

大型风力发电机组用风电铸件国家标准的制订和制造技术

俞旭如

(无锡一汽铸造有限公司,江苏 无锡 214174)

摘要:笔者结合由其公司牵头制订国家标准《风力发电机组球墨铸铁件》的情况,介绍了大型风力发电机组用风电铸件的技术要求和国家标准的主要内容。同时介绍了多年研究和生产大型风力发电机组轮毂、底座(主框架)、轴承座等主要件的经验和生产技术要求要点。

关键词:风电铸件;国家标准;技术要求

风能是除水电外最有前途的可再生能源,国外已成功应用,近年来我国正在大力发展。国内风力发电自2005年开始逐渐升温,现已进入批量制造阶段,主要为MW级风力发电机,单台功率为1~3 MW。

本公司自1997年以来就开始研发和生产大型风力发电机组用铸件,是国内较早开发和生产风力发电机组用铸件的单位之一。目前主要为国际前五大风力发电机组制造商中Vestas、GE、Gamesa等提供铸件,前几年也为Suzlon和国内大连华锐、金风等风力发电机组制造商大批提供风电铸件。

大型风力发电机组用风电铸件主要有轮毂、底座(机舱座)、轴、轴承座、齿轮箱箱体等,轮毂、底座(机舱座)材料大部分采用EN1563标准的EN-GJS-400-18U-LT和EN-GJS-350-22U-LT,相当于GB/T 1348标准中的QT400-18AL和QT350-22AL。对1~3 MW风力发电机,轮毂铸件单件重量一般为10~18 t。

50 mm,材料牌号为HT250,树脂砂组芯地坑造型共22个芯子。双直浇口 $\phi 85$ mm(其中一端两层浇注);浇注温度1 330~1 360 °C;冷却时间90 h;铸造缩尺0.8%。

工艺特点:(1)床身长7 000 mm,宽高小,必须留出反变型量(挠度)。(2)组芯造型两侧面留出余量(变窄),下箱留出分型负数,还要考虑工艺补正量。(3)床身导轨面不允许有铸造缺陷。(4)打箱后铸件要根据变型大小方向,乘热态摆放,保证床身平直状态。

1 风电铸件技术难点和主要缺陷的危害

1.1 风电铸件特点

(1)部件工作条件恶劣。工作温度低,零件安装在几十米甚至百米高空,有些地区工作温度在-20 °C到-40 °C。工作时风速变化大。

(2)可靠性要求高。部件必须保证20年不更换,如发生意外失效,则更换费用巨大,加上故障引起的不能发电,损失将更大。

(3)材料性能要求高。要求在-20 °C或-40 °C时的低温冲击值和无损探伤,无损探伤要求标准严格的超声波无损探伤和磁粉无损探伤。

1.2 技术难点

(1)铸件致密性达到超声波无损探伤要求。由于球铁凝固特性,易产生缩松,严重降低铸件的强度和韧性。

(2)铸件纯净度达到磁粉无损探伤要求。因为球铁中要加入Mg和RE,因而易产生渣;渣为产生

4 结论

(1)生产大型铸铁件必须在充分考虑铸造方案的基础上选择合适的熔炉和起重设备,严防增大投资成本,加重企业负担。

(2)大型球墨铸铁件是发展方向,但大断面、大吨位球墨铸铁件的铸造技术和工艺方面,还有很多难点需要攻克。

(3)大型铸件“废不起”,要加大CAD/CAE技术运用,这是不断改进和提高铸件质量的重要保证。

裂纹的源泉,必须控制在要求范围内。

(3) 厚大断面球铁石墨畸变问题。大型风力发电机组用轮毂和底座等球铁铸件厚大断面石墨易畸变,使保证铸件本体材料性能难度增加。

(4) 工艺必须兼顾材料的各力学性能,以力争同时达到要求。强度(抗拉强度、屈服强度、疲劳强度)与低温冲击值在一般情况下是负相关关系,还有伸长率的特殊要求等。

1.3 风电铸件的主要缺陷和危害

除铸件常规缺陷外,风电铸件主要有缩松和夹渣、石墨畸变缺陷。据资料介绍,石墨畸变使疲劳强度下降 20%~30%,缩松使疲劳强度下降 40%~50%,夹渣使疲劳强度下降 60%~70%。

