

# 低温铁素体球墨铸铁的特性及质量稳定性研究

丁建中<sup>1</sup>, 马敬仲<sup>2</sup>, 曾艺成<sup>3</sup>, 丁杰<sup>1</sup>, 赵金权<sup>1</sup>

(1. 常州华德机械有限公司, 江苏常州 213234; 2. 北京第一机床厂, 北京 101300;

3. 机械科学研究总院, 北京 100044)

**摘要:** 探讨了低温铁素体球墨铸铁的理论基础。详细介绍了低温铁素体球墨铸铁的生产技术, 包括化学成分、金相组织、力学性能以及生产流程的控制。成功生产了抗拉强度 $\geq 400$  MPa, 伸长率 $\geq 18\%$ ,  $-40$  °C、 $-50$  °C、 $-60$  °C时的冲击功大于12 J的低温铁素体球墨铸铁, 满足了用户的要求。

**关键词:** 低温铁素体球墨铸铁; 化学成分; 组织; 力学性能

**中图分类号:** TG143.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2015) 03-0193-09

## Quality Stability Study and Feature of Ferritic Ductile Iron Castings Suitable for Low Temperature Service

DING Jian-zhong<sup>1</sup>, MA Jing-zhong<sup>2</sup>, ZENG Yi-cheng<sup>3</sup>, DING Jie<sup>1</sup>, ZHAO Jin-quan<sup>1</sup>

(1. Changzhou Huade Machinery Co., Ltd., Changzhou 213234, Jiangsu, China; 2. Beijing No.1 Machine Tool Plant, Beijing 101300, China; 3. China Academy of Machinery Science and Technology, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The theoretical basis of ferritic ductile iron castings suitable for low temperature service was discussed. The production technologies of ferritic ductile iron castings suitable for low temperature service were introduced, such as chemical compositions, microstructure, mechanical property and work flow. The ferritic ductile iron castings suitable for low temperature service which tensile strength is more than 400 MPa, elongation is more than 18%, impact energy at  $-40$  °C,  $-50$  °C,  $-60$  °C is more than 12 J were produced successfully, the castings meet the requirements of customers.

**Key words:** ferritic ductile iron castings suitable for low temperature service; chemical compositions; microstructure; mechanical property

随着中国高速铁路的发展, 时速300~350 km/h等级的京广、京沪、哈大等高速铁路投入运行, 一些国家相继与中国协商高速铁路建设, 使得中国高速铁路的自身发展和走向世界进入了一个辉煌的时代。2012年高速铁路已达1.2万公里, 2020年预计为5万公里。为了实现引进动车组技术的消化吸收和再创新, 原铁道部根据高速列车基本组成技术难度和我国铁路机车车辆的工业化水平, 把高速动车组的技术分成九大关键技术: 动车组系统集成、车体、转向架、牵引变压器、主变流器、牵引电机、牵引传动、列车控制网络、制动系统。常州华德机械有限公司参与了其中转向架轴箱材料的开发, 研究成功低温铁素体球墨铸铁, 已成功地应用在高寒地带高速列车转向架轴箱及国内外高速列车其他零件上, 见表1。

这些高速列车零件, 除要求高的力学性能外, 还要求高的质量稳定性、一致性, 为此, 需要深入地研究这种材质的特性。

## 1 低温铁素体球墨铸铁的理论基础

低温铁素体球墨铸铁QT400-18AL (用25 mm Y型附铸试样作检验试样), 要求抗拉强度 $\geq 400$  MPa, 屈服强度 $\geq 240$  MPa, 硬度HBW为130~150, 伸长率 $\geq 18\%$ 的条件下, 其 $-40$  °C、 $-50$  °C、 $-60$  °C时的冲击值皆要大于12 J, 单个试样最小值为9 J, 这个要求比至今颁布的国内外低温铁素体球墨铸铁标准更为严格。与目前执行的低温球墨铸铁标准QT400-18AL (EN-GJS400-18ULT) 的不同点是除要求 $-20$  °C的冲击吸收功外, 还要求 $-40$  °C、 $-50$  °C、 $-60$  °C的冲击吸收功 $\geq 12$  J。为此, 需要对其理论进行探讨。

低温铁素体球墨铸铁的理论基础就是如何确定金相组织与化学成分、力学性能三者之间的关系。要使低温铁素体球墨铸铁的冲击吸收功在 $-60$ ~ $-40$  °C下稳定地达到12 J, 基体要求100%铁素体, 球化率90%~95%, 石墨大小6~7级, 石墨球数90~200个/mm<sup>2</sup>, 无

收稿日期: 2014-12-16。

作者简介: 丁建中 (1944-), 男, 高级工程师, 主要从事铸造技术及管理工作。E-mail: office@huadechina.cn

磷共晶和碳化物。

100%铁素体基体是球墨铸铁提高低温冲击值的首要条件,生产实践证明,即使1%~2%的珠光体都会导

致低温冲击值的降低。研究表明,同样是铁素体球墨铸铁,低磷、低硅退火态的全铁素体球墨铸铁,其低温冲击值最佳,见图1。

表1 生产的高速列车轨道低温球铁产品

Table 1 The ferritic ductile iron castings suitable for low temperature service for high speed train

