

灰铸铁的孕育处理

■ 中国铸造协会 李传斌

灰铸铁基本上是由铁、碳和硅组成的共晶型合金，其中，碳主要以石墨的形态存在。生产优质铸件，控制铸铁凝固时形成的石墨的形态和基体金属组织是至关重要的。孕育处理是生产工艺中最重要的环节之一。良好的孕育处理可使灰铸铁具有符合要求的显微组织，从而保证铸件的力学性能和加工性能。

在液态铸铁中加入孕育剂，可以形成大量亚显微核心，促使共晶团在液相中生成。接近共晶凝固温度时，生核处首先形成细小的石墨片，并由此成长为共晶团。每一个共晶团的形成，都会向周围的液相释放少量的热，形成的共晶团越多，铸铁的凝固速率就越低。凝固速率的降低，就有助于按铁—石墨稳定系统凝固，而且能得到A型石墨组织。

一、孕育处理的作用

灰铸铁的力学性能在很大程度上取决于其显微组织。未经孕育处理的灰铸铁，显微组织不稳定、力学性能低下、铸件的薄壁处易出现白口。为保证铸件品质的一致性，孕育处理是必不可少的。

铸铁孕育处理所用的孕育剂，加入量很少，对铸铁的化学成分影响甚小，对其显微组织的影响却很大，因而能改善灰铸铁的力学性能，对其物理性能也有明显的影响。良好的孕育处理有以下作用：

- ◆ 消除或减轻白口倾向；
- ◆ 避免出现过冷组织；
- ◆ 减轻铸铁件的壁厚敏感性，使铸件薄、厚截面处显微组织的差别小，硬度差别也小；
- ◆ 有利于共晶团生核，使共晶团数增多；
- ◆ 使铸铁中石墨的形态主要是细小而且均匀分布的A型石墨，从而改善铸铁的力学性能。

孕育良好的铸铁流动性较好，铸件的收缩减少、加工性能改善、残留应力减少。

二、灰铸铁的显微组织

灰铸铁的力学性能决定于其基体组织和片状石墨的分布状况。

灰铸铁的力学性能主要取决于其基体组织，为了得到高强度，希望基体组织以珠光体为主、尽量减少铁素体含量。如果铁素体量过多，不仅导致铸铁的强度低，而且加工时会使刀具过热，显著降低刀具的寿命。与球墨铸铁不同，对灰铸铁不可能有延性和韧性的要求，只要求其强度，所以一般都以珠光体含量高为好。

灰铸铁中的石墨片，有切割金属基体、破坏其连续性、使其强度降低的作用。从强度考虑，应避免产生生长而薄的石墨片和粗大的石墨片，具明显方向性的石墨片影响尤大。控制石墨片的分布状况，是保证灰铸铁性能的关键。

A型石墨是在铸铁的石墨生核能力较强、冷却速率较低、在过冷度很小的条件下发生共晶转变时形成的。在光学显微镜下观察时，石墨呈均匀分布的弯曲片状，无方向性，其长度则因铸铁的生核条件和冷却速率而不同。高品质的结构铸件，都希望其具有中等长度的A型石墨。

B型石墨在光学显微镜下呈菊花状，共晶团中心部位石墨片比较细小，外围的石墨片较粗大。实际上，中心部位是D型石墨，外围是A型石墨。B型石墨的生核条件比A型石墨差，共晶转变时的过冷度也比形成A型石墨时大，结晶时先在共晶团中心部位产生过冷石墨（D型），释放的结晶潜热使周边的过冷度降低、形成A型石墨。如B型石墨为量不多，对铸铁的性能影响不大，一般情况下可允许其存在。

C型石墨主要出现于碳当量很高（过共晶）、

冷却缓慢的铸铁中,有粗大片状初生石墨,也有小片状石墨,有时部分石墨片上有带尖角的块状。过共晶铁液冷却时,通过液相线后,在一定的过冷度下析出初生石墨,并在液相中逐渐长大。由于结晶温度较高,成长时间较长,形成分枝较少的粗大片状。温度降低到共晶温度时,发生正常的共晶转变,这时产生的石墨是正常的共晶石墨(A型石墨),最终的结果是在粗大的石墨片之间分布有正常的共晶石墨。因此,C型石墨是由粗大、块状石墨和A型石墨构成的。C型石墨可使铸铁的热导率提高,改善其抗热冲击的能力,但对铸铁的力学性能影响较大,一般的结构铸件不应有这种石墨。

