

# 高强度灰铸铁件典型质量问题探讨

■ 辜祖勋

**摘要:** 铸造生产的困扰是因任何铸件的具体质量问题与缺陷表征及其原因是多种多样又彼此关联甚至相互对立。当生产高强度 (HT300 和 HT350 级) 灰铸铁件时更为突出, 较难处理的两对主要矛盾是: 提高金属强度将引起石墨形态恶化; 而材质性能的升高将加大铸件产生缩松的倾向并降低铁水流动性。本文拟就此进行分析并相应地探讨一些调解措施, 以期能有助于拟订调试工艺方案和分析问题时参考。

**关键词:** 冶金因素 凝固与结晶 形核能力 过冷和过冷组织 缩松

## 1. 问题的由来

考察机械制造的动态可知, 机械——尤其是行走机械, 其研发重点内容之一是提高金属强度以减轻自重和提高使用寿命。灰铸铁件生产较易、价格低廉且耐磨、抗压性好, 故迄今仍占各类铸件重量的首位 (约占 50~55%)。至于在汽车制造业, 灰铸铁也是重量居第一位的铸造合金。

灰铸铁之所以仍具有竞争力, 在于克服其固有的最大弱点——强度相对较低导致工件较重这方面不断地取得进展的缘故。例如, 有的高强度灰铸铁轿车缸体自重已降至 40 公斤以下, 最薄断面壁厚不及 3 毫米。

如果孤立地仅就金属强度而言, 要提高灰铸铁强度并非难事, 因为只要降低灰铸铁的碳硅量, 即可减少所形成的片状石墨 (相对于金属而言, 石墨的硬度和强度可以视为零), 同时加入合金元素强化基体, 就能达到这一目的。

但是, 碳量 (碳当量) 的降低将加剧两大质量问题, 一是石墨形态的恶化, 二是铸件易于产生缩松缺陷。可见, 为生产高强度灰铸铁件需要解决好这些突出矛盾, 而这将涉及一系列理论和实践方面的问题。

## 2. 影响灰铁性能的因素

先前的一致认识是: 灰铁材质性能取决于它的化学成份及冷却速率。对于给定形状、重量和壁厚的铸件, 如果铸型介质和浇注温度不变, 冷却速率也是不变的, 因而影响到金属性能的将主要是化学成份, 对于灰铸铁来说, 基本成份中的锰、磷、硫三元素对性能的影响较小且可供调控和实际变化的范围又很窄, 显然, 决定灰铁材质性能的最重要因素是碳和硅的含量 (合金元素影

响作为另类问题对待), 如果找出该两元素含量 (还可以将两元素合二为一地用碳当量代表) 与表征灰铁材质性能的强度和硬度之间的数学关系, 这不仅给试验研究带来便捷同时也将对生产者具有实用价值。此外, 还有一个问题一直引起人们的关注——内燃发动机, 它的大部分工件是灰铁件, 其主要部件如缸体不仅加工量大、工序繁多, 且多用专用设备和刀具, 而专用刀具都是单件制作, 因此, 即使在欧美国家, 在发动机厂生产费用中, 刀具损耗的费用占居第一。按传统观点, 灰铁的硬度与强度呈直线正比关系, 可否在一定范围内生产出强度提高而硬度不变或稍许上升的灰铁? !

循着这一思路, 铸铁学者派特生进行系统性充分试验, 并对大量数据加以处理<sup>[1]</sup>, 得出灰铁硬度和强度与共晶度 (或称碳饱和度, 为便于运算与建立简明的数学公式, 将铸铁共晶点的碳当量 4.26 换称共晶度为 1) 之间的数值关系。这一成果得到各国业界的广泛认同, 其硬度与强度间关系的计算原则, 已纳入国标 GB9439-88《灰铸铁件》之内。

