

稀土在铸铁中的应用研究

张 洋, 刘玉宝, 吕卫东, 高日增, 杨鹏飞, 李 园, 兰岳光

(包头稀土研究院白云鄂博稀土资源研究与综合利用国家重点实验室, 内蒙古包头 014030)

摘要: 综述了稀土在铸铁中的作用, 详细描述了稀土在白口铸铁、灰铸铁、可锻铸铁、蠕墨铸铁和球墨铸铁中的应用, 并且阐述了稀土在各类铸铁中的作用机理。同时结合近些年的科研工作总结出更高效的稀土添加剂: “稀土铁合金”, 通过中间合金加入法, 应用到铸铁中, 解决了稀土在加入铸铁中烧损大、收得率低等问题。

关键词: 铸铁; 稀土; 稀土添加剂; 稀土铸铁

在工业领域中, 每年都因材料磨损有大量的钢材损失。因此近几十年来一直在研究和开发耐磨材料, 白口铸铁虽然耐磨但是其自身比较脆, 而稀土元素是很好的反石墨化元素。将稀土元素添加到白口铸铁中可以制备出保持白口铸铁的硬度和耐磨性的高韧性稀土白口铸铁^[1]。灰铸铁具有较低的缺口敏感性、耐磨性、减震性、铸造性、切削和加工性能。但是高碳当量的灰铸铁强度降低, 而低碳当量的灰铸铁硬度增加、流动性和加工性下降, 成品率下降。稀土孕育处理可以改善高碳当量和低碳当量的铸造性能和力学性能^[1]。蠕墨铸铁具有良好的抗热疲劳性、导热性、足够的致密性和刚度, 主要用于液压阀壳体、大马力柴油机缸盖、曲轴驱动箱箱体、钢锭模、制动鼓、电机外壳、机座等领域, 取代了可锻铸铁、合金铸铁、高强度的灰铸铁和一些球墨铸铁。现在使用的蠕化剂是一种不含钛的La-Ce混合稀土金属^[2-5]。球墨铸铁是20世纪50年代发展起来的一种高强度铸铁材料, 其综合性能接近于钢, 基于其优异的性能, 已成功用于铸造一些受力复杂, 强度、韧性、耐磨性要求较高的零件。稀土作为球墨铸铁常用的球化剂, 在球墨铸铁中的应用量较大, 而且稀土的应用途径仍有优化的潜力^[6]。虽然稀土在铸铁行业应用广泛, 但是稀土熔点与铸铁相差较大, 稀土在加入过程中烧损大、收得率低。为了解决这一问题, 首先制备稀土铁合金作为中间合金, 然后将稀土铁合金作为稀土添加剂加入到铸铁中, 从而提高稀土铸铁产品质量和综合性能, 降低生产成本。

1 稀土在白口铸铁中的应用

1.1 不同稀土含量对白口铸铁的影响

白口铸铁通常含(质量分数, 下同)2.0%~3.6%C、0.5%~1.9%Si、0.25%~0.8%Mn、0.06%~0.2%S、0.06%~0.2%P、其余为Fe。加入合金元素Cr、Mo、Cu、Al等可制成白口铸铁。凝固时, 按Fe-Fe₃C相图进行, 无石墨析出, 碳除少量溶于铁素体外, 绝大部分以渗碳体的形式存在于铸铁中。铸件凝固组织由化学成分和冷却速度而定, 冷却速度足够大时为白口铸铁组织。白口铸铁含有大量游离的碳化物, HB硬度很高, 达500以上, 韧性很差。白口铸铁仅用于制作耐磨的农具、磨球、叶片、泵、轧辊等。在低合金白口铸铁中加入稀土可有效地改善其组织性能, 但并不是加入得越多就越好而是对应于一定的白口铸铁和对应的处理工艺, 有最佳加入量范围, 如果在这个范围之外其性能得不到改善。使用La、Ce混合稀土及其稀土硅铁, 在低合金白口铸铁中(0.5%~1.5%Cr, 1.5%~4.5%Ni)加入混合稀土0.3%~0.5%, 残留量是0.15%~0.22%时有较好的效果。文献[7-8]都用混合稀土

作者简介:

张 洋(1993-), 男, 助理工程师, 目前主要从事稀土铸铁的研究工作。电话: 15247256997, E-mail: 15247256997@163.com

通讯作者:

刘玉宝, 男, 正高级工程师, 博士。电话: 18047202708, E-mail: liuyubao1985@126.com

中图分类号: TG25

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)11-1534-07

收稿日期:

