

高强度铸铁(球墨铸铁)化学成分的选择

M. Мургащ, A. С. Чаус, M. Покусова 著

张少华 编译

(东风汽车公司, 湖北十堰 442001)

在通常情况下, 高强度铸铁的组织及性能是由铁液凝固热动力状态所决定的, 而铁液凝固热动力状态除了受铸铁化学成分的影响外, 还受铸件壁厚及铸型材料导热性的较大影响。正因如此, 许多国家现行的高强度铸铁件标准中(例如, 独联体国家标准 7293-89 以及斯洛伐克国家标准 STN4225) 均未规定合金铸铁的化学成分, 而只限定了它的力学性能。在实际生产中, 在具体选择铸铁化学成分及必要孕育剂时, 都要考虑铸件的凝固状态, 所以在特殊情况下, 为了使高强度铸铁件达到所需要的性能, 对它进行热处理也是必要的。但是, 在与高强度铸铁相关的文献资料中, 没有涉及到如何根据铸件几何参数来选取铸铁的最佳化学成分, 而多是泛泛之论, 诸如铸铁成分应该尽可能接近共晶点等。然而, 对于某些用途的铸件, 例如汽车铸件来说, 优选铸铁化学成分具有重要意义。本文将从高强度铸铁化学成分与铸件组织、性能之间的关系以及高强度铸铁化学成分与铸件凝固条件之间的关系, 说明如何优选铸铁的化学成分。

对高强度铸铁熔液进行孕育处理时, 铁液中加入的一些表面活性元素将会改变结晶条件, 促使形成球状石墨。因为铁液中的主要球化剂 Mg (0.03% ~ 0.06%)、极少量 Ce、Ca 及其它元素促使铸铁以 Fe-Fe₃C 亚稳定相图

凝固, 对铁液进行石墨化处理是必要的(可同时进行, 也可单独进行)。在经过奥氏体与液相组成两相区后, 在铁液中加入的孕育剂开始促进石墨成核并长大。原铁液中应含有少量的 S, 通常为 0.01% ~ 0.02%。为了使铸件达到较高力学性能, 应尽量增加以预定组织均匀分布在金属基体中的球状石墨的数量。

我们采用两种试块研究铸件壁厚对传统非合金高强度铸铁的影响, 这两种试块一种是斜度为 12.5°, 宽度为 100 mm 及厚度为 2 ~ 90 mm 的标准楔形试块, 另一种是梯高为 3 mm、6 mm、12 mm、24 mm、48 mm 及 96 mm, 长宽始终为相应梯高六倍的梯形试块。使用的熔炉为 100 kg 及 500 kg 的感应炉, 炉料为生铁加废钢及铁合金。为了进行对比试验, 我们同时使用了经渗碳处理的钢炉料(废料)。这两种炉料都含有 ~0.15% 的 S。当炉料含有 2.3% ~ 4.2% 的 C 及 1.9% ~ 3.5% 的 Si 时, 有几炉料中的铸铁碳当量 CE 为 3.9% ~ 5%。在初始阶段, 铁液在浇包内处理, 而到最后阶段, 为了检测两个试验的结果是否一致, 铁液再经型内球化处理。球化剂为 LITVAR 牌号的 FeSiMg7, 铁液浇铸在潮模铸型中, 型砂含水量为 3.5%, 膨润土占 7%, 砂石细度为 0.22 mm。

在对其组织进行金相分析时, 我们注意观察了石墨的形态、数量以及在基体中的分

布特性。我们采用的另一个判别标准是铁素体及珠光体在金属基体中的组成比例、铸铁的激冷程度、石墨飘浮、异态杂质、收缩量以及形如俗称黑点的缺陷。

我们把实验数据加以统计, 绘出了碳当量 CE 与铸件壁厚 d 的关系曲线图, 它实际上是指出了未经热处理的高强度铸铁所能达到的最高冲击韧性范围的图。用该图我们确定了在包内和型内两次孕育处理(球化及石墨化)时, 珠光体基体形成的临界条件以及碳当量 CE 的极限值(如果超出了这个极限值, 铸件组织就不符合要求, 铸件质量差)。

