

高韧性等温淬火球墨铸铁的生产工艺及力学性能

龚文邦, 陈立亮, 刘瑞祥, 郝 静

(华中科技大学材料科学与工程学院, 湖北武汉 430074)

摘 要: 为了稳定某高韧性等温淬火球墨铸铁(ADI)铸件的生产,对其进行了化学成分设计,加入铜、钼、镍等元素进行适当的合金化,铸造球铁毛坯,然后采用在 880~920 °C 奥氏体化、350~370 °C 等温淬火工艺进行热处理,对其性能进行了测试。结果表明:试样的抗拉强度在 908~1 054 MPa 时,平均伸长率达 11.8%,冲击功 136 J,屈服强度 744 MPa,布氏硬度 271 HB,其力学性能指标明显优于欧盟 ADI 标准值;同时发现合金化高韧性 ADI 铸件的力学性能不遵循欧盟 ADI 标准 EN1564 中抗拉强度与伸长率、冲击功、屈服强度、布氏硬度之间的变化规律。

关键词: 合金化; 高韧性; 等温淬火球墨铸铁; 力学性能

中图分类号: TG255

文献标识码: A

文章编号: 1000-3738(2007)08-0051-03

Production Technics and Mechanical Properties of High Toughness Austempered Ductile Iron

GONG Wen-bang, CHEN Li-liang, LIU Rui-xiang, HAO Jing

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to produce high toughness austempered ductile iron (ADI), the influence of chemical composition and heat treatment was studied. The chemical composition of the iron was designed by adding Cu, Mo, Ni. The high quality ductile iron roughcast was made by casting. The heat treatment was performed at austenitizing temperatures of 880 - 920 °C and then at austempered temperatures 350 - 370 °C. The mechanical properties of the high toughness ADI sample are tensile strength 908 - 1 054 MPa, average elongation 11.8%, impact resistance 136 J, yield strength 744 MPa, and Brinell hardness 271 HB. The mechanical properties of the produced high toughness ADI excel the European Community ADI standard, but do not comply with the principle of the change between tensile strength and elongation, impact resistance, yield strength, Brinell hardness in ADI Standard EN1564.

Key words: alloying; high toughness; austempered ductile iron; mechanical property

0 引 言

等温淬火球墨铸铁(ADI)由于具有很高的强度和优异的综合力学性能,已成为颇受关注的热点材料之一。在过去十多年间,欧美发达国家该材料的用量以每年 15% 的速度快速增长,预计今后增长速度更快^[1];主要应用在汽车、铁路、工程机械、农机等方面^[2]。许多国家已制定了 ADI 标准,但如何稳定批量生产高性能 ADI 铸件,尤其是高韧性 ADI 铸件,仍然有许多技术及工艺方面的问题需要解决^[3]。

由于 ADI 的基体组织为针状铁素体(贝氏体)与残余奥氏体,针状组织有利于获得高强度,不利于获得高韧性,高碳稳定的残余奥氏体一般有利于提高韧性,但若奥氏体内及晶界存在较多的碳化物,又会降低韧性^[4-7]。因此,生产高韧性 ADI 的难度较大,对铸铁的化学成分及热处理工艺有严格要求。国内目前在 ADI 的研究方面,主要侧重于热处理工艺,而生铁等主要原材料的成分不稳定给优质铸件毛坯批量生产带来了很大的困难^[8],因此,一般只能试制出合格样品,而很难批量稳定生产高韧性 ADI 铸件。某外资公司 ADI 铸件产品,要求其力学性能为 σ_b 900 MPa, $\sigma_{0.2}$ 650 MPa, δ_5 9%, A_k 105 J,硬度为 269~321 HB;铸件质量约 30 kg,壁厚 10~65 mm,外形尺寸约为 580 mm × 430 mm × 120 mm;要求完全淬透,表面与芯部显微组织一致,为

