

金属工艺学参考教材

铸件设计

清华大学金属工学教研组



目 录

第一章	序 言	1
第一节	铸件的生产	1
第二节	金属在铸型中的凝固	2
第三节	孕育铸铁模型制造的收缩裕量	3
第四节	凝固过程中的冶金学	4
第五节	石墨的形成	5
第六节	凝固后的冶金变化	8
第七节	定向凝固	8
第二章	一般设计规则	11
第一节	向铸造工作者请教	11
第二节	做个小模型	11
第三节	获得健全铸件的设计	11
第四节	避免尖角和棱角	12
第五节	减少连接断面的数量	14
第六节	均匀断面的设计	16
第七节	铸件内壁的合理尺寸	18
第八节	避免断面突变	18
第九节	用园角代替所有的尖棱角	19
第十节	使筋和加强筋发挥最大作用	21
第十一节	当需要时才采用凸台、耳子、和凸起部分	24
第三章	铸件应力	27
第一节	热应力	27
第二节	残余收缩应力	27
第三节	变形裕量	30
第四节	消除应力热处理	30
第五节	扼要介绍铸件设计中的一些重要规则和因素	31
第四章	模型制造	34
第一节	模型的染色	34
第二节	模型的制造	34
第三节	模型制造的缩尺	35
第四节	模型的结构	35
第五节	模型的维护保养	36

	第六节	芯盒的结构	36
	第七节	芯头	37
	第八节	芯子出气孔的考虑	38
	第九节	芯撑	39
	第十节	尺寸公差	39
	第十一节	机加工裕量	40
第五章		造型和造芯	43
	第一节	分型面的选择	43
	第二节	设计合适的斜度	44
	第三节	简化造型的设计	45
	第四节	均匀断面的设计	48
	第五节	降低成本的设计	48
	第六节	便于机加工的设计	49
	第七节	减轻重量的设计	49
	第八节	浇注系统和冒口	50
附 录			
	1.	铸铁典型的物理性能	52
	2.	尺寸和重量公差	54
	3.	机加工裕量	55
	4.	尺寸的稳定性	57

第一章 序 言

在工程另件中采用铸件的优点，已为工程技术人员充分地意识到了。最主要的事实是他可以设计任何复杂程度的形状以及实际上任何尺寸大小的铸件。近代的冶金技术已经能提供大量的各种铸造合金。设计时可以根据合金的物理性能和机械性能进行选择，也可以根据所设计另件的使用条件、经济效果及设计中所考虑的其他因素对合金进行选择。

在所有可用于铸态的材料中，铸铁、特别是孕育铸铁具有最广泛的用途，具备最大范围的物理性能，而且成本最低。

把液体金属浇入铸型的这种技术称为“铸造”。这种技术取决于许多物理化学的基本规律。当设计人员对铸件进行设计时，只有对这些物理化学的基本规律进行反复考虑，才能使设计获得最理想的效果。

本手册写作的目的是为了向设计人员提供有关铸造生产工艺知识，特别是和铸铁有关的知识。这种铸铁在分类上属于孕育铸铁。在编纂这些内容时，为了获得优质工程铸件，我们也清楚地指出了孕育铸铁生产工艺和主要材料的重要特性。孕育铸铁具有这种可靠的性能并非偶然，它是巧妙地运用冶金和铸造实践等各方面有关的知识，也是精通这些知识的工程技术人员创造性努力的结果。

我们真诚地希望，本手册能给设计人员以更多有关铸造方面的工艺知识。这些知识设计人员未必掌握。也许有的工程技术人员在过去已经具备这方面的知识，而本手册又能使他在设计工程机械时设计出更合理的铸件。

我们也还考虑到，设计人员在自己的生产实践中考虑过的许多铸造方面的问题，但是还未能从这些问题中得出任何结论。因为设计人员只能了解到铸造工作者能做什么，不能做什么。而本手册则能帮助设计人员设计出一个真正有效的工程另件，这样的另件恰恰是设计人员发挥自己的创造能力所能做到的。

第一节 铸件的生产

铸件生产的最简单过程包括首先按工程另件的形状做一个模型；用准备好的型砂对这模型进行造型；从铸型中取出模型；然后用熔化的液体金属浇入铸型中；待凝固后就获得和工程另件形状相同的铸件。由于每个步骤取决于上述各道工序，以及在各道工序的完成情况。因此有必要对以上各道工序进行讨论研究。对技术人员来说，这一点尤为重要。在铸件生产中，技术人员必须在决定铸件的整个完成过程中起重要作用。下面就和铸造生产实践有关的铸件设计部分在一些细节方面进行讨论。