2023-04-17 收到初稿,
2023-10-23 收到修订稿。

金属加入0.15%~1.05%，得出结果：向普通白口铸铁中加入0.3%的混合稀土时可以细化渗碳体，改善铸铁的耐磨性和提高强度。还有研究在白口铸铁中加入0.3%~1.5%的混合稀土进行试验，得出结论：残留量在0.25%~0.55%时冲击值提高到最大^[9]。对于稀土硅铁的加入量，由于其加入稀土硅铁合金中稀土含量不同及其所处理的白口铸铁的成分差异等原因，导致其有不同加入量。较多的研究表明稀土硅铁加入量（1.2%~1.4%）有较好的效果^[10-13]。

在加入适量的稀土金属或者稀土硅铁合金时，白口铸铁的抗拉强度和冲击韧性都有明显的提高。在干态和湿态两种条件下分别对白口铸铁和稀土处理过的白口铸铁磨损量进行对比，发现用稀土处理过的白口铸铁稍有下降^[7]。稀土变质处理中稀土白口铸铁，可使其组织中的碳化物从连续网状变为孤立的板块状^[14]。

1.2 稀土在白口铸铁中的作用机理

稀土不但可以让白口铸铁中的硫元素含量显著降低，而且稀土金属处理白口铸铁后在凝固期间改变了合金元素在相间的分布，使镍的相间分配系数增大，而Cr和Mn在共晶碳化物中的溶解量与Ce含量有关，当Ce元素残留量在0.15%~0.22%区间内其均匀性有显著提高^[15]。用稀土处理后白口铸铁中的碳化物的形态有明显的变化，在稀土处理前碳化物为典型的M₃C型碳化物，表现为网状的宽片状的碳化物。处理后碳化物形态则呈现为断续网状，甚至呈孤立状态分布。基体和渗碳体细化，共晶奥氏体和共晶渗碳体分离形成离异共晶，且渗碳体略有减少。其原因是稀土元素和氧、硫有很强的化学亲和力，当铁液用稀土处理时，形成大量的细小硫化物和氧化物，在凝固时可能成为初生奥氏体的外来晶核，和硫氧反应后余下的稀土可能吸附在初生奥氏体树枝晶表面，而阻碍其继续生长，因此使初生奥氏体树枝晶大大细化，使残余液相和奥氏体接触面大大增加。若这种残余液相成分达到共晶成分，由于对初生奥氏体接触表面增大，此时共晶奥氏体便较容易在初生奥氏体表面上析出，而形成离异共晶，同时在单位接触面上析出的渗碳体数量也相应减小，结果导致渗碳体细化并呈孤立状态分布，白口铸态性能得到改善^[7]。

2 稀土在灰铸铁中的应用

灰铸铁中石墨以片状形态存在，断口呈浅灰色，价格便宜，应用广泛，灰铸铁占铸铁的总产量58%以上。主要应用于机床床身、齿轮箱、皮带轮、底座、缸体、盖和手轮等受力不大、耐磨、减震零件。灰铸铁中存在很多杂质元素，当这些杂质元素含量较多时

会严重影响灰铸铁的物理性能。但有些杂质元素如果其含量在一定范围内时可以与稀土元素形成不同的化合物并有效提升灰铸铁的性能。

硫元素在灰铸铁中是一把双刃剑，当硫元素过多时会使灰铸铁产生“热脆”现象，使其力学性能、耐腐蚀性能和焊接性能下降。但硫元素含量在适当范围内时，稀土孕育处理过程中硫与稀土反应生成硫化稀土，稀土的硫化物促进了石墨化并保证了孕育效果。文献[1]研究得出当铁液含硫量在0.035%~0.1%时最适合稀土孕育。

氧在铸铁中一般是以氧化物夹杂的形式存在，分别用不同的孕育剂：硅锆、硅锆锰、硅锆稀土和0.11%S+硅锆，处理灰铸铁从而得到不同氧化夹杂的灰铸铁，得出氧化夹杂的量与杨氏模量和抗拉强度成反比的结果^[16]。由于稀土与氧结合力较强，在熔炼时稀土和氧形成稳定的稀土氧化物，在除渣过程中直接排除，或者在铁液中作为外来形核物，促进石墨化，使晶粒得到细化，增强铸铁的物理性能和力学性能等。