亚共晶铸铁中,偶尔也能见到这种石墨。如:用感应电炉熔炼而炉料中生铁块用量过多时,由于原生铁遗传的影响,就可能出现带尖角的块状石墨;孕育剂加入量过大,造成局部硅元素富集,也会产生这种石墨。

D型石墨是铸铁的碳当量较低、冷却速率较高,在过冷度较大、初生奥氏体枝状晶发达的条件下在奥氏体枝晶间形成的,石墨片细小而无方向性。D型石墨常见于碳当量较低的薄壁灰铸铁件中,也称为‘过冷石墨’或‘枝晶间石墨’。在不加合金元素时,D型石墨往往伴随有铁素体。如基体组织为珠光体,则铸铁的耐磨性较好,且机械加工后能得到较细的表面粗糙度。

E型石墨是在碳当量较低、冷却速率也较低条件下形成的。由于初生奥氏体枝状晶较多、发生共晶转变时过冷度不大、石墨核心不太多、共晶团较大,形成的石墨片大于D型石墨。由于冷却比较缓慢,奥氏体枝状晶发达,发生共晶转变时液相主要在初生奥氏体枝状晶之间,形成的石墨片沿枝状晶方向生长,具有一定的方向性,对铸铁力学性能的影响较大,要力求避免其产生。

可能出现E型石墨的铸铁,如冷却速率较高,也会形成D型石墨。因此,在高强度薄壁铸件中往往会同时见到D型石墨和E型石墨。

生产优质灰铸铁件,应使其基体组织全部为珠光体,石墨为A型,而且石墨片要均匀分布于金属基体中,珠光体也应细小而均匀。要尽可能

的地使组织中的B型石墨和D型石墨减至最少,不应该有C型石墨和E型石墨。为此,必须进行有效的孕育处理并控制铸件的冷却速率。

三. 孕育剂

目前,用于处理灰铸铁的孕育剂品种繁多,但广泛应用的还是75硅铁。近年来,对薄壁铸件的需求日益增多,对孕育处理的要求也更为严格,在铸铁碳当量较低的情况下,采用含锶、钡、铈、镨或某种稀土元素的孕育剂,能较好地控制薄壁处的白口倾向。还有报道说,采用含钡、铈和稀土元素的孕育剂,可减缓孕育的衰退。此外,碳质孕育剂的应用近来也日渐增多。关于孕育剂的选用,虽然已进行了大量的研究工作,但还不足以形成普遍适用的准则,铸造厂需考虑自己产品的特点、参考其他单位的经验进行试验,并考核供应厂商产品的质量,再根据试验结果作出最适合本企业条件的选择。

1. 75 硅铁

75硅铁是最常采用的孕育剂,其中的铝、钙含量对孕育效果有重要的作用,有报道说,不含铝、钙的硅铁对灰铸铁的孕育作用很小,甚至没有作用。一般认为:在铁液中,铝和钙会与氧、氮反应,形成高熔点的化合物,成为石墨结晶的核心。而且,加入孕育剂后,铁液中可形成局部的富硅微区,有利于石墨析出。采购孕育用硅铁时,不能不考虑其中铝和钙的含量。

对于作孕育剂的75硅铁,美国相关标准规定含铝量为0.75~1.75%,含钙量为0.5~1.5%。我国标准GB/T 2272-1987中有不同铝含量的75硅铁牌号,铝含量的上限值分别为0.5%、1.0%、1.5%和2.0%,含钙量的上限值则为1.0%。