用户名称	零件名称	牌号	尺寸/mm	重量/kg	性能要求	已交付的产品/套
德国舍弗勒集团有限公司	CRH300轴箱	EN-GJS-400-18LT (-20 °C)	861×286 ×309	80	抗拉强度≥400 MPa; 屈服强度(规定非比例延伸强度)≥240 MPa; 断后伸长率≥18%; 冲击吸收功(-20 °C)≥12 J。	2 736
	CRH380轴箱	EN-GJS-400-18LT (-40 °C)	861×286 ×309	80		
斯凯孚法国有限公司	SKF轴箱 (西门子项目)	EN-GJS-400-18LT (-40 °C)	800×426 ×241	82	抗拉强度≥400 MPa; 屈服强度(规定非比例延伸强度)≥240 MPa; 断后伸长率≥18%; 冲击吸收功(-40 °C)≥12 J。	800
法国阿尔斯通交通运输有限公司	高铁动车 齿轮箱	EN-GJS-400-18LT (-40 °C)	585.9×525 ×565	147		
长春轨道客车股份有限公司	CRH380轴箱	EN-GJS-400-18LT (-40 °C)	861×286 ×309	80	抗拉强度≥400 MPa; 屈服强度(规定非比例延伸强度)≥240 MPa; 断后伸长率≥18%; 冲击吸收功(-50 °C)≥12 J。	11 500
德国庞巴迪运输设备有限公司	机车齿轮箱	EN-GJS-400-18LT (-50 °C)	1 591×935 ×378	570		
	牵引电机端盖 抱轴箱		Φ89×185 Φ428×842	127 144		

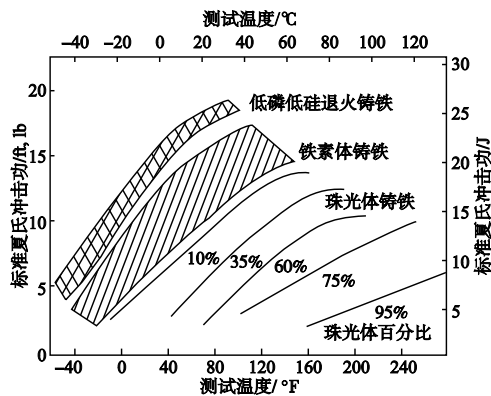


图1 球墨铸铁基体组织对其V型缺口夏氏冲击性能的影响

Fig. 1 The effect of ductile iron microstructure on V notch Charpy impact properties

球化率达到90%~95%是保证低温冲击值的必要条件。球墨铸铁的裂纹是沿着球墨边界扩展的,球形越圆,越不易产生裂纹,因此球化率越高,越有利于冲击性能与疲劳强度等动载性能的提高。

石墨球数的多少对常温与低温的缺口冲击值有不同的影响。如图2所示,石墨球数少,利于上限冲击性能的提高;石墨数多,利于低温冲击性能的提高,具体多少,应根据试验确定。对于主要壁厚为30 mm的转向架轴箱,以90~200个/mm<sup>2</sup>为宜。

晶界上的磷共晶与碳化物,会大幅度降低球铁的低温冲击吸收功。

值得注意的是,上述的金相组织仅是保证低温铁素体球墨铸铁获得高的低温韧性的基础,要全面达到其性能要求,还需做以下研究。

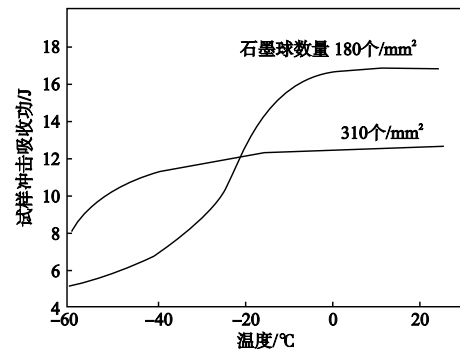


图2 石墨球数对冲击性能的影响

Fig. 2 The effect of graphite nodule number on impact property

(1) 100%的铁素体基体是保证低温冲击值所需要的,但100%的铁素体却难以保证400 MPa的抗拉强度,必须对其基体进行固溶强化,以提高抗拉强度。这就要求利用化学成分中较高的Si或加入Ni等合金元素来强化铁素体,使其达到400 MPa的要求。

(2) 铁素体的强化往往导致塑-脆性转变温度的提高及低温冲击值的降低。因此,要研究如何调整抗拉强度与低温冲击值相互制约的关系,并探索其解决的方法。

(3) 当金相组织较为完善,基本达到要求时,要进一步提高低温冲击值,则取决于晶界夹杂物的净化。此时如何净化晶界将是保证低温冲击值的关键因素。

(4) 球墨铸铁冲击性能随温度的降低而下降是球墨铸铁固有的特性。要保证零件在低温下安全运行,不仅要保证其低温下的冲击值,还要研究塑-脆性转变温度曲线,即冲击值随温度的变化曲线。其曲线下降

越平缓越安全, 温度稍有变化就导致冲击值大幅度波动是不可取的。

## 2 低温铁素体球墨铸铁的生产技术

### 2.1 调整Si、Mn、P、Ni含量

在低温铁素体球墨铸铁中, 控制Si含量是其中的关键。Si固溶强化铁素体, 提高抗拉强度与屈服强度作用明显, 实验表明, 每提高0.1%Si可提高 $R_m$  9.29 MPa、 $R_{p0.2}$  13.8 MPa<sup>[1]</sup>。故要保证100%铁素体下的400 MPa抗拉强度, 需提高Si含量。但是, Si强烈地升高塑-脆性转变温度, 研究表明: 每升高0.1%Si, 脆性转变温度升高5.5~6.0 °C<sup>[2]</sup>, 为保证-60~-40 °C下的冲击值, 需降低Si含量。