除上述氧和硫以外，灰铸铁中还存在不能通过扒渣和气化排除的杂质。例如磷元素在一定的范围内可以提高铁液的流动性，并且可以促进石墨化、增强其强度和耐磨性。当磷含量超过0.02%时^[15]，磷存在于晶界中的方式是二元或者三元的磷共晶，这些磷共晶导致铸件缩松缺陷；稀土孕育灰铸铁时，只有当稀土原子数是磷原子数的七分之一时，稀土才会与固溶在铁液中的磷反应生成磷化物，降低由磷引起的脆性。研究表明^[17]，稀土能够将高磷铁中磷共晶连续网打破并细化石墨与基体。除此以外还有砷、铅、铝等，当砷含量超过0.013%时会使灰铸铁石墨形态恶化，A型石墨中出现B、D、E型石墨，降低其力学性能。铝元素扩大了灰铸铁中的铁素体区，增加了过冷奥氏体动态相变的过冷度^[18-21]，且铝元素活性强，容易与氧结合反应生成针孔和熔渣。稀土元素可以有效改善铸铁性能、降低其白口化、促进共晶团生长、减少其内应力，解决铸件上的缩孔、缩松和裂纹问题。

3 稀土在蠕墨铸铁中的应用

蠕墨铸铁是铁液经过蠕化和孕育处理后，石墨在铁液凝固过程中以蠕虫状析出的铸铁材料。石墨主要由80%以上的蠕虫状石墨和少量球状、团絮状石墨组成^[22]。其不仅具有良好的铸造性、导热性和抗震性，同时具备高耐磨性和高强度，相当于同时具备灰铸铁和球墨铸铁的优点，但除此以外蠕墨铸铁还具备较高的耐热疲劳性和高温疲劳强度。由于其综合性能优异，主要应用于大功率发动机、制动鼓和刹车盘等领域^[2-4]。

稀土元素与蠕墨铸铁中的氧、硫结合生成氧化稀

土和硫化稀土。这些氧化物和硫化物可以作为石墨的形核基底，促进石墨的结晶长大^[5]。稀土的抗蠕化衰退能力强，但如果稀土加入量较大时会增加蠕墨铸铁的白口倾向形成渗碳体^[23]。文献[24]认为当稀土质量控制 在0.04%~0.07%时蠕化效果最好。

4 稀土在球墨铁中的应用

球墨铸铁是20世纪50年代发展起来的一种高强度铸铁材料，通过球化和孕育处理得到球状石墨，有效地提高了铸铁的力学性能，特别是提高了塑性和韧性，其综合性能接近于钢^[6]。基于其优异的性能，已成功地用于铸造一些受力复杂，强度、韧性、耐磨性要求较高的零件^[25]。球墨铸铁已迅速发展为仅次于灰铸铁的、应用十分广泛的铸铁材料，所谓“以铁代钢”，主要指球墨铸铁^[26]。

文献[27-32]详细概述了稀土在球墨铸铁中的优缺点。Mg、RE和Ca都有使石墨球化的作用。它们在铁液中都有脱硫、脱氧的作用。虽然稀土和钙的脱氧脱硫能力比镁强，但是镁的沸点低，所以镁在铁液中有很强的搅拌作用。搅拌的同时将铁液中的气体带出，铁液中的氧化物和硫化物也一并被带至铁液表面，因此镁在脱氧脱硫方面比钙和稀土都要强。如果只用镁作为球化剂时，镁与氧反应生成的氧化镁熔点高、稳定性好可能上浮到表面成为浮渣，也有可能被卷入内部成为夹渣。而硫化镁的稳定性差且密度较低上浮到铁液表面，与铁液表面的氧反应生成氧化镁和硫，硫继续返回铁液与镁反应，这也是单用镁作为球化剂易于衰退的原因。同时还有一些反球化元素，在铸铁发生共晶转变时富集于共晶团之间，从而让石墨的形状畸变，但是镁对这些反球化元素的作用又很弱。当使用镁和稀土的混合球化剂时，在铁液中形成稳定的、粒度细小的硫化稀土和氧化稀土，这些细小的硫化稀土和氧化稀土可以作为石墨析出的异质核心，从而兼有孕育的功能。同时稀土元素可以有效地抑制干扰元素的反球化作用。因此，稀土和镁的混合球化剂可以更有效提高球化能力和球化等级^[33]。

5 通过具体试验测试稀土铁合金对铸铁的影响

稀土通过稀土铁合金的形式应用到稀土铸铁生产中，有效解决了稀土在加入过程中烧损大、收得率低等难题。稀土铁合金的主要特点有：密度与熔点适宜，易于加入铸铁中且稀土收得率高；铸铁中稀土成份均匀稳定、偏析小；合金中稀土元素活度低，抗氧化性好，热稳定性高；合金在铸铁中使用能够提高

稀土铸铁产品质量和综合性能，降低生产成本。在铸铁中加入的稀土硅铁合金相对于稀土铁合金有一些不足：①生产过程中耗电增加20%以上；②制备稀土硅铁合金时稀土收得率低；③稀土硅铁合金的洁净度较差；④稀土硅铁合金加入铸铁里面，稀土的收得率低。