第二节 金属在铸型中的凝固

虽然凝固不是生产铸件过程中的头道工序，但凝固过程是很重要的，它受物理化学基本规律的支配，这样，凝固就成为开始了解铸造生产过程中最主要的方面。

假定有一个形状简单的型腔，并用熔化的金属充满铸型（参看图 1—1）。

图中可以看出在一个球形内，热量从球形表面经过铸型向外扩散，而凝固过程则是从球形外表面逐层向球形的中心移动。当液体金属凝固时，体积要收缩，因此在没有液体金属补充的情况下，就要在球形中心形成缩孔。关于铸铁补缩金属的需要量根据合金的类型而不同，即根据铸铁的碳当量来决定。这种碳当量通常可以由抗拉强度来判断（参看表 1—1）。因为在铸铁组织中，石墨的形态决定了铸铁的强度；又由于石墨的密度较低，因此在铸铁件中，含石墨碳量高的比含石墨碳量低的收缩小。液体金属的补充采用冒口的方法。

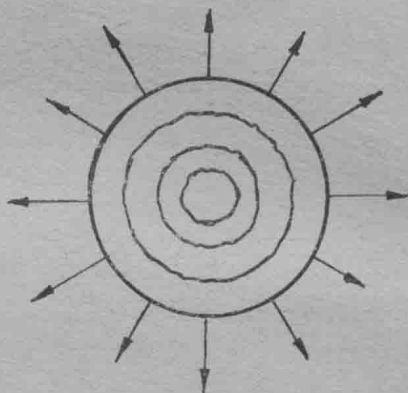


图 1—1

表 1—1

孕育铸铁类型	抗拉强度 磅/吋 ²	凝固收缩	相当我国牌号
GM60	55,000	5.0%	HT40—68
GA50	50,000	4.0%	HT35—61
GC40	40,000	2.0%	HT30—54
GE30	30,000	0%	HT20—40
GF20(低硬度)	20,000	+1.0%	HT15—33

白口铸铁中由于含有碳化物代替了石墨，收缩能达到 6%。特别值得注意的是韧性铸铁、球墨铸铁和孕育铸铁，根据其化学成分，收缩率从 0% 到 1.0%。硬度很低的铸铁还显示出凝固时膨胀的现象，不需用冒口补缩。低硬度铸铁出现的这一特殊性能主要是其密度较低而造成的。由于孕育铸铁方法中特有的可控石墨碳量，使它具有相同物理性能的材料相比，表现出凝固收缩较小的特征。

设计人员必须认识到收缩问题的存在，还要考虑到铸造工作者如何在铸件上安置冒口，或者采用哪些方法来消除缩孔。设计时要尽量采用物理性能较低的铸铁。这是一个很实际的问题，这样做可以减少铸造工作者的困难。

当形状简单的球体进一步凝固时，其体积要进一步收缩。因此最后得到的铸件比铸型的型腔小。为了使铸件获得足够的尺寸精度，就需要采用收缩裕量的方法。这种收缩

还影响着抗拉强度。在白口铸铁中呈现的收缩最大。

表 1—2 为孕育铸铁的收缩率。

表 1—2 (特殊情况除外)

模 型 尺 寸 (吋) (mm)	HT20—40 HT30—54 (吋/呎)	HT35—61 HT40—68 (吋/呎)
<24 (600) 不带芯子模型	1/8(0.95%)	5/32(1.30%)
25—48(600—1200) 不带芯子模型	1/10(0.83%)	1/8(0.95%)
>48 (1200) 不带芯子模型	1/12(0.70%)	1/10(0.83%)
<24 (600) 带芯子模型	1/8(0.95%)	5/32(1.30%)
25—36 (600—900) 带芯子模型	1/10(0.83%)	1/8(0.95%)
>36 (900) 带芯子模型	1/12(0.70%)	1/10(0.83%)

另件每边机加工裕量列在表 1—3

表 1—3

模型尺寸 (吋) (mm)	平面(吋) (mm)	孔 (吋) (mm)
<12 (300)	3/32 (2.4)	1/8 (3.2)
13—24 (301—600)	1/8 (3.2)	3/16 (4.8)
25—42 (601—1050)	3/16 (4.8)	1/4 (6.4)
43—60(1051—1500)	1/4 (6.4)	5/16 (8)
61—80 (1501—2000)	5/16 (8)	3/8 (9.6)
81—120 (2001—3000)	3/8 (9.6)	7/16 (11)
>120 (3000)	专 门 说 明	

第三节 孕育铸铁模型制造的收缩裕量

(确定之前和铸造工作者和模型工磋商)

白口铸铁收缩通常取每呎 1/4 吋 (2%)。一般收缩量不是一个固定的量，它受铸件大小和形状的影响。特别值得注意的是球墨铸铁和孕育铸铁，铸件如果不采用退火处理，其收缩量通常是每呎 1/8 吋 (1%)。在有些情况下，退火处理会使铸件产生膨胀，使得整个尺寸收缩范围从每呎 0—1/16 吋 (0—0.5%)。当收缩受到铸型的阻碍时，就会使铸件产生应力，收缩量最小的材料在铸件中产生的应力也最小。

