

可锻铸铁材质的生产现场质量控制

中铁宝桥天元实业发展有限公司 (陕西宝鸡 721001) 王友昭

铁素体基可锻铸铁作为一种历史悠久的重要结构材料,因其具有高的强度及良好的减震性、塑性和韧性,在铁路、建筑、水暖等行业获得广泛的应用。我公司生产的主要产品是牌号为 KTH350—10 铁路道岔配件,铸件品种约 1000 余种,铸件壁厚 8~40mm,单重 0.25~40kg。长期以来,我们在使用 3.5t/h 三排风口热风炉胆冲天炉熔炼铁液、湿粘土砂脱箱手工造型、燃煤台车式热处理炉退火,以及传统的炉前化学分析化验的生产条件下,积累总结出了一些较好的生产现场质量控制经验,现将主要内容介绍给铸造同行们,供借鉴参考。

在可锻铸铁的生产实践中,要使道岔配件材质长期稳定达到牌号所要求的力学性能指标,从而满足铁路运输行业对行车安全的严格要求,关键是控制好熔炼和热处理两个重要环节。

一、熔炼工部的控制

1. 化学成分的确

铸件化学成分的准确设计,是决定可锻铸铁力学性能和热处理周期的主要因素。我们的设计原则是:保证

速度,即应使其散热加快,先于其相连接的筋板凝固。具体措施是通过设置石墨内冷铁来实现。

常用的外冷铁和内冷铁一般用金属材料制成,它具有制作方便、效果显著的特点。起初我们也在主滑油孔处应用铸铁材料制成的成形内冷铁,为防止影响加工性能,在其工作面沿纵向切槽:宽 5mm、深 5mm。为防止生锈,表面进行镀锡。但在小批量的调试和试加工过程中发现,主滑油孔内仍有缩松,同时在加工中有金属内冷铁随钻头一起转的现象,并损坏多根钻头。仍有缩松的原因是冷却速度不够,而内冷铁随钻头转的原因是金属内冷铁与金属液不能很好的融合。

因石墨具有良好的导热性,热膨胀系数约为硅砂的

铸件在铸态时整个断面上呈现符合化学成分控制要求的全白口组织;用尽可能短的时间完成第一、第二阶段石墨化退火,使铸件有高的力学性能;在保证力学性能达到技术要求的同时具有较好的铸造性能。在以上设计原则的框架内,根据铸件的壁厚、力学性能要求及高硅加铈的孕育处理,从而确定化学成分控制范围(见表 1)。

表 1 铁液化学成分控制范围(质量分数) (%)

C+Si	C	Si	Mn	S	P	Cr
3.8~4.4	2.4~2.7	1.4~1.7	0.35~0.55	<0.2	<0.1	<0.06

注:冲入 0.01%铈,进行孕育处理。

2. 炉料管理


(1) 金属炉料 金属炉料的质量和使用时,会对熔炼可锻铸铁铁液的温度和化学成分中的各元素含量造成大幅度波动。

熔炼可锻铸铁配料中要使用 60%左右的废钢,对于废钢必须严格管理,按不同的化学成分元素含量分类堆放,在配料中按比例搭配使用。废钢的采购来源一般比较复杂,应使用碳素结构钢和普通热轧型钢,特别注意防止含有铬、钛、钨等合金元素的废钢混入,以免影响

1/3,蓄热系数大(1.55,是铸铁的 1.15 倍),以及硬度低 1~2 的特点,所以用其作内冷铁更能加速主滑油孔的冷却速度,同时因其硬度低,用石墨作内冷铁时不可用切槽。但其强度较低,在制芯和装箱时需严防碰断。

3. 结果验证

(1) 石墨内冷铁在主滑油孔处使用后,经小批量的调试和试加工生产,主滑油孔处未见铸造缺陷,表面光滑,同时也未见有石墨内冷铁影响加工的现象发生。

(2) 消除铸件内相对孤立、热节较大,同时又无法用冒口等工艺措施进行补缩的缩孔和缩松时,可选用石墨内冷铁。但为降低石墨内冷铁自身的发气量,应选焦油含量较低的石墨材料制作。 (20070619)