试验1：30%钕铁合金（稀土铁合金的一种）用于砂型铸造HT200时不同稀土含量对应的抗拉强度的变化。成品样取自铸件本体，试样棒取自单铸试样棒。

由表1可以看出当HT200有稀土残留时，HT200的抗拉强度都比未加稀土的高，并且随稀土残留量的增加抗拉强度还在增强，具体增加的范围还需要进一步试验确定。

表1 成品样抗拉强度
Table 1 Tensile strengths of finished product samples

稀土残留量/%	抗拉强度/MPa
0	199
0.001 6	222
0.022	253
0.038	264
0.076	319

由表2可知，试样棒和成品样的趋势一致，当稀土残留量逐渐增加时，稀土铸铁的抗拉强度也在不断增加，同时抗拉强度的增长范围还需要进一步试验确认。

表2 试样棒抗拉强度
Table 2 Tensile strengths of sample bars

稀土残留量/%	抗拉强度/MPa
0	207
0.001 6	235
0.022	266
0.038	271
0.076	327

试验2：30%钕铁合金（稀土铁合金的一种）用于球墨铸铁时对不同稀土含量球墨铸铁的SEM和EDS分析。

图1为不加稀土的球墨铸铁电镜图片，由图1可以看出，视场内除了有比较完整的球形石墨外，还有一些不规则的三角状和长条状石墨。其他球化和孕育条件都不变，球化剂为：Si、Mg、Fe、Ca。孕育剂为：Si、Ba、Fe、Ca。

图2为不含稀土球墨铸铁的面扫图：图2a为原视场，2b、2c、2d、2e、2f分别为C、Si、Fe、Mn和S。可以看出，不加稀土的球墨铸铁其石墨形态不规则而且体积较大，因此其球化等级和石墨等级都不好。

添加稀土后球墨铸铁石墨分布形态和夹杂物如图

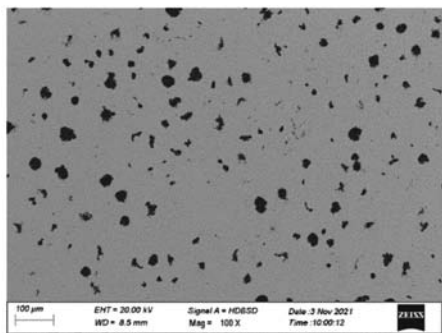


图1 不加稀土球墨铸铁的石墨形态

Fig. 1 Graphite morphology of nodular cast iron without rare earth addition

3、图4、图5和表3、表4所示。从图3中可以看出, 基体内的球形石墨增多, 不规则的石墨减少。从图4和图5和其对应的成分表表3和表4可以看出, Ce元素存在于极小的夹杂物中, 并且这些夹杂物有助于石墨的形核和长大。

Ce含量0.07%球墨铸铁的石墨形态和Ce夹杂物如图6、图7和表5所示。从图6可以看出, 球形石墨不仅增多, 而且变小了。从图7和表5中可以看出, Ce元素存在于球墨铸铁的夹杂物中, 由此可以推断, 这些稀土夹杂物有利于增加石墨核心。

