大，表明含气量超低，铝液质量越好。



1 一支架 2 一底座 3 一压力表 4 一真空橡皮 5 一玻璃钟罩 6 一小增锅
7-铝合金液 8 一排气阀图 3-6 减压凝固试验装置

变质效果的检验方法多采用扁平工艺试样，根据断口状况判断，变质不良时晶粒粗大，断口呈暗灰色，发亮的硅晶粒明显可见，此时，应重新进行变质处理。变质正常时，断口晶粒细小，呈银白丝绒状。变质过度时，断口呈青灰色，晶粒粗大，有闪亮白点。还可以浇注巾 $15 \times 200\text{mm}$ 的试样，弯角在 90° 以内不开裂，断口呈银白色细晶粒组织，也表明变质良好。这些判断方法简便易行，但是都缺乏定量数据。

三、实验内容及方法

1. 将塔锅升温，清理柑锅残渣，联接热电偶测温系统，监控炉温。配料，填写记录。将钟罩、搅棒等凡与铝液接触的工具，均必须刷上涂料并烘干。

2. 加料，迅速升温熔化。

3. 当炉料即将熔化完时，将精炼剂称好并用铝箔包好备用（注意保持干燥）。当铝液温度上升到 $720 \sim 750^\circ\text{C}$ （应严格控制过热温度，不要超过 750°C ）时。将占炉料重 0.5% 的六氯乙烷用钟罩压入铝液表面以下 30mm。等到铝液翻滚完毕，看不到气泡时提起钟罩，静置 1-2min。

4. 浇注未经变质处理的检验试样和机械性能试棒，浇注时增锅嘴应尽量靠

近浇口，浇口杯应该充满。

5. 称量和配制三元钠盐变质剂。

6. 精炼扒渣后进行变质处理。即于 730-750°C 时撒入 2% 三元钠盐变质剂，在烧结成壳后再用压勺将液面的变质剂压入。变质后应静置数分钟。

7. 浇注变质后的检验试样和机械性能试棒观察断口颜色、晶粒粗细反击断时试棒的弯曲程度。

8. 在材料试验机上测定未变质及经变质处理的试棒的机械性能（抗拉强度和延伸率）。在拉伸试验前，应在试棒上标出标距。

9. 在浇注系统部位截取并磨制金相试样，观察金相组织，画出组织示意图，注明组织组成物。坩埚残渣，连接热电偶测温系统，监控炉温。配料，填写记录。

将钟罩、搅棒等凡与铝液接触的工具，均必须刷上涂料并烘干。

实验四 焊接接头性能评价及分析

第一部分 焊接接头组织金相分析及焊条选用、分类

一、实验目的

- 1、观察与分析焊缝的各种典型结晶形态。
- 2、掌握低碳钢焊接接头各区域的组织变化。
- 3、了解焊条的选用、焊条组成及焊条的分类。

二、实验装置及实验材料

- | | |
|-----------------------|----|
| 1、金相砂纸，从 180 目—1200 目 | 一套 |
| 2、平板玻璃 | 一块 |
| 3、低碳钢焊接接头试片 | |
| 4、金相显微镜 | 一台 |
| 5、抛光机 | 一台 |
| 6、电吹风机 | 一个 |
| 7、4%硝酸酒精溶液，无水乙醇、脱脂棉 等 | 若干 |

三、实验原理

一)、焊条的选用

焊接材料是焊接时所消耗的材料包括焊条、焊丝、焊剂。焊条是焊接回路中的一个组成部分，它不仅可以传导电流，而且作为与焊件产生电弧的电极，焊条还起着填充金属的作用。同时，焊条药皮在焊接时产生的熔渣和气体，对焊接冶金反应和保护液态金属都起重要作用。由此可见，焊条不但影响电弧的稳定性，而且直接影响到焊缝金属的化学成分和机械性能。因此，焊条的优劣是决定手弧焊焊缝的主要因素。