这里再举一个例子，考虑一个正方形断面，如一个立方体 (如图 1—2)，冷却沿着棱角向表面进行，而且在棱角处冷得较快。因此，凝固在棱角处进行得更加迅速。在一般的铸铁件中，会在这些棱角处出现较高的硬度。而采用在铁水中成核而石墨化的孕育铸铁生产方法使得外表面的激冷效应减小。例如在棱角处，辐射热量是沿着二个方向进

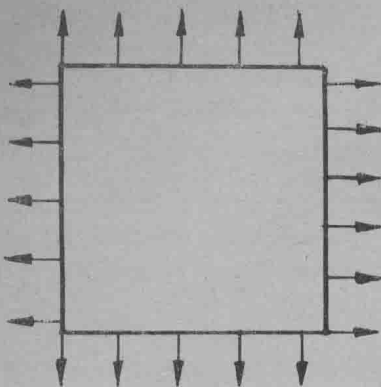


图 1—2

行，把正方形或长方形棱角的设计改为圆角如图 1—3，这样就可使热量通过铸型向外传递更加均匀。

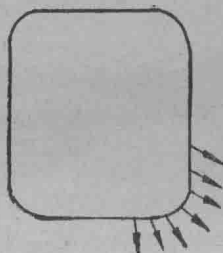


图 1—3

又如根据凝固特点来考虑一个内棱角的特殊情况。由于热量在尖角处是沿着和表面垂直方向传递，这样在棱角处必然冷得慢，在这里热量的流动方向线是相交的（如图 1—4），加上所采用的普通铸型是砂子，其热传导性能很差，而造成在棱角处冷得慢的条件，这样就产生了局部热区。延长了凝固时间，促使凝固收缩和降低这个部位的密度。从设计人员的观点出发，唯一合理的介决方法是对这些内角加大量的筋或加大园角半径如图 1—5。此外，棱角彼此形成的两个断面的相互关系是很重要的。如果断面有很大的差别，如图 1—4 中所看到的，在较薄部分收缩发生的时间和较厚部分收缩发生的时间是不同的。收缩不同是铸件产生应力，变形和裂纹的主要原因。

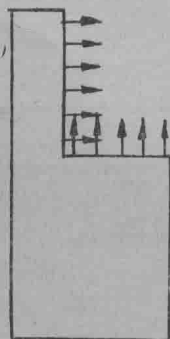


图 1—4

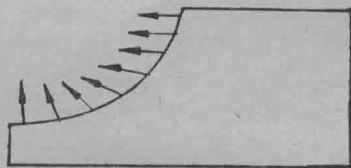


图 1—5

第四节 凝固过程中的冶金学

在讨论冶金变化之前，我们已经就凝固期间所发生的物理变化进行了讨论。铸铁是由许多不同的组织所组成的一种材料，对铸件而言，这种组织的形成决定于凝固期间以及在金属熔化之前的炉料成分。原来决定铸铁性能的石墨的析出，是由凝固过程进行控制，而凝固过程本身又是受设计所考虑到的因素而影响的。

以简单的园形为例,如图 1—6。铸件的凝固是从表面析出奥氏体晶体而开始的。这些晶体以树枝状形式向园形内部迅速生长,其生长速度取决于铸型的散热条件。与此同时,晶体的侧面也变厚,石墨由于在高温下具有较高的溶解度,因此石墨在一些奥氏体晶粒先析出后,才开始在残留的铁水中析出。石墨的析出发生在一些结晶核心或晶胞中,这就是人们称之为共晶胞或共晶团。这个过程可以用图解法表示。铸铁凝固的冶金过程是在一个简单断面上,从边上开始向中心进行。如图 1—7 所示。

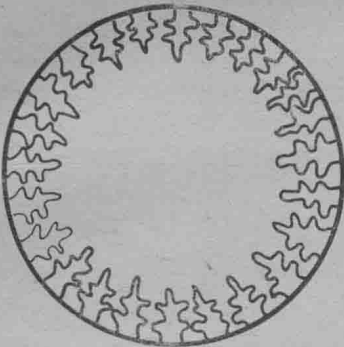


图 1—6

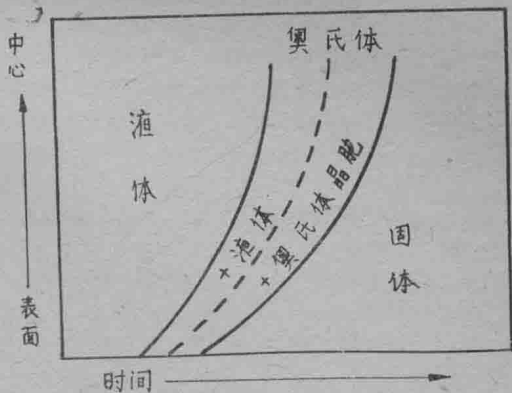


图 1—7

第五节 石墨的形成

铸铁物理性能的控制,通常是控制石墨从铁水中析出的时间。概括地说,就是对铸铁的成分进行控制,特别是控制铸铁的碳当量。在凝固过程中早期析出的石墨长得粗大,使得强度降低,但具备好的机加工性能。后析出的石墨较小,这种铸铁具有较高的强度。石墨析出得太晚,由于奥氏体枝晶长大使得石墨生长具有方向性。这样就会使铸件质量削弱。由于和石墨从铁水中的析出有关,在金相组织方面的变化结果如图 1—8。