但是,铁液中的铝含量不能太高,加入0.01%的铝,就可能导致铸件产生皮下气孔。选择孕育剂品种和确定孕育剂用量时,对此也应有所考虑。

2. 含锶硅铁

含锶硅铁消除白口的能力很强,特别有利于改善薄壁铸件中石墨的形态和分布状况,使不同厚度处组织的差别更小,过冷组织只见于铸件的表层。

目前,我国已有含锶硅铁供应,其中锶含量

有 0.6~1.0% 和 1.0~2.0% 两种。一般可选用含锍 0.6~1.0% 的品种, 锍含量过高则不能充分发挥其作用。

含锍硅铁的加入量约为 75 硅铁的一半。

3. 含钡硅铁

含钡硅铁 also 具有很强的促进石墨化的能力, 可改善薄壁铸件中石墨的形态和分布状况, 而且还有减缓孕育衰退的作用, 处理时的用量也少于 75 硅铁。有报道说, 加入过多的钡会使基体组织中 铁素体含量增多, 导致铸铁的强度降低。

目前, 我国也有含钡硅铁供应, 其中钡含量一般为 4~6%。

国外有研究报告称, 含铋的硅铁也具有与含钡硅铁类似的效果。

4. 含锆硅铁

锆有脱氧作用, 有利于提高铁液的流动性, 能减轻铸铁的白口倾向, 促成均匀、细小的 A 型石墨。而且还有减缓孕育衰退的作用。

我国也有含锆硅铁供应, 但目前采用者还很少。

5. 硅钡合金

用含钡 20~30% 的硅钡合金作孕育剂, 能显著降低铸铁的白口倾向, 并可使保持孕育效果的时间增至 30min 左右, 特别适用于大型铸件。处理时, 合金加入量约为 0.1%。

6. 硅钙合金

硅钙合金虽有很强的孕育作用, 但是, 除制成包芯线应用外, 用粒状合金作铸铁的孕育剂并不太合适, 其主要缺点是:

◆ 密度远低于铁液, 易于飘浮而影响其与铁液的作用;

◆ 成渣倾向大;

◆ 孕育作用衰退快;

◆ 处理需用的加入量大, 约为 0.3~0.5%。

7. 稀土孕育剂

稀土混合金属和稀土硅铁等含稀土金属的孕育剂, 加入量适当时, 孕育作用很强, 其效果可以是 75 硅铁的若干倍, 能有效地消除白口, 并减缓孕育作用的衰退。如加入量过高, 则可能使铸铁结晶时产生过冷, 出现渗碳体组织。使用

时必须严格控制用量。

8. 碳质孕育剂

碳质孕育剂主要用于铁液孕育前的预处理, 一般都是结晶态的碳质材料。有研究报告称: 对于灰铸铁, 以 85~90% 的冶金碳化硅效果最好, 晶态石墨也有效。预处理时的加入量一般为 0.75~1.0%, 应根据试验结果求得最佳值。

四. 孕育处理方法

近年来, 孕育处理工艺发展很快, 有多种有效的孕育方法。对于生产灰铸铁件, 选用合适的孕育处理方法非常重要, 往往是决定产品质量的关键因素。每一种孕育处理方法都有其优点, 同时也有一定的局限, 迄今还没有一种能适应各种生产条件的处理方法。铸造企业都应该根据自己的具体条件, 通过试验, 选定最适合企业特点的方法。处理方法一经确定, 就应严格控制工艺过程, 以保证铸件质量稳定。

广泛采用的孕育处理方法主要有: 出铁时孕育、浇注时孕育、型内孕育和孕育前的预处理

1. 出铁时孕育

出铁时孕育也称为浇包孕育 (Ladle Inoculation), 是在铁液自熔炉或保温炉流向浇包时进行的孕育处理。这种处理方法既简单又方便, 目前是应用最广的工艺, 但采用时必须注意遵从作业要点。

不可在浇注前将孕育剂加在空浇包的底部。这样操作, 会有部分孕育剂在与铁液作用前被氧化, 而且孕育剂易于裹入炉渣, 导致其利用率降低。最好在出铁后、自浇包中铁液量约为出铁量的 1/4 时起开始孕育处理, 通过定量漏斗将粒状孕育剂均匀而分散地撒向液流, 到浇包中铁液量约为出铁量的 4/5 时处理结束。这种作业方法, 可利用液流的搅拌作用使孕育剂完全溶于高温铁液, 提高其利用率。采用喂线法进行孕育处理效果更为稳定, 但目前用于出铁时孕育的还比较少。