1、电焊条的组成及作用

焊条芯：一般是一根具有一定长度及直径并经过特殊冶炼的钢丝。焊芯有两个功用，一是传导焊接电流，产生电弧；二是熔化后作为填充金属。

焊条药皮：只有机械保护、冶金处理、改善焊接工艺性能等作用。它是由稳弧剂、造渣剂、造气剂、脱氧剂、合金剂、. 粘结剂、增塑剂等七类物质混合而成。

2、焊条的分类

按焊条的用途可分为结构钢焊条、铝及铬钼耐热钢焊条、不锈钢焊条、铸铁焊条以及特殊用途焊条等。

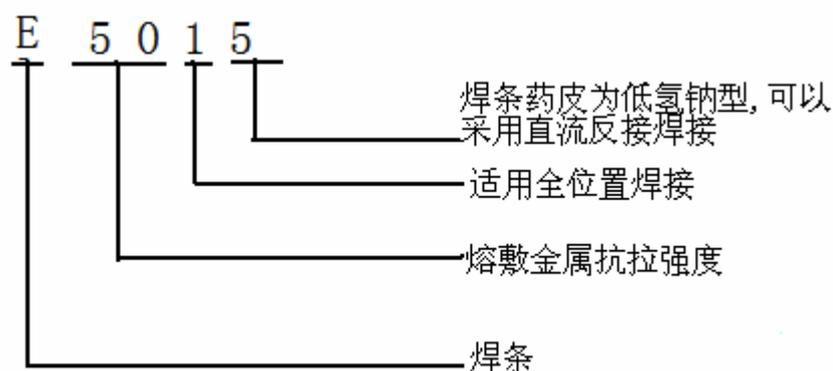
按焊接熔渣的酸碱度可分为酸性焊条和碱性焊条。

按焊条药皮的类型可分为钛钙型、氧化钛型、钛铁矿型、氧化铁型、低氢型焊条等。

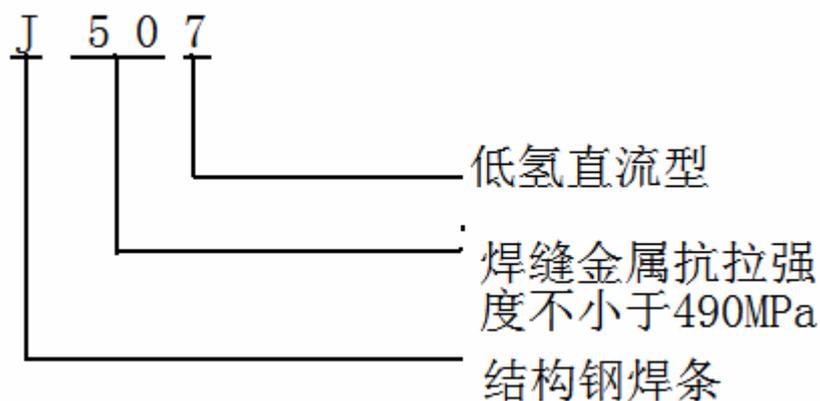
3、焊条的型号和牌号

焊条型号是在国家标准及权威性国际组织的有关法规中，根据焊条特性指标明确规定的。

具体如下例所示：



焊条牌号是对于焊条产品的具体命名，是由焊条生产厂家规定的，具体如下例所示。



4、结构钢焊条的选择

焊条选择应根据被焊结构的材料及使用性能、工作条件、结构特点和工厂的

具体情况等综合考虑。现将结构钢焊条选择的基本原则简介如下：

- (1) 根据被焊结构的材料机械使用性能进行选择。
- (2) 根据被焊结构的工作条件和结构特点进行选择。
- (3) 考虑焊接设备和施工条件。
- (4) 考虑焊工劳动条件，生产率及经济合理性等。

焊接过程中，焊接接头各部分经历了不同热循环，因而所得组织各异。组织的不同，导致机械性能的变化。对焊接接头进行金相分析，是对接头机械性能鉴定的不可缺少的环节。

焊接接头由焊缝金属和焊接热影响区金属组成，焊缝金属的结晶形态与焊接热影响区的组织变化，不仅与焊接热循环有关，也和所用的焊接材料和被焊材料有密切关系。

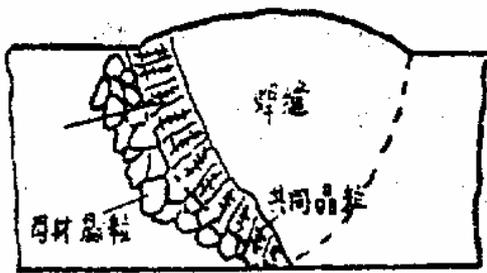


图 4-1 焊缝金属的交互结晶示意图

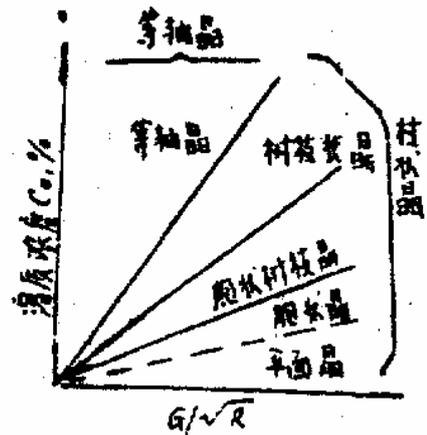


图 4-2 C、R和G对结晶形态的影响

(一) 焊缝凝固时的结晶形态

1、焊缝的交互结晶

熔化焊是通过加热使被焊金属的联接处达到熔化状态，焊缝金属凝固后实现金属的焊接。联接处的母材和焊缝金属具有交互结晶的特征，图 4-1 为母材和焊缝金属交互结晶的示意图。由图可见，焊缝金属与联接处母材具有共同的晶粒，即熔池金属的结晶是从熔合区母材的半熔化晶粒上开始向焊缝中心成长的。这种结晶形式称为交互结晶或联生结晶。当晶体最易长大方向与散热最快方向一致时，晶体便优先得到成长，有的晶体由于取向不利于成长，晶粒的成长会被遏止。这就是所谓选择长大，并形成焊缝中的柱状晶。

2、焊缝的结晶形态

根据浓度过冷的结晶理论，合金的结晶形态与溶质的浓度 C_0 、结晶速度（或晶粒长大速度） R 和温度梯度 G 有关。图 4-2 为 C_0 、 R 和 G 对结晶形态的影响。由图 4-2 可见，当结晶速度 R 和温度梯度 G 不变时，随着金属中溶质浓度的提高，浓度过冷增加，从而使金属的结晶形态由平面晶变为胞状晶，胞状树枝晶，树枝状晶及等轴晶。

当合金成分一定时，结晶速度越快，浓度过冷越大，结晶形态由平面晶发展到胞状晶、树枝状晶，最后为等轴晶。

当合金成分 C_0 和结晶速度 R 一定时，随着温度梯度 G 的升高，浓度过冷将减小，因而结晶形态会由等轴晶变为树枝晶，直至平面晶。

随着晶粒的成长，熔池中晶粒界面前的浓度过冷和温度梯度也随着发生变化。因而，熔池全部凝固以后，各处将会出现不同的结晶形态。在焊接熔池的熔化边界上，温度梯度 G 较大，结晶速度 R 很小，因此此处的浓度过冷最小，随着焊接熔池的结晶，温度梯度 G 由熔比边界处直到焊缝中心逐渐变小，熔池的结晶速度却逐渐增大，到焊缝中心处，温度梯度最小，结晶速度最大，故浓度过冷最大。

由上述分析可知，焊缝中结晶形态的变化，由熔合区直到焊缝中心，依次为：平面晶，胞状晶，树枝状晶，等轴晶。

在实际的焊缝金属中，由于被焊金属的成分、板厚、接头形式和熔池的散热条件不同，一般不具有上述的全部结晶形态。当焊缝金属成分不甚复杂时，熔合区将出现平面晶或胞状晶。当焊缝金属中合金元素较多时，熔合区的结晶形态往往是胞状树枝晶（或树枝状晶），焊缝金属中心则为等轴晶。

