

碳当量对合成铸铁力学性能的影响

曹 琨^{1,2}, 赵子文^{1,2}, 祁庆花^{1,2}, 马 升^{1,2}, 胡克潮², 曹拥军³

(1. 兰州兰石能源装备工程研究院有限公司, 甘肃兰州 730314; 2. 甘肃省高端铸锻件工程技术研究中心, 甘肃兰州 730314; 3. 兰州兰石集团有限公司, 甘肃兰州 730314)

摘要: 用合成铸铁熔炼方法, 研究了不同碳当量对合成铸铁力学性能和组织的影响。结果表明, 随着碳当量降低, 石墨变得细小, 对基体的割裂作用降低, 抗拉强度提高。为了合理控制浇注温度, 降低铁液收缩率, 避免出现缩松缩孔、裂纹等缺陷, 采用Magma模拟软件对铸造工艺进行了数值模拟优化。最终通过多次孕育改善石墨形态, 不需加入合金就能获得低成本、高强度合成铸铁。

关键词: 合成铸铁; 碳当量; 力学性能; Magma

国内外高品质灰铸铁的生产往往需要消耗大量铸造生铁。随着优质矿石资源的枯竭及国家去产能政策的影响, 铸造生铁价格飞涨, 由大约2 600元/吨(2016年)涨至约3 700元/吨(2018年), 使灰铸铁件的利润十分微薄。面对这种严峻的形势, 许多铸造企业开始采用合成铸铁的方法(即废钢增碳技术)来降低成本^[1-3]。使用合成铸铁方法熔炼的铁液有害元素含量低, 纯净度高, 夹杂物少, 大量废钢的加入降低了原铁液Si含量, 使增大孕育剂提高孕育效果成为了可能, 而且孕育后的铁液白口倾向小, 石墨形态大部分为A型, 石墨长度也更短^[4], 对基体的割裂作用小, 抗拉强度比普通灰铸铁高15~30 MPa^[5]。

高强度铸铁一般采用高碳当量(3.8%~4.2%)、低合金化(Cu: 0.3%~1.0%)方法生产。该方法可使灰铸铁具有良好铸造性能, 获得高的抗拉强度, 但大量合金的加入增加了熔炼成本。适当降低碳当量使石墨数量相对减少, 减轻石墨对强度的削弱作用, 少加或者不加入合金就可获得高强度灰铸铁^[6], 节约了大量熔炼成本, 但容易出现白口组织, 造成加工性能恶化^[7]。齐笑冰等^[8]研究了低碳当量、高硅碳比条件下可以获得高强度的方法, 但是使用的主要原料为生铁, 对于铸造质量问题没有深入研究。盖志宏等^[9]采用低碳当量(3.45%~3.85%)批量化生产HT350合成铸铁, 但是仍加入少量Cu(0.8%~1.0%); 合成铸铁方法生产的铁液纯净, 石墨形态良好, 不易产生夹杂物和过冷石墨^[10], 具有良好铸造性能, 为低碳当量高强度铸铁的研究提供了新的可能。

本试验采用合成铸铁的熔炼方法, 研究了低碳当量、非合金高强度合成铸铁的生产方法, 分析了其组织与力学性能的关系, 并对容易出现的铸造问题进行相应研究。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料的选择

本试验采用呋喃树脂砂铸造工艺, 在5 t酸性中频炉感应电炉进行熔炼。主要选用普通碳素废钢, 一般不用合金钢, 废钢应无油无锈, 成分明确。选用少量Q12生铁和灰铁回炉料, 生铁中微量有害元素(As、Sn、Sb、Pb等)应越低越好。采用普通FeSi75孕育剂, 粒度范围为5~10 mm。选择高温石墨化增碳剂, 应符合YB/T 4403—2014《石墨化增碳剂》标准, 粒度范围为1~8 mm。各原材料化学成分如表1所示,

作者简介:

曹 琨(1993-), 男, 硕士, 研究方向为钢铁冶金及金属材料。电话: 18919069491, E-mail: 18919069491@qq.com

中图分类号: TG243+.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)11-1232-05

基金项目:

