

灰铸铁的组织 and 几种合金元素的影响 (二)

■ 中国铸造协会 李传斌

(接上期)

二. 灰铸铁中常用的合金元素

灰铸铁中所加的合金元素大体上可分为 4 类, 即石墨化元素, 渗碳体稳定元素, 珠光体稳定元素和细化珠光体的元素。

铸铁凝固过程中, 碳、硅、铝、硫、铜和镍等元素都有促进石墨形成的作用, 可认为是石墨化元素。但是, 各元素的效能却很不相同, 例如, 铜的作用大约是硅的 20%。镍和铜还有双重作用: 共晶转变时促进石墨化; 共析转变时却抑制石墨化, 有助于形成较多较细的珠光体, 所以也可以将其视为珠光体稳定元素。

钛的影响也很复杂。一般说来, 钛是很强的碳化物形成元素, 但当其含量很少时 (如 <0.08%), 它的微细的化合物可作为石墨的核心, 有促进石墨化的作用。

锡、锑、锰、钼、铬、钒和铌等都能阻碍石墨的析出和成长, 增强形成渗碳体的倾向, 都属于渗碳体稳定元素。其中, 钼的作用与其加入量有关。铸铁中含钼量, <0.8% 时, 钼的作用温和, 表现为使珠光体细化, 含量提高就是渗碳体稳定元素。一般认为: 锰的作用是增加铸铁的珠光体量, 提高铸铁的强度。实际上, 锰的作用也是多方面, 含量高时, 会使石墨粗大, 从而降低铸铁的强度。

本文的开始, 我们就谈到了提高灰铸铁件的强度及其综合质量的目标, 现在就从这个角度来谈谈灰铸铁中常用的合金元素。

1. 锰和硫

一般说来, 硫是有害元素。但对灰铸铁来讲, 含少量的硫对于石墨的生核和共晶团的细化都有非常重要的作用。所以, 灰铸铁中的含硫量不宜低于 0.06%, 最好保持在 0.06% - 0.08% 之间。

含硫量太高 (>0.18%), 则各种有害作用都会显现, 损害铸件的质量。

硫是化学活性强的元素, 在铸铁中含锰量很低时, 硫与铁生成化合物 FeS (熔点 1193℃), 也与铁和碳形成低熔点的共晶体 (含碳 0.17%, 硫 31.7%, 其余为铁, 熔点 975℃)。

FeS 可以完全溶解于铁液中。铁液凝固时, 硫或 FeS 在奥氏体和渗碳体的固溶度很小, 逐渐富集于剩余的液相中, 最后以硫化物的形式析出, 铸铁中含硫量为 0.02% 时, 即可出现独立的硫化物。

在灰铸铁中, 硫与锰的亲合力比其与铁的亲合力大得多, 下式表述的反应中, MnS 的形成是占优势的。



MnS 的熔点为 1620℃, 在灰铸铁中, MnS 是细小而无害的蓝灰色夹杂物, 散乱地分布在金属基体中, 而且有助于改善铸铁的加工性能、提高工具的寿命。

灰铸铁中, MnS 和 FeS 可以互溶, 所以, 复合硫化物 (MnFe)S 中, 锰和硫的量是可变的。硫和氧也可以互溶, 所以, 灰铸铁中, 硫化物的情况很复杂, 生成的化合物可以用 Fe_xMn_yS_vO_w 来表示, 其中 x、y、v 和 w 的值会因铸铁的具体条件而改变。

近年来, 用定量金相分析方法所作的研究表明: 1cm³ 灰铸铁中, MnS 和 (MnFe)S 夹杂物约有 4300 万个, 夹杂物的尺寸为 2~23 微米。夹杂物的总量不到铸铁重量的 0.01%。

硫以 FeS 或三元共晶存在时, 在铸铁凝固过程中, 偏析于共晶团界面的液相中, 阻碍共晶团的成长, 使共晶凝固时的过冷度增加, 因而使铸铁的白口倾向增大。凝固以后, 偏析于共晶团边

铸造纵横

www.foundry.com.cn

界上的 FeS 或三元共晶，又会使铸铁的力学性能低下，脆性大。这就是硫的有害作用。

如果铸铁中加有足够量的锰以抑制 FeS 的产生，并形成细小而分散的硫化物夹杂，硫就会在石墨的生核和成长中起积极而有益的作用。结果，铸铁组织中共晶团细小，石墨为 A 型，也不会出现白口。为使石墨片的形态令人满意，灰铸铁中硫的最低含量应是 0.06%。含硫量低于此值，铸铁中石墨片的分布状况就不好，且易产生白口。