在孕育铸铁方法中,碳当量和冷却速度或断面大小有关,而且和控制初始阶段所形成的物理条件有关。对于片状石墨,典型的碳当量 $(T.C + \frac{1}{3}Si)$ 如表 1—4。

表 1—4 灰口铸铁的典型碳当量

“GM60”	(HT40—68)	3.2%—3.8%
“GA50”	(HT35—61)	3.3%—3.9%
“GC40”	(HT30—54)	3.6%—4.1%
“GE30”	(HT20—40)	3.9%—4.3%
“GF20”	(HT15—33)	4.3%—4.5%
	(低 硬 度)	

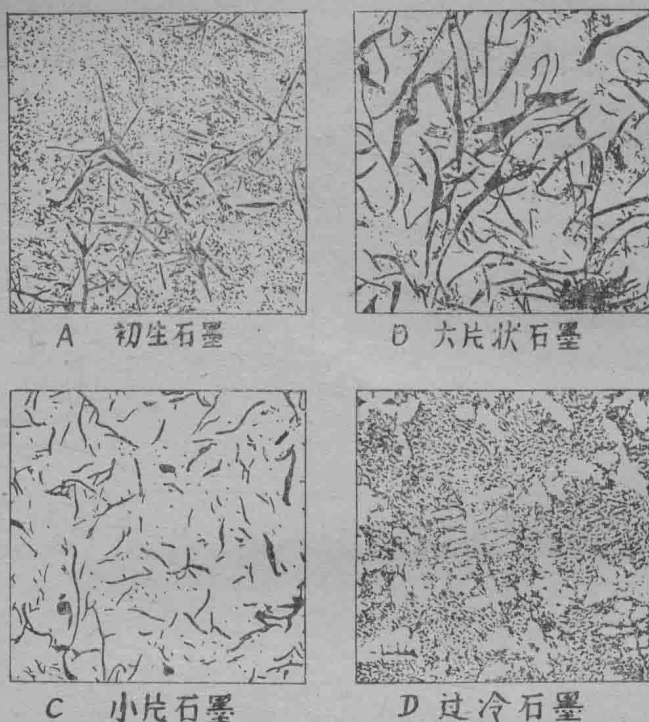


图 1—8

也许控制石墨从铁水中析出的最重要的因素是过冷现象。根据图 1—7 的虚线可以看出，随着过冷度增加，共晶团晶胞的形成时间推迟了，当一个晶胞开始形成时，其他晶胞也紧接着出现，结果形成了细小晶粒，提高了物理性能。

过冷是在铁水中对结晶起重要作用的。而过冷和化学成分无关。基于这个原因，对合金严格的化学成分说明通常是毫无意义的。

由于所有结晶过程都是从晶核开始的，因此缺少晶核将延迟结晶过程，从而就会增加过冷度。在孕育铸铁方法中，晶核的有效来源是原始炉料中的石墨碳。所以审慎地选择炉料，并采用专门的配方，可以把石墨碳控制在一定的范围。要获得高强度铸铁，就要在炉料中采用低的石墨碳含量。在这种情况下，通常是在炉料中提高低碳废钢比例。

有些过冷度的测定方法是采用从熔化炉中取样浇入楔形试块的方法，这种试块是人们所知道的能给出白口值读数的“组织试块”。

一旦熔化金属过冷可以考虑采用孕育剂来成核时，这种孕育剂是促进石墨化的，它能控制片状石墨的性能，并抑制过冷，促使石墨析出。

孕育铸铁生产首创了这种技术，这种技术是采用碱土硅化物作为核心，保证使铸件获得从边上到中心和各个断面的性能一致。

从设计人员的观点看来，这是一项很重要的技术，由于理想条件是需要铸件有均匀的断面，它在整个凝固期间表现出各部分具有相同的冷却速度。因此，采用过冷技术，

可以使设计工作在更宽的范围进行，以及消除从边上到中心部分的不可避免的差别，甚至也能在一个均匀断面各部分之间消除差别。

可以用一个简单的例证来鉴别形成什么晶核。图 1—9 为采用孕育技术后组织，性能的变化情况。



图 1—9

用专门的孕育处理方法的控制使得整个铸件所有断面组织和性能均匀一致，而且还能减少在任何一个铸件中从一个断面到另一个断面之间的差别，因此也能消除由于设计不当而引起的局部热区和其他容易裂开的慢冷断面部分的质量削弱。

然而，我们并不赞成助长这种错误的设计，设计人员目前需要做的是认真了解冶金学的重要规则，以便在设计中运用自如。

第六节 凝固后的冶金变化

铸件凝固后将继续冷却到室温，在这个冷却期间，铸件会收缩，其收缩量根据合金的成分不同而异。铸件还要经过一个重要的结晶变化，即高温下的奥氏体组织要转变成低温下稳定的珠光体组织。