华德机械公司采用综合调整Si、Mn、P含量, 适当加入合金元素Ni, 成功地确保了400 MPa的抗拉强度与-60~-40 °C时 $\geq$ 冲击功12 J的要求。其方法是以1.9%Si为界, 生产(-50~-40 °C) QT400-18AL时, 将Si由1.9%提至2.2%~2.4%, 以强化铁素体, 保证抗拉强度, 同时降低Mn、P以抵消Si升高所带来的塑-脆性转变温度提高, 确保-50~-40 °C的低温冲击值。生产(-60 °C) QT400-18AL时, 将Si降至1.8%~1.9%, 以保证-60 °C的低温冲击值。铁素体强化由Ni代替以保证抗拉强度, 同时Mn、P都要维持最低含量: Mn < 0.10%, P < 0.025%。实践证明这种Si、Mn、P、Ni的综合调整是可行的, 见表2、表3。

表2 (-50~-40 °C)QT400-18AL的化学成分

Table 2 The chemical compositions of QT400-18AL  $w_B/\%$

C	Si	Mn	P	S	Mg <sub>残</sub>	RE <sub>残</sub>
3.6~3.9	2.2~2.4	$\leq 0.10$	$\leq 0.025$	$\leq 0.010$	0.03~0.05	<0.01

按表2的化学成分生产(-40 °C) QT400-18AL的CRH380转向架轴箱, 获得了良好的验证。表4为开始批量生产300炉次的性能统计。

300炉次的转向架轴箱力学性能与低温冲击值双项达标, 重要原因就是2.2%~2.4%的Si保证了抗拉强度,  $\leq 0.025\%$ P与 $\leq 0.10\%$ Mn降低了脆性转变温度, 保证

表6 (-50 °C)QT400-18AL机车变速箱与牵引电机端盖的化学成分

Table 6 The chemical compositions of QT400-18A Locomotive gearbox and traction motor end cover at -50 °C  $w_B/\%$

项目	C	Si	Mn	P	S	Ti	Mg <sub>残</sub>	RE <sub>残</sub>
要求值	3.6~3.9	2.1~2.3	$\leq 0.10$	$\leq 0.025$	<0.010	$\leq 0.025$	0.03~0.05	$\leq 0.010$
统计值	3.603~3.860	1.996~2.244	0.038~0.070	0.024~0.033	0.004~0.012	0.007~0.012	0.03~0.049	0.007~0.014

表7 (-50 °C)QT400-18AL机车变速箱和牵引电机端盖本体的力学性能

Table 7 The mechanical properties of QT400-18AL locomotive gearbox and traction motor end cover at -50 °C

项目	抗拉强度/MPa	伸长率/%	冲击吸收功/J
要求值	$\geq 400$	$\geq 18$	$\geq 12$
统计值	400.0~419.9	21.0~29.7	12.0~14.9

表3 (-50~-40 °C)QT400-18AL的力学性能

Table 3 The mechanical properties of QT400-18AL

序号	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	冲击吸收功/J					
				23 °C	0 °C	-20 °C	-40 °C	-50 °C	
试验1	1	396.5	250.0	28.4	15.4	16.0	15.8	14.4	12.4
	2	394.1	250.0	26.6	15.4	15.8	15.0	14.4	12.8
	3	397.0	255.0	24.3	15.0	15.6	15.4	14.4	13.0
	平均	395.9	251.7	26.4	15.3	15.8	15.4	14.4	12.7
试验2	1	404.8	265.0	26.9	15.0	16.0	15.0	14.4	12.8
	2	402.1	260.0	26.9	16.4	16.0	15.2	14.4	13.0
	3	402.3	260.0	25.8	15.6	15.6	15.4	14.6	13.2
	平均	403.1	261.7	26.5	15.7	15.9	15.2	14.5	13.0

表4 (-40 °C)QT400-18AL转向架轴箱300炉次的性能统计

Table 4 The performance statistics of 300 melt for

QT400-18AL truck journal box

抗拉强度/MPa	伸长率/%	冲击吸收功/J
400~425.5	20.0~28.4	13.3~17.8

了-50~-40 °C的低温冲击值, 表5为300炉次(-40 °C) QT400-18AL转向架轴箱Si、Mn、P含量的统计。

表5所列300炉Si、Mn、P含量的球铁, 其力学性能都能达到要求, 即Si低至2.03%,  $R_m$ 也能达到400 MPa, Mn达0.133%, -40 °C冲击吸收功也在12 J以上。但为了稳定质量, 还要进一步加强控制, 特别是Mn量, 超过0.1%的约占18%, 这可能成为-40 °C冲击值波动的因素, 与龙凤山铸业公司商议后, 很快便得到解决, 以后的Mn量均 $\leq 0.1\%$ 。

表5 (-40 °C)QT400-18AL转向架轴箱300炉次中Si、Mn、P含量统计

Table 5 The Si, Mn, P content statistics of 300 melt

for QT400-18AL truck journal box  $w_B/\%$

项目	Si	Mn	P
要求值	2.2~2.4	$\leq 0.10$	$\leq 0.025$
统计值	2.033~2.387	0.040~0.133	0.013~0.026

庞巴迪的机车变速箱与机车牵引电机端盖的要求是(-50 °C) QT400-18AL, 且要本体取样, 表6、表7分别为其化学成分与力学性能。

表2、表3为用龙凤山高纯生铁作原材料的试验结果, 而表6、表7用的是南非高纯生铁。两者成分对比, 龙凤山生铁P低, Mn、Ti略高, 南非生铁P略高, 而Mn、Ti低, 力学性能则基本一样。这说明当生铁Mn、Ti低时, P可适当放宽; 而P低时则Mn、Ti可适当放宽, 要综合考虑Si、Mn、P、Ti的影响。