退火质量，造成力学性能不合格。

金属炉料的块重和块度对熔炼有相似的影响。块重越大，单位受热面积越小，热量由表面传到中心的时间越长；块度越大，越易造成棚料，而在长时间棚料处理完后，有可能使冷炉料直接进入熔化带。这两者都会使炉料在预热区的预热过程来不及完成，所需预热和熔化时间延长，降低了熔化带位置，使熔化带变宽且下移，过热带变窄，不仅会造成铁液温度降低，产生浇不足缺陷，还会使化学成分中的碳、硅、锰元素含量因熔炼损耗大而偏低。如果发生落生，更会使铁液严重氧化，造成大量铁液报废。因此块重为 1~15kg、块度控制在不大于炉径的 1/3 为宜。

(2) 焦炭 由于可锻铸铁的碳、硅含量低，铸态是白口组织，流动性较差且多为浇注小件，与灰铸铁相比需具备较高的铁液温度，故应使用二级以上铸造焦炭（符合 GB8728 — 1988）。铸造焦炭的固定碳含量、强度指标高，块度 80~120mm，在焦铁比 1:6~7、冲天炉风/焦平衡操作状况下，表面燃烧温度高于冶金焦和地方焦，可使出铁温度稳定达到 1420~1450℃。另外，铸造焦炭硫含量低，在正常熔炼时，铁液中 $w_S \leq 0.1\%$ ，可减少熔炼过程中对锰含量的调整频次，为控制 Mn/S 比带来方便；使用铸造焦炭，冲天炉的炉况相对比较稳定，减少了化学成分中碳、硅、锰等元素的波动范围；使用铸造焦炭，还可降低冲天炉熔炼对炉型的依赖程度。

3. 修炉

按通用《铸铁熔炼工艺守则》修炉。图 1 为所使用的炉型，其主要特点是：缩小风口区，使风能进入炉膛中心，减少炉壁效应；炉缸区浅；带有前炉；三排风口之间的排距均为 250mm，比标准系列排距稍大，目的是略微提高增碳率，配料时可多用废钢，少用或不用新生铁，使配料中回炉料比例与铸件综合实得率相互匹配。修炉材料为白泡石砂：耐火土 = 65%~70% : 30%~35%，水分适量，捣固紧实。修完的前、后炉，应小火烘干。

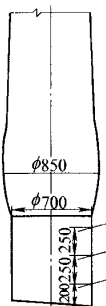


图 1

4. 加料

加料前的底焦高度（指下排风口到底焦顶面的距

离）实测值为 2m，比一般冲天炉的正常底焦高度要高。这部分多加的底焦，是为了在开炉初期延长炉料和炉体的预热时间。对于熔化初期底焦增高，造成铁液化学成分中碳、硅、锰元素含量的增加，可在前 3~5 批金属炉料中用适量增加废钢比例，减少回炉料、硅铁和锰铁加入量来调整，从而确保开炉初期时的铁液温度和化学成分均达到浇注的技术要求。

5. 熔炼操作

化学成分、冷却速度和孕育处理是在可锻铸铁熔炼生产过程中对铸件材质产生主要影响的工艺因素。

(1) 化学成分控制 在国内可锻铸铁生产中，使用冲天炉熔炼仍占主导地位，虽生产效率高，可连续熔炼，造价和运转成本较低，但由于众所周知的原因，其化学成分中的碳、硅、锰、硫（主要由焦炭带入）始终处在不断波动的动态变化之中，有时会超出控制范围，若控制或处理不当则会造成批量废品。

第一，碳、硅含量的控制。获得碳、硅含量符合化学成分要求的白口坯件，是确保可锻铸铁铸件材质合格的首要条件。正常状态下，白口坯件金相组织为亚共晶白口组织，即珠光体 + 莱氏体，无石墨存在。