锰在灰铸铁中的主要作用是约束硫，抑制 FeS 的形成。由于锰与硫的原子量的比值为 1.71。铸铁中的锰与硫化物形成 MnS 的当量比为 1.71 时，认为其处于锰硫平衡状态。含量高于平衡状态的锰，称为“超量锰”，含锰量低于平衡状态时，则属于“硫超量”。

前面说到的反应是可逆的，如欲使 FeS 充分地 与锰作用生成 MnS，必须有适当的超量锰。在正常的作业条件下，如灰铸铁中含硫量不高于 0.18%，同时又含有足够量的锰，硫的有害作用就不会太大。如果没有足够的含锰量，含硫高就有明显的稳定渗碳体的作用。石墨的形态也不好（尖锐石墨片）。

锰延缓奥氏体转变的作用很明显，在铸钢中是最便宜的、也是最常用的提高淬透性的合金元素。在灰铸铁中，锰也有提高基体淬透性的作用。由于灰铸铁不适宜淬火处理，这一优点是无从利用的。

锰对灰铸铁强度性能的影响有其两重性：一方面，锰能促进珠光体形成，且有一定的细化珠光体的作用，因而有助于提高强度；另一方面，含锰量太高会影响铁水的生核，使共晶团数量少，石墨粗大，甚至可能促成过冷石墨，从而使铸铁的强度降低。

关于锰在灰铸铁中的作用，英国铸铁研究协会（BCIRA）曾进行过系统的研究，美国铸造学会（AFS）也组织过有关的调查和研究，以下一些看法是目前为大家所认同的。

灰铸铁中的超量锰为 0.2-0.3% 时，白口倾向最小，硬度也最低，当然强度也不高。将超量锰降低到 0.1% 左右，灰铸铁的抗拉强度会有较大幅度的提高，同时，布氏硬度也可能提高 40-50 单位，在这种情况下，应注意铸铁的加工性能是否

适宜。超量锰在 0.3% 以上继续提高含锰量，可使灰铸铁基体中的珠光体增多，但并不一定能提高强度。

美国铸造学会的研究表明，将灰铸铁的含锰量从 0.39% 逐步提高到 0.97%， $\phi 22.5$ 、 $\phi 30$ 和 $\phi 50$ 的试棒的抗拉强度，都随含锰量的增加而降低。

由于各个铸造厂的铸铁中的残留合金元素含量不同，含硫量也不相同，所以，各厂超量锰的最佳值不尽相同，无法推荐广泛适用的含锰量。铸造厂宜根据其熔化设备和炉料的具体情况，通过试验，确定最合适的含锰量。可以超量锰 0.2% 为起点，在一较长的时间内进行逐步改变含锰量的试验。每一阶段（约一个月）增加 0.1% 的锰，看含锰量为何值时能得到适合其作业条件和产品要求的最佳综合性能（包括抗拉强度和硬度的比）。一般说来，最佳的含锰量会在超量锰为 0.2% 和 0.5% 之间。

如果铸铁中含硫量较高（0.15% 以上），含锰量又超过了 0.7%，则铸件的上表面容易出现渣反应生成的皮下气孔，这是由于 MnS 上浮到金属/铸型界面上发生反应而造成的。在这种情况下，应降低含硫量并适当提高浇注温度。

实际生产条件下，灰铸铁中含硫 0.05-0.15%，含锰量不超过 0.65 是正常的。

2. 铜

灰铸铁中的铜，有多方面的作用：

- ◆ 促进石墨化（效能约为硅的 20%）；
- ◆ 减轻铸铁的白口倾向，但又不促成游离铁素体；
- ◆ 促进形成珠光体的作用较强；
- ◆ 可因溶于铁素体，使铁素体强化；
- ◆ 使珠光体细化。

对于铁素体，珠光体铸铁，加铜后提高抗拉强度和硬度的作用比较明显而且可靠。如果用于高碳、低硅铸铁，则改善作用最大。铜的加入量一般为 1%。最好与其他合金元素（如钼、锡、镍和铬等）配合使用。已有研究表明，铜可以抵消碳化物稳定元素（如铬之类）的负面作用，减轻铸铁的白口倾向。