图 1—10 中孕育铸铁或钢的典型冷却曲线可以看出，尺寸的变化恰好在 1400°F (760°C) 以下。

很明显，通常在不产生过大应力的情况下，这种缓慢冷却所发生的变化是不可避免的。而对于那些壁厚不同的铸件或有局部慢冷的部位，就会存在一些特殊的问题。

在珠光体析出期间发生的尺寸变化，使得铸件产生应力，裂纹和变形，而且会从冷得特别慢的部位裂断，造成废品。铸造工作者的工作完全取决于设计人员对设计工作的熟练程度，设计人员应该提供这样的设计，即要使得铸件各部分冷却均匀进行，而且要避免断面突变。

由于高强度铸铁在较低的温度下有明显的珠光体转变，在这种情况下，高强度铸铁不容易象那些含有少量能吸收应力的石墨的铸铁一样产生塑性变形，这就使铸件产生应力，这种应力的存在和降低铸件强度相类似。所以要对铸件提供这样一种方法，以便使铸件获得均匀的组织。因此进一步进行设计时，无论在什么地方都应该避免出现抗拉强度降低的可能。孕育铸铁方法，由于在基体组织上含有相当多的石墨以及具有相当高的机械性能，而且在铸件的断面内部，石墨形状非常均匀，这就使设计人员在设计时有更多的考虑余地。

应力是不可避免的，应力的消除采用热处理方法解决。通常采用的办法是在整个珠光体转变时，缓慢加热和缓慢冷却来消除应力。

由于强化热处理的铸铁或由于提供硬度高的耐磨马氏体基体而合金化的铸铁，使得收缩应力达到最大值。因此，合理的设计变得更加重要了。孕育铸铁方法提供了一系列用正火方法热处理使铸件得到强化。而且这种铸铁在热处理时，不容易发生裂纹和变形。强化热处理不能在设计完成后再考虑。主要是在设计的初始阶段，就要正确地运用这些原则，而且还要根据冶金过程和在强化处理过程中所发生的尺寸变化，制定出合适的尺寸公差。

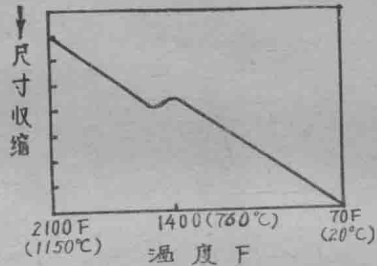


图 1—10

第七节 定向凝固

在探索铸件凝固规律、铸件应力消除和提高铸件尺寸精度方面，铸造工作者可以在严格控制凝固过程中熟练地运用这种技术。由于金属的浇注温度高于凝固点，使得在铸型的某些部分过热，并促使铸件按人们所知道的“定向凝固”进行。图 1—11 是一个

简单圆筒铸件的例子。

从图 1—11 A 中的铸件可以看到，液体金属从浇口注入铸型后，把热量传给铸型而液体本身冷却，考虑用来补缩液体金属而设计的冒口却变成铸件中最冷的部分，因而不能起克服凝固收缩的补缩作用。

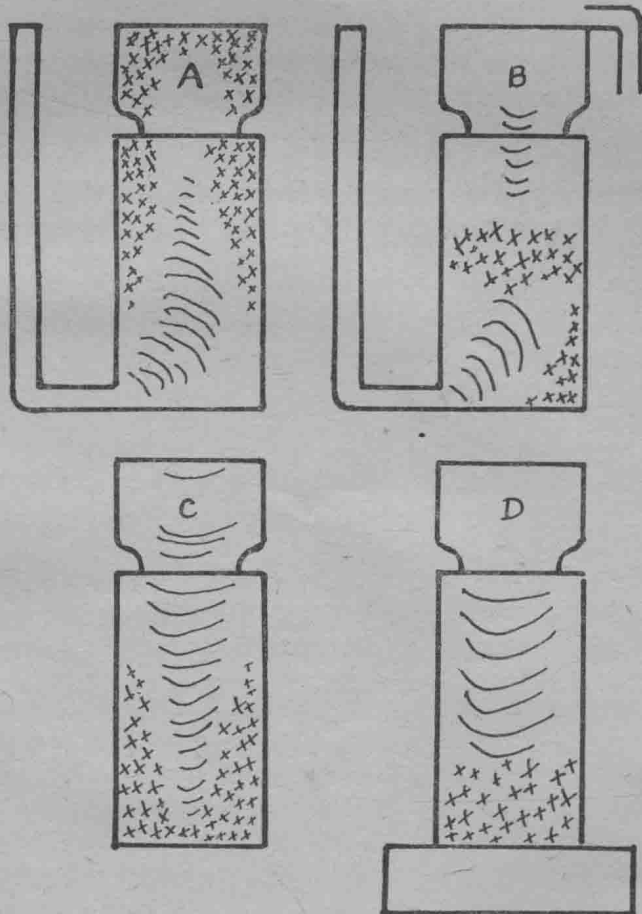


图 1—11

设计人员可以把铸件设计成带锥度如图 1—12 所示，由于上部较大而冷得较慢，这样就能抵销铸型所造成的反向温度梯度。

铸造工作者也可以采用使有些较冷的液体金属流掉的方法。如图 1—11 (B)。

更好的方法可以象图 1—11 (C) 那样浇注。在图 1—11 (C) 中可以看出：从上到下会出现一个自然的温度梯度。随着浇注速度的减慢，这个温度梯度会增加。这两种