收稿日期:2006-09-17;修订日期:2007-04-23

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划[2005 年]资助项目

作者简介:龚文邦(1965 -),男,湖南岳阳人,研究员,博士研究生。

导师:陈立亮教授

贝氏体(针状铁素体)+残余奥氏体+球状石墨。作者通过原材料的选用及对 ADI 铸件成分优化设计,生产出优质的球铁毛坯,并采用合适的热处理工艺,在国内现有原材料及生产设备的条件下,使 ADI 的综合力学性能得到大幅度提高,从而为稳定生产高品质的 ADI 铸件提供了依据。

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

ADI 成分设计选用低磷、硫、锰的生铁,其成分(质量分数/ %,下同)为 0.035P, 0.025S, 0.35Mn),配加少量铜、钼、镍等合金元素,设计的材料化学成分为 3.40~3.85C,2.30~2.90Si,0.10~0.50Mn, 0.038P, 0.015S,0.50~0.85Cu, 0.12~0.28Mo,0.60~0.85Ni。

采用中频感应电炉熔炼,粘土湿型砂造型,呋喃树脂砂芯。铁液出炉前采用自行配制的脱硫剂在包内进行脱硫及铁液净化处理,然后再将铁液倒入炉内调整温度。出炉温度控制在 1 470~1 490 。选用低稀土镁球化剂 FeSiMg8RE3 (2 %~4 %RE, 7 %~9 %Mg) 进行球化处理,加入量为 1.3 %~1.6 %;孕育剂 FeSi75,加入量为 1.2 %~1.6 %。球化处理时及时扒渣,防止回硫。

设计合理的铸造工艺。在浇注系统中用过滤网撇渣,设计明出气孔以利排出型腔中的气体,厚大部位用冷铁提高冷却速率,防止缩松。湿型砂造型应确保较高的铸型紧实度,且型砂的透气性要好。

球铁铸件的热处理工艺根据产品的质量、壁厚、化学成分和铸态组织而定。奥氏体化温度一般选用 880~920 ,保温时间 2~2.5 h;等温淬火温度为 350~370 ,等温时间 1~1.5 h。在铸件上取样进行各种性能试验。

1.2 试验方法

按照 GB 228 - 1978 用 WE-300 型万能材料试验机进行拉伸试验,试样尺寸 $\phi 12.7\text{ mm} \times 50\text{ mm}$;按照 GB 106 - 1980 用 JB-30B 冲击试验机进行冲击试验,试样尺寸 10 mm \times 10 mm \times 55 mm(无缺口);按照 GB 231 - 1984 用 HD-187.5 布洛维硬度计测试硬度;用 HIR-944B 型红外碳硫分析仪测定碳、硫含量;用 722 型分光光度计测定合金元素;用 Olympus A HM-L 型光学显微镜观察显微组织。

2 试验结果及分析

2.1 ADI 的力学性能标准

表 1 为欧盟标准化委员会制订的 EN1564 - 1997 标准中 ADI 的力学性能。可见随着抗拉强度 σ_b 的提高,屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 和硬度 H 相应提高,而伸长率 δ_5 和冲击功 A_k 相应降低。经分析,基本呈线性函数关系,通过回归计算,其拟合关系式为

$$\sigma_{0.2} = \sigma_b - 300 = 17.3 - 0.011 7 \sigma_b$$
$$A_k = 193.6 - 0.116 7 \sigma_b \quad H = 103.4 + 0.233 3 \sigma_b$$
$$\sigma_b = 748.6 + 0.25 \sigma_{0.2} + 1.07 HB - 21.37 A - 2.14 A_k$$

检测出试样的 σ_b 后,由上式可推算出 $\sigma_{0.2}$ 、 A_k 及 H ,而根据后者的检测数据可验算 σ_b 值。

表 1 EN1564 - 1997 标准中 ADI 的力学性能

Tab.1 Mechanical properties of ADI in EN1564 - 1997 Standard

牌号	σ_b / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	δ_5 / %	A_k / J	H / HB
EN-GJS-800-8	800	500	8	100	260~320
EN-GJS-1000-5	1000	700	5	80	300~360
EN-GJS-1200-2	1200	850	2	60	340~440
EN-GJS-1400-1	1400	1100	1	30	380~480