试验3: 以30%钕铁合金为中间合金加入到球墨铸

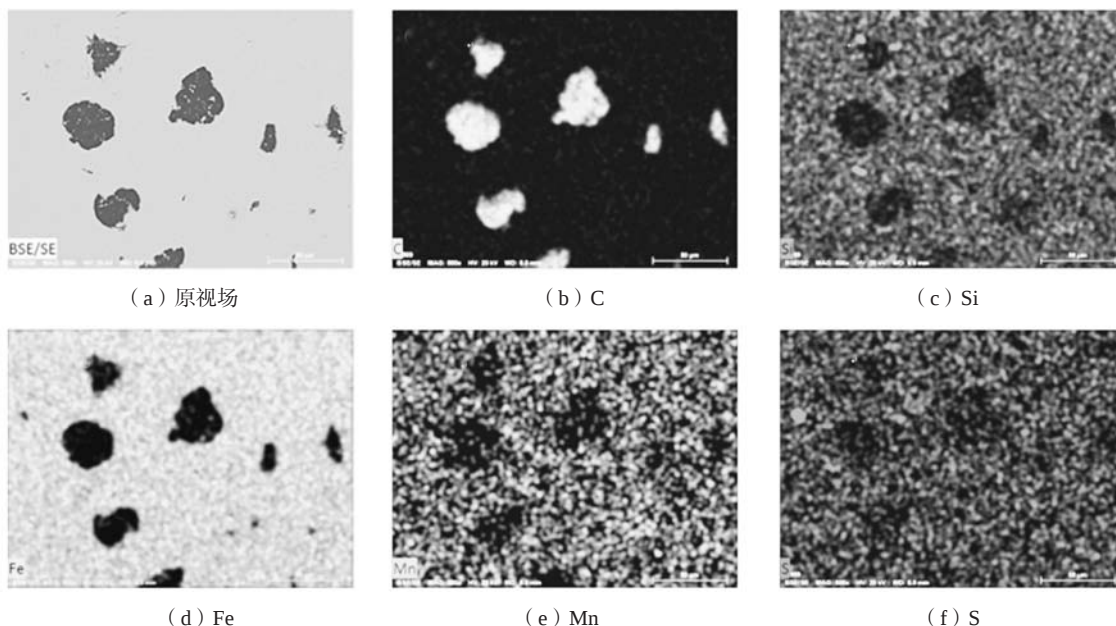


图2 不含稀土球墨铸铁的成分分析

Fig. 2 Composition analysis of ductile iron without rare earth elements

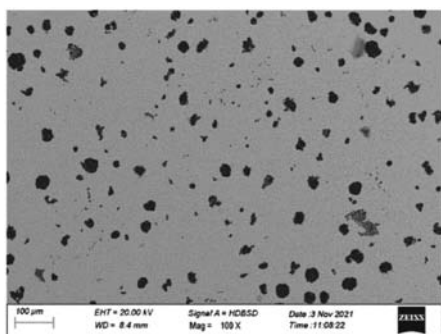


图3 Ce含量0.035%球墨铸铁的石墨形态

Fig. 3 Graphite morphology of nodular cast iron with 0.035% Ce content

铁中, 做球墨铸铁稀土含量的梯度试验。30%钕铁合金加入方法: 首先制备0~3 mm的钕铁合金粒, 然后将钕铁合金粒放入到浇包的底部, 之后在上面覆盖球化剂和孕育剂, 最后再覆盖一层覆盖料(块状较小的球墨铸铁), 最后将熔化好的铁液倒入浇包中进行球化和

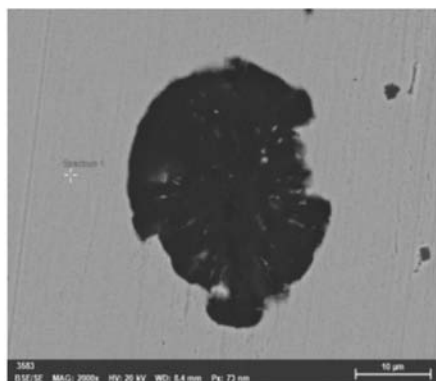


图4 含Ce 0.035%球墨铸铁的夹杂物

Fig. 4 Inclusions in 0.035% Ce containing ductile iron

孕育处理。

表6详细记录了球墨铸铁中的稀土残留量 and 对应球墨铸铁的球化等级、抗拉强度和断后伸长率等试验结

表3 图4中Ce夹杂物成分分析
Table 3 Composition analysis of Ce inclusion in Fig. 4

										w _B /%
C	Mg	Si	P	S	Ti	Mn	Fe	La	Ce	
7.33	0.00	2.28	0.01	0.05	0.00	0.20	89.94	0.00	0.19	

表4 图5中Ce夹杂物成分分析
Table 4 Composition analysis of Ce inclusion in Fig. 5

												w _B /%
C	N	Mg	Al	Si	P	S	Ti	Mn	Fe	La	Ce	
7.97	17.18	18.26	5.42	15.94	0.00	0.44	0.06	0.45	33.24	0.92	0.12	

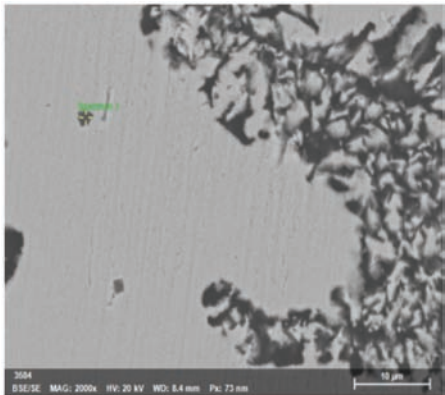


图5 Ce含量0.035%球墨铸铁夹杂物
Fig. 5 Ce content 0.035% ductile iron inclusions

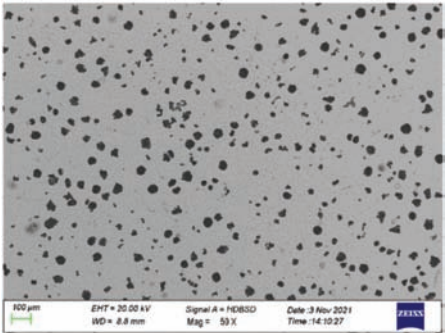


图6 Ce含量0.07%球墨铸铁的石墨形态
Fig. 6 Graphite morphology of nodular cast iron with 0.07% Ce content