甘肃省科技计划资助项目(2015GS05896)。

收稿日期:

2019-04-10 收到初稿,
2019-07-25 收到修稿。

配料时据此进行成分核算。

1.2 合成铸铁熔炼工艺

合成铸铁炉料配比为：80%~100%废钢，可根据现场情况加入0~20%回炉料。炉料加入方式如下：①为防止增碳剂与炉底粘结，炉底铺少量废钢，再加入30%的增碳剂，其上用废钢覆盖，通电熔化；②熔化过程中逐步加入剩余增碳剂、废钢和回炉料，在废钢化清前增碳剂必须加完；③根据化清后成分进行相应调整，如C含量超标可加适量废钢降碳，C含量偏低可在铁液表面加入少量增碳剂或生铁增碳。化清后加增碳剂时，必须用废钢或生铁将增碳剂压入铁液，以免增碳剂漂浮于铁液表面，并且升温至1 500℃保温10 min，以保证增碳剂被铁液充分吸收。采用本方法，增碳剂吸收率为85%~90%左右，增碳剂主要在熔化阶段损耗较大，主要是其中的挥发分、无定形碳燃烧并冒大量黑烟，加增碳剂时可用钢屑将增碳剂尽快压入铁液减少氧化。

1.3 孕育处理和浇注

原铁液化清后测温取样，根据取样结果调整铁液成分，炉内加入大块FeSi75（1%~1.5%）进行增硅。出铁时进行二次孕育，铁液在出铁过程进行充分混合搅拌，具有良好动力学条件，促进石墨形核，减小该区域铁液过冷，起到细化石墨、增加共晶团数量作用。具体操作如下：炉内孕育后，扒净熔渣出铁（出铁温度1 480~1 500℃），二次孕育总量为0.6%，其中包底放60%的孕育剂，剩余40%的孕育剂放到铁槽随

铁液冲入包内。撒珍珠岩扒渣2~3次，薄撒珍珠岩覆盖铁液表面保温，浇注光谱试样及三角试块。观察三角试片断口，需断口尖角白口清晰，宽度4~7 mm范围为合格。如三角试片断口白口化严重需要补加孕育剂。三角试片判断合格后方可进行浇注，浇注温度为1 320~1 340℃。

2 试验结果及分析

2.1 合成铸铁的化学成分

选择不同的碳含量浇注5组 $\Phi 30$ mm的试棒进行化学成分和力学性能检测，结果如表2所示。C含量分别为2.84%、2.93%、3.00%、3.13%、3.24%，Si含量基本保持在1.8%~2.0%范围，碳当量随之提高。大比例加入的废钢中Mn元素含量高，铁液中Mn含量达到1.0%~1.1%，较高的Mn含量有助于提高珠光体组织数量，获得更高的抗拉强度。由检测结果可以看出，合成铸铁中P、S有害元素含量极低， $P \leq 0.04\%$ ， $S \leq 0.02\%$ 。P元素虽然能提高铁液流动性，但含量过高会在晶粒边界上形成磷共晶，导致铸铁的强度和塑性下降，使铸件疏松、缩孔及开裂倾向增加。一般认为S元素为有害元素，一定含量的S能改善石墨形态，并细化共晶团，使石墨长度变短，端部变纯，形态变得弯曲，能提高灰铸铁的性能^[9]。但是合成铸铁中Mn含量高，为防止与S元素形成MnS夹渣，不加硫铁增硫。

2.2 碳当量与力学性能关系

从表2可以看出，随碳当量的升高，抗拉强度

表1 原材料化学成分
Table 1 Chemical composition of raw materials

材料	C	Si	Mn	P	S	$w_B / \%$
废钢	0.20	0.30	0.7~1.0	0.04	0.04	
石墨增碳剂	≥ 95	-	-	-	≤ 0.20	
生铁	4.2	1.2	0.42	0.035	0.035	
回炉料	3.1	1.8	0.8	0.07	0.05	
孕育剂	0.1	74~80	0.4	0.035	0.02	