借助于该研究结果 (公式), 可以定量地、明确无误地反映所生产的铸铁及其工艺技术的优劣。

任何灰铁生产车间可将所生产铁水的碳饱和度和按公式得出它的“计算硬度”和“计算强度”, 以之与所浇注试棒得到的“实测硬度”, 和“实测强度”两两对比, 分别得出“相对硬度”和“相对强度”, 再将“相对强度”比“相对硬度”, 所得值称为“正常度” (或称“质量指标”)。如果正常度等于 1 表示该车间的“熔铸状态”处于正常

合理；若大于 1 则为优良，反映该车间在给定的铸铁成份下获得较高的强度与较低的硬度；如果小于 1 显然说明生产状态不佳，因为若要提高材质强度势必要靠降低碳饱和度（碳硅含量）的办法来达到，这必将对金属组织及铸件缺陷不利。

更为有意义的是，根据对众多铸铁车间的考核统计，发现有的车间正常度可达 1.2，而另一些车间则低至 0.8。换句话说，同一成份的灰铁，状态最好的车间，其金属性能较状态最差的车间要高出 1/2，或者说后者低于前者 1/3。

透过这一事实还表明灰铁的材质性能不仅取决于它的化学成份和冷却速率，必然还有其他更深层次原因在发挥着明显的作用。它们被统称为“冶金因素”。研试表明，冶金因素是一系列状态内涵和工艺技术的泛称，它包括原材料、炉料组成、熔化炉、炉衬材料、熔化工艺操作、温度控制、铁水中气体与微量元素的量、炉前处理、浇注温度等。

现举两实例以证实冶金因素的影响：一家铸造厂为降低成本在中频炉熔化时不用生铁，改用废钢增碳（高度石墨化的渗增剂）工艺后，铸铁性能全面提升。采用含少量合金元素的复合孕育剂，所得铸铁的性能优于等量合金单独加入铁水的结果。

再从另一方面看，近期铸铁学者都不遗余力地进行研试以期改变或控制某些冶金因素以达到不主要依赖于降低碳饱和度与加入合金求得铸铁强度的提高（其回旋空间很大）。这从国内外期刊和各级学会发表的文章动态可明确地感知。

### 3. 凝固与结晶和过冷度与过冷组织

众所周知，液体金属转变为固体金属时，只能也必然是以结晶形式凝固（完成）的，就物理学的原理而论，凝固和结晶是两个不同范畴的概念。凝固指物质从液相变为固相，而结晶是说物质原子以一定形式排列构成晶体，它可以出现在液固相转换之际，但也可在固相时发生转变。

任何相图（例如铁—碳平衡图）所表示的给定成份的合金都有一凝固结晶点，但这是在理论上金属液在极其缓慢的冷速下构建的。而在现实生产中不论冷却如何缓慢，实际的凝固结晶温度都一定（必然）是低于理论温度点的（“过冷现象”）。这一相差的温度度数，被称为“过冷度”。

产生过冷现象并出现过冷度的原因是因为存在结晶必须先有晶核且在其达到一定数量时才能形成结晶体这一自然规律。因此，液态金属的实际凝固结晶温度点必然将滞后于它的理论

值。因此可以认为，“过冷”（过冷度）是金属由液相至固相转变时使“凝固”与“结晶”同时发生的“缓冲器”或“调节器”。

至于过冷度的大小取决于金属产生晶核的能力和冷速的快慢。晶核的来源有二，一是金属冷凝时自然产核的本质，称为“自发晶核”，它与金属成份有关，对铸铁来说，碳饱和度和越高，石墨结晶的形核能力也越强。二是所谓的“非自发晶核”，包括铁水中保有的石墨残核以及晶体结构十分接近石墨的其他物质微观质点以及孕育处理所引入的核心。