果。图8到图10是对表6试验结果的具体分析结果：正常球化孕育之后加入稀土铁合金，球化剂为Si、Mg、Fe、Ca。孕育剂为Si、Ba、Fe、Ca。

由图8可以得出：稀土含量在0~0.05%左右时球化等级基本一致，稀土含量再增加时球化等级开始增加，球化等级数越大说明球化得越差。由图9可以得

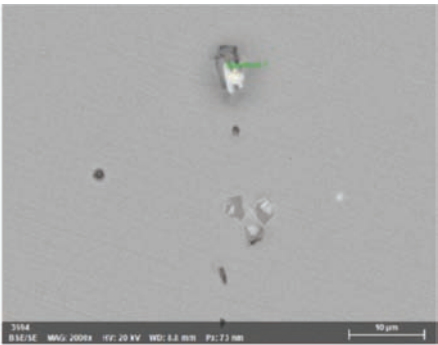


图7 Ce含量0.07%球墨铸铁中含Ce夹杂物
Fig. 7 Ce-containing inclusion in ductile iron with 0.07% Ce content

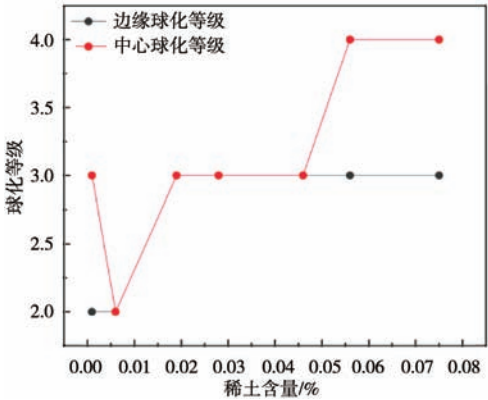


图8 不同稀土含量球墨铸铁的球化等级
Fig. 8 Nodulization grades of ductile iron with different rare earth contents

出：球墨铸铁稀土含量在0~0.05%的范围内随着稀土含量的增加，球墨铸铁的抗拉强度也在逐渐增加，当稀土含量超过0.05%时抗拉强度呈下降趋势。由图10可以得出：球墨铸铁的断后伸长率在整个试验的过程中都是下降趋势。但是当稀土含量在0.05%以下时其断后伸长率都超过10%，当其稀土含量超过0.05%时断后伸长

表5 图7中Ce夹杂物成分分析
Table 5 Composition analysis of Ce-containing inclusion in Fig. 7

												w _B /%
C	O	Mg	Si	P	S	Ti	Mn	Fe	La	Ce		
11.95	19.29	7.97	0.51	5.31	0.09	0.05	0.81	29.99	0.41	23.63		

表6 稀土含量和球化等级、抗拉强度和断后伸长率的关系

Table 6 Relationships between rare earth contents and nodularization grades, tensile strengths and elongations after fracture

稀土残留量/%	边缘球化等级	中心球化等级	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%
0.001	2	3	525	16.6
0.006	2	2	487	20.1
0.019	3	3	520	15.0
0.028	3	3	551	15.3
0.046	3	3	577	15.0
0.056	3	4	605	13.1
0.075	3	4	591	6.5