表2 化学成分与力学性能检测结果
Table 2 Testing results of chemical composition and mechanical properties

序号	化学成分					$w_B / \%$	力学性能	
	C	Si	Mn	P	S		抗拉强度/MPa	硬度平均值HBW
1	2.84	1.93	1.02	0.021	0.016	3.48	375	222
2	2.93	1.82	1.03	0.038	0.016	3.54	360	211
3	3.00	1.89	1.04	0.013	0.010	3.63	325	209
4	3.13	1.86	1.09	0.012	0.010	3.75	308	205
5	3.24	1.96	1.00	0.032	0.007	3.89	285	204

下降明显。碳当量为3.48%时,抗拉强度最高能达到375 MPa,即能达到HT350级别牌号性能要求,随着碳当量升高到3.89%时也能满足HT250级别牌号要求,抗拉强度性能十分优异。硬度随碳当量升高而降低,但总体变化幅度不大,机加工性能良好。

2.3 微观组织分析

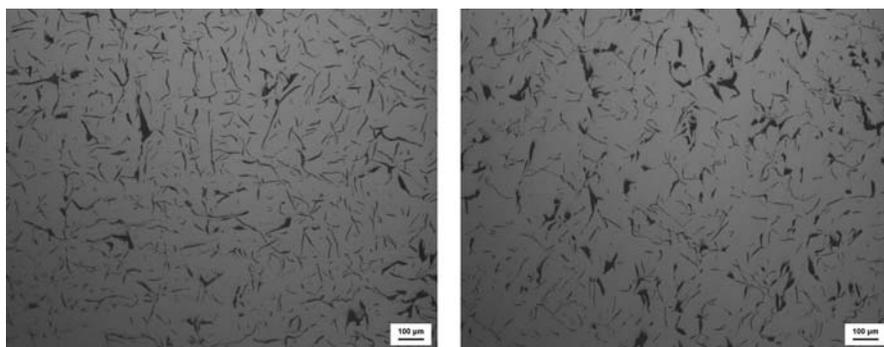
为了分析低碳当量、非合金高强度合成铸铁的微观组织与力学性能之间的关系,选择碳当量为3.48%和3.89%的样品进行金相检测,其金相照片如图1所示。从图中可以看出,合成铸铁的石墨形态均匀且呈无方向性分布,全部为A型石墨,由于铁液过冷度小,无D、E型过冷石墨的生成,石墨长度为3~4级,珠光体数量为98%,无碳化物、磷共晶。这是由于冶炼过程中使用大量的增碳剂进行增碳,在铁液中形成大量的石墨的非均质晶核,石墨形核数量多,通过多次孕育也能促进形核、细化石墨,因此形成大量细小弥散的A型石墨。碳当量为3.48%时石墨形态基本都为细小的A型石墨,对基体组织的割裂作用小,随着碳含量增加,碳当量达到3.89%时出现较多粗大的A型石墨,对基体

产生较大割裂作用,因此其抗拉强度较低。

合成铸铁存在大量的高碳和低碳微区,高碳微区提高了铸铁的形核能力,而大量的低碳微区则使合成铸铁在不加或少加促使奥氏体形成的合金元素的情况下,自身具有较普通灰铁大得多的形成奥氏体的能力,从而增加了珠光体的数量,使基体得以强化。因此低碳当量、非合金合成铸铁具有很好的力学性能。

2.4 铸造质量控制

采用合成铸铁方法,大比例废钢的加入增加了铸造收缩率,铸件容易出现裂纹,造成产品报废。我公司生产厚大断面皮带轮产品(最大壁厚处为100 mm)时,12件产品中9件出现不同程度裂纹。本研究采用Magma软件对铸造工艺进行模拟,根据现场实际情况设定相关参数,分析了浇注温度分别为1 300 ℃、1 330 ℃、1 360 ℃、1 390 ℃条件下热裂倾向,其结果如图2所示。从图中可以看出,随着浇注温度的提高,铸件表面热裂倾向增大,浇注温度为1 300 ℃和1 330 ℃时裂纹倾向相对较小,浇注温度为1 390 ℃时出现裂纹的可能性最高。热裂区域主要位于铸件圆角与壁厚