在冲天炉熔炼过程中，由于碳、硅元素含量波动较大，常会产生两种废品：一种是灰口，原因是碳、硅含量高于控制范围上限，铸态时有石墨析出，其宏观断面上出现黑点，严重时整个断面全部呈黑色，退火后金相组织为铁素体 + 枝晶点片状石墨，力学性能大幅度降低， $R_m \approx 200\text{MPa}$ 、 $A = 1\% \sim 2\%$ ；另一种是退火不足（此缺陷在退火温度偏差大时也会产生），原因是碳、硅含量低于控制范围下限，铸态宏观组织断面虽与合格铸件相同，但按正常温度和时间退火后，断面呈灰白色，金相组织常为小团絮状石墨周围铁素体 + 珠光体，力学性能中的伸长率不合格。

以上两种废品均与铁液中的碳、硅含量有关。而传统炉前化学分析时间（包括送样和返单的时间）需要 10min 以上，若代表该包铁液所送试件的化学分析报告单中的碳、硅含量被判定为不合格并返至炉前时，此时被取样分析的该包铁液已全部浇注完毕，常会形成批量废品。这两种废品混迹在大面积脱箱手工造型区，将给仅凭铸件浇口的宏观断面来挑捡废品铸件带来很大困难，且该两种废品铸件在使用时有可能产生断裂，一旦流出车间，将会危及铁路行车安全，是熔炼生产中铸件

材质质量控制过程的监控重点。

由于可锻铸铁中碳、硅均为促进铸态石墨化元素，且各自含量的控制范围均较窄，故可近似用碳硅总含量（由表 1 可知， $w_{C+Si} = 3.8\% \sim 4.4\%$ ），即用 C + Si 来衡量其对铸态石墨化的影响能力。另外，在长期熔炼生产实践中我们发现，当铁液从出铁口流入铁液包时，由于铁液流股对铁液表面的冲击，会在铁液包口和出铁槽上产生雪花状铁花（可能是由 FeO 所造成）。根据出铁过程中铁花的多少和特征，虽难以准确判断碳、硅各自的含量，但可以判断铁液中碳、硅总含量的范围，我们称此为“炉前快速经验判断法”。其总体判断原则是：铁液中的 C + Si 越低，雪花状铁花的数量越多，飞溅的水平垂直范围越大，具体判断方法见表 2。

表 2 铁液中 C + Si 的炉前快速经验判断方法

C + Si (质量分数, %)	铁花的多少和特征
> 4.4	铁液包口的铁花较少，飞溅范围约 0.5 ~ 1.0m，且出铁槽上无铁花飞溅；当 C + Si 更高时，铁液包口和出铁槽无铁花，仅有铁豆飞溅
3.8 ~ 4.4	铁液包口铁花较多，飞溅范围约 1.0 ~ 1.5m，且出铁槽上有铁花飞溅
< 3.8	铁液包口和出铁槽上铁花很多，飞溅范围 1.5m 以上；当 C + Si 更低时，不仅铁花大量飞溅，且铁液包口出现团簇状铁花

使用此法需要注意：一是判断时间最好设在堵出铁口以前的 10 ~ 15s 左右，时间过早，由于铁液流股对铁液包壁的冲击，会造成铁花大量飞溅的假象，可能出现误判；二是结合浇注过程中铁液的流动性进行综合判断，则准确性更高；三是此法仅作为判断铁液质量的手段，不能作为检验产品质量的依据，若对铁液的 C + Si 判断有异议，可待炉前化学分析报告单返至炉前再予以确认或修正。

经验判断法的优点是快速，炉前化学分析的优点是准确，二者相互配合，取长补短，以炉前报告单为准，辅之经验判断法，很好解决了炉前生产需求的快速与传统化学分析速度的滞后相矛盾的问题。多年来的生产实践表明，使用这种方法，在冲天炉出铁的第一时间里，就能初步判断铁液中碳硅总含量是否超出控制范围，从而及时指导炉前工在浇注前对铁液进行快速处理（包括调整孕育剂的种类和质量、浇注不同壁厚的铸件、是否

报废处理等），同时还可对是否调整底焦高度、供风量和金属炉料配比等提供依据，从而有效地避免上述两种废品的产生。该方法简单易学，炉前工在实践中只要勤观察、勤对比（化学分析报告单中的 C + Si 与铁花多少和特征之间的反复印证）、勤练习、勤总结，一般很快就可以熟练掌握。