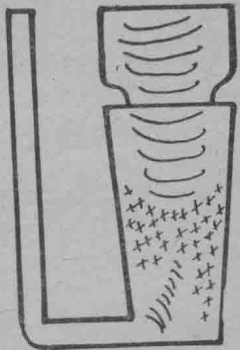


图 1—12

方法可以任选一种。铸造工作者还可以在图 1—11 (B) 的基础上用冷铁或激冷的方法浇注。这种方法如 1—11 (D) 图所示。在这种情况下，热量通过激冷迅速向外传递，使温度梯度进一步增加。有一个剧变的温度梯度在铸件下部提供最初凝固，而且对下部凝固部分提供补缩金属，最后到达铸件的上部。结果是获得一个健全的铸件，并且最容易控制。定向凝固还能预先定出铸件在凝固期间和凝固以后尺寸的变化。

为了获得最佳的效果，铸造工作者和设计人员必须密切配合，充分发挥他们的才能。平常铸造工作者只把注意力局限在降低成本方面以及避免采用高级合金，以免增加制造成本。在这种情况下，技术人员要发挥作用。铸造工作者也不能总是局限在浇注系统上采用纯粹的定向凝固方法。因为这种方法还受到一些因素的限制，例如要提供一个这样的浇注系统，这个浇注系统要保证铁水纯净，挡渣效果好地流入型腔。还要防止铁水对铸型的某些部分不合理地冲刷、造成铸型损坏。另外还受到成本因素的限制。因此，定向凝固仅适于不规则铸件和非标准铸件的浇注方法。

工程技术人员也不能把自己的设计工作局限在总是只设计完成一种作用的另件。与此同时，要使得所设计的另件容易铸造。这个问题最好的解决办法是在设计的初始阶段，对所考虑的每一个问题向其他有关人员请教。

第二章 一般设计规则

第一节 向铸造工作者请教

在完成设计的最后图纸之前，要向有经验的铸造工作者和模型工请教。

在铸件设计工作中有两个问题：一个是对设计人员而言，另一个是对铸造工作者而言。

a. 设计人员必须了解：“一个铸件应怎样设计，才能使铸件具有所要求的强度及基本性能。”

b. 铸造工作者必须具备这种能力：“要把铸件做出来并使铸件具有设计时确定的强度要求和基本性能。”

设计铸件要适合工程处的要求而不是适合铸工车间的要求，这是一件很普通的事情。做出的铸件有可能失败或满足不了要求。从铸造工作者的观点考虑，首要的问题是要求所设计的铸件能够不止用一种造型方法做出来，虽然这种方法并不很多。此外还要求所设计的铸件没有结构上的薄弱部分。

设计人员和铸造工作者之间的磋商要考虑到有关铸造的问题，这些问题很可能是生产中会碰到的，而且这种磋商要促进做出健全的铸件。在铸件设计初始阶段还要考虑到铸件完成的时间和制造成本。铸造工作者要求回答的主要问题是：需要用什么样的模型，合金的收缩量大小，要求用什么造型方法以及做一个健全铸件所需要的其他条件，机加工方面的考虑和尺寸公差等等。

第二节 做个小模型

几乎没有一个设计人员或铸造工作者能够在一张兰图上使铸件所有的断面形状相同。因此要绘制三向视图或者做个小模型。这样做可以对液体金属怎样浇入铸型、凝固怎样进行以及为了确保做出合格的铸件，应在哪些部分进行补缩等方面的问题进行研究。

一个按比例缩小的模型或完全按铸件实际大小做出的模型可以进一步帮助设计人员考虑芯子如何设计、如何固定和去掉不必要的芯子。这个模型也能帮助铸造工作者考虑造型方法，分析铸件的薄弱部分产生的缺陷（收缩和裂纹），在哪里安置浇冒口等。这样的模型还能分析有关获得健全铸件的其他问题，制造成本和完成日期。

