



铸态下低温高韧性球墨铸铁件的研制

■ 刘光瑞, 杨永辉, 夏翠芹

摘要: 介绍了铸态下低温高韧性球墨铸铁件的研制要点, 分析了化学成分、组织等对性能的影响, 制订了合理的生产工艺, 生产实践证明达到了技术要求且有高的一致性。

随着我国经济的飞速发展以及国外高端铸件的引入和吸收, 各领域出现的高性能、高效率、高可靠性的设备对铸件的质量要求日益提高。由于低温冲击球墨铸铁材料在低温下具备较高的冲击韧度, 在风电、高铁等领域得到了广泛的应用。近年来这些领域不断发展, 行业内外对铸件的质量要求逐渐达成一致, 致力于发展-40℃甚至-50℃条件下的高韧性球墨铸铁, 铸件的质量优劣对设备的安全、质量、寿命有着决定性的影响。我公司是河南柴油机重工有限责任公司与上海711研究所合资组建的专业铸铁制造公司, 一直秉承把提高产品质量放在首位的原则, 把质量的稳定性与一致性作为管理的重中之重。我公司生产的齿轮箱体材料为EN GJS400-18LT, 属于典型的薄壁球墨铸铁壳类铸件, 其尺寸精度、重量、内部质量等要求非常高, 在铸造工艺方面存在一定难度, 铸态下达到-40℃冲击韧度更是难点中的难点。

1. 铸件要求

毛坯结构如图1所示, 材质为EN GJS-400-18LT, 重量260/280kg。技术要求见表1。

2. 影响因素

低温环境下服役的球墨铸铁的韧性受生产过程中很多因素的影响, 包括其化学成分、铸造工艺、熔炼、球化、孕育处理工艺及热处理制度等, 这些因素决定了铸件最终的组织和力学性能。

(1) 球墨铸铁组织对冲击韧度的影响 实际生产应用中, 在碳含量一定的情况下, 球化率和石墨球数对冲击性能影响显著, 其关系如图2、图3所示。同时, 圆整的石墨球可以改善球墨铸铁的冲击韧度, 而石墨体积分数增加或石墨球数增多均可使脆性转变温度下降, 并提高上限冲击吸收能量。因此, 在实际生产中必须严格控制球化处理和孕育工艺, 要控制原材料(生铁、废钢、回炉料等)中的微量元素含量, 特别是要限制反球化及干扰

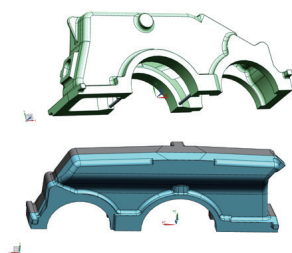


图 1

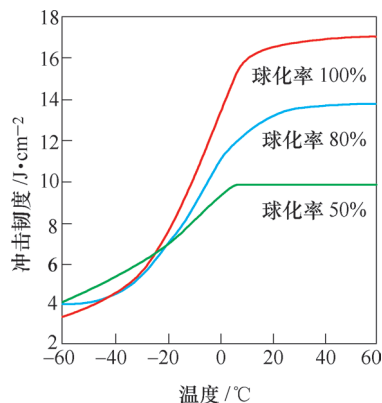


图2 球化率对冲击韧度的影响

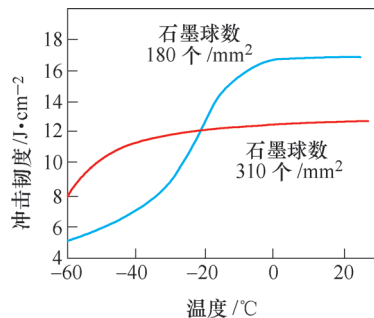


图3 石墨球数对冲击韧度的影响

元素的含量。图4显示球墨铸铁的基体组织对其冲击性能有明显的影响。由图4可知,随着珠光体体积分数的增加,冲击性能降低,因此要保证低温高韧性球墨铸铁为全铁素体基体。

(2) 球墨铸铁化学成分对冲击韧度的影响 在工艺条件一定的情况下,球墨铸铁的化学成分对组织会产生决定性的作用,从而决定其性能。C 对球墨铸铁V型缺口冲击性能的作用主要体现在对上限冲击吸收能量的影响,上限冲击吸收能量随球墨铸铁碳含量的增加而下降,原因在于球墨铸铁断裂是通过在石墨球上形成的空位及其聚集生长而进

行的,碳含量高会使墨球数增加及尺寸增大,因而空位生长及其聚集过程中的塑性形变降低,导致断裂过程塑性形变能减少,表现为上限冲击吸收能量的下降。但是,碳含量过低会使塑-脆转变温度区间向高温方向移动,反而影响低温冲击吸收能量。综合考虑碳含量,确定 $w_C = 3.70\% \sim 3.80\%$ 较为合适。

Si 对球墨铸铁冲击性能的影响有双重性。由于Si 强烈改变塑-脆性转变温度,要获得优越的低温韧性,需要尽可能降低球墨铸铁的Si量,但Si量减少,会降低铁素体球墨铸铁的抗拉强度和屈服强度。综合考虑, 确定 $w_{Si终}$

$= 1.80\% \sim 2.00\%$ 。
Mn 可增加偏析倾向,促进基体中碳化物和珠光体的形成,对韧性十分不利,尤其对低温球墨铸铁的冲击吸收能量有严重的损害,此外Mn量高还增加球墨铸铁退火处理的难度。因此需要限制Mn量,一般上限为 $w_{Mn} \leq 0.2\%$ 。