2 国家标准《风力发电机组 球墨铸铁件》的制订

2.1 制订过程

在 2005 年全国风力机械协会年会上,我们提出了制订中国风电铸件标准的必要性和充分性;2006 年完成了风电铸件标准的建议稿和立项建议,2006 年底科技部将风电铸件标准等风力机械方面标准正式列项,委托全国风力机械标准化技术委员会组织制订;全国风力机械标准化技术委员会于 2007 年 2 月发文委托本公司作为第一起草单位进行起草,本公司是铸造标准化技术委员会铸铁标准化技术分会的委员单位,我们联合了铸造标准化技术委员会、国内风力发电机组主要整机厂、以及风电铸件生产厂进行起草;2008 年 6 月召开了研讨会,参加单位有组织单位、起草单位、认证机构、风力发电机组整机生产厂、与铸件有关的风力发电机部件厂、风电铸件生产厂和无损检测专家等,研讨会由广泛的相关各方组成的 19 家单位 32 位代表参加,对起草的《风力发电机组 球墨铸铁件》进行了全面的讨论;2008 年 8 月在全国风电行业中征求意见;2008 年 12 月全国风力机械标准化技术委员会召开了标准审定会,一致通过,已上报审批,近期即将颁布实施。

2.2 制订风电铸件标准的作用和意义

(1) 原风电铸件一般采用国外标准,不利于国产化,不利于各风力发电机生产厂确定技术要求。国内有风力发电整机制造商 50 多家,对铸件技术

要求不很熟悉和重视。

(2) 风电铸件主要采用球墨铸铁,国家标准 GB/T 1348-1988《球墨铸铁件》与国际上风电铸件所采用的 EN1563 标准有较大的差距:

① GB/T 1348-1988《球墨铸铁件》标准中材料牌号只有 -20℃ 冲击值要求的 QT400-18AL,而无 -40℃ 冲击值要求的 QT350-22AL。而在北方地区,风力发电机的工作环境温度经常会达到 -40℃。长远地看,随着国内风力发电机的发展,在不远的将来,我国的风力发电机会出口到欧美市场,其中会有相当数量的 -40℃ 冲击值要求的球墨铸铁。

② 风电铸件国外标准低温冲击值为 -20℃ 下 V 型冲击值,单位为 J;而我国 GB1348-1988 低温冲击值为 -20℃ 下 V 型冲击韧度,单位为 J/cm²,由于冲断处面积为 0.8 cm²,所以我国标准在低温冲击值方面要求值仅为国外标准的 80%。

③ 由于 QT400-18AL 低温冲击值的要求,抗拉强度应比无低温冲击值要求的 QT400-18A 要低些,而我国标准仍为一样。

④ 在球化率方面,风电铸件国外标准要求达 90%(按 ISO 945 标准评判,相当于我国 GB/T 9441 标准的 80%),而我国为 70%(按 GB/T 9441 标准评判)。

(3) 风电铸件国内无合适的无损探伤标准,国内超声波无损探伤标准在铸件上只有二个标准:《JB/T 5439-1991 压缩机球墨铸件零件的超声波探伤》和《GB/T 7233-87 铸钢件超声波探伤及质量评级标准》,这些与国外常用的风电铸件超声波探伤标准 EN 12680-3 有较大的差距,不适用于风电铸件。

2.3 国家标准《风力发电机组 球墨铸铁件》的编制原则

标准等效采用欧洲标准和各风力发电机组制造商的先进技术要求,内容主要包括球墨铸铁材质要求和无损检测(超声波探伤和磁粉探伤)要求,另包括尺寸和外观质量等方面的要求。作为特殊要求,允许供需双方商定特殊技术指标并在标准中注明,供对铸铁相对不熟悉的风力发电机组制造商参考。