第三节 获得健全铸件的设计

大多数金属和合金，凝固时要收缩。

因此，另件的整个部分尺寸要在一个或几个地方进一步加大，这些地方是为了抵消液体金属收缩安放冒口用的。

图 2—1 中表示了正确和错误的设计方法，所有在这里进一步确定的规则已经在使用过程中以及保证断面的完整性方面得到证明。

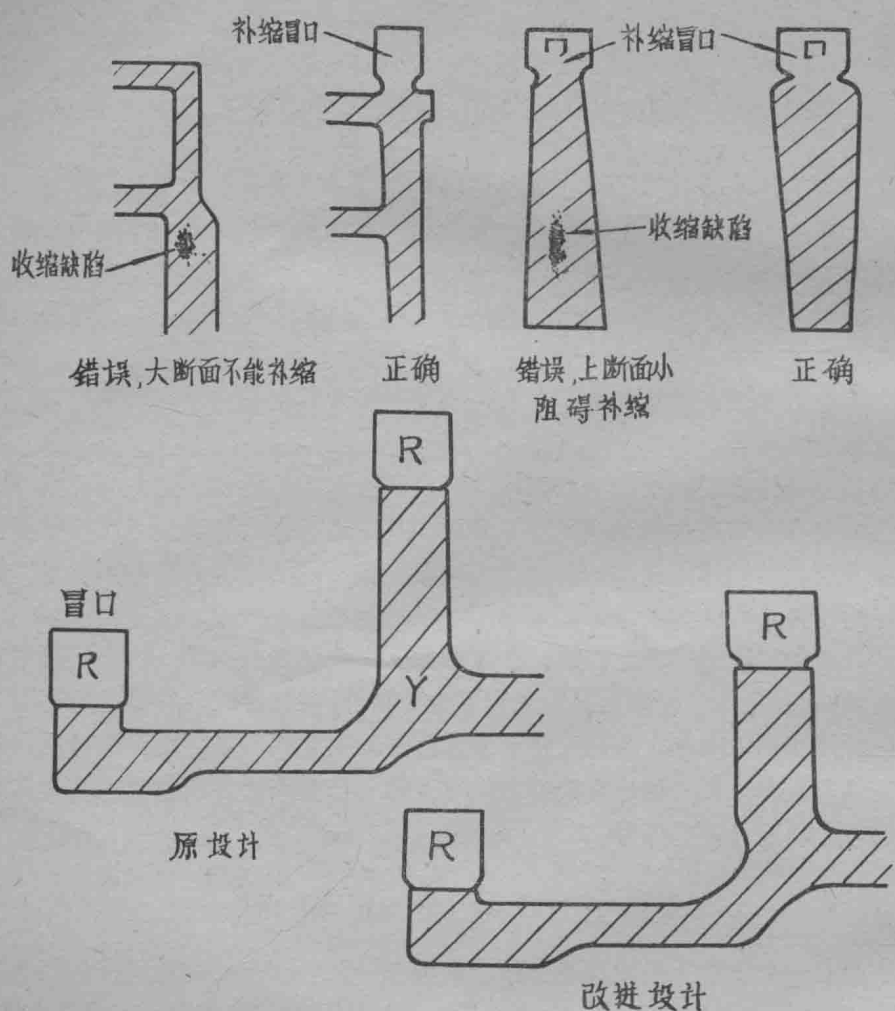


图 2—1

第四节 避免尖角和棱角

A) 要使铸件具有自由冷却表面，避免尖角和棱角。

熔化金属的凝固总是从铸型表面开始形成不规则的晶粒。这些晶粒按着和冷却表面成直角的方向生长而伸入铸件内部。简单断面的铸件，冷却过程是均匀的，因而不存在机械性能削弱部分。而当两个或更多的断面连接在一起时，机械性能削弱就会在接点处产生，自由冷却也会由于“热区”的产生而受到干扰。金属组织受铸件断面尖棱角的影响见图 2—2。