孕育剂的粒度因处理的铁液量而略有不同: 铁液量不到 500kg 时, 粒度宜为 2~5mm; 铁液量在 500kg 时, 粒度宜为 5~8mm。加入量一般为处理铁液量的 0.2~0.4%, 可视孕育剂的品种

和铸件壁厚调整,并通过试验确定。加入量过多,不仅无益,还会因不能完全溶于铁液而产生一些负面作用,如浇包积渣、铸件产生夹渣缺陷、堵塞浇注系统中的过滤器件以及因铁液过孕育而造成铸件缺陷等。孕育剂粒度太大,也会因不能完全溶于铁液而影响孕育效果,并造成铸造缺陷。

出铁时用 75 硅铁进行孕育处理,孕育效果会很快地随时间的推移而衰退,孕育后 5~7min,作用的衰退可在 50%以上,大约经 15min 后,孕育作用将大部或全部消失。为确保铸件质量,通常都要在孕育后 10min 内浇注完毕,最好在铁液自浇包注入铸型时进行再次孕育。

2. 浇注时孕育

浇注时孕育也称为后孕育 (Post Inoculation) 或瞬时孕育,是在铁液自浇包注入铸型时进行的孕育处理。可将细粒孕育剂加入液流,也可用喂

线法孕育。

(1) 细粒孕育剂孕育

浇注时孕育不存在孕育衰退的问题,一般都用 75 硅铁作孕育剂,有特殊要求时也可用含其他合金元素的孕育剂。为使孕育剂能迅速溶于铁液并能均匀地分布于铁液中,应采用细粒,一般为 0.3~0.7mm。加入量大致为铁液的 0.15~0.2%。

采用倾转式浇包人工浇注时,比较简便办法是采用吊挂在包嘴上的定量漏斗,浇注时开启下料口,孕育剂由重力作用落入液流。对于生产线上位置固定的倾转包,则以采用带料斗的微型螺旋给料器为好。

生产线上由保温炉经虹吸式浇嘴浇注的条件下,国外多采用干燥空气吹送方式。开始浇注时,由传感器控制开启气阀,将孕育剂加入液流中,如图 1 所示。

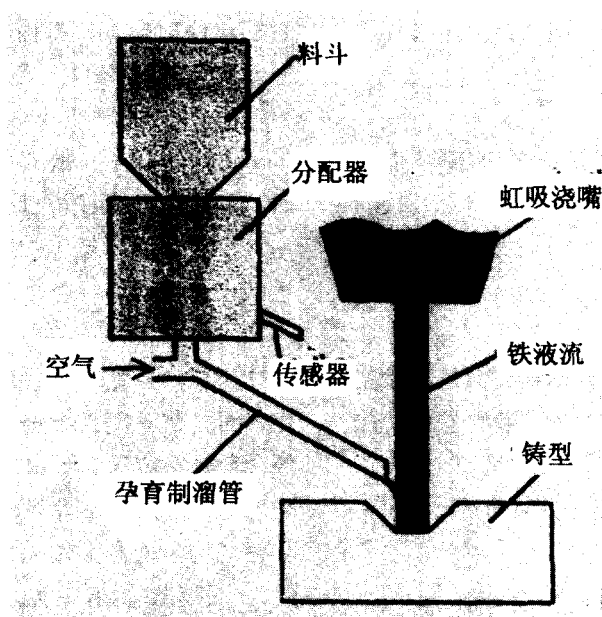


图 1 空气吹送方式加料装置示意图

采用这种加料方式的缺点是:难免有些粉状孕育剂被空气吹散,不能进入液流。采用机械给料方式,也有容易堵塞而影响准确定量的问题。

(2) 喂线孕育

喂线孕育也是一种常用的方法,所用的包芯线直径一般在 5~10mm 之间,线芯材料为 75 硅

铁。孕育剂加入量约在 0.05~0.1% 之间。

用保温炉经虹吸式浇嘴浇注的条件下,在浇嘴的塞杆附近喂入包芯线,如图 2 所示。喂线装置由计算机控制,在提起塞杆进行浇注的同时喂入包芯线,浇注完毕放下塞杆时停止喂线。