第二，锰、硫含量的控制。Mn/S 比在铁素体可锻铸铁熔炼生产中是受到重视的另一个因素。将两者分开看：硫在铁液中是有害元素，强烈阻碍铸态石墨化，在退火时强烈阻碍渗碳体分解，对第一、二阶段石墨化均有阻碍；锰在铁液中是限量元素，略微增大铸铁形成白口的倾向，却强烈降低共析转变温度，促使珠光体的形成。工业上应用的铁素体可锻铸铁中往往是硫和锰共存，硫与锰在铁液中进行 $FeS + Mn = Fe + MnS$ 可逆反应，随着铁液中锰量的增加，反应有利于向右进行，即 MnS 的量增加，FeS 相应量减少，使硫的有害作用减弱。故对铸铁石墨化而言，实际起作用的不是硫和锰的绝对含量，而是两者之间的比值，即 Mn/S 比。

在长期的生产实践中，我们将 Mn/S 比控制为：铁液中 $w_S < 0.2\%$ 时， $w_{Mn} = 1.7 w_S + (0.2\% \sim 0.3\%)$ ； $w_S = 0.20\% \sim 0.25\%$ 时， $w_{Mn} = w_S + 0.4\%$ 。当碳、硅、磷含量符合表 1 控制范围时，按以上两式控制 Mn/S 比，铸件力学性能可以长期且稳定达到 KTH 350—10 以上。必须指出的是，若 Mn/S < 2 时，会造成铸件退火后基体组织中残留渗碳体，力学性能不合格，产生批量废品；若锰含量稍过剩，即 Mn/S ≥ 4 ~ 5 时，虽有可能造成铸件退火后基体组织中残留珠光体，但通过延长第二阶段石墨化时间，一般都可有效地消除之。由于铁素体可锻铸铁中锰的不足要比锰的过剩危险的多，因此实际含锰量在控制上总是多一些。当铁液中锰含量偏低时，可在炉前冲入锰铁调整。

(2) 冷却速度的控制 在铸件冷却过程中，冷却速度对其基体组织具有极大影响，变换冷却速度可在较大范围内获得各种组织和析出石墨的数量，冷却速度对铸铁组织的定性影响见图 2。当冷却速度以 v_1 缓冷时，析出石墨获得灰口铸铁组织；当以 v_2 冷却速度较快冷却时，析出的既有石墨，又有渗碳体，获得麻口组织；当以 v_3 冷却速度快速冷却时，则石墨析出受到抑制，全部以渗碳体析出，获得白口组织。

铁素体可锻铸铁的生产实践表明，加入 0.01%（质

量分数) 铈的铁液, 冷却过程中基体组织变化的定性分析仍可借鉴上述规律。当浇注温度 (1360 ~ 1410℃) 和造型材料 (湿粘土砂) 的条件确定之后, 铸件壁厚就成为影响冷却速度的重要因素。将 $w_{C+Si} \geq 4.4\%$ 附近的铁液浇注壁厚 $\geq 40\text{mm}$ 的铸件, 可能会产生灰口废品, 若将其浇注壁厚为 8 ~ 10mm 的铸件时, 可获得铸态白口组织、无石墨析出的合格铸件。生产中充分利用铸件壁厚的不同而造成的冷却速度的差异, 在炉前将较高 C + Si 的铁液及时浇注薄壁铸件, 可缓解冲天炉熔炼时铁液中的碳、硅元素波动偏高的问题, 从而降低灰口废品的发生几率。

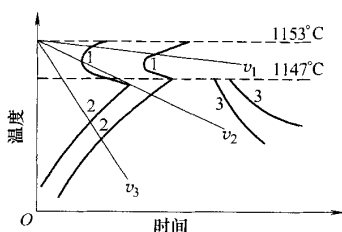


图2 铸铁结晶动力学曲线

1—石墨析出的开始和完毕

2—渗碳体析出的开始和完毕

3—渗碳体缓慢冷却时分解的开始和完毕

(3) 孕育处理 当今, 在可锻铸铁的生产中广泛采用孕育处理, 其目的在于细化碳化物或由于加入少量孕育剂而提高硅的含量, 这些因素皆可促使退火时石墨核心数增加, 从而缩短退火时间, 提高生产效率。多年来, 我们采用的是高硅加铈, 即在炉内配料时有意提高铁液含硅量, 并在炉前加铈来促进铸铁冷凝时白口化。需要强调的是, 炉前孕育处理应按以下方法执行。