金属液浇入铸型后随冷速的不同过冷度为之改变。显然，浇注温度增高，过冷度减小。铸型介质导热性愈佳和（或）比热愈大，过冷度加大。铸件壁厚越大，过冷度越小。

过冷度与灰铁组织间的关系参见附录。

## 4. 灰铸铁强度的提高

### 4.1 石墨的影响

#### 4.1.1 石墨数量

前已提及，石墨的强度可以作为零对待，因此灰铁的总（含）碳量愈高，石墨的量（体积）也愈大（全珠光体的化合碳为 0.8%），强度的下降也愈明显。

#### 4.1.2 石墨形态（见附录）

### 4.2 基体的影响

#### 4.2.1 珠光体数量与弥散度及珠光体的性质

正常的灰铸铁金相组织中只有珠光体（或允许有少量铁素体存在），这是出于对强度和耐磨性方面的考虑。因为中等晶粒度的铁素体硬度在 HB80 左右，拉力强度约 250Mpa；而中等弥散度的纯碳共析体（全珠光体）则分别为 HB240 和 800Mpa 左右。

珠光体的弥散度（片间距）对其硬度和强度的影响不亚于数量的效应（参见下表 1），但这一点往往被人们所忽视。

表 1 珠光体片间距与硬度的关系

珠光体的片间距, $\mu$	相应的珠光体硬度, Hv
0.40	200
0.35	228
0.30	287

珠光体是由碳化物（渗碳体）和铁素体组成，而碳化物可以是碳化铁（这是最基本的），但也可以是碳化铬、碳化钼、碳化钒……等以及由它们构成的复合碳化物，复合碳化物的硬度（强度）和稳定性高于单一碳化物，这是合金元素提高

(铸铁)强度的原因之一。合金元素几乎都可固溶于铁素体并强化铁素体,虽然其固溶量极限与强化程度各不相同。这是合金元素提高(铸铁)强度的另一效果。绝大多数合金元素提高珠光体的数量及其弥散度,这是它们提高(铸铁)强度的又一作用。对此有必要加以阐述。

根据铁—碳平衡图可知,珠光体是在铸铁冷却降温通过共析转变温度区间时以介稳定形式相变获得的。反之,当以稳定形式发生相变则将得到铁素体和石墨。

究竟哪些因素影响铸铁共析转变按介稳定或按稳定平衡进行?

第一,当铸铁快速冷却即迅速通过该温度区间时,碳化物(渗碳体)将来不及分解从而得到珠光体组织。这也就是薄壁件和800℃以上高温开箱落砂有利于珠光体生成的原因。

第二,有的元素扩大并抬高此温度范围因此将有利于相变按稳定平衡模式进行,例如硅。

铸铁学者德拉帕尔对此进行大量试验归纳其数据得出如下公式<sup>(2)</sup>:

$$A_{1.2}=738+18 \times (\text{Si} \%)^{1.75} \dots (1)$$

$$A_{1.1}=738+5 \times (\text{si} \%)^{2.0} \dots (2)$$

式中,  $A_{1.2}$  为共析转变的启始(上限)温度,  $A_{1.1}$  为终了(下限)温度。其间为两相区。

这就是硅高不利于铸铁获得珠光体基体而且粗化珠光体的缘故。

绝大多数的合金元素——例如铜和镍,虽然属弱石墨化元素,但因随其含量的升高,既收缩共析转变温度区间同时压低该温度范围,因而不但促使相变按介稳定方式进行以形成珠光体,同时还加大珠光体的弥散度,因为随着温度的降低原子扩散活力减弱之故。镍的加入量一般为0.3~0.7%。铜在0.4~0.8%左右(超出1.2%溶解度极限后将有游离铜出现,导致强度下降)。铬和锰性质近似,易引起“白口”故锰不超过0.7%,而铬不可超过0.4%。钒的类似作用更强,仅在生产某些耐磨件时应用,加入量一般不超过0.1%。钛通常也很少运用,加入上限为0.1%。锡只有稳定珠光体的作用,故仅在铸件厚壁或需考核珠光体数量的指定部位(例如缸体的缸筒)达不到时推荐采用,其加入量通常在0.05%左右。铋的作用与锡相同而且更强烈,提高材质脆性对断屑有利,但它加大复杂铸件产生裂纹的倾向,加入量不宜超过0.02%。锡和铋对消除过冷铁素体作用明显。钼是最优异的合金元素,但价格昂贵,故通常不选用。