2.2 等温淬火参数的确定

获得优质铸件毛坯后,热处理决定了 ADI 的最终力学性能。由表 2 可见,化学成分相同的 ADI 试样,不同热处理参数所得力学性能差异极大。由此可确定获得高韧性 ADI 的热处理工艺参数为工件在 880~920 完全奥氏体化后,快速进入 350~370 盐液中等温淬火 1 h。

表 2 等温淬火参数对力学性能的影响

Tab.2 Influences of austempering parameters on mechanical properties

等温淬火时间 / h	等温淬火温度 /	抗拉强度 σ_b / MPa	伸长率 / %	硬度 / HB
1	310	1 283	6.5	321
	330	1 204	8.8	314
	350	1 078	11.7	293
	370	986	13.3	276
2	310	1 197	5.2	329
	330	1 103	6.8	307
	350	977	9.9	276
	370	908	12.7	272

2.3 试样力学性能

生产过程中抽检了 32 组试验数据,其范围及均值见表 3。其力学性能指标均能满足客户的要求;抗拉强度 σ_b 在 908~1 054 MPa 之间时,伸长率 δ_5 、冲击功 A_k 、屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 均明显高于 EN1564 标准,而硬度低于 EN1564 标准,这有利于机加工。并且

表 3 ADI 试样检测结果分布范围及均值
Tab.3 Range of measurement results of ADI casting

项目	b	0.2	A _k	硬度	化学成分(质量分数/ %)								
	/ MPa	/ MPa			/ %	/ J	/ HB	C	Si	Mn	P	S	Cu
最小值	908	660	9.1	105	253	3.40	2.30	0.12	0.02	0.004	0.50	0.11	0.67
最大值	1 054	858	16	175	302	3.90	2.95	0.25	0.038	0.016	0.85	0.26	0.83
平均值	967.5	744	11.8	136	271	3.65	2.55	0.16	0.027	0.011	0.78	0.16	0.74

该高韧性 ADI 铸件各项性能指标均优于 EN1564 标准值。最好的试样性能为 $b = 1\,054\text{ MPa}$, $0.2 = 744\text{ MPa}$, $= 15\%$ 。 $A_k = 164\text{ J}$, 硬度 268 HB。

由图 1 可见, 0.2 、 H 、 A_k 的值随 b 提高的变化规律与 EN1564 标准不同, 0.2 、 H 在 b 提高时变化不大, A_k 值略有提高;这主要是由于合金元素