2.3.1 材质标准

球墨铸铁件材质标准有 ISO1083、EN 1563 和 ASTM A536 等,但包括美国 GE 在内的国内外风力

发电机组生产商都采用 EN 1563 标准,现国内引进国外技术的风力发电机组生产商都采用 EN 1563,国内自主开发的风力发电机组采用 GB/T 1348-1988,GB/T 1348-1988 低于 EN 1563 的要求。为保证风力发电机组球墨铸铁件材质要求达到国际先进水平,保证风力发电机组运行的可靠性,同时为保持与国外引进技术的接轨,本标准等效采用 EN1563 标准,同时推荐高于 EN 1563 标准的特殊性能要求由供需双方商定时选用。

材质标准相关的金相检验标准方面,欧洲各国广泛采用 ISO 945,日本采用 ISO 945,美国有采用 ASTM A247,也采用 ISO 945,ASTM A247 和 ISO945 分类顺序有所不同,但技术要求是一致的,在风力发电用铸件方面基本采用 ISO 945。本标准等效采用 ISO 945。

2.3.2 超声波检测标准

包括美国 GE 在内的国内外风力发电机组生产商都采用 EN12680-3 标准,本标准等效采用 EN12680-3。

2.3.3 磁粉检测标准

包括美国 GE 在内的国内外风力发电机组生产商都采用 EN1369 标准,本标准等效采用 EN1369。

3 风电铸件的主要技术要求

3.1 材质性能

(1) 材质验收以附铸试块力学性能为主。球墨铸铁牌号按力学性能进行分类,从附铸试块上加工的试样测得的力学性能虽然并不能准确地反映铸件本体的力学性能,但与单铸试块上的试棒上测得的值相比更接近于铸件的实际情况,因此除轴承盖等铸件壁厚不超过 60 mm 的小件外,其它铸件均采用附铸试块。根据风力发电机组的使用要求,风力发电机组用球墨铸铁一般选用球墨铸铁中的三个牌号,其中按单铸试块的力学性能分为 2 个牌号,按附铸试块的力学性能分为 3 个牌号。

(2) 与 GB/T 1348-1988《球墨铸铁件》相比增加了-40℃低温冲击值要求的牌号 QT350-22AL。

(3) 与 EN1563 相比,对应各牌号列出了硬度值,并列出了适用件。

(4) 屈服强度与 QT400-18A 和 QT400-18 进行区分,分别对应于 EN1563 中的 EN-GJS-400-18U-LT、EN-GJS-400-18-LT、EN-GJS-400-18U-RT 和

EN-GJS-400-18-RT,与 EN1563 保持一致(见表 1)。

表 1 几种标准中的 QT400-18A 和 QT400-18 力学性能要求

标准	牌号	试块	抗拉强度	屈服强度	伸长率
			最小值 /MPa	最小值 /MPa	最小值 (%)
GB/T 1348-1988	QT400-18L	25 mm, Y	400	250	18
	QT400-18				
	QT400-18AL QT400-18A	70 mm, 附铸	370	240	12
EN 1563	EN-GJS-400-18-LT	25 mm, Y	400	240	18
	EN-GJS-400-18-RT	25 mm, Y	400	250	18
	EN-GJS-400-18U-LT	70 mm, 附铸	370	220	12
	EN-GJS-400-18U-RT	70 mm, 附铸	370	240	12
GB/T 1348-2008 审批稿	QT400-18L	25 mm, Y	400	240	18
	QT400-18R	25 mm, Y	400	250	18
	QT400-18AL	70 mm, 附铸	360	220	12
	QT400-18AR	70 mm, 附铸	370	240	12
本标准	QT400-18L	25 mm, Y	400	240	18
	QT400-18AL	70 mm, 附铸	370	220	12

事实上,由于 QT400-18AL 和 QT400-18L 有低温冲击值的要求,QT400-18A 和 QT400-18 无低温冲击值要求,成分也明显不同,因此这是二种不同牌号的球墨铸铁,QT400-18AL 和 QT400-18L 比 QT400-18A 和 QT400-18 的抗拉强度、屈服强度稍低。