焊缝的结晶形态除了受被焊金属成分的影响外，还与焊接速度、焊接电流、板厚和接头形式等工艺因素有关。

（二）不易淬火钢焊接热影响区金属的组织变化

不易淬火钢包括低碳钢、16Mn等低合金钢。若以A₃碳钢为例，根据其焊接热影响区金属的组织特征，可以分为四个区域（如图 4-3 所示）。

1、熔合区

紧邻焊缝的母材与焊缝交界处的金属称为熔合区或半熔化区。焊接时，该区

金属处于局部熔化状态，加热温度在固液相温度区间。在一般熔化焊的情况下，此区仅有 2-3 个晶粒的宽度，甚至在显微镜下也难以辨认。但是，它对焊接接头的强度、塑性都有很大影响。

2、粗晶区

该区的加热温度范围为 1100-1350℃。由于受热温度很高，使奥氏体晶粒发生严重的长大现象，冷却后得到晶粒粗大的过热组织，故称为过热区。此区的塑性差，韧性低，硬度高。其组织为粗大的铁素体和珠光体。在有的情况下，如气焊或导热条件较差时。甚至可获得魏氏体组织。

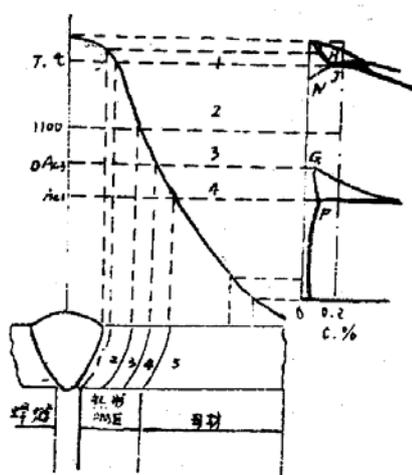


图 4-3 A₃碳钢焊接热影响区金属的组织

3、细晶区

此区加热温度在 900℃-1100℃之间。在加热过程中，铁素体和珠光体全部转变为奥氏体，即产生金属的重结晶现象。由于加热温度稍高于 900℃，奥氏体晶尚未长大，冷却将获得均匀而细小的铁素体和珠光体，相当于热处理时的正火组织，故又称为正火区或相变重结晶区。该区的组织比退火（或轧制）状态的母材组织细小。

4、不完全重结晶区

焊接时，加热温度在 750-900℃之间的金属区域为不完全重结晶区。当低碳钢的加热温度超过 750℃时，珠光体先转变为奥氏体。温度进一步升高时，部分铁素体逐步溶解于奥氏体中，温度越高，溶解的越多，直至 900℃，铁素体将全部溶解在奥氏体中间。焊后冷却时又从奥氏体中析出细小的铁素体，一直冷却了 750℃时，残余的奥氏体就转变为共析组织——珠光体。由此看出，此区只有一

部分组织发生了相变重结晶过程，而始终未溶入奥氏体的铁素体，在加热时会发生长大，变成较粗大的铁素体组织，所以该区域金属的组织是不均匀的，晶粒大小不一，一部分是经过重结晶的晶粒细小的铁素体和珠光体，另一部分是粗大的铁素体。由于组织不均匀，因而机械性能也不均匀。

如果焊前母材为冷轧状态，则在温度为 750℃ 以下的金属中，还存在一个结晶区。处于再结晶区的金属，在加热的过程中，将发生金属的再结晶过程，即经过冷变形后的碎粒再在结晶温度作用下重新排列的过程。

四、实验方法与步骤

(一) 低碳钢焊接接头的金相分析

- 1、将已焊好的试件（以结 422 焊条在 150X40X6mm 的试件上堆焊），切成 25X25mm 的试片，然后把试片四周用砂轮打去毛刺，并把四个角打磨成圆角。
- 2、用金相砂纸打磨试片。必须注意，研磨试片的砂纸要由粗到细、依次制作，不要使粗砂粒带到细的砂纸上。试片研磨完后，用清水冲洗，进行机械抛光，抛光后再用清水冲洗试片。
- 3、将抛光好的试片，用 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀，大约经过 5-10s 左右，立即用清水冲洗，然后用无水乙醇轻轻擦去水分，并用吹风机吹干。
- 4、把已制备好的试片在显微镜下进行观察与分析。

分清焊接接头各区域后，仔细辨认各区域组织的特征。

第二部分 焊接接头 X 射线探伤实验

一、实验目的

- 1、XXQ—2005 型 X 光机的构造及工作原理；
- 2、了解对接接头的 X 射线探伤的过程及目的；
- 3、掌握主要规范参数（管电流；管电压；曝光时间）对探伤灵敏度的影响；
- 4、了解 X 胶片暗室处理技术。

二、实验设备及材料

- 1、XXQ—2005 型 X 光机一台, 象质剂一套；
- 2、工业用 X 光照像胶片若干张, 试板若干个；
- 3、显影液, 定影液等；
- 4、冷光源强光观片灯一台。

三、XXQ—2005 型 X 光机的结构特征

现在用的最普遍的 X 射线管是玻璃外壳的真空两极管。它的阴极是由钨丝绕成, 当通以电流加热时, 钨丝就在白炽状态下放出自由电子。电子在阳极高电压作用下加速, 以十分巨大的速度撞击阳极而产生 X 射线。当调节阴极（灯丝）电压, 增大灯丝电流, 阴极温度提高时, 发射电子数目就会增加, X 射线强度随着管电流（毫安）增加而增加, 当增加 X 射线管阳极高压时, 电子就会以更高速度撞击阳极靶, 此时产生的 X 射线波长更短, 能量更强, 透照厚度更大。