的强化作用、铁液净化处理对铸件内在质量的改善及合适的热处理工艺综合作用的结果。这一规律有利于指导高韧性 ADI 铸件的生产。

以上说明在铁液中合理添加适量合金元素和铁液净化处理可以有效改善铸件的力学性能,再通过适当的热处理工艺,能稳定获得高韧性 ADI 铸件。

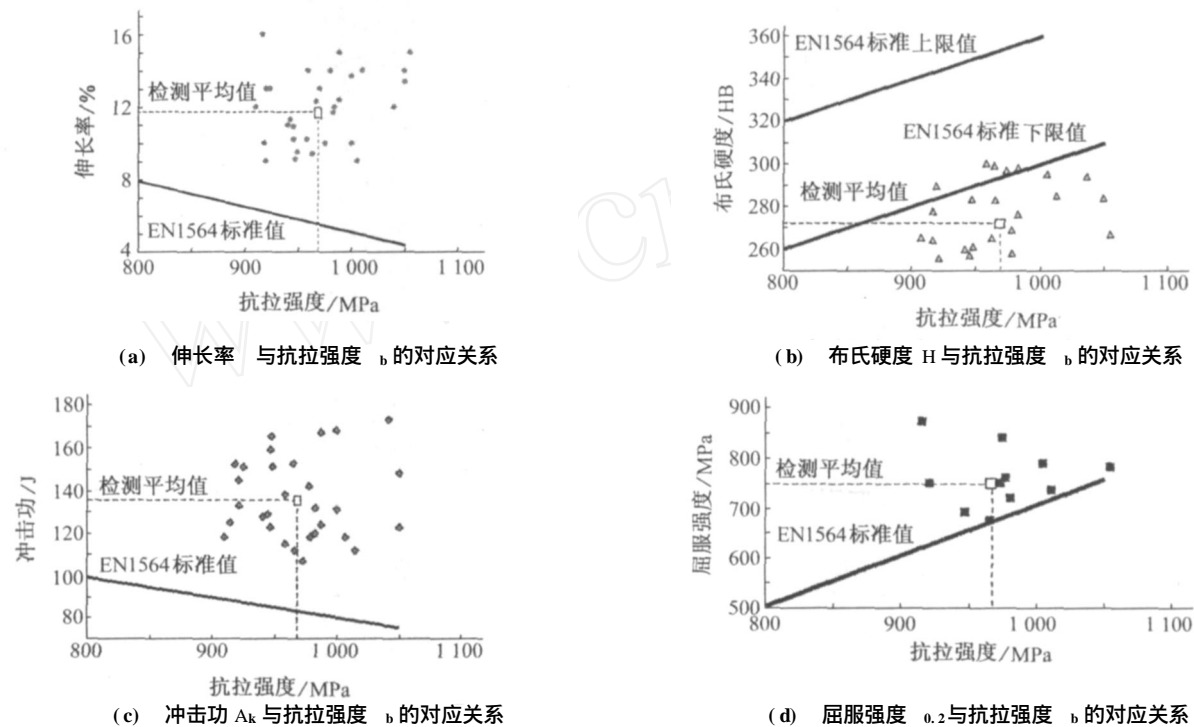


图 1 力学性能测量值及 EN1564 标准值的对应关系
Fig.1 Relationship between value of test and value of EN1564 standard on mechanical properties

3 结 论

(1) 合金化高韧性 ADI 铸件的力学性能与常规 ADI 铸件不同,其伸长率、冲击功 A_k 、屈服强度 0.2 、硬度 H 在一定范围内随抗拉强度 b 的提高而变化不大,这一变化规律明显不同于 EN1564 标准;这有利于指导稳定生产高韧性 ADI 铸件。

(2) 设计适当的化学成分,添加少量的铜、钼、镍等合金元素,采取合适的熔炼、球化孕育处理、铁液净化处理工艺,可生产出优质的球铁毛坯,并进行合理的等温淬火热处理(等温淬火温度为 $350 \sim 370$,等温时间 $1 \sim 1.5\text{ h}$),可获得综合力学性能优异

的高韧性 ADI 件。当抗拉强度控制在 $908 \sim 1\,054\text{ MPa}$ 时,平均伸长率可达 11.8% ,冲击功 136 J ,屈服强度 744 MPa ,布氏硬度 271 HB ,其力学性能指标明显优于欧盟 ADI 标准值。

参考文献:

[1] 曾艺成,李克锐,张忠仇. 我国等温淬火球铁(ADI)生产应用及发展前景[C]// 第四届全国等温淬火球铁(ADI)技术研讨会论文集. 苏州:2006:1 - 6.

[2] 刘金城. 关于奥贝球铁及其微观组织术语的探讨[J]. 现代铸铁,2001(1):9 - 12.

[3] 吴勇生. 原始组织对等温淬火后奥贝球铁组织与性能的影响[J]. 铸造,1998(3):18 - 22.

(下转第 69 页)

组织的可能性增大,特别是在批量生产时,零件尺寸的不均匀性、炉温的不均匀性、装炉量过大时,淬火后出现非淬火组织的可能性更大。从奥氏体形成动力学角度也不难理解,碳含量偏下限时,奥氏体形成前铁素体较多,渗碳体少,导致铁素体和渗碳体相界面减小,不利于奥氏体形核,因此需要通过提高淬火加热温度增加奥氏体形核动力,并更有利于奥氏体成分均匀化,对于消除组织中的带状组织和成分偏析也大有好处,在淬火冷却过程中可一定程度上抑制先共析铁素体析出,带状组织的消除和成分偏析的改善也一定程度上提高了零件的冲击韧度^[5]。从冲击吸收功随淬火加热温度提高而增加的结果来看,在实际热处理生产中,应当对原材质进行详细了解和掌握,对于碳含量在标定范围内偏上限、偏下限或适中,均应在热处理工艺制定时予以足够的重视并作出相应调整。