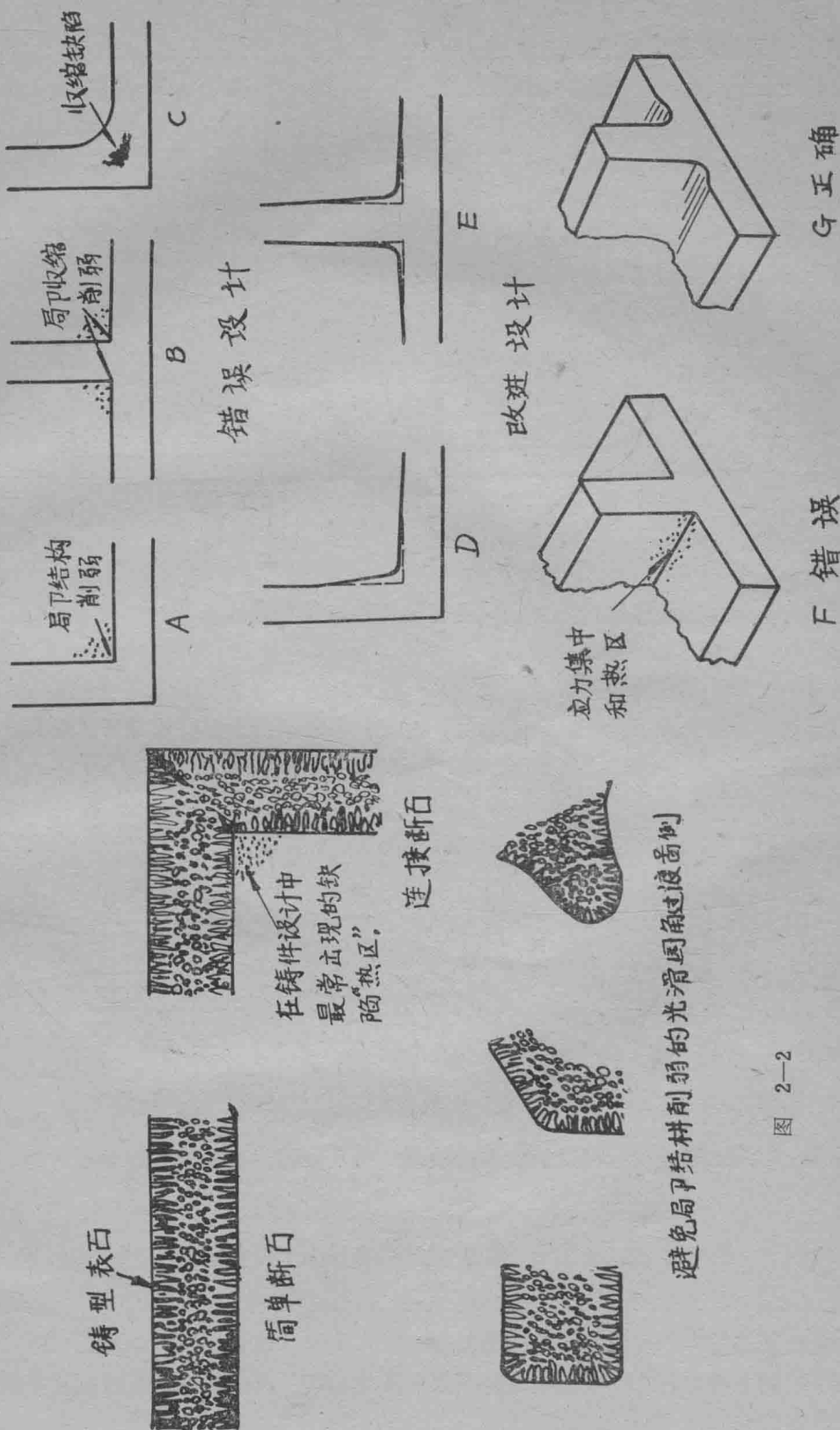


图 2-2

图 2-3

B. 用园角代替尖棱角

设计连接断面时，应避免尖棱角而用园角代替尖棱角，并把热区和应力集中限制在最小范围。图 2—3 的 A, B, C 是不合理的设计，这种设计使铸件出现结构薄弱部分，图 D, E 是推荐的设计，这种设计改善铸件的强度和刚度。图 F 所画的是“T”型断面出现的常见缺陷，而图 G 改进的设计消除热区和应力集中。

C. 避免铸件内表面的尖棱角

由于设计不合理造成铸件局部结构薄弱的例子。

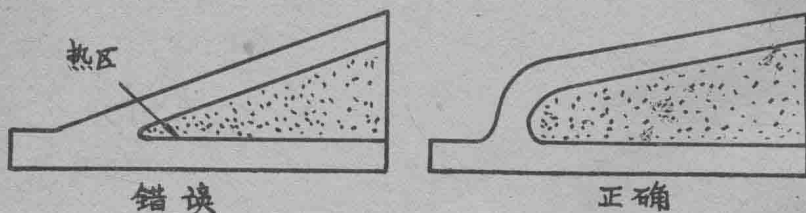


图 2—4

图 2—4 为发动机汽缸体另件经常会出现铸件薄弱部分的设计。

应避免缺乏散热表面的芯子设计。

图 2—5 为外部的流线型设计造成“Y”型大断面，这样细长的芯子结构在 A 点出现热量集中，这一点又是在大断面地区，结果，在热区由于铸件收缩形成缩孔、缩松而产生渗漏。

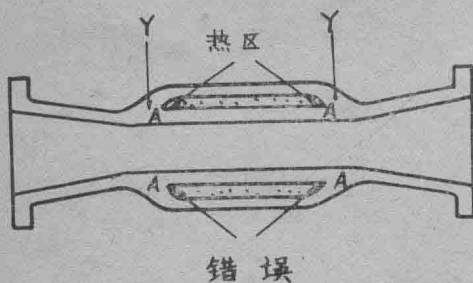


图 2—5

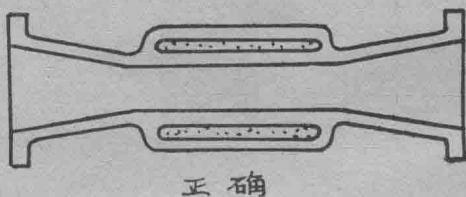


图 2—6

图 2—6 为改进的设计可以消除渗漏缺陷，而且使铸件各个部分的强度均匀。

第五节 减少连接断面的数量

少量断面连接在一起的凝固情况见图 2—7

为了绘制各种带有几个断面组成的节点的冷却曲线，可以在各节点断面处安装热电偶，测定的结果如图 2—8。