(5) 低温冲击值。与 GB/T 1348-1988《球墨铸铁件》相比,将冲击初度 α_k 及其单位 J/cm² 改为冲击值 A_{kv} 及其单位 J,与 EN1563 相一致,将 GB/T 1348-1988 要求的低温冲击值要求提高了 25%。

与 GB/T 1348-1988《球墨铸铁件》相比,增加了的材料牌号 QT350-22AL 和 QT350-22L,其-40℃低温冲击值要求与 EN1563 一致。

3.2 球化率、球化级别和本体声速

(1) 球化率和球化级别

欧洲各国评定球化率广泛采用 ISO945。日本采用 ISO945; 美国有采用 ASTM A247,也有采用 ISO945、ASTM A247 和 ISO945,分类顺序有所不同,但技术要求是一致的。包括美国 GE 在内的国内外风力发电机组生产商都采用 ISO945,我国标准为 GB/T 9441,现用标准 1988 版,与 ISO945 有较大差别。现我国标准 GB/T 9441 正在修订成为 2008 版。本公司作为 GB/T 1348-2008《球墨铸铁件》和 GB/T 9441-2008《球墨铸铁金相》的参与起草和修订单位,河海大学作为铸造标准化委员会铸铁分委员会

主任单位在近期的 GB/T 1348-2008《球墨铸铁件》和 GB/T 9441-2008《球墨铸铁金相》修订过程中提出建议并被采纳。现 GB/T 9441 将等效采用 ISO945, 因此本标准现等效采用 ISO945。按 GB/T 9441-1988 国内一般要求球化级别不低于 4 级, 由于风力发电机组用球墨铸铁件质量要求高, 因此本标准要求球化率不低于 90%, 这与国外风力发电机组用球墨铸铁件的技术要求一致。

(2) 铸件本体声速

超声波声速能反映球化状况。球化越好, 超声波声速越高, 而且声速是全部壁厚的平均值, 反映了铸件由外到内的球化状况; 金相检测则是反映所观察截面的球化状况。因此, 对铸件本体进行超声波声速测定是有作用的。对于铸态铸件, 检测超声波声速必须控制在 5 550 m/s 以上。

3.3 基体组织

按风力发电机组用球墨铸铁件质量要求, 为保证低温冲击值和疲劳强度, 对铁素体型球墨铸铁要求其铁素体体积分数不低于 90%。事实上, 对铁素体型球墨铸铁, 当珠光体达 15% 左右时, 抗拉强度、伸长率和低温冲击值仍能达到要求, 但对疲劳强度有影响, 所以标准要求铁素体体积分数不低于 90%。对珠光体型球墨铸铁, 为保证抗拉强度, 珠光体体积分数不低于 90%。渗碳体和磷共晶对球墨铸铁的抗拉强度、伸长率、冲击值等都有较大的危害, 国外大部分客户要求控制在 1% 以下, 也有少数客户要求控制在 0.5% 以下, 但由于评判有一定的主观性, 且在抗拉强度、伸长率、冲击值方面会有所反映, 主要的还是看抗拉强度、伸长率、冲击值是否达到要求, 所以标准要求控制在 1% 以下。

3.4 特殊性能

由供需双方商定的特殊性能要求, 主要体现在下列几个方面:

(1) 在同等抗拉强度时达到更高的低温冲击值

或更低温的冲击功。如对 QT400-18AL 和 QT400-18L 在 70 mm 附铸试块上 -20 °C 低温冲击功要求达到平均 12 J 和单个 9 J, 或要求 -30 °C 或 -40 °C 低温冲击功达到平均 10 J 和单个 7 J。

(2) 同等低温冲击值时达到更高抗拉强度。如对 QT350-22AL 和 QT350-22L 保证 -40 °C 最小冲击功时适当提高强度, 要求抗拉强度达到 350 MPa (标准值为 320 MPa)。

(3) 更厚大试块上要求标准试块的抗拉强度值和低温冲击值。如国外有客户要求要求在 150 mm 厚附铸试块上达到 70 mm 附铸试块的要求值。

(4) 本体性能。有些客户在样品试制和批量生产时检测铸件的本体力学性能, 由于取样位置和铸件结构的不同, 铸件本体力学性能可能相差较大, 一般为相应附铸试块标准值的 90%~100%。一般情况下附铸试块的性能可代表材质性能, EN 1563 和 ISO 标准也未对本体性能明确要求, 为此本标准将本体性能作为特殊要求, 由供需双方商定, 未列出标准值或参考值。