从 1987 年开始, 该关系曲线图在铸造车间得以成功应用, 多种铸件获得了较高冲击韧性及塑性。关于这方面的情况, 有关文献已有论述。该关系曲线图的缺点是, 不能确定 C 含量与 Si 含量的最佳比。因此, 在选取 Si 孕育剂时, 通常不得不参照那些本来就经常自相矛盾的文献数据。考虑到解决该问题是铸造生产的当务之急, 又加之这方面的文献资料缺少可靠数据, 因此我们再次进行了相关实验。所进行的正交法试验表明, 为了获得使铸铁具有优良铁素体组织及最好韧性、塑性的 C 含量与 Si 含量的最佳比, Si 含量应在 1.8% ~ 4% 范围之间变化。

我们把实验数据加以统计, 除绘出了上述铸件与碳当量 CE 的关系曲线图以外, 还根据统计结果得知, 对于壁厚小于 8 mm 的薄壁铸件, 由已知的 Si 含量与碳当量 CE 的关系可知, Si 含量可以在 2.3% ~ 3.5% 的范围变化, 而且在室温下它对材料的力学性能没有较大影响。而对于壁厚大于 75 mm 的铸件, 铸铁对 Si 含量就变得特别敏感, Si 的作用急剧增大, 因此它在铸铁中的含量应以 2.1% ~ 2.5% 为宜。如果超出这一范围, 铁液金相组织就会变差, 从而导致铸铁性能急剧下降。为

了预防 Si 对低温脆性临界点的负面影响, 最好使 Si 含量处于这一范围的下限。

把实验数据进行回归分析, 得出了两个数学等式, 利用它们就能直接计算出碳当量及在把铸铁浇注到潮模时的总含碳量 C_F 。

$$C_E = 5.13 - 0.52 \log d \quad (1)$$

$$C_F = 4.3 - 0.46 \log d \quad (2)$$

在等式(1)、(2)中, 铸件壁厚 d 的单位为 mm(3 ~ 100 mm), 铸铁 C 含量(CE 和 C_F)单位为百分比。 Si 含量由下列已知等式得出:

$$CE = C + 0.31Si \text{ 或者}$$

$$Si = 3.22(CE - C) \quad (3)$$

等式(1)~(3)没有计入其它合金元素, 因为它们含量通常很小(除特殊高强度铸铁, 如奥氏体铸铁外), 对碳当量 CE 的影响不太明显。但是 P 的含量不应该超过 0.05%, 而强碳化物形成元素的添加则更应严格限制。 Mn 的掺入上限为 0.6%, 因为它能促使形成渗碳体。此外, 由相关文章得知, 0.4% 的 Mn 就已经明显降低了壁厚 d 大于 35 mm 铸铁件的冲击韧性。

从工艺上看, Mg 的残余含量至关重要。楔形试块及梯形试块的实验表明, 随着试块厚度增加, Mg 的加入量应相应增加, 以调整石墨化孕育程度。因此, 对于壁厚小于 8 mm 的薄壁铸件, 只要在硅铁($FeSi75$)的基础上加入 0.04% 的 Mg 及 ~0.6% 的孕育剂就足够了。对于壁厚大于 50 mm 的铸件, Mg 含量应接近上限 0.06%, 而硅铁孕育剂含量达 0.4% ~ 0.5% 就足够了。为了使厚壁铸件获得较高力学性能, 建议在包内球化时进行两次孕育, 因此从促使石墨成核数量上来看, 这是比较有效的。