1、X 射线发生器

X 射线发生器为组合式, X 射线管、高压变压器与绝缘气体一起封装在桶状铝壳内。X 射线发生器一端装有风扇和散热器, 作冷却之用。所用绝缘气体对于高压具有良好的介电性能。另外还有温度继电器、气体压力表、连接电缆插座、冷却风扇等组成。每一种型号的探伤机都由控制器、X 射线发生器、电源电缆、连接电缆等组成; x 射线管的构造见图 4—4。

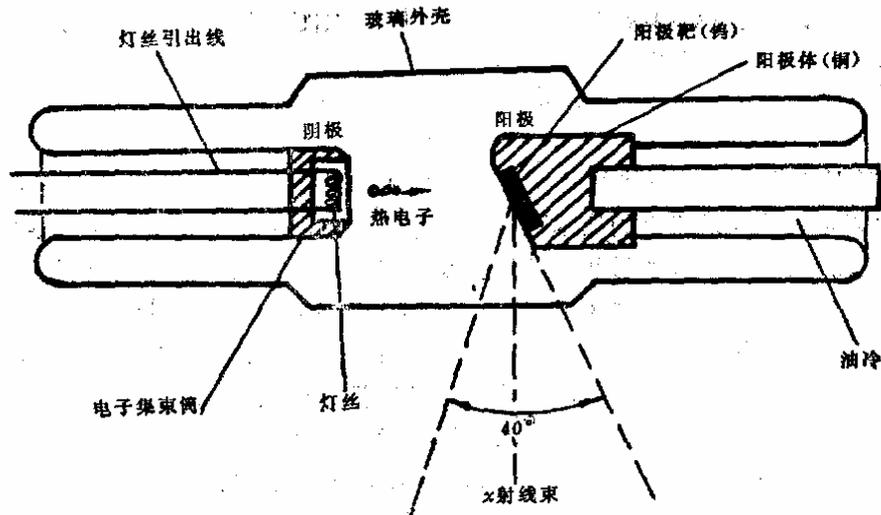


图 4-4 X 射线管结构示意图

2、控制器

控制器为箱式结构，内有四块电路板及其它电子元器件，所有的操作按钮均设置在面板上，X 射线管电压和管电流在控制器内自动稳定。管电压及曝光时间均可预置，电源电压的波动可通过控制器本身自动调节，以保证获得稳定的 X 射线；曝光时间及故障代码由数码管显示。X 射线发生器出现过电压、过电流及温度过高现象时，控制器可以自动保护。

四、射线照相法原理

x 射线和 γ 射线所以能在无损检验技术中得到广泛的应用，主要是因为它能穿透普通光线不能穿透的物质；它在物质中具有衰减作用和一定的衰减规律，以及它对某些物质发生光化学作用。

射线具有穿透金属或其它物质的能力。其透过率随被透照物质的种类、厚度或密度而不同。射线照相法原理如图 4-5 所示。X 射线透过被检物体时，有缺陷部位（如气孔、非金属夹渣等）与基本金属对射线吸收能力不同。缺陷部位所含的空气或非金属夹杂物对射线的吸收能力大大低于金属对射线的吸收能力。因而如图 4-5 所示，透过有缺陷部位射线强度高于无缺陷部位射线强度，在 x 射线感光胶片上对应的有缺陷部位将接受较多的，射线粒子，从而形成黑度较大的缺陷影像。

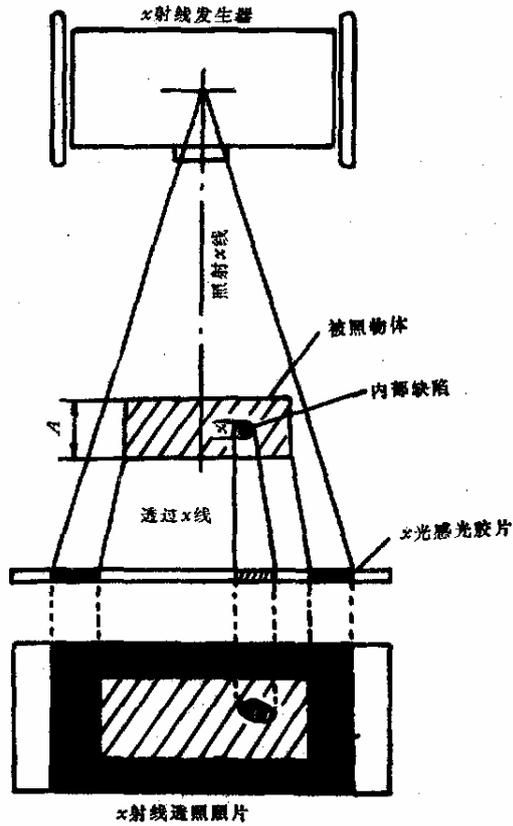


图 4-5 X 射线照相原理

五、管电压及曝光时间的选择

曝光曲线是曝光条件与与工件厚度之间的关系曲线。有了它就可以迅速查出不同被检工件厚度所应用的管电压和曝光时间，避免了因透照条件不当而影响底片质量，或因临时摸索实验条件而影响检验进度。

在应用曝光曲线时，首先要测出被检验工件的厚度，然后在曝光曲线的横座标上找出这一厚度值来，由此点平行纵座标向上引一直线，其直线与曝光曲线相交，再由此交点引平行横座标的直线与纵座标相交，纵座标所示的管电压或曝光时间即为该厚度工件所需的曝光条件。

在实际探伤中，被检材料不同时要有不同的曝光曲线。为了便利起见，人们从大量实验中制作一条钢铁条件的曝光曲线，对于其它材料可以利用等效系数进行换算的表。表 4-1 列出了几种常用材料时等效系数，可供探伤时参考。