根据我们的经验, 采用合理的工艺, 上述特殊性能是可以达到的。

3.5 无损检测要求

风电铸件无损探伤分两大类, 内部缺陷采用超声波探伤检测, 表面缺陷采用磁粉探伤检测。质量等级要求为重要区域 2 级, 一般区域 3 级。风力发电机组常用球墨铸铁件典型件不同区域质量等级要求在附录 A 中列出。根据设计要求最终由供需双方决定并在图纸或其它技术文件中标明。

(1) 超声波无损检测质量要求。体积反射类最大缺陷的尺寸不得超过表 2 的要求, 夹渣类最大缺陷的尺寸不得超过表 3 的要求。经供需双方协商一致, 可另行商定接受准则。

(2) 磁粉探伤缺陷要求。磁粉探伤检测质量等级要求为重要区域 2 级, 一般区域 3 级。

表 2 允许的最大缺陷显示尺寸-体积反射类

特 征	单位	质量等级											
		2			3			4			5		
受检区公称壁厚	mm	<50	50-200	>200	<50	50-200	>200	<50	50-200	>200	<50	≥50	
缺陷最大厚度占壁厚百分数	%	20	20	20	25	25	25	30	30	30	35	35	
边缘区中最大缺陷 a, b	mm ²	600	1 000	1 000	1 000	2 000	2 000						
中心区中的最大缺陷	mm ²	10 000	15 000	15 000	15 000	20 000	30 000	20 000					
缺陷的总面积占受检表面的百分比	%	10	15	15	15	20	20	15	20	30	30	40	

表3 缺陷的最大允许指示尺寸-夹渣

特征	质量等级			
	2	3	4	5
壁厚百分比(%)	10	15	20	25

检测部位按检测图或铸件浇注时易产生夹渣的铸件最上表面和坭芯形成的内腔下表面。如顾客有要求也可在加工后加工面上进行检测,质量要求等级按表4。

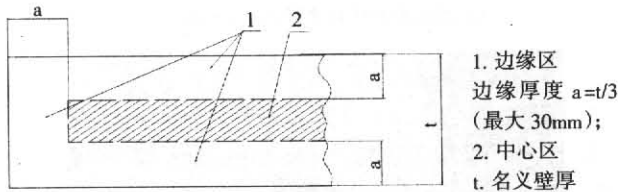


图1 铸件壁截面的边缘区和中心区划分 (机加工之后的尺寸)

表4 磁粉检测质量要求等级

缺陷类别	A区	B区
非线状缺陷 SM	SM2级	SM3级
线状缺陷 LM	LM2级	LM3级
排列缺陷 AM	AM2级	AM3级

注:非线状缺陷(SM):缺陷长度小于3倍宽度时的缺陷。

线状缺陷(LM):缺陷长度大于2mm,而且大于或等于3倍宽度时的缺陷。

排列缺陷(AM):如果在线状缺陷间的距离小于2mm或小于排列中最大线状缺陷时,就认为是同一个缺陷,其长度要等于排列的总长(所有缺陷长度加上间距长度)。

(3)无损检验人员资质。要求应由具备资格的人员来完成;检验人员的资质,应按照GB/T 9445规定的2级或以上的要求进行资质审查。

(4)对检测设备、环境等进行规定。

3.6 其它要求

(1)铸件尺寸公差和铸件重量公差。铸件尺寸公差与GB/T 1348一致,壁厚公差要求放宽1级。

对于轮毂件,为保证强度,一般壁厚采用尺寸正公差,有时由于设计时已考虑负公差的影响,因此有些不要求正公差,另由于铸件一般采用正负公差,因此规定“但应在相关技术要求或图纸中注明。如不注明则采用正负公差”。