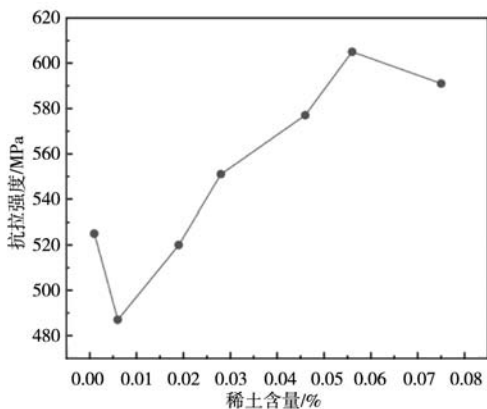


图9 不同稀土含量球墨铸铁的抗拉强度

Fig. 9 Tensile strengths of ductile iron with different rare earth contents

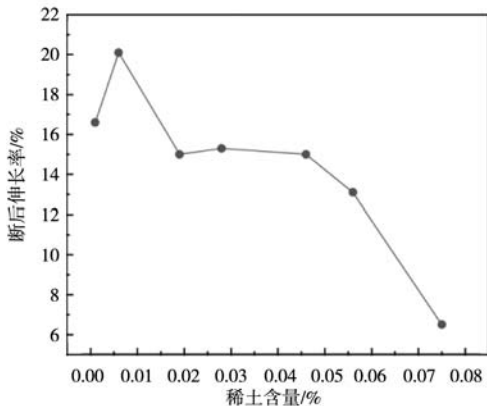


图10 不同稀土含量球墨铸铁的断后伸长率

Fig. 10 Elongations after fracture of ductile iron with different rare earth contents

率下降较快并低于10%。因此,球墨铸铁的稀土加入量控制在一定的范围内时将会有效提高铸铁的性能。

参考文献:

- [1] 胡开华,蔡启舟,魏伯康.硫在稀土孕育灰铸铁中的作用的试验与探讨[J].铸造技术,2002(2):120-123.
- [2] 康瑞.稀土蠕化剂加入量对蠕墨铸铁组织和性能的影响[D].呼和浩特:内蒙古工业大学,2015.
- [3] 刘燕平,杨清,杨宇鹏,等.一种新型低稀土蠕化剂的研制及应用[J].现代铸铁,2012,32(S2):48-52.
- [4] 蒋勇强.稀土蠕化剂对蠕墨铸铁生产的影响[J].铸造技术,2010,31(9):1143-1145.
- [5] 季玮,刘群,程玉桂.铈和硫对蠕铁组织和性能的影响[J].江西冶金,1992(3):1-3.

试验1主要研究的是稀土在灰铸铁中的应用,试验2和试验3主要研究的是稀土在球墨铸铁中的应用,分别解释了稀土对其微观组织的影响和某些物理性能的影响。从试验1、试验2和试验3可以得出:在铸铁中加入稀土铁合金可以有效地增强铸铁的抗拉强度和提升其球化等级。因此稀土铁合金不仅具备了混合稀土和稀土硅铁的所有优点而且解决了稀土在加入过程中烧损大、收得率低等难题,证实了稀土合金在铸铁中使用能够提高稀土铸铁产品质量和综合性能。

6 总结与展望

研究表明稀土元素和氧、硫等元素有很强的化学亲和力,当铁液用稀土处理时,大部分的氧、硫等杂质元素与稀土造渣,漂浮在铁液上方从而净化铁液;还有一些形成大量细小的硫化稀土和氧化稀土,在铁液中作为外来形核物,从而促进石墨化并保证了孕育效果,因此晶粒细化,铸铁力学性能增强。稀土能够将高磷铁中磷共晶连续网打破并细化石墨与基体。稀土元素可以有效地阻止蠕化和球化的衰退,抑制干扰元素的反球化作用,改善铸铁性能,降低其白口化,促进共晶团生长,减少其内应力,有利于解决铸件缩孔、缩松和裂纹问题。但由于稀土金属活度高,抗氧化性差,热稳定性低,因此在使用过程中烧损大、收得率低,在铸铁中稀土成份不均匀且不稳定、偏析较大。采用稀土铁合金可以完全解决上述问题,在铸铁中使用稀土铁合金能够提高稀土铸铁产品质量和综合性能,降低生产成本,在将来的科研和生产中稀土铁合金产品将被广泛使用。