通过以上分析可见,生产高强度灰铁件时加入合金虽然是必要措施之一,但通常实际可供运用的元素只有铜、铬和锡,而且可变动的含量范围都很窄。有必要指出的是,任何合金元素都不同程度地降低铁水流动性且加大收缩倾向,亦即对铸件工艺性不利。

第三,石墨形态对共析转变具有显著的影响。共析转变是固相发生,此时不易产生石墨晶核,故相变将以稳定或者介稳定模式进行必然与这时已有的石墨(因为它们是共析转变时的石墨化核心)数量有关,不言而喻,数量愈多相变愈有利于按稳定平衡进行。这就解释了为何A型石墨有利于生成珠光体基体;而D、E型石墨必然伴生“过冷”铁素体,因为过冷石墨的特征就是大量密布的细小片状和点状石墨,因而缩短了碳原子扩散至石墨聚合的距离。换言之,如果说过冷度大是“因”,则共晶结晶(凝固)形成过冷石墨是“果”;而对共析结晶(固相转变)来说,如果有了过冷石墨这个“因”,就极有可能(如无其他相反因素)导致产生过冷铁素体这个“果”。

#### 4.3 孕育剂的作用

孕育剂增加石墨晶核,因此降低过冷度,促进A型石墨生长同时也增加珠光体数量,故对提高铸铁强度有利。

#### 4.4 共晶团的影响

虽然国标BG7216——87《灰铸铁金相》载有共晶团的图谱及其检测与分级,但遗憾的是,极少有灰铁铸造车间将其纳入日常生产的考核内容,无疑这对生产者深层次地综合了解和提高铸件质量带来缺失。看来这可能是由于对共晶团数量(大小)在一定程度也反映某些灰铸铁材质和灰铸铁件质量的功能了解不足的缘故。

4.4.1 共晶团数与强度的关系:仅就此而言,铸铁的强度随共晶团数的增加而升高。

4.4.2 共晶团数与石墨长度的关系:从立体观念看,每一生长完成的石墨结构都被界定(限制)在该共晶团之内,可见,石墨的大小取决于共晶团的尺寸。金相视场上所见的是所切取试样无数石墨花瓣的平面形态,由于数量庞大且尺寸悬殊,因此人们只能对照图谱给石墨长度评级,因此不可能准确。而共晶团是可计数的。

4.4.3 由共晶团可以联系到过冷度。

4.4.4 共晶团数可以反映孕育处理是否适度。

4.4.5 共晶团数在一定程度上也能反映铸铁的切削性。

4.4.6 共晶团数可以表示铸铁的缩松倾向。

综上所述，每一级别的灰铸铁各有其相对应的共晶团数（大小）的适当范围，检验某些重要铸件的指定部位——如缸体缸筒的共晶团数对了解其质量将是有益的。

4.5 试棒（指试样铸坯）和试样（指试棒机加后）的影响

4.5.1 试棒（或试棒铸块）的取得：根据国标 GB9439-88《灰铸铁件》，可以用与浇注铸件的同一炉（包）铁水浇成的直径 30 毫米长约 250 毫米的单铸试棒或根据供需双方的协商在铸件上带出附铸试棒或浇出连体铸块再切取。对于单铸试棒无需讨论，但对附体试棒和连体铸坯有必要予以论及。

按国标图样规范，附铸试棒直径可以是 30 毫米也可以是 50 毫米，而连体铸块为一给定尺寸。换句话说共给出三种方式供选择。

鉴于灰铸铁的“断面敏感性”极强，生产高强度灰铸铁件要保证附铸试棒或连体铸坯性能达标，是一件不可忽视的问题。建议生产者以采取浇铸直径 30 毫米试棒为宜。同时，应将位置选择在远离浇冒口的铸件薄断面处。