表 4-1 几种材料的等效系数

射线源种类 材 料	X 射 线 (KV)						γ 射 线	
	50	100	150	200	400	1000	Ir192 Cs137	Co60
镁	0.05	0.05	0.08					
铝	0.08	0.08	0.12	0.18				
铝 合 金	0.12	0.10	0.13	0.14				
钢	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0 1.0	1.0
不 锈 钢		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0 1.0	1.0
铜			1.6	1.4	1.4		1.1 1.1	1.1
锌			1.4	1.3	1.3	1.2	1.1 1.0	1.1
黄 铜			1.4	1.3	1.3	1.2	1.1 1.1	1.1
铅			14	12		3	2.2 2.3	

图 4-6 曝光曲线应用示意图图 4-6 为 XXQ-2005 射线机对 A₃ 钢的曝光曲线。

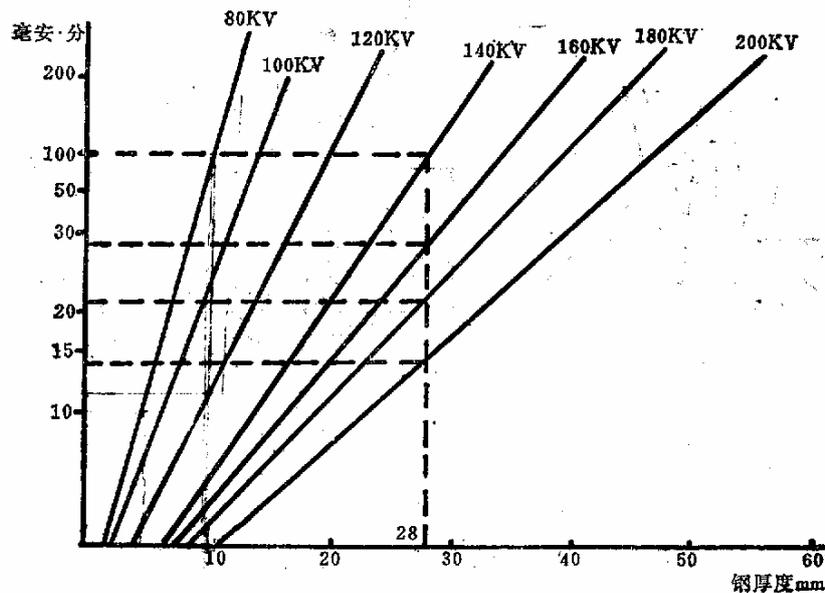


图 4-6 为 XXQ-2005 射线机对 A₃ 钢的曝光曲线。现以图 4-6 和表 4-1 举例说明曲线和表的应用：如果有一被检焊缝，其母材钢板厚为 25 毫米，算上焊缝加强高度本内总厚为 28 毫米。在其它透照条件都固定的前提下，要用曝光曲线查找曝光条件，就在厚度座标轴上找出 28 毫米，再作与纵座标平行的直线，与 200，180，160，140 千伏的直线相交如点，从这四点再作平行横座标的直线与纵座标相交又得四点，即为我们所要求的曝光量；考虑底片的清晰度和摄影密度要取最佳方案，即取电压较低的一点，即 140 千伏，用 100(毫安×分钟)的曝光量，

如果X射线机用的最大电流是 5 毫安，则曝光时间 $100/5=20$ 分钟。就是说，探伤这样的焊缝用 140 千伏电压，5 毫安电流，时间 20 分钟是能够得到一个质量较好的底片。如需提高生产效率，减少拍照时间，又保持底片灵敏度达到一定水平，则可选用 160 千伏或 180 千伏。

六、实验步骤

- 1、准备一对接接头；
- 2、接好 X 射线机的连接电缆及电源，确认无误后，接通电源；
- 3、测量接头母材厚度，应用曝光曲线选择合适的曝光参数并进行曝光；
- 4、对曝光的胶片进行暗室处理，得到质量较好的胶片；
- 5、对冲洗的胶片在观片灯上仔细观察，找出缺陷。

第三部分 焊接接头宏观硬度实验

一、实验目的

- 1、了解布氏、洛氏硬度计的构造及使用方法。
- 2、掌握布氏硬度值及洛氏硬度值的测定方法。
- 3、了解焊接接头三个区域即焊缝、热影响区、母材的硬度差别。

二、实验原理

硬度是指材料在另一较硬的物体压入表面抵抗塑性变形的一种能力，是重要的力学性能指标之一。与其它力学性能相比，硬度实验简单易行，又无损于工件，因此在工业生产中被广泛应用。常用的硬度实验有布氏硬度和洛氏硬度试验法。

(一) 布氏硬度试验

(1) 原理：用载荷 P 把直径为 D 的淬火钢球压入试件表面，并保持一定时间，而后卸除载荷，测量钢球在试样表面上所压出的压痕直径 d ，从而计算出压痕球面积 A ，然后再计算出单位面积所受的力 (P/A 值)，用此数字表示试件的硬度值，即为布氏硬度，用符号 HB 表示。设压痕深度为 h ，则压痕的球面积为：

$$A = \pi Dh = \pi d$$

式中 P ——施加的载荷， kg ；

D ——压头（钢球）直径 mm ；

A ——压痕面积， mm^2 ；

d ——压痕直径， mm 。

但实验时，是根据 d 值查表求硬度值。

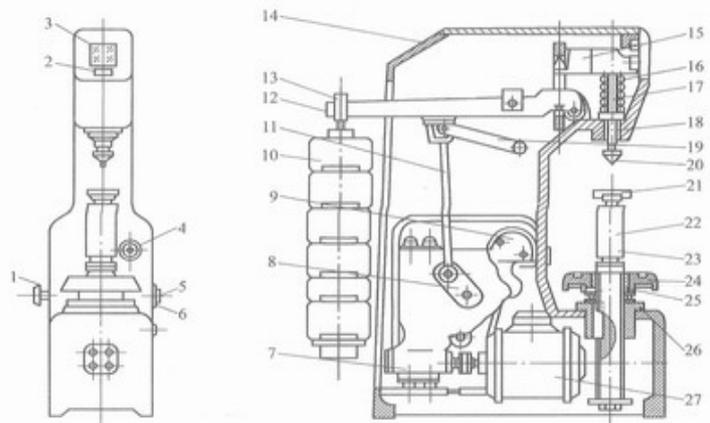


图 4-7 HB-3000 型布氏硬度计结构图

1. 电源开关; 2. 加力指示灯; 3. 电源指示灯; 4. 加力开关; 5. 压紧螺钉; 6. 圆盘;
8. 曲柄; 9. 换向开关; 10. 砝码; 11. 连杆; 12. 大杠杆; 13. 吊环; 14. 机体; 15.
小杠杆; 16. 弹簧; 17. 压轴; 18. 主轴衬; 19. 摇杆; 20. 压头; 21. 可更换工作台;
22. 工作台立柱; 23. 螺杆; 24. 升降手轮; 25. 螺母; 26. 套筒; 27. 电动机