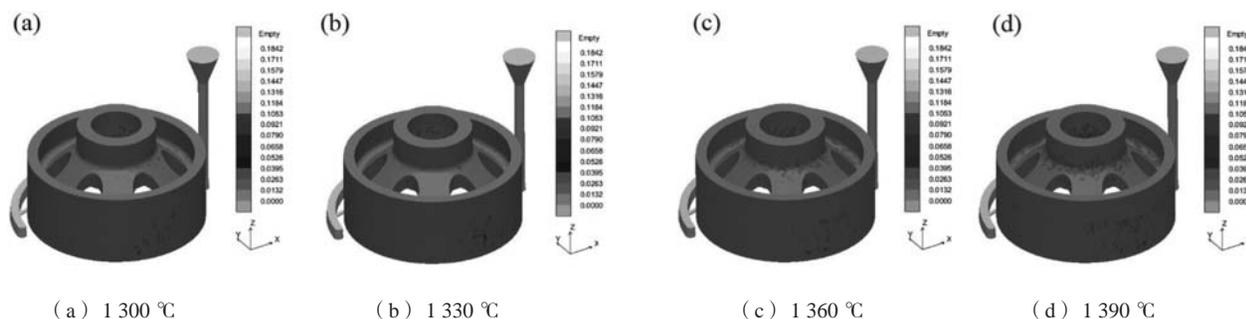


(a) 碳当量CE=3.48%

(b) 碳当量CE=3.89%

图1 不同碳当量合成铸铁金相照片

Fig. 1 Metallographic photographs of synthetic cast iron with different carbon equivalents



(a) 1 300 ℃

(b) 1 330 ℃

(c) 1 360 ℃

(d) 1 390 ℃

图2 浇注温度对热裂倾向的影响

Fig. 2 Effect of pouring temperature on tendency of hot tearing

过渡区域,这与实际生产情况相符合。原出炉温度为1 480~1 500℃,根据现场实际测量浇注温度约为1 380~1 400℃,实际裂纹出现最多的位置也为铸件圆角与壁厚过渡区域,如图3所示。根据模拟结果,在冶炼皮带轮类厚大断面铸件时,浇注温度降低至1 320~1 340℃进行浇注,后续产品无一出现质量问题。合成铸铁的浇注温度按表3执行。

3 经济效益分析

采用合成铸铁熔炼方法生产的高强度铸铁具有十分明显的经济效益,主要体现在原料结构和类型发生变化,在不考虑动能、辅料、人力、加工等成本时,对比了普通铸铁和低碳当量、非合金合成铸铁两种方法主要原料冶炼成本如表4所示。可见,传统生铁熔炼方法时,主要原料成本约为3 334元/t,而合成铸铁方法采用废钢和增碳剂代替昂贵的生铁,同时可不加合金,冶炼成本约2 427.5元/t,降低冶炼成本906.5元/t,具有十分明显的经济优势。本研究自试制成功以来已累计生产约200 t合成铸铁,节约生产成本约18.13万元。



图3 皮带轮出现裂纹位置

Fig. 3 Crack location of belt wheel

表3 合成铸铁的浇注温度

Table 3 Pouring temperature of synthetic cast iron

壁厚/mm	出炉温度/℃	浇注温度/℃
≤20	1 480~1 500	1 380~1 400
20~40	1 440~1 480	1 340~1 380
≥40	1 420~1 440	1 320~1 340

表4 两种熔炼方法主要原料成本对比

Table 4 Comparison of primary metallic material expenses between synthetic cast iron and common cast iron

材料	原料	吨铁液消耗量/kg	单价/元	总价/元	费用合计/元
普通铸铁	回炉料	200	1.6	320	3 334
	废钢	200	2	400	
	生铁	600	3.665	2 199	
	锰铁	10	9.5	95	
	纯铜	5	50	250	
	孕育剂	7	10	70	
合成铸铁	回炉料	100	1.6	160	2 427.5
	废钢	900	2	1 800	
	增碳剂	35	7.5	262.5	
	孕育剂	20.5	10	205	