灰铸铁中加铜，可使厚截面处的铁素体减少，同时又能减轻薄壁处的白口，使铸件各截面处的显微组织比较一致。由于铜可以改善铸件显

微组织的均匀性，因而可以改善铸件的加工性能。

对于原本就是全部珠光体基体的铸铁，加入 0.35% 以下的铜，能提高抗拉强度，加铜量超 0.4% 以后作用就不明显。

3. 锡

在灰铸铁中，锡是很好的珠光体稳定元素，在共晶凝固过程中，逐渐向液相偏析，最后富集在与石墨片相邻的奥氏体中，共析转变时，阻碍奥氏体中的碳向石墨片扩散，从而使珠光体增多。锡在金属基体中的溶解度很有限，加入量不可过多，否则就会使铸铁脆化，冲击韧度下降，而且还有其他副作用。

锡减少铁素体和增加珠光体的作用很强，在灰铸铁中的主要作用是消除铁素体，加入量也以得到全部珠光体基体为限，用量一般为 0.04-0.10%。加锡的铸铁，一般可得到 A 型石墨，90% 以上的珠光体。

4. 铈

铈和锡类同，在灰铸铁中也是稳定珠光体的合金元素，而且价格便宜。但是，铈在灰铸铁中的作用目前也还是有不同看法的。

铈促成珠光体的能力很强，视原铁水的条件不同，其作用一般是锡的 2-4 倍，所以加入量也比锡少少得多。对于容易产生 B 型和 D 型石墨的薄壁铸件，加铈的效果特别好。

有人曾用抗拉强度为 250MPa 左右、基体基本上完全是珠光体的铸铁，进行了加铈的研究。结果是：除硬度因加铈而增高外，抗拉强度、抗弯强度和挠度都随之下降。因而认为铸铁中加铈是有问题的。

在基体组织中有铁素体的铸铁中加铈，对提高抗拉强度和硬度都是有益的。铈和锡的作用相似，随着铸铁强度的提高，其冲击韧度下降，因此，其加入量应不超过得到完全珠光体组织所需的量，以在 0.02-0.05% 之间为宜。

灰铸铁中加入铈，对于防止析出铁素体和过冷石墨，得到较多的 A 型石墨，肯定是有效的。当铸件某些部位总保留有少量铁素体，而且加入铜、铬和锡等合金仍不能消除铁素体时，就特别要考虑加入铈。

目前，加铈的一个问题是缺乏良好的光谱标样，准确的分析得靠湿法化学分析，这很费时间

而且花销不少。

5. 镍

镍在灰铸铁中的作用与铜相似，既是石墨化元素，可用以减轻白口倾向，又可以促进珠光体形成，还可以使珠光体细化。如果与其他合金元素（如钼）配合使用，改善铸铁性能的作用就会良好。

6. 铬

铬在铸铁中使碳在奥氏体中的溶解度增加，因而阻碍铁素体生核成长，是很强的珠光体促成元素。但是，在铸铁凝固过程中，铬促成渗碳体的作用很强，使铸铁的白口倾向增强。虽然在铸铁中加硅、并进行孕育处理，对减轻铬造成的白口倾向有效，但对于消除铬所致的晶间渗碳体则效果欠佳。

此外，铬细化珠光体从而提高铸铁强度的作用也不太明显。

灰铸铁中，加入 0.5% 左右的铬，能使石墨细化，减少铁素体，增加珠光体。加入 1% 左右，就可能出现少量渗碳体，形成麻口组织。

灰铸铁件生产中，对于单用铬一种合金元素，宜采取审慎的态度。

7. 钼

在灰铸铁中，钼是有效的促硬元素，但作用温和。铸铁中的含钼量一般不多于 0.8%，这样的量就能细化珠光体、增强基体，从而有效地提高铸铁的强度。同时，铸铁的白口倾向并不明显增强。

钼并不是促进珠光体形成的元素，实际上，钼阻碍形成珠光体的作用可能比阻碍形成铁素体的作用更强。如果铸铁中只加入钼，则厚截面（缓冷）处铁素体量可能较多。因此，钼最好与其他促成珠光体的合金元素（铬、铜和镍等）配合使用。

8. 钒

钒是强烈形成碳化物的元素。灰铸铁中加入钒，则白口倾向大为增强，这就限制了它的应用。

加入量在 0.3% 以下时，钒的作用较易控制，可以有效地使石墨细小并使珠光体增多，从而提高铸铁的强度。

厚大截面的铸件，加入钒可使整个截面上的组织较为均匀，这是非常重要的特点。（完）