布氏硬度试验是在布氏硬度试验机(图 4-7)上进行。当 F/D^2 的比值保持一定时,能使同一材料所测的布氏硬度值相同,不同材料的硬度值可以比较。故在进行布氏硬度试验时,应根据材料和布氏硬度值范围选择 F/D^2 的值。最后用读数显微镜测出压痕直径 d 。根据 d 查表求得布氏硬度值。

(二) 洛氏硬度

3、洛氏硬度试验

(1) 原理:洛氏硬度试验是用特殊的压头(金刚石压头或钢球压头)在先后施加的两个载荷(预载荷和总载荷)的作用下压入金属表面来进行的。总载荷 P 为预载荷 P_0 和主要载荷 P_1 之和,即

$$P = P_0 + P_1$$

洛氏硬度值是施加总载荷 P 并卸除主载荷 P_1 引起的残余压入深度 e 来计算。 h_0 表示在预载荷 P_0 作用下,压头压入被试材料的深度; h_1 表示施加总载荷 P 并卸除主载荷 P_1 ,但仍保留预载荷 P_0 时,压头压入被试材料的深度。

深度差 $e = h_1 + h_0$,该值用来表示被测材料硬度的高低。在实际应用中,为了使硬材料测出的硬度值比软材料的硬度值高,并符合一般的习惯,将被测材料的硬度值用公式加以适当变换,即

$$HR = K - (h_1 - h_0) / C$$

式中 K ——常数,其值在采用金刚石压头时为 0.2,采用钢球压头时为 0.26;

C ——常数,代表指示器读数盘每一刻度相当于压头压入被测材料的深度,其值为 0.002mm;

HR ——标注洛氏硬度的符号,当采用金刚石压头及 150 kg 的总载荷时应标注 HRC,当采用钢球压头及 100kg,总载荷试验时,则应标注 HRB。

HR 值为一无名数,测量时可直接由硬度计表盘读出,表盘上有红、黑两种刻度,红线刻度的 30 和黑线刻度的 0 相重合。

洛氏硬度试验是将顶角为 120° 金刚石圆锥体或直径为 1.588mm 的淬火钢球压头，在一定载荷 F 作用下压入被测金属表面，保持一定时间后卸掉载荷。根据压痕的深度 h 确定被测金属的硬度值。根据所加的载荷和压头不同，洛氏硬度值有三种标度：HRA、HRB、HRC。

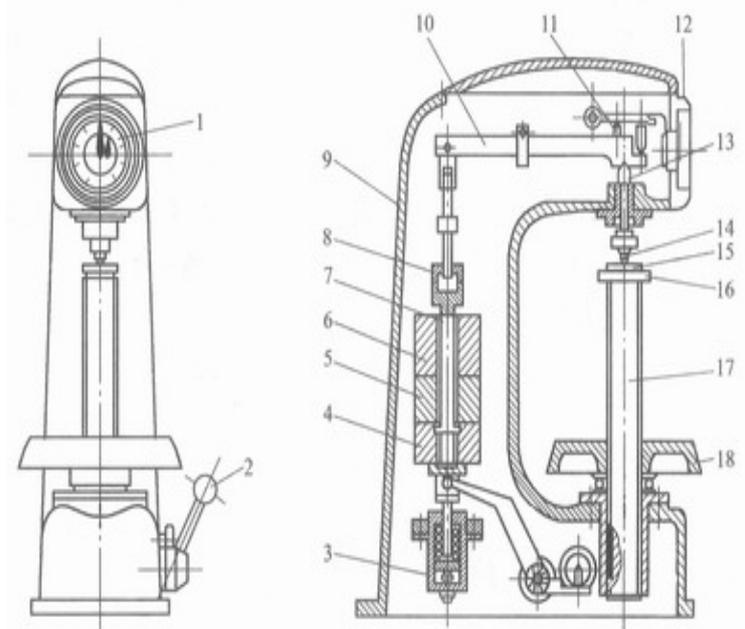


图 4-8 洛氏硬度计结构图

1. 指示器；2. 加载手柄；3. 缓冲器；4. 砝码座；5、6. 砝码；7. 吊杆；
8. 吊套；9. 机体；10. 加载杠杆；11. 顶杆；12. 刻度盘；13. 主轴；
14. 压头；15. 试样；16. 工作台；17. 升降丝杠；18. 手轮