- [6] 李传杖. 浅谈稀土元素及其在球墨铸铁和铸钢中的应用 [C]// 中国铸造协会. 第十六届中国铸造协会年会暨第五届全国铸造行业创新发展论坛论文集, 2020.
- [7] 赵伯璠, LANGER E W. 用稀土处理白口铸铁的试验研究 [J]. 稀土, 1985 (2): 1-4.
- [8] 王康康. 合金化与稀土复合变质处理对高铬白口铸铁组织和性能的影响 [D]. 太原: 太原科技大学, 2018.
- [9] 马前, 王兆昌. 白口铸铁的稀土变质处理对热处理时碳化物团聚的影响 [J]. 钢铁, 1990 (11): 52-56.
- [10] 梁工英, 顾林喻. 稀土对白口铸铁中碳化物形貌及冲击疲劳的影响 [J]. 中国稀土学报, 1993 (4): 341-344.
- [11] 李崇礼. 低铬-稀土白口铸铁强化处理对组织与性能的影响 [J]. 铸造技术, 1986 (2): 33-36.
- [12] 胡成才, 晁焕清, 陈振林. 稀土对厚大断面耐磨铸铁性能的影响 [J]. 铸造技术, 1986 (2): 36-38.
- [13] 向宝执. 高铬铸铁磨球的研制 [J]. 铸造技术, 1989 (4): 11-12.
- [14] 王兆昌, 马前. 稀土变质处理中锰白口铸铁的研究 [J]. 铸造, 1989 (11): 1-6.
- [15] 史鉴开, 史小雨. 灰铸铁磷含量对铸件缩松和金属渗透的影响 [J]. 铸造, 2008 (15): 65-65.
- [16] 侯起飞, 杨娟, 王刘利, 等. 石墨形态和氧化夹杂对灰铸铁力学性能的影响 [J]. 铸造技术, 2010, 31 (3): 302-304.
- [17] 郭进毅. 稀土对高磷灰铸铁中磷共晶的变质作用 [J]. 稀土, 1994, 15 (2): 31-34.
- [18] 龚志华, 赵莉萍, 赵鸣, 等. 部分Al替代Si后TRIP钢的贝氏体转变 [J]. 金属热处理, 2011, 36 (7): 32-35.
- [19] 赵爱民, 张宇光, 赵征志, 等. Al与P对TRIP钢固态相变的影响 [J]. 材料热处理学报, 2011, 32 (4): 82-85.
- [20] 肖鸿飞, 李壮, 李平瑞. 以Al代Si对TRIP钢力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2009, 38 (10): 18-1.
- [21] 刘敬广, 景财年, 甘洋洋, 等. TRIP钢中合金元素对相变诱发塑性的影响 [J]. 山东建筑大学学报, 2012, 27 (4): 422-425.
- [22] 鲁栋, 许景峰, 姜爱龙, 等. 蠕墨铸铁蠕化衰退特性研究 [J]. 铸造设备与工艺, 2016 (6): 38-40.
- [23] 陈向强, 吴文远, 莫德勒图, 等. 富钼蠕化剂对铸铁中的石墨形态和组织的影响 [J]. 有色矿冶, 2008 (2): 40-42.
- [24] 孙玉成, 孟迪, 姜爱龙, 等. 蠕墨铸铁性能及其在内燃机中应用的研究进展 [J]. 铸造技术, 2019, 40 (4): 417-422.
- [25] RIPOSAN I, UTA V, STAN S, et al. The effect of minimizing rare earth elements during nodulizing treatments and the inoculation of ductile iron [J]. AFS Trans., 2014, 122: 219-236.
- [26] TUTTLE R B. Preliminary experiment on refining cast steel [J]. AFS Trans., 2009, 117: 727-740.
- [27] TUTTLE R B. Grain refinement in plain steel [J]. AFS Trans., 2010, 118: 425-435.
- [28] TUTTLE R B. Role of titanium on the grain refinement of 1030 steel castings [J]. AFS Trans., 2011, 119: 561-571.
- [29] 陆文华, 郭大展, 武宏强. 利用含稀土球化剂及型内孕育剂研制QT40-15铸态铁素体球墨铸铁 [J]. 铸造, 1988 (9): 1-5.
- [30] TUTTLE R B. Industrial trail of rare earth based grain refinement of a steel casting [J]. AFS Trans., 2013, 121: 561-571.
- [31] TUTTLE R B. Understanding the mechanism of grain refinement of plain carbon steels [J]. International Journal of Metalcasting, 2013, 7 (4): 7-16.
- [32] TUTTLE R B. Effect of normalizing on grain refined 1030 [J]. AFS Trans., 2014, 122: 305-316.
- [33] TUTTLE R B. Rare earth grain refiner addition method [J]. AFS Trans., 2015, 123: 295-302.

Application Research of Rare Earth in Cast Iron

ZHANG Yang, LIU Yu-bao, LÜ Wei-dong, GAO Ri-zeng, YANG Peng-fei, LI Yuan, LAN Yue-guang

(Baotou Research Institute of Rare Earths, State Key Laboratory of Baiyunobo Rare Earth Resource Researches and Comprehensive Utilization, Baotou 014030, Inner Mongolia, China)

Abstract:

The roles the rare earths played in cast iron are summarized, and the applications of them in white cast iron, grey cast iron, malleable cast iron, vermicular cast iron and nodular cast iron are described in details, and the action mechanisms of rare earths in various kinds of cast iron are expounded. At the same time, combined with the scientific research work in recent years, a more efficient rare earth additive "rare earth ferroalloy" was applied to cast iron through master alloy addition method, which solved the problems of large burning loss, low yield and so on during adding the rare earths to the cast irons.

Key words:

cast iron; rare earth; rare earth additive; rare earth cast iron