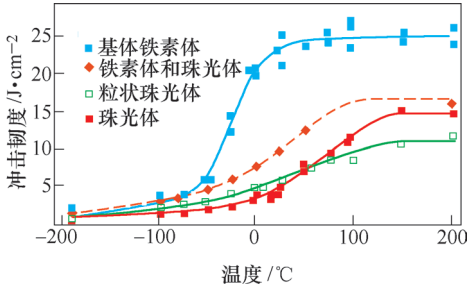


图4 基体组织对冲击韧度的影响

表1 铸件技术要求

检测项目		检验标准	质量水平	备注
化学成分		GB/T 223	分析元素至少包括C、Si、Mn、P、S、Mg 等主要元素	光谱
力学性能	抗拉强度/MPa	NF EN 10002-1	≥ 400	单铸试块, 如检验本体, 最小抗拉强度允许降低10%, 最小伸长率不变
	屈服强度/MPa	NF EN 10002-1	≥ 240	
	断后伸长率 (%)	NF EN 10002-1	≥ 18	
	硬度 HBW	EN ISO 6506-1	$\triangle \leq 30$	—
	夏比V型缺口冲击吸收能量/J	EN 10002-1	-40℃时, $\geq 9J$ 三次平均值 ≥ 12	—
微观检验	—	NF EN ISO945	石墨形态:VI	—
		NF EN ISO945	球化率 $\geq 85\%$	最低球化2级
		NF EN ISO945	尺寸:5~6	—
		NF EN ISO945	铁素体基体	
		NF EN ISO945	无碳化物	
磁粉无损检测	Z区	NF EN 1369+ 7.3 段	LM1a/AM1a-SM1a	首件和批产后每生产50件检验
	其他区域		LM3a/AM3a-SM3a	
X射线无损检测	R区	ASTM E94	A和B类为3级, C类为2级	不接受D、E、F、G类 灵敏度: 2%~5%, 黑度: 2~3.5,
	其他区域	ASTM E446-84	A, B, C类为4级	
几何外形和尺寸		ISO 8062	CT11	未注尺寸公差
表面状况		MSS SP 55 NF EN 1370	2S1: 抛丸表面 2S2: 打磨表面	—
标识		标识技术规范	标识清晰可辨	—
渗透检验		渗漏试验规范	不允许漏油	煤油常压

S、P均为有害元素，P既显著升高塑-脆性转变温度，又强烈降低球墨铸铁的上限冲击吸收能量。为此，降低P量是生产低温高韧性球墨铸铁的关键因素之一，因此需要限制 w_S 、 w_P 量，一般上限均为0.02%。

Ni可以作为低温球墨铸铁的铁素体强化元素， $w_{Ni}=0.4\% \sim 0.6\%$ 较为合适。

3. 熔炼工艺的设计

(1) 原材料的选用 生铁选用高纯生铁，其化学成分为： $w_{Si} < 0.4\%$ 、 $w_{Mn} < 0.2\%$ 、 $w_P < 0.03\%$ 、 $w_S < 0.02\%$ ，其他有害元素总量（质量分数）不超过0.2%，其中包括球化干扰元素（Ti、As、V、Sb、Bi）和促进碳化物生成元素（Cr、W、Pb、Sn）。

废钢为优质碳素废钢，主要是冲压的边角料压块。

(2) 铁液化学成分的选择 见表2。

(3) 球化及孕育处理 1t球化包，球化温度控制在1450~1480℃，三明治冲入法处理，球化剂选用Lamet5841，粒度4~25mm，加入量为1.2%~1.4%。其上覆盖0.6%高钙钡孕育剂，粒度3~8mm。再覆盖部分除过油的铸铁屑，球化完毕，扒净熔渣。浇注温度控制在1360~1380℃，随流瞬时孕育采用粒度0.2~0.7mm随流孕育剂，加入量0.1%。

4. 生产实践

5t/h中频感应电炉熔炼20炉次的控制结果见表3。

表 2 (%)

材料牌号	原铁液化学成分（质量分数）						孕育剂量	球化剂量
	C	Si	Mn	P	S	Ni		
EN GJS-400-18-LT	3.7~3.8	1.0~1.1	0.1~0.15	<0.04	<0.02	0.4~0.6	0.4~0.8	1.2~1.4

表3 生产控制结果

序号	控制项目	控制范围	实际控制值
1	原材料	采用高纯生铁 采用优质低碳废钢 回炉料按成分分类 回炉料全部抛丸清理	$w_P < 0.02\%$ 、 $w_S < 0.02\%$ 、 $w_{Mn} < 0.2\%$ 、 $w_{Ti} < 0.03\%$ 11种微量元素<0.03%
2	出炉温度/℃	1480~1520	1485~1510
3	化学成分（质量分数，%）	原铁液C	3.70~3.80
		原铁液S	<0.02
		球化后Si	<2.0
		球化后Mn	<0.2
		球化后P	<0.03
		Mg _残	<0.06
		RE _残	<0.01
4	球化时间/s	60~80	100%达到
5	浇注温度/℃	1360~1380	1365~1378
6	浇注时间/s	30~45	32~44
7	力学性能	抗拉强度/MPa	≥400
		伸长率（%）	≥18
		-40℃冲击吸收功/J	≥12

5. 结语

(1) 高质量的原辅材料是生产高标准铸态下低温高韧性球墨铸铁件第一要素。

(2) 合理的化学成分是生产高标准铸态下低温高韧性球墨铸铁件第二要素，其中的Si又是关键中的关键。

(3) 二次孕育是生产高标准铸态下低温高韧性球墨铸铁件第三要素。

(4) 满足以上三个要素再配以合理的铸造工艺即可高一致性地生产高标准铸态下低温高韧性球墨铸铁件。

作者简介：刘光瑞、杨永辉，洛阳河柴齐耀铸造有限公司。
夏翠芹，中国一拖集团有限公司拖拉机学院。

MW 20151026