试验和生产统计中发现, 2.1%~2.4%Si、Mn≤0.10%、P≤0.025%的成分, 能保证-50~-40℃的低温

冲击值, 温度进一步降到-60℃, 则其冲击吸收功仅能达到10.1~10.7J, 见表8。

表8 2.1%~2.4%Si时低温铁素体球墨铸铁性能

Table 8 The properties of ferritic ductile iron castings suitable for low temperature service with 2.1%~2.4%Si

试验 编号	力学性能			低温冲击吸收功/J					
	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A/%	23℃	0℃	-20℃	-40℃	-50℃	-60℃
1	395.5	251.7	26.4	15.3	15.3	15.4	14.4	12.7	10.7
2	403.1	261.7	26.5	15.7	15.9	15.2	14.5	13.0	10.1

注: (1)化学成分同表5; (2)性能为三个试样的均值。

由于Si是影响低温冲击性能的最大因素, 必须降低Si量, 将Si从2.2%~2.4%降至1.8%~2.0%, 以降低塑-脆性转变温度, 再用Ni (0.5%~0.7%) 来强化铁素体以保证抗拉强度, 通过多次试验证明这项技术在生产中是可行的。见表9与表10。

上述研究与试验表明, (-60℃) QT400-18AL材质是可以同时达到400 MPa的抗拉强度及-60℃时12 J

的冲击功的。图3为 (-50~-40℃) QT400-18AL与(-60℃) QT400-18AL冲击吸收功随温度变化曲线。

表9 (-60℃)QT400-18AL的化学成分

Table 9 The chemical compositions of QT400-18AL

at -60℃								$w_B$ /%
C	Si	Mn	P	S	Ni	Mg <sub>残</sub>	RE <sub>残</sub>	
3.79	1.94	0.046	0.019	0.007	0.556	0.042	0.007	

表10 (-60℃)QT400-18AL的力学性能与低温冲击吸收功

Table 10 The mechanical properties and impact absorbing energy at low temperature of QT400-18AL at -60℃

序号	力学性能			冲击吸收功/J					
	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	23℃	0℃	-20℃	-40℃	-50℃	-60℃
1	395.2	260	24.7	15.2	16.0	15.0	14.0	14.0	13.0
2	391.1	255	24.9	15.6	15.4	14.6	14.8	13.6	12.8
3	393.6	255	24.8	15.4	14.8	14.8	14.0	13.8	12.8
平均	393.3	256.7	24.8	15.4	15.4	14.8	14.3	13.8	12.9

图3表明, (-50~-40℃)QT400-18AL与(-60℃)QT400-18AL两者性能相差最大的是-60℃时冲击值, 其原因是两者强化铁素体的主体不同, 前者为Si, 后者为Ni。Si与Ni在强化铁素体上是一致的, 但对塑-脆性转变温度的影响, 则差别较大, Si显著提高, 而Ni基本不影响。要在-60℃达到12 J的冲击值, 必须降Si于2.0%以下, 而强化铁素体的作用则由Ni去完成。低温铁素体球墨铸铁在化学成分中的另一个特点是对Mn、P含量要求更低, 与普通铁素体球墨铸铁相比, Mn由0.3%降至0.10%以下, P由0.04%降至0.025%以下, 从而使脆性转变温度下降。

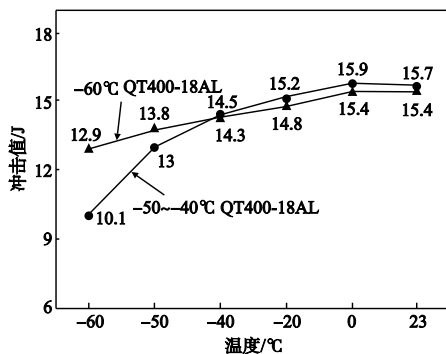


图3 低温铁素体球墨铸铁的缺口试样冲击值与温度的变化曲线

Fig. 3 The change curves of notch sample impact value and temperature for ferritic ductile iron castings suitable for low temperature service

资料表明<sup>[2]</sup>: Mn每降0.1%, 脆性转变温度下降11~12℃。Mn由0.3%降至0.1%时, 脆性转变温度下降 $2 \times (11 \sim 12 \text{ } ^\circ\text{C}) = 22 \sim 24 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。P每降0.01%, 脆性转变温度下降4~5℃。P由0.04%降至0.025%, 则脆性转变温度下降 $1.5 \times (4 \sim 5 \text{ } ^\circ\text{C}) = 6 \sim 7.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。调整后的Mn、P使脆性温度下降了28~31.5℃, 抵消了Si由1.9%升至2.3%时所增加的脆性转变温度 $4 \times (5.5 \sim 6.0 \text{ } ^\circ\text{C}) = 22 \sim 24 \text{ } ^\circ\text{C}$ , 保证了-50~-40℃的冲击值。对于(-60℃)QT400-18AL, Mn<0.10%, P<0.025%不变, Si从2.3%降至1.9%, 这二者的调整, 保证了-60℃时的冲击值。上述计算结果与实践结果是一致的。

## 2.2 铁液与晶界净化的技术控制

球化前的原铁液是灰铸铁, 研究表明<sup>[2]</sup>: 用电解法分离发现, 在1 cm<sup>3</sup>体积灰铁件内, 仅稳定的氧化物(SiO<sub>2</sub>, FeO-MnO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)就达500万个, 其中70%在0.2~1.0 μm之间; 用定量金相分析法发现, 1 cm<sup>3</sup>体积内约有4 300个硫化物(Mn、S、Fe-MnS)夹杂, 其尺寸为2~23 μm, 这些夹杂在球化与基体十分良好的高端铸件内, 其破坏作用十分突出, 成为进一步提高低温韧性的关键。