(2)外观质量。为防止和减少应力,缺陷处要求打磨成圆弧R50~100,打磨深度不超过壁厚的5%。

(3)不允许焊补。

4 风电铸件制造技术

4.1 化学成分

球铁中主要成分为C、Si、Mn、P、S、RE、Mg。

(1)C和Si 一般球铁的 $w(C)$ 量为3.6%~3.9%, $w(Si)$ 量为1.8%~3.0%。断面大的取下限,断面小的取上限;强度要求高、伸长率要求低的取下限,强度要求低、伸长率要求高的取上限。根据大功率风力发电铸件壁厚较大,铸件强度要求不高,伸长率和低温冲击要求高,但要求经无损探伤缩松达到标准的特点,选取: $w(C)$ 量偏上限、 $w(Si)$ 量偏下限,这样 $w(C)$ 量高些可析出石墨并利用石墨自膨胀减少或清除缩松,另外 $w(Si)$ 量过高易引起脆性转变,导致低温冲击韧性下降,所以 $w(Si)$ 量不能太高。选取 $w(C)$ 在3.70%~3.85%、 $w(Si)$ 在1.8%~2.3%。

(2)Mn Mn是促进珠光体形成元素,它有助于提高强度,但同时使韧性下降,导致伸长率和低温冲击值下降。一般对于风力发电机类要求低温韧性的球铁来说,其金相组织中铁素体体积分数要求不低于90%,所以在保证抗拉强度和屈服强度的前提下,应降低 $w(Mn)$ 量。综合考虑, $w(Mn)$ 选定在0.10%~0.30%。

(3)P P在铸铁中为有害元素,形成二元或三元磷共晶,强烈降低风力发电铸件的低温冲击韧性和伸长率,因此是须主要控制的有害元素,要求 $w(P)$ 控制在0.040%以下。

(4)S S一般是铸铁中的有害元素,对球铁尤为有害,因为它是反球化元素。 $w(S)$ 高则球化差,抗拉强度、屈服强度、伸长率和低温冲击值都要下降,为此 $w(S)$ 应低些,最终 $w(S)$ 量控制在0.020%以下。但 $w(S)$ 太低将影响孕育效果,所以不能低于0.006%。

(5)RE RE可净化铁液、脱硫、氧和促进球化作用。当原铁液中 $w(S)$ 较低时, $w(RE)$ 土应低些,不然易产生夹渣和石墨畸变。确定 $w(RE)$ 为0.010%~0.030%。

(6)Mg Mg是球化元素,但对韧性有影响,对风电铸件来说,不能太高,以保证低温冲击值和较小的夹渣和缩松倾向。所以 $w(Mg)$ 量为0.040%~0.060%。

(7)Ni 一般认为Ni既能提高强度,又能促进韧性,所以国外一般加 $w(Ni)$ 在0.2%~2.0%,但Ni

价格较高,生产成本高。我们的试验表明,Ni 主要提高强度,对低温冲击韧性影响不大。

(8)杂质元素的控制 一般 $w(\text{Ti}) < 0.060\%$;
 $w(\text{V}) < 0.060\%$; $w(\text{Cr}) < 0.060\%$; $w(\text{Sn}) < 0.030\%$;
 $w[\text{Pb}+\text{Bi}+(\text{Ti}/10)] < 0.008\%$; $w(\text{Mo}) < 0.050\%$ 。

综上所述,化学成分一般为: $w(\text{C})$ 3.70%~3.85%、
 $w(\text{Si})$ 1.8%~2.3%、 $w(\text{Mn})$ 0.10%~0.30%、 $w(\text{P}) < 0.040\%$ 、
 $w(\text{S})$ 0.006%~0.020%、 $w(\text{RE})$ 0.010%~0.030%、
 $w(\text{Mg})$ 0.040%~0.060%。

4.2 铸造工艺

4.2.1 分型面和浇注状态

常规铸造工艺原则上将重要的工作面或厚大面朝下,风电铸件则与之不同,如对轮毂而言,按三个桨叶孔圆中心作为分型面,可将主轴孔朝上,也可将镇流孔朝上。如将主轴孔朝上,铸造难度将增大,但主轴孔面要机械加工,铸件经机械加工后可将轴孔面上的微观渣去除,减少轮毂工作时因裂纹源产生疲劳损坏的现象,对此有经验的客户会明确提出要求。