第一, 加铈时必须称量准确。

第二, 因铈的熔点为 271℃, 所以不要过早将其投入到铁液包底, 以免烧损而影响孕育效果。正确的方法是: 当铁液上升至铁液包高度的 1/2 ~ 2/3 时加入铈, 然后充分利用铁液流股的自我冲击搅拌作用, 使铈在铁液中迅速均匀化。

第三, 据相关资料介绍, 铈加入铁液后, 促进铸态白口化的有效时间约 8min, 过时会逐渐衰退, 造成铸件铸态宏观断面出现黑点, 因此应尽量减少铁液在孕育处理后的停留时间。孕育处理后的铁液若不能在 8 ~ 10min 内浇注完毕, 可考虑补加铈。

第四, 由于在加入 $w_{Bi} = 0.01\%$ 的基础上适量多加一些铈, 可起到更强烈阻碍铸态石墨化作用, 所以当铁液的 w_{C+Si} 波动到 4.6% 附近时, 将铈的加入量提高至 0.02%, 并浇注壁厚为 8 ~ 10mm 的铸件, 仍可获得铸态白口组织且无石墨析出, 在此状况下, 尚未发现对铸件力学性能产生明显的不良影响。适量提高铈的加入量, 可更有效地降低灰口废品的发生几率, 同时提高了铁液的合格率。当然, 对于 C + Si 含量更高的铁液, 必须报废处理。

第五, 在孕育处理中, 硅是促进铸态石墨化最有效的元素之一。当铁液的 w_{C+Si} 波动到 $\leq 3.8\%$ 附近时, 在炉前冲入 0.1% ~ 0.2% (质量分数) 的硅铁, 粒度为 2 ~ 10mm, 并按正常量加入铈, 因增加了石墨结晶核心, 降低渗碳体的稳定性, 可使浇注出的铸件在正常的退火时间和温度内顺利完成组织转变, 组织为铁素体 + 团絮状石墨, 从而缓解冲天炉熔炼时铁液中的碳、硅元素波动偏低的问题, 从而降低退火不足发生废品的几率。但对于严重氧化而造成 C + Si 含量更低的铁液, 也必须报废处理。应注意的是, 炉前冲硅或炉后加硅形成铁液终硅量相同时, 前者的铸态石墨化效果要高于后者。

二、热处理工部的控制

铁素体基体可锻铸铁在退火过程中的主要任务就是对白口铸铁中的共晶渗碳体、二次渗碳体和共析渗碳体进行石墨化, 获得基体组织为铁素体 + 团絮状石墨。根据铸件毛坯的特点 (壁厚和复杂程度、化学成分、力学性能等)、热处理炉的特性 (加热速度和冷却速度、可达到的最高温度、运行经济性等) 及退火箱内铸件的加热周期 (包括传热 + 均温 + 保温), 制定退火工艺曲线 (如图 3 所示)。热处理工部使用装有两台水平往复炉排燃煤机的台车式热处理炉, 温度控制使用铂铑-铂热电偶并配有长图自动平衡记录仪, 在铸件退火质量发生问题时, 使温度控制具有可追溯性。

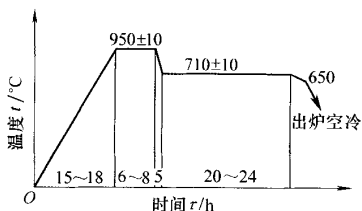


图3 热处理退火工艺曲线

1. 炉内温度调控

热处理生产实践表明,可锻铸铁常见退火缺陷(退火不足、变形、表面严重氧化、过烧和石墨形状恶化等)皆与炉内温差过大有关。减少炉内温差的措施有以下几个方面。

(1) 以退火后各箱垛铸件的质量为依据,调整炉内两侧各个分烟道口之间的相对横截面积,以减少炉内中部与四角处的温差;调整燃烧室上排与下排各个进火口之间的相对横截面积,以减少炉内上、下部位之间的温差。上排进火口应高于箱垛,下排进火口应对准火道,不能直冲箱垛。