日本科学家对铸铁件失效做了长达60年的跟踪分析研究, 发现影响铸件使用寿命的因素60%~70%是由于铸件内部存在有过量的夹杂物所致, 而力学性能的

因素仅占30%~40%。因此,低温铁素体球墨铸铁要达到高的性能水平,晶界夹杂的净化是一重要环节。华德机械公司采取的技术措施如下。

(1) 采用高纯生铁。高纯生铁与球化。低温铁素体球墨铸铁件对球化有二项要求:一是球化率达90%以上;二是减少球化剂加入量,使 $M_{g残}$ 控制在0.03%~0.045%,减少白口、收缩和夹杂。这就要求把生铁中球化的干扰元素Ti、As、Sn、Sb、Pb、Bi、Al等进行严格控制,并用球化指数 $K_1$ 表征, $K_1=4.4Ti+2.0As+2.3Sn+5.0Sb+290Pb+3ToBi+1.6Al$ <sup>[3]</sup>。如 $K_1 > 1$ ,则在20 mm壁厚的Y型试样上出现畸变石墨,而低温铁素体

球铁要求 $K_1 < 0.6$ 。华德机械公司用的是中国龙凤山铁业公司的高纯生铁,微量元素见表11。

$K_1=0.22$ ,从而使球化干扰降至最低程度。在3 608炉次的球化中,球化率皆在1~2级,如图4所示。

高纯生铁对球铁的塑-脆性转变温度的影响。华德机械公司使用的是 $P \leq 0.025\%$ ,  $Mn \leq 0.1\%$ 的高纯生铁,从而保证了球化后的球铁中Mn、P的低含量,P的波动范围为0.013%~0.026%,Mn的波动范围为0.040%~0.133%。随后生产中,进一步把P控制在 $\leq 0.025\%$ ,  $Mn < 0.1\%$ 。Mn、P含量的降低是降低塑-脆性转变温度的关键所在。

表11 高纯生铁化学成分

Table 11 The chemical compositions of high-purity pig iron

化学成分 $w_B/\%$										球化系数
P	S	Mn	Sn	Sb	Ti	Al	As	Bi	Pb	$K_1$
<0.022	0.005	<0.021	<0.000 05	<0.000 5	0.01	0.007 45	0.001	0.000 01	<0.000 5	0.22

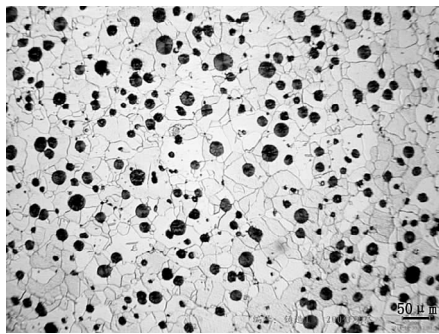


图4 (-40℃) QT400-18AL的球状石墨

Fig. 4 The spheroidal graphite of (-40℃) QT400-18AL

高纯生铁与晶界净化。晶界夹杂的减少与净化是提高低温冲击值的重要措施,晶界夹杂的形成不仅与生铁中P、Mn形成磷共晶及碳化物有关,还与生铁中各种微量元素形成晶间偏析有关:如Cr、V、Ti、Mo、B、As在晶界碳化物形成的正偏析。Si、Ni、Cu在晶粒内部形成的反偏析及P、S、Pb、Zn低熔点元素在最后凝固形成的晶界偏析。因此需要对生铁中微量元素的总和 $\sum \tau+Ti$ 进行限制,中国各地区生产的高纯生铁的 $\sum \tau+Ti$ 约在0.04%~0.09%。南非生铁 $\sum \tau+Ti$ 约为0.18%。华德公司采用龙凤山的高纯生铁 $\sum \tau+Ti$ 为0.035%,因此,在100倍显微镜下,生产的(-50~-40℃) QT400-18AL的磷共晶+碳化物总和经4 000炉次的测定,其值趋近于零,即使400倍下也未发现明显的晶界夹杂,说明了高纯生铁在晶界净化方面的有效作用。图5是400倍下对磷共晶与碳化物的观察。

高纯生铁与100%铁素体。生铁中含有促进珠光体的元素Mn、Sn、Pb、Bi、As、Cr、Sb,直接影响着(-50~-40℃) QT400-18AL球墨铸铁能否获得100%铁素体基体,一般用珠光体系数 $P_x$ 大小来表征对珠光体元素的限制。

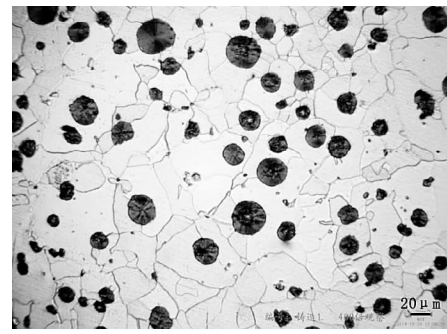


图5 无磷共晶和碳化物的组织

Fig. 5 The microstructure of no phosphide eutectic and carbide

$$P_x = 3.0Mn - 2.65(Si - 2.0) + 7.75Cu + 90Sn + 357Pb + 333Bi + 20.1As + 9.6Cr + 71.1Sb$$

中国各地区生产高纯生铁的 $P_x$ 数在0.53~1.35的范围内。龙凤山的高纯生铁的 $P_x=0.61$ 。从而使铸态的(-50~-40℃) QT400-18AL的基体接近100%的铁素体,使热处理后的基体稳定达到100%。