对于某些特殊铸件，用户可能要求从铸件本体切取拉力试样，在这样的情况下，通常因受具体铸件的制约，大都不可能获得标准尺寸的试样，亦即只能作出非标试样，此时应力求试样加工后的直径最大限度地接近于所切得铸坯的壁厚。

还要提及的是，如果客户要求考核金相组织，则不论哪种方式取得的拉力试样，均可以之作为金相试验供检查之用。不能同意在铸件任一部位切取试样，因为没有代表性。当然，对于某些特殊件，如缸体指定检查缸筒的金相组织，则是合理的应予接受的要求。

4.5.2 试样的车削及加工后的状态

由于灰铸铁金属“缺口敏感性”极强，故车削后的试样必须用细砂纸精抛光至国标规定的粗糙度 3.2 级以上，试验前必须精确测量记录各相关尺寸并细心地检查其外观状态，任何微观的铸造缺陷如：砂眼、气孔、渣孔、缩松等瑕疵以及刀痕，都将导致拉力强度试验值明显下落。

## 5. 缩松

### 参考资料

- [1] 《AFS Transaction》1982 p.263
- [2] 《Giesserei》1963 H.2, S.89

热胀冷缩是绝大多数物质固有的普遍规律。因此，收缩缺陷——尤其是缩松就成为铸件缺陷中最难以解决的问题。

灰铁中有自由碳—石墨的存在应该说对缓解收缩现象有利，这是由于石墨的密度（比重）是 2.0，铁素体和珠光体都接近 7.5 的缘故，因而在铸铁凝固时石墨析出使铸件的收缩得到补偿（石墨碳量越高，补偿能力也越强），不过强度下降，在生产高强度铸铁时这一矛盾更突出。

为降低高强度灰铸铁件产生缩松的倾向，大致有以下一些措施可根据铸铁级别和具体铸件同时顾及可能引起其他铸造缺陷而适当采用。

5.1 就铁水成份而言，国内外均倾向于尽可能地少调低碳饱和度（碳当量），即使要降也力求采取高碳低硅，因为起膨胀作用的是碳，而且低硅对强度有利。

5.2 将磷控制在 0.06% 以下，因磷加剧缩松。

5.3 尽可能降低合金元素加入量。研试并调动“冶金因素”以提高铸铁的性能是方向性的启迪。

5.4 适中的浇注温度有利于减轻缩松倾向。但温度过低将恶化石墨、产生“白口”、降低铁水充型能力（流动性）和导致气孔（灰铁件极易产生气孔，特别是包覆砂芯的壳体件，如缸体）。

5.5 过度孕育将加剧缩松，孕育后凝固过程进一步缩短并滞后，亦即铁水在铸型中保持液态的时间延长。大量试验研究表明，灰铁的最大容许孕育量为 0.3%，何况过量孕育无累加效应。

5.6 铸型刚度愈高铸件产生缩松的程度愈低，因为低硬度砂型在石墨化膨胀时发生位移使型腔增大从而导致膨胀产生的补偿作用失效的缘故。但高刚度铸型的起模性差、透气性下降和易引起砂膨胀缺陷（起皮与鼠尾）。

5.7 “糊状凝固”的铸造合金较难依靠补缩冒口得以解决，而均衡凝固过程即铸件不同壁厚部位凝固终了时间若能趋于接近则可消减缩松的产生，如分散内浇口并将其设于薄壁处和加置“热平衡冒口”都是有益的工艺措施。因此，利用计算机通过模拟温度场使浇注系统设计更趋科学化和合理化显得更加重要。至于在某些铸件的特殊热节点处加放冷铁或刷碲粉涂料有时也是不得已的措施。