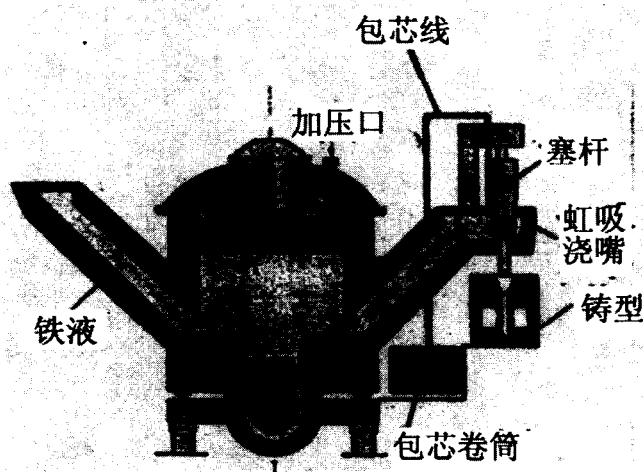


图2 加压经虹吸式浇嘴浇注时喂线孕育示意图

3. 型内孕育

型内孕育是将孕育剂直接安放在浇注系统内，使其在浇注过程中与铁液作用，孕育剂溶入铁液的速率是工艺方案设计时应予以考虑的重点。

所用的孕育剂可以是细粒状料、由粉料加粘

结剂制成的块料或预制块。

按照铸件的工艺特点，孕育剂可安放在浇口盆内、浇注系统内或特制的过滤器件中。

(1) 浇口盆内孕育

浇口盆内孕育可以有两种方式，见图3。

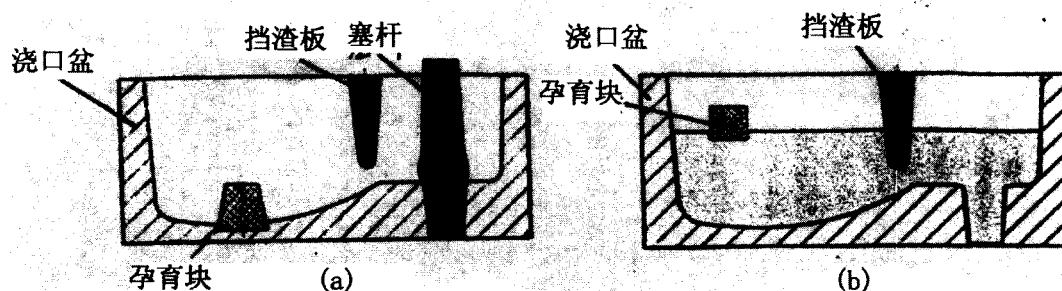


图3 浇口盆内孕育

(a) 孕育块固定; (b) 孕育块飘浮

一种是将块状孕育剂固定于浇口盆底部，见图3(a)，浇注时逐渐溶入铁液。浇注的铁液量较大时，可采用塞杆，这就更有利于孕育剂溶入铁液并均匀分布于铁液中。

另一种是将块状孕育剂放在浇口盆内，浇注时浮在铁液上，见图3(b)，也可说是浮硅孕育，

只不过不在浇包中孕育。采用此种方式时，应保证孕育块部分溶入铁液后尺寸仍大于直浇口的直径。

无论采用何种方式，浇口盆内都应有挡渣板。

(2) 浇注系统内孕育

浇注系统内孕育液也有两种方式，见图4。

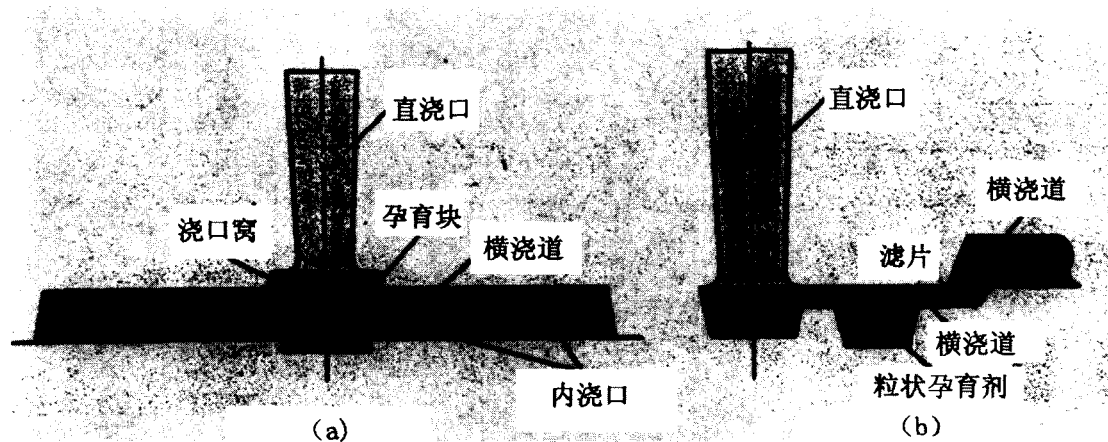


图4 浇注系统内孕育

(a) 孕育块固定于浇口窝内; (b) 横浇道中设孕育槽

可将块状孕育剂固定在直浇口下的浇口窝内,如图4(a)所示。采用此种方式时,一定要用预制成块状的孕育剂,浇注过程中逐渐溶入铁液,实现有效的孕育。