洛氏硬度试验是在洛氏硬度机上进行，如图 4-8 所示。

三、实验步骤

(一) 试样准备

将对接头如图 4-9 制备试样，按图中所示逐个点进行检测；

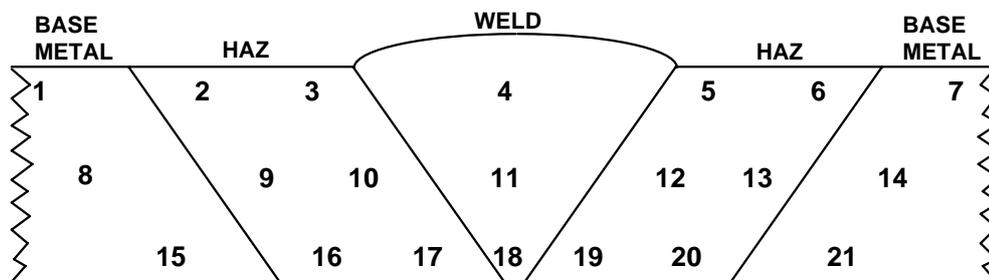


图 4-9 焊接接头硬度测试试样

（二）布氏硬度试验

- 1、清理试样表面，并根据试样的材料、厚度和硬度范围选择钢球压头直径 D 、载荷 F 及保载时间。
- 2、放在硬度计工作台上，按布氏硬度计的操作规程进行试验，在试样表面产生一个压痕。移动试样重做一次试验，产生第二个压痕。
- 3、取下试样，用读数显微镜在相互垂直方向上测量压痕直径 d ，并根据 d 查表求出试样的布氏硬度值。

（三）洛氏硬度试验

- 1、清理试样表面，并根据试样的材料、形状、选择压头、载荷和工作台。
- 2、把试样放在工作台上，按洛氏硬度计的操作规程进行试验。前后共测三点，取其平均值为洛氏硬度值。

四、实验注意事项

- （1）试样两端要平行，表面要平整，若有油污或氧化皮，可用砂纸打磨，以免影响测定。
- （2）圆柱形试样应放在带有“V”形槽的工作台上操作，以防试样滚动。
- （3）加载时应细心操作，以免损坏压头。
- （4）测完硬度值，卸掉载荷后，必须使压头完全离开试样后再取下试样。
- （5）金刚钻压头系贵重物品，资硬而脆，使用时要小心谨慎，严禁与试样或其它物件碰撞。
- （6）应根据硬度实验机的使用范围，按规定合理选用不同的载荷和压头，超过使用范围，将不能获得准确的硬度值。

实验五 工业纯铝反挤杯形件实验

一. 实验目的:

1. 冷挤压件图制定, 并比较车削与挤压的材料利用率;
2. 计算单位挤压力并与挤压法实测挤压力大小;
3. 实测杯形件壁厚大小并分析壁厚差产生的原因。

二. 实验内容:

零件现状及尺寸见图 5-1。材料为工业纯铝L6, 杂质总量为 1.2%, 冷作硬化状态下的室温 $\sigma_s=100\text{MPa}$, 32HBS。挤压件如图 5-2, 实验装置如图 5-3, 使用设备为 1000KN油压机。

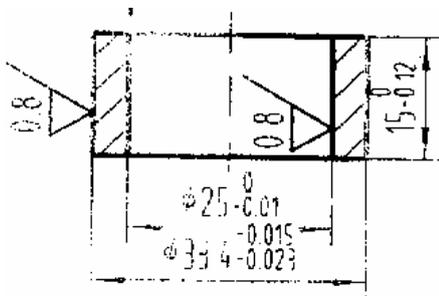


图 5-1 零件现状及尺寸

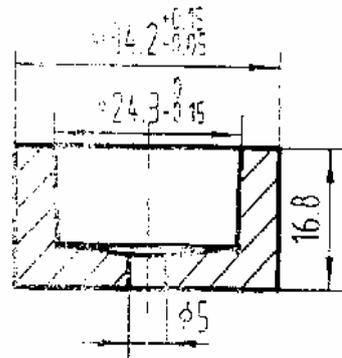
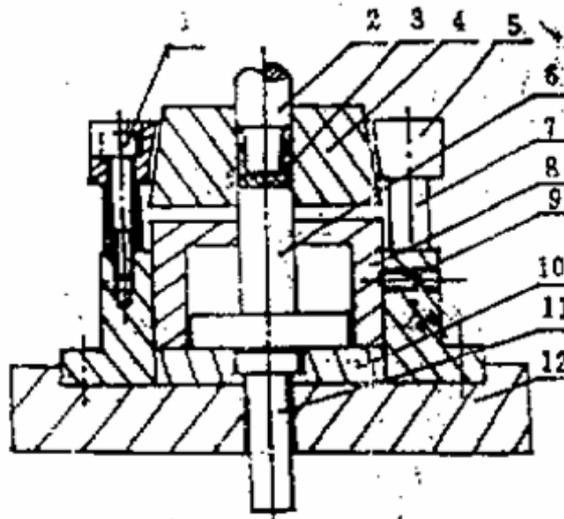


图 5-2 挤压件



1. 螺钉
2. 冲头
3. 挤压件
4. 凹模
5. 挡圈
6. 下凸模
7. 套筒
8. 支承座
9. 螺钉
10. 下垫板
11. 顶杆
12. 下模板

图 5-3 摩擦反挤杯形件实验装置

三. 实验说明

由图 5-1 所知零件属于极高对称性零件，在冷挤压成型时金属容易均匀流动。L6 的变形抗力小，塑性好，适宜冷挤压成型。

图 5-1 零件可用反挤，正挤，复合挤压成型。考虑到同样的挤压件反挤比正挤的单位小 15%左右，同样的挤压件反挤比正挤的凸模寿命高的多。另外，纯粹的反挤比复合挤压模具结构简单，成本低，故本次实验采用反挤压。

图 5-1 中，外径允许偏差相当于 IT5-IT6, IT4 超出冷挤压可能达到的精度范围。高度尺寸虽可满足要求，由于挤压件上端不平，也需修边故内外径，高度三个尺寸都需切削加工的保证。参照图内的实际工艺水平，将内外径，高度的余量分别取 0.8, 0.8, 1.5-2.0mm, 内径缩小 0.02-0.04mm, 为使凹模、凸模有一定的磨损寿命，确定内外径如图 5-2。