(2) 采用优质碳钢,废钢和回炉料全部要经抛丸清理以减少氧化夹杂。

(3) 铁液的高温静置净化,铁液在1 500℃以上静置一定时间使夹杂物上浮。铁液净化来自三个方面,一是炉料净化,通过采用高纯生铁对Mn、P、S及微量干扰元素的限制,采用优质碳素钢对合金元素的限制,通过抛丸清理对回炉料及废钢粘砂及氧化物的限制,达到炉料的净化。二是铁液净化,通过高温静置达到大幅度降低铁液中氧化夹杂的净化。三是通过配料使球化前的原铁液的S降至0.015%以下,达到减少球化剂及降低硫化渣的净化。

美国球铁协会调查表明,铁液温度过热至1 528℃比过热至1 483℃,其氧化夹杂大幅度下降。因此将1 510℃定为铁液最低的过热温度。

华德机械公司连续300炉次的统计,铁液温度均在1 500~1 525 ℃,并静置8~10 min,有效地减少氧化夹杂。图6为球化前S含量与球化后Mg<sub>残</sub>与RE<sub>残</sub> 300炉次的统计。

由图6可知,原铁液95%以上S含量≤0.015%,减少了硫化渣,使球化后99%Mg<sub>残</sub>≤0.045%,RE<sub>残</sub>≤0.020%,仍能保证1-2级球化,使白口倾向减少,收缩减小,夹杂减少,为孕育打下了良好的基础。

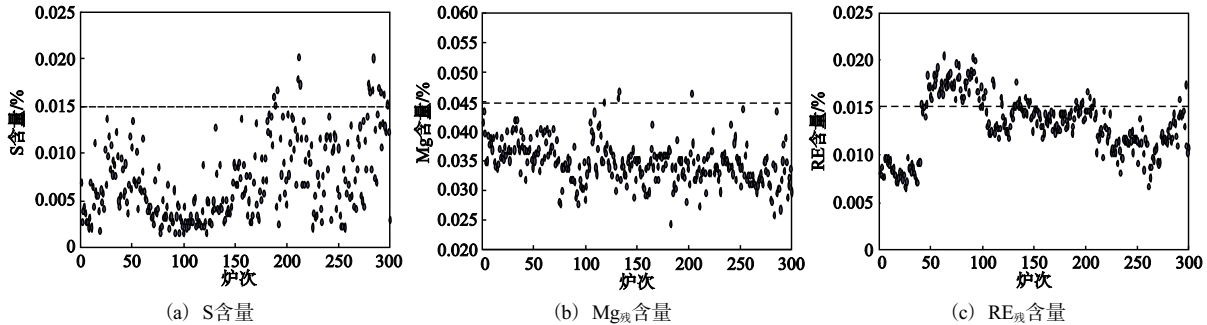


图6 球化前原铁液含S量与球化后的Mg<sub>残</sub>、RE<sub>残</sub>含量统计

Fig. 6 The S content of melt iron before nodularization and Mg<sub>残</sub>、RE<sub>残</sub> content after nodularization

### 2.3 低温铁素体球铁热处理的技术控制

出于对高速列车的安全性能考虑,低温铁素体球墨铸铁的热处理是必要的,因为铸态很难保证成分不偏析、晶界杂质均匀分布和100%铁素体,而采用高温退火热处理工艺,则能保证,使性能更加稳定。表12为不同铸型铸态和退火态铁素体球铁不同温度下冲击值对比。从表12可以看出,-20 ℃前铸态和退火态球铁冲击吸收功相差不大,都能达到要求,温度越低,两者差别越大。

其提出三点要求:一是-20 ℃、-40 ℃、-50 ℃、-60 ℃都要达到12J的冲击吸收功,二是将塑-脆性转变温度向左移,即降低脆性转变温度,三是冲击功随温度降低而下降的速度要缓慢,减少冲击功对温度的敏感度。

对低温铁素体球铁从塑性到脆性的转变进行了试验。试验条件:用生产的(-50 ℃)QT400-18AL球墨铸铁材质作试样。试验温度从0 ℃开始,每降10 ℃作一测试点,直至-130 ℃,试验结果(附铸试样)见表13、图7。

### 3 塑-脆性转变温度的研究

为使高速列车转向架轴箱在使用中更安全,我们对低温铁素体球铁的塑-脆性转变温度进行了研究并对

由图可知:-50 ℃、-40 ℃、-30 ℃、-20 ℃、-10 ℃、0 ℃时试样的缺口冲击吸收功全部在12 J以上;塑-脆性转变温度点(FATT50)为-74.3 ℃,塑-脆性转变温度点对应的冲击吸收功为7.65 J。

表12 铸态和退火态铁素体球铁冲击吸收功

Table 12 The impact absorbing energy of ferrite ductile iron with as cast and anneal /J

项目	0 ℃		-20 ℃		-40 ℃		-50 ℃		
	测量值	平均	测量值	平均	测量值	平均	测量值	平均	
树脂砂	铸态	21.0, 18.4, 19.4	19.6	17.5, 19.0, 18.8	18.4	13.2, 9.3, 11.0	11.2	8.0, 6.1, 6.5	6.9
	退火态	19.5, 19.5, 19.4	19.5	17.8, 19.4, 19.8	19.0	17.3, 17.3, 15.8	16.8	13.7, 12.9, 14.2	13.6
湿型砂	铸态	20.8, 20.7, 20.2	20.6	16.8, 18.0, 17.2	17.3	10.9, 11.2, 11.0	11.0	7.6, 7.6, 7.3	7.5
	退火态	20.3, 19.3, 20.9	20.2	19.2, 19.6, 20.0	19.6	15.6, 16.3, 14.1	15.3	12.8, 13.5, 13.0	13.1