另外,尽量降低炉床与炉墙之间缝隙的宽度,以免部分火焰不经过箱垛顶的以上空间而直接进入分烟道,造成进火口处箱垛温度偏高。

(2) 调整两台燃煤机各自的燃烧速度,使其燃烧热量相同一致;调整燃煤机单位时间的供风量和单位时间进煤量即风煤比,过剩空气量不能大,以降低炉气的氧化气氛。

(3) 对因结渣而被堵塞的进火口应定期清理,使之符合按比例分配的进火面积。

(4) 利用观察孔目测炉内温度的均匀性,确定是否调温。

(5) 退火升温期间,在升温至 880~900℃时,停烧 0.5~1h,待炉内温差减少后,再以 20℃/h 升温至 950℃;保温期间需升温时,升温速度应控制在 10℃/h。

(6) 热电偶和试件应放置在炉子中温区的退火箱内,热电偶的正负极和插入深度应符合产品使用说明书的要求。

(7) 定期校验测温仪。在测温系统发生故障而造成的温差较大时,会对退火后的铸件产生很大影响:炉内实际温度过高,不仅会引起严重过烧、氧化,而且第二阶段石墨化后的基体组织很难全部转化为铁素体;炉内温度过低,同样会使第一、第二阶段石墨化长时间不能完成。

2. 退火后铸件产生“亮圈”缺陷的分析与处理

“亮圈”出现在试件和铸件的表皮上,与正常灰白色脱碳层有明显区别,基体金相组织见图 4。其产生机理可能是:水蒸汽与炽热的煤发生反应 $H_2O + C \rightarrow CO + H_2$,水蒸汽在高温下分解 $H_2O \rightarrow H_2 + 1/2O_2$,生成物氢

是反石墨化元素,在退火的高温条件下,氢向铸件内部扩散,稳定了珠光体,并阻碍它在第二阶段石墨化期间发生分解,因此在铸件表面形成了有团絮状石墨的珠光体表层。这层表皮组织稳定性较强,再次退火后也难以完全消除。当表皮组织厚度在 0.5~1mm 时,试件力学性能还能合格,但当厚度 > 1mm 时就要按废品处理。需注意的是,此缺陷的发生有很明显的季节性,一般在每年 7~9 月份的雨季。

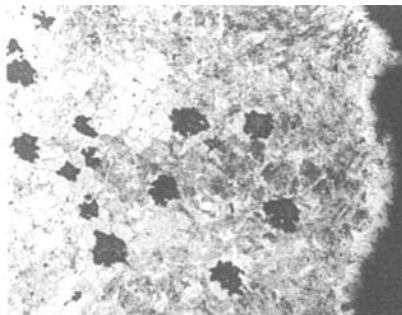


图 4 表皮组织的金相组织 ×100

该缺陷预防的方法:一是应尽量减少煤的水分(煤的正常含水量为 8%~10%),以防燃烧时产生飞灰和漏煤;二是对退火箱之间的箱缝用较硬的封箱泥(型砂:白泥=1:1,水分较少)封严;三是潮湿和锈蚀的铸件不能装箱。

3. 铸件材质检验

退火后的整炉铸件不仅要求随炉单铸试件力学性能合格,还要对炉内特殊位置的铸件实施破坏性宏观断口检验,以对铸件的材质质量进行监控和评估。

三、结语

我公司多年生产统计的结果显示,试件力学性能的平均值 $R_m = 388.5 \text{ MPa}$, $A = 16.2\%$,满足了铁路行车安全对铸件材质的严格要求。

以上所述生产现场的质量控制措施,部分还停留在经验管理范畴内,虽是可行的、有效的,但不是最佳的。治本的措施应是:随着铸造业检测技术的发展及对铸件高强度、高使用性能的质量要求,在铸件材质质量控制过程中,不仅要使用更准确、更快速的先进检验手段,对生产过程的重要技术参数进行科学判断,提高和稳定铸件品质,同时还要对铸件本体进行 100% 的无损检验,以减少对现场生产经验的依赖程度,为企业进入科学管理领域打下基础。 (20070609)