接下来的研究表明, 如果在算式中壁厚 d 只取极限值, 那么对于壁厚不同的铸件, 等式不成立。从金属基体中铁素体及珠光体组成

比例与铸铁力学性能最佳比来看,如果先用等式(1)、(2)计算出铸件最大壁厚处(d_{\max})及最小壁厚处(d_{\min})的碳当量和总碳量,再取其算术平均值的话,计算结果将会更可靠。按对数法则,得到:

$$CE = 5.13 - 0.26 \log(d_{\max} \cdot d_{\min}) \quad (4)$$

$$C_p = 4.3 - 0.23 \log(d_{\max} \cdot d_{\min}) \quad (5)$$

d 的限定值为 3~100 mm。Si 含量由等式(3)得出。只有当铸件无限平坦或者说表面精度很高以及铸件长宽至少为厚度的 6 倍时,含 d_{\max} 及 d_{\min} 的等式才成立。

当铸件外形变化时,其体积与冷却表面积之比也随之变化。因此,应使用等效厚度 R 计算,它是铸件体积与冷却表面积之比,并与铸件完全冷却时间(达到固相线温度的时间)的平方根成正比。在国外的文献中,常使用铸件模数代替 R ,标作 M 。对于无限平坦的铸件 $R = d/2$,而对于其它外形的铸件, $R =$ 部分 d 。根据“外形不同但具有同样等效 R 值的铸件冷却速度相同”这一定律,因此在计算时可以使用铸件有效厚度,且 $d_{\text{有效}} = 2R$ 。具体到不同外形的铸件:对于直径为 d 的柱形铸件, $d_{\text{有效}} = d/2$;对于边长为 b 的正方形截面的棒形铸件, $d_{\text{有效}} = b/2$;对于边长为 a 的立方体铸件, $d_{\text{有效}} = a/4$ 。

从实际得知,直角截面铸件的冷却速度稍慢。使用等效 R 值计算出的冷却速度有时要比现实冷却速度低 30%,有文章认为,这种现象与铸型内部的复杂散热特性有关。

对于薄壁铸件 ($d_{\text{有效}} \leq 10$ mm),可能 $d_{\max}/d_{\min} \leq 6/1$ 。如果铸件有效壁厚大于 15 mm,那么当 $d_{\max}/d_{\min} \leq 4/1$ 时,铸铁力学性能、组织已经发生了很大变化。当 $d > 30$ mm

时,为了补偿铸件由于预收缩及自收缩导致的体积变化,就必须使用冒口。

对于那些已经使用了冒口的厚壁铸件,在计算补偿收缩所必要的金属体积时,应该考虑其表面形状,因为对于表面凸起的铸件,在铁液冷却时,冷却熔皮发生预收缩使铸件体积变大,而对于表面凹入的铸件正好相反。通常, d 应尽量取最小极限值,因为薄壁球墨铸铁铸件具有很高强度,更重要的是,具有很高冲击韧性及相对延伸率。因此,薄壁铸件要比厚壁铸件具有更高的基体强度。

铁素体基体使铸件具有很高的瞬间强度,但要使铸件具有较高韧性及塑性,就必须调整铸铁化学成分,增大珠光体在组织中的比例。为此,要根据等式(1)~(5)找出各种基本成分的最佳配比,使用促使形成大量共析渗碳体,并阻止一次和二次偏析出的辅助合金元素,但通常使用 Sn 和 Cu,或者把 Ni 和 Mo 混合加入。

各种数据分析表明,尽管试验结果本质上不同,但是都能由等式(1)~(5)得出能使铸件获得最好冲击韧性及相对延伸率的 C 含量及 Si 含量的范围。并且型内孕育绝对是最好的,这是因为,第一,型内孕育白口趋向最小,而且石墨分布最为细小均匀;第二,铸件收缩程度降低了 50%,因为 $d_{\text{有效}}$ 可以达到 40 mm,所以 R 的上限可以达到 20 mm。

本文根据铸件几何尺寸所确定的,反映高强度铸铁化学成分与铸件组织、性能之间内在联系的关系式,在现实应用中已获得了很好效果。

(丁叙生 校)