4.2.2 浇注系统

一般采用底注式或分型面注入,保证铁液平稳进入型腔,防止氧化夹渣。

4.2.3 过滤系统

采用铁液过滤技术以防夹渣,保证充型平稳。

4.2.4 冷铁和冒口

在局部热节处放冷铁,以同时凝固方式保证铸件致密。在顶面局部热节处放冒口进行液态补缩,减少缩松。

4.3 造型

(1)采用树脂砂工艺,树脂加入量 0.9%~1.2%,造型时保证良好的型砂强度和型砂紧实度。

(2)涂料。采用阻硫涂料,防止表面由于型砂中 S 引起的表面片状石墨。图 2 为涂料改进前后铸件表面的石墨形态。

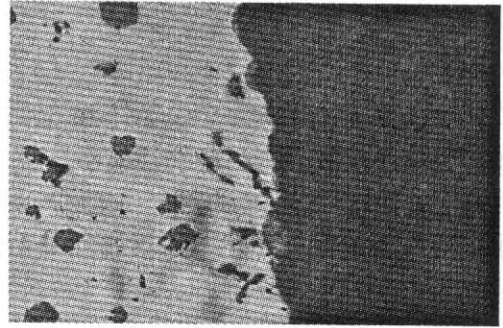
4.4 熔炼及炉前处理

4.4.1 原材料控制

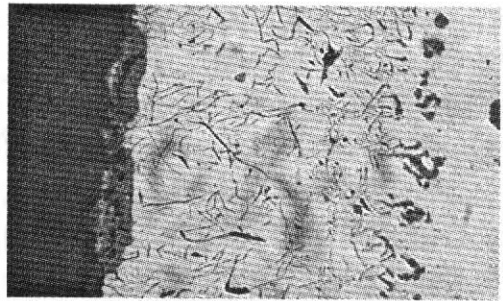
采用低 $w(\text{Si})$ 、 $w(\text{Mn})$ 、 $w(\text{P})$ 、 $w(\text{S})$ 的生铁,要求生铁 $w(\text{Si})$ 0.6%~1.4%、 $w(\text{Mn}) < 0.2\%$ 、 $w(\text{P}) < 0.050\%$ 、 $w(\text{S}) < 0.030\%$ 。废钢采用碳素钢。杂质元素主要控制 Ti、V、Cr、Sn、Pb、B、Mo 等。

4.4.2 熔炼方式

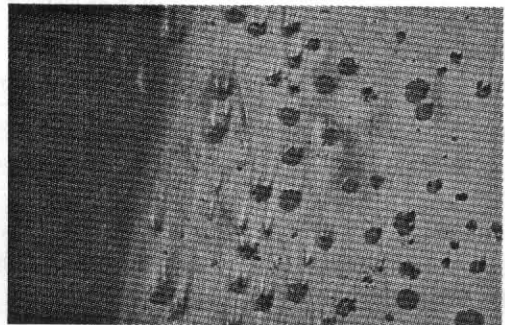
(1)采用电炉或冲天炉-电炉双联熔炼,便于控



(a)改进前片状石墨层 0.4~0.5 mm



(b)改进前片状石墨层 0.4~0.5 mm



(c)涂料改进后

图 2 涂料改进前后铸件表面的石墨形态 100x

制成分和温度。

(2)原铁液控制:冲天炉出炉原铁液进行脱硫处理,使原铁液 $w(\text{S})$ 控制在 0.020% 以下。炉前光谱分析检测成分,在电炉中调整成分和温度达到要求后进行处理。

(3)球化处理:采用本公司专用低稀土球化剂,根据原铁液 $w(\text{S})$ 量的高低加入量。

(4)孕育处理:采用 Fesi75 孕育或 Fesi75Ba 孕育。

(5)温度控制:用快速热电偶测定出炉温度,控制浇注温度。

(6)重量控制:铁液重量、球化量、孕育量进行