毛坯的现状和尺寸如图 5-4。实际批量生产时应采用镟粗毛坯。图 5-4 的毛坯只供实验用，以简化实验的准备工作。

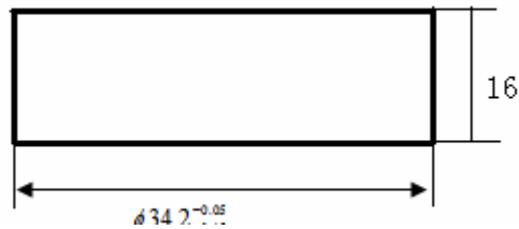


图 5-4 毛坯的现状和尺寸

冷挤压设计中，挤压力的计算是非常重要的工作。理论公式法用的很少，图算法、查挤压力曲线、查表法用的较多。无论采用何种方法计算挤压力，最后都应该实测挤压力。实测方法有液压法、点测法、机械测定法三种。本实验用液压法。其原理是在油压机的液压系统上直接由其上的压力表读出单位面积上的挤压力，这种方法准确、直观。

四. 实验步骤

1. 油压机上安装模具；
2. 油压机标定；
3. 实测毛坯尺寸，凸模尺寸，凹模尺寸，挤压件尺寸；
4. 实测挤压力。

实验六 镦粗不均匀变形研究

一、实验目的

- 1、通过对不同高度与直径比 (H_0/D_0) 的坯料，在镦粗后鼓形形成规律的分析研究得到镦粗时最适合的毛坯尺寸。
- 2、通过对比分析试样网格的观察、测量，了解镦粗时金属的流动规律。

二、实验简介

镦粗是锻造工艺中的基本工序之一，它是减少坯料高度，增加其横截面积的变形工艺。镦粗用于：

- 1) 由横截面积较小的坯料得到横截面积较大而高度较小的锻件；
- 2) 冲孔前增大坯料横截面积和平整坯料端面；
- 3) 提高下一步拔长时的锻造比；
- 4) 提高锻件的力学性能和减少力学性能的异向性；
- 5) 反复进行镦粗和拔长可以破碎合金工具钢中的碳化物，并使其均匀分布。

一般镦粗时，坯料内的应力场和变形场是很不均匀的。镦粗的坯料有圆截面、方截面和矩形截面。

坯料镦粗时的主要质量问题有：侧表面易产生纵向或呈 45° 方向的裂纹，锭料镦粗后上、下端常保留铸态组织；高坯料镦粗时常由于失稳而弯曲等。镦粗时作用力是沿轴向，而侧表面上的纵向裂纹是由切向拉应力引起的，切向拉应力的产生与镦粗时不均匀变形有关；锭料镦粗后上、下端保持铸态组织也与镦粗时的不均匀变形有关。一般坯料 ($\frac{H_0}{D_0} = 0.8 \sim 2$) 在平板间镦粗时，外观呈现鼓形，即中间直径大，两端直径小。用网格或硬度试验等方法可以观察到坯料镦粗后其内部变形的情况。镦粗后锻件的变形程度大小可分为三个区域：变形程度较小的区域，变形程度较大的区域和变形程度适中的区域。在常温下产生这种不均匀变形的原因主要有以下两点：

- 1) 工具与坯料端面之间摩擦力的影响，这种摩擦力使金属变形困难，使变形所需的单位压力增高；
- 2) 温度不均匀也是一个重要的因素，与工具接触的上、下端金属由于温度降低快，变形抗力大，故较中间处的金属变形困难。

因此为保证内部组织均匀和防止侧表面裂纹产生，应当改善或消除引起变形

不均匀的因素或采取合适的变形方法。

三、实验设备及工具

50 吨万能材料试验机。游标卡尺 0~150 或 200 毫米一把、钢板尺 150 毫米一支、划针一支、机油。

四、试验模具

平砧模一付，不同高度的垫铁一套。

五、试样尺寸（见表 6-1）

表 6-1 试样尺寸

组别	试验尺寸 (mm)	试样个数	1		2		3		4	
			变形量 $\varepsilon\%$	压下量 ΔH (mm)						
I	$\Phi 30 \times 120$	4	10	12	20	24	25	30	30	36
II	$\Phi 30 \times 100$	4	10	10	30	30	50	50	60	60
III	$\Phi 30 \times 40$	4	10	10	20	20	30	30	40	40
IV	$\Phi 30 \times 30$	4	10	8	30	24	50	40	60	8

六、实验步骤

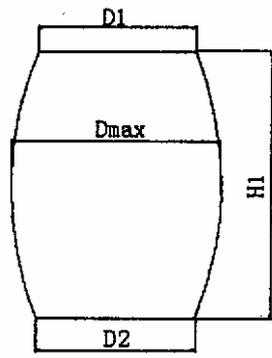
- 1、实验前，测量整体试样原始尺寸列入表 6-2，并将平砧面擦净。
- 2、在试样表面划分网格，要求网格划分均匀。
- 3、按表 6-1 规定项目逐个进行镦粗，并测量整体试样变形后的尺寸列入表二，同时观察其外形变化。表中的符号见图 6-1。

表 6-2 试样原始尺寸及镦粗后的尺寸

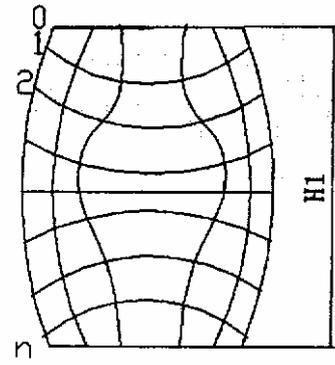
设备名称	摩擦条件	试样尺寸				变形后试样尺寸 (mm)						
		H_0	D_0	H_0/D_0	H_0	ε	D_{max}	D_1	D_2	$D = (D_1 + D_2) / D_1$	D_{max}/D	D/D_0

注：其中 $\varepsilon = \frac{H_0 - H_1}{H_0} 100\%$ ，试样在变形后出现鼓形，故测量时直径应量 D_1 与 D_2 ，

取其平均值列入表 6-2。



a) 单鼓形



b) 网格形状

图 6-1 试样示意图