表13 (-50 ℃)QT400-18AL在不同温度下的V型缺口冲击功

Table 13 The V shape notch impact energy of (-50 ℃) QT400-18AL at different temperature /J

项目 试样	温度/℃														
	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	
1	2	3	3	3	4	5	10	11.5	12.5	12	12	13	12	13	
2	2	2.5	3	3	6	6	6.5	11.5	12	13	13	12	13	14	
3	-	2	2.5	3.5	4	6	10	11	12	13	13	14	13.5	12	
均值	2	2.5	2.83	3.17	4.67	5.67	8.83	11.3	12.17	12.17	12.67	13	12.83	13	

低温铁素体球铁塑-脆性转变中缺口试样宏观断面分析。随机选取每一测试点的断口试样,进行扫描电镜观察,并用软件计算其解理状断面的面积及其占总断面面积比例,分析宏观断面形貌与冲击值之间的对

应关系,确定塑性到脆性温度转变点的具体温度,结果见表14及图8。

经计算,解理状面积与韧窝状面积各占50%处的塑-脆性转变点温度为-72.4 ℃,对应的冲击功为8.0 J

左右。将温度、冲击功、试样断口形貌三者合在一起，其关系见图9。

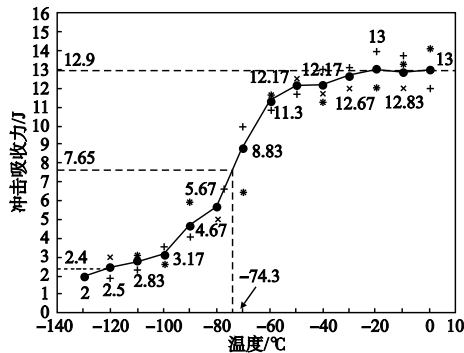


图7 (-50 °C)QT400-18AL的冲击功-温度曲线

Fig. 7 The impact-temperature curve of (-50 °C)QT400-18AL

表14 不同温度下试样断面解理状面积变化与塑-脆性的转变

Table 14 The section cleavage area and plastic-brittle change of samples at different temperature

项目	编号	温度/°C													
		-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0
解理状面积与 总断面积之比/%	1	98	86	79	82	73	60	40	26	41	13	15	11	5	4
	2	93	87	85	70	68	60	46	45	22	11	13	8	9	5
	3	98	91	82	74	68	62	56	41	20	19	19	9	10	5
	均值	96.3	88	82	75.3	69.7	60.7	47.3	37.3	27.7	14.3	15.7	9.3	8	4.7

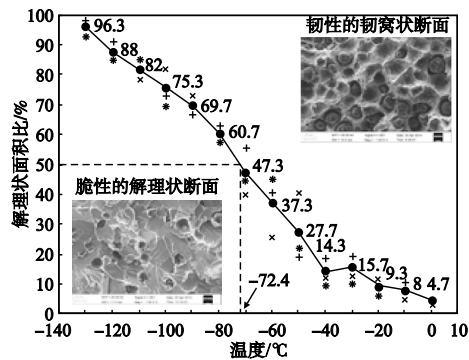


图8 冲击断口解理状面积的变化

Fig. 8 The section cleavage area change of impact fracture

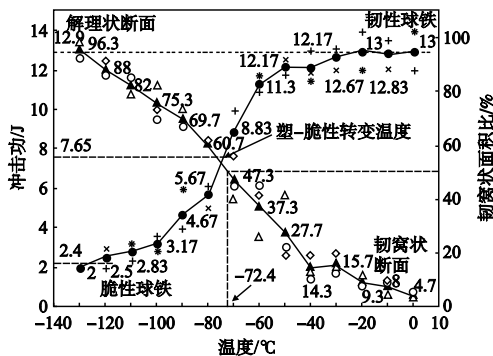


图9 (-50 °C)QT400-18AL的温度、冲击功、试样断裂形貌的关系曲线

Fig. 9 The relationship of temperature, impact energy, fracture morphology for (-50 °C)QT400-18AL

(3) 本试验为制定低温铁素体球铁标准在-40 °C、-50 °C、-60 °C的缺口试样冲击值皆要达12 J以上提供

通过塑-脆性转变温度和断口形貌分析可得出下列结论。

(1) (-50 °C) QT400-18AL低温铁素体球铁的塑-脆性转变的温度为-74.5~-72.4 °C，对应的缺口试样冲击吸收功为8J。证明高速列车的低温铁素体球铁件在-40 °C、-50 °C、-60 °C时冲击功为12 J是安全的。其冲击性能高于塑-脆性转变点的冲击值，其运行的环境温度低于塑-脆性转变温度。

(2) 球墨铸铁的冲击性能随温度的下降而降低是其固有特性，在技术上的进步是使-40 °C、-50 °C、-60 °C时冲击功皆能达到12 J以上，并将塑-脆性转变温度向左移和-60~-30 °C时，冲击值随温度降低而下降的速度变缓。

了依据。

#### 4 球墨铸铁的质量稳定性控制

转向架是高速列车九大关键部件之一，它的安全性要求其材质的力学性能不仅要保证在高水平上，而且在质量上要保持高度的稳定性、一致性，两者缺一不可。图10为转向架示意图，转向架轴箱铸件是其中的A类零件，该件质量直接影响着列车的安全性、稳定性与舒适性，是一个不允许“犯一次错误”的零件。