4 结论

(1) 随着碳当量降低,抗拉强度升高。当碳当量为3.54%时,抗拉强度最高能达到375 MPa。硬度随碳当量升高而降低,但总体变化幅度不大,机加工性能良好。

(2) 合成铸铁的石墨形态均匀且呈无方向性分布,全部为A型石墨,石墨长度为3~4级,珠光体数量为98%,无碳化物、磷共晶。碳当量越低,石墨形态越

细小,对基体的割裂作用降低,抗拉强度随之提高。

(3) Magma软件模拟分析表明,随着浇注温度的提高,铸件表面热裂倾向随之增大,热裂区域主要位于铸件圆角与壁厚过渡区域,与实际情况相符合,对于厚大断面铸件应当相应降低浇注温度。

(4) 采用合成铸铁的熔炼方法,生产的低碳当量、非合金高强度铸铁具有十分明显经济效益,每吨铸铁件可降低成本约906.5元。

参考文献:

- [1] 司乃潮, 张芳芳, 姜金文. 合成铸铁工艺的试验研究 [J]. 铸造, 2006, 55 (8): 799-802.
- [2] 叶天汉, 陈翌庆, 苏勇, 等. 合成铸铁生产缸体铸件的工艺技术 [J]. 铸造设备与工艺, 2010 (4): 21-23.
- [3] 林浩, 郭学锋, 徐春杰, 等. HT300 合成铸铁力学性能及断裂特征 [J]. 铸造, 2010 (9): 947-950.
- [4] 高洁, 焦有生, 解卫红, 等. 高强度合成铸铁微观组织分析 [J]. 热加工工艺, 2009, 38 (7): 47-49.
- [5] 王顺安, 邹荣剑. 合成铸铁的研究及应用 [J]. 铸造, 2010 (7): 721-724.
- [6] 刘振一, 刘增良, 冯淑花. 合成铸铁在发动机高强度铸铁件生产中的应用 [J]. 铸造技术, 2013 (2): 240-242.
- [7] 刘继波, 房夺, 杨淑欣, 等. 高强度灰铸铁的生产工艺研究 [J]. 铸造设备与工艺, 2017 (3): 11-12.
- [8] 齐笑冰, 董峰, 王鹏华, 等. 碳当量和硅碳比对灰铸铁力学性能的影响 [J]. 铸造, 2014 (12): 1287-1289.
- [9] 盖志宏, 刘全荣, 孙新明. HT350高牌号合成铸铁的工艺实践 [J]. 铸造, 2019 (2): 67-70.
- [10] 岳海, 赵超云. 中频炉熔炼高强度灰铸铁A形石墨的控制 [J]. 铸造设备与工艺, 2013 (2): 42-44.

Effect of Carbon Equivalent on Mechanical Properties of Synthetic Cast Iron

CAO Kun^{1,2}, ZHAO Zi-wen^{1,2}, QI Qing-hua^{1,2}, MA Sheng^{1,2}, HU Ke-chao², CAO Yong-jun³

(1. Lanzhou LS Energy Equipment Engineering Institute Co., Ltd., Lanzhou 730314, Gansu, China; 2. Gansu Engineering Research Center for High-End Forging and Casting, Lanzhou 730314, Gansu, China; 3. Lanzhou Lanshi Group, Lanzhou 730314, Gansu, China.)

Abstract:

The effect of different carbon equivalents on the microstructure and mechanical properties of synthetic cast iron was studied by use of melting method of synthetic cast iron. The results show that with the decrease of carbon equivalent, the graphite flakes become finer, therefore, their splitting effect on the matrix decreases, and the tensile strength increases accordingly. Based on the numerical simulation results of the casting process that was carried out by using Magma software, reasonable pouring temperature was obtained and the shrinkage cavity and crack defects were eliminated. Finally, low cost and high strength synthetic cast iron was obtained through multiple inoculations that can improve graphite morphology and without adding alloying elements.

Key words:

synthetic cast iron; carbon equivalent; mechanical properties; Magma