也可将孕育剂安放在横浇道中专设的孕育槽内,如图4(b)所示。采用此种方式时,可用粒度为 $0.3\sim 0.7\text{mm}$ 的孕育剂,用量一般为铸型中铁液量的 $0.05\sim 0.1\%$ 。浇注时,铁液从孕育剂的上方流过。为避免孕育剂颗粒进入铸件,铁液

流经孕育槽后必须通过有效的过滤片。

(3) 通过过滤片时孕育

这是一种比较新的型内孕育方法,将孕育剂安放在特制的滤片内,浇注时铁液流经滤片得到孕育处理,同时又可以防止残渣进入铸件型腔。

采用发泡陶瓷滤片时,在两滤片间的空腔内装细粒孕育剂,如图5(a)所示。

如采用通孔陶瓷滤片,则将预制成片状的孕育块置于两滤片间的空腔内,如图5(b)所示。

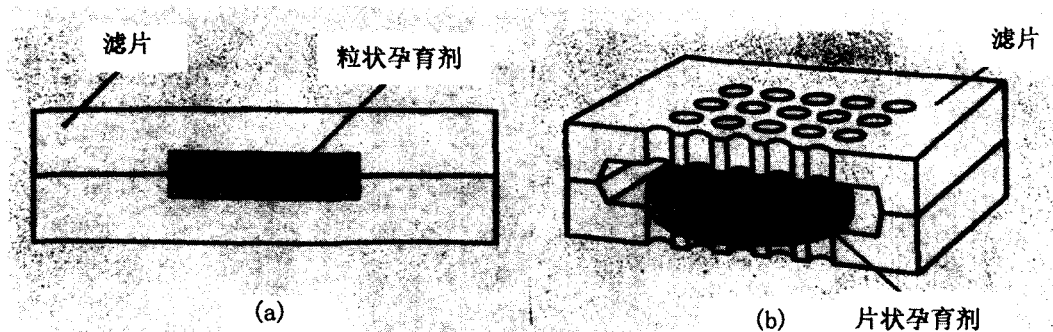


图5 孕育剂置于两滤片间的空腔内

(a) 发泡陶瓷滤片; (b) 通孔陶瓷滤片

4. 孕育前的预处理

一些重要的薄壁灰铸铁件,如内燃机的缸体、缸盖等,需求量不断增长,冶金要求也日益提高,因而,灰铸铁孕育前的预处理逐渐受到了广泛的关注。

生产薄壁灰铸铁件时,在孕育处理前进行预处理,不仅可避免组织中出现碳化物,而且可使过冷石墨(B型、D型和E型)减至最少。

研究表明,效果最好的预处理剂是晶态的碳质材料,灰铸铁宜用 $85\sim 90\%$ 的冶金碳化硅,也可用晶态石墨。加入量一般为 $0.75\sim 1.0\%$,应用时需通过试验求得最佳用量。预处理剂加入铁液后,需要一定的时间使其溶于铁液,而且需要搅拌,所以,最好是在出铁前加入感应电炉进行处理。也有报道说,加入浇包中处理,只要操作得当,也可得到很好的效果。