(2) 增大淬火冷却速率对于零件韧性的提高具有显著效果,特别是工艺 6,在其它力学性能达标的情况下,冲击吸收功达到 78 J,完全满足验收标准。一般情况下,增加冷却速率,工件的有效淬硬层增加,在取样部位得到的淬火组织就越理想,通过回火后得到的回火索氏体越细密。在通常的调质组织中,回火索氏体越细密(图 3),回火越充分,其冲击功越高。但增加冷却速率会带来组织转变应力的增加。所以,当零件表面和芯部实际冷却速率超过临界冷却速率,绕过 C 曲线鼻尖为界,就能够有效减少非淬火组织,此后,适当降低冷速可有效降低零件变形和开裂倾向^[6]。实践证明,水淬油冷的冷却方式能很好地满足这一

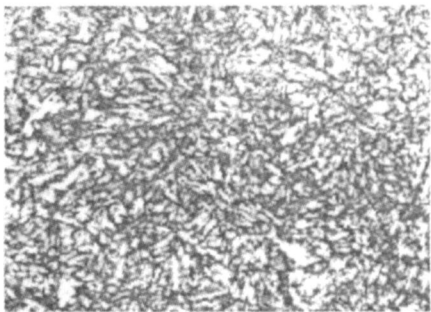


图 3 工艺 6 调质处理后的显微组织 500 ×
Fig. 3 Microscopic constitution after No. 6 plan modified treatment 500 ×

要求。

经过上述工艺试验,最终确定该批次 42CrMoA 钢减振器锻后调质工艺为淬火加热温度 870 ,保温 100 min 后水淬油冷,出水入油温度控制在 310 ,碱水清洗后入炉回火,在 560 回火 200 min 后空冷。将该批次减振器 300 件采用以上工艺处理后,产品检验一次合格,满足了生产要求。

3 结 论

为解决 42CrMoA 钢制机车减振器调质热处理后出现的韧性偏低的现象,对原热处理工艺进行改进,将淬火加热温度从 850 适当提高至 870 ,保温时间不变,采用水淬油冷方式取代原油冷的淬火方式,在保证其它性能的前提下可以大幅度提高零件冲击韧度,冲击吸收功达到 78 J,完全满足验收标准。

参考文献:

[1] 孙宝珍. 合金钢手册(下册). 第一分册[M]. 北京: 冶金工业出版社,1992.
[2] 束德林. 金属力学性能[M]. 北京: 机械工业出版社,1999.
[3] 王洪明. 结构钢手册[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社,1985.
[4] 王笑天. 金属材料学[M]. 北京: 机械工业出版社,1987.
[5] 夏立芳. 金属热处理工艺学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社,1996.
[6] 胡光立,谢希文. 钢的热处理[M]. 西安: 西北工业大学出版社,1993.

表 3 对比调质工艺试样的力学性能
Tab. 3 Mechanical properties of test sample after comparative modified treatment

工艺	硬度 / HB	抗拉强度 / MPa	屈服强度 / MPa	伸长率 / %	冲击吸收功 / J
1	258	903	765	23	28
2	267	942	784	19	34
3	275	950	805	18	38
4	284	963	812	18	41
5	296	986	834	17	66
6	301	1 020	890	14	78

(上接第 53 页)

[4] 刘金城,孙国雄. ADI 的冲击韧度和断裂韧度[J]. 现代铸铁, 2003(4): 1 - 6.
[5] 孙国雄,刘金城. ADI 的研究与应用[J]. 现代铸铁,2004(1): 1 - 8.
[6] Thomson R C, James J S, Putman D C. Modelling micro-structural evolution and mechanical properties of austempered

ductile iron[J]. Materials Science and Technology,2000,16: 1412 - 1419.
[7] Johansson M. New ADI production technology[C]// Proceeding of the 2002 World Conference on ADI. Louisville, Kentucky, USA :2002 :63 - 67.
[8] Moncada O J. Machinability of austempered ductile iron[J]. AFS Transaction,1988(10): 39 - 45.