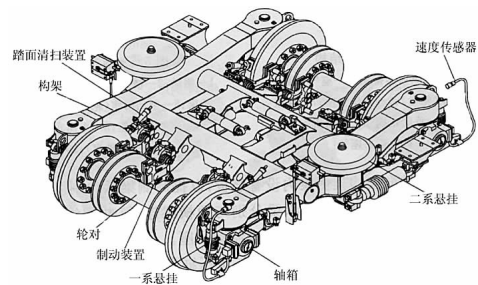


图10 高速列车上的转向架

Fig. 10 The truck of high speed train

华德机械公司就是严格按照图11进行(-40 °C) QT400-18AL件生产控制的，统计已生产的3 600多炉，质量非常稳定。

当一件产品正确的生产工艺确定之后，只能说明这一工艺能生产出合格的产品，但不能保证每件产品都合格。质量的稳定性要靠非常严格的质量管理，而管理的关键是对每道铸造工序的过程进行控制。图11

是(-40℃)QT400-18AL材质CRH380转向架轴箱IRIS质量控制流程图。表15为(-40℃)QT400-18AL转向架轴箱性能3 608炉次的统计。(-50~-40℃)QT400-18AL转向架轴箱生产中工艺参数及操作要点包括以下几点。

(1) 原材料的控制。采用高纯生铁，优质碳素钢，回炉料经抛丸清理，按类堆放。化学成分(质量分数)： $P \leq 0.025$ 、 $Mn \leq 0.10$ 、 $S \leq 0.015$ 、 $Ti \leq 0.03$ ，11种微量元素之 $\Sigma r=0.05$ ，球化系数 $K_1=0.6$ ，珠光体系数 $P_x=0.7$ 。

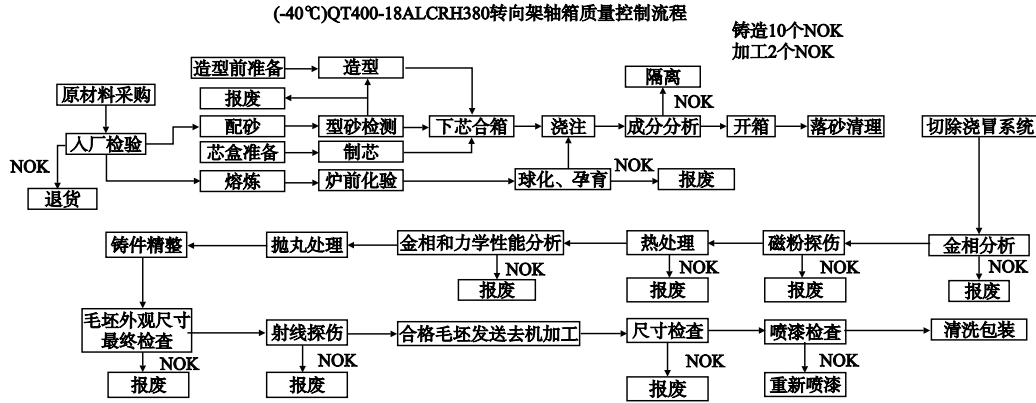


图11 质量控制流程图

Fig. 11 The quality control flow chart

(2) 熔炼。采用高温静置工艺，采用一炉一包的的操作，铁液温度控制在1 500~1 520℃，静置7~10 min。一炉一铁液包，一包铁液浇8个轴箱。

(3) 球化。采用低镁低稀土球化剂，控制原铁液含S量。球化剂加入量1.0%~1.2%，球化时间60~90 s，原铁液含0.01%~0.02%S。

(4) 孕育。采用硫、氧孕育剂倒包孕育+随流孕育。球化至浇注时间 $\leq 10$  min，生产统计值为6 min。

(5) 浇注温度要求控制在1 390~1 420℃，生产统计值为1 392~1 418℃。

(6) 浇注速度。浇注速度控制在300 s，生产统计值为278~308 s。

(7) 铸件的化学成分如表16所示。

表17为(-40℃)QT400-18AL铁液温度与原铁液S含量的3 608炉次统计结果，表18为(-40℃)QT400-18AL化学成分3 608炉次的统计。图12为3 608炉次的 $Mg_{残}$ 、 $RE_{残}$ 与球化时间统计结果。表19为(-40℃)QT400-18AL转向架轴箱铸件3 608炉次的金相组织。

表15 (-40℃)QT400-18AL转向架轴箱性能统计结果

Table 15 The statistical result of (-40℃)QT400-18AL truck journal box

抗拉强度/MPa			伸长率/%			-40℃冲击吸收功/J		
要求	统计值	平均值	要求	统计值	平均值	要求	统计值	平均值
$\geq 400$	400.0~425.5	403.1	$\geq 18$	20.0~30.7	26.1	$\geq 12$	12.1~17.8	14.3

表16 (-50~-40℃)QT400-18AL转向架轴箱的化学成分

Table 16 The chemical compositions of QT400-18AL truck journal box at -50~-40℃

项目	原铁液C	原铁液S	Si	Mn	P	$Mg_{残}$	$RE_{残}$
要求值	3.6~3.9	$\leq 0.015$	2.1~2.4	$\leq 0.10$	$\leq 0.025$	0.03~0.05	$< 0.015$
生产统计值	3.62~3.83	0.005~0.017	2.04~2.35	0.067~0.095	0.016~0.025	0.031~0.049	0.011~0.018

表17 (-40℃)QT400-18AL铁液温度与原铁液S含量的统计结果

Table 17 The statistical result of melt iron temperature and S content for (-40℃)QT400-18AL

铁液温度/℃			原铁液S含量/%		
要求	统计值	平均值	要求	统计值	平均值
1 500~1 550	1 493~1 527	1 510	$< 0.02$	0.001~0.025	0.013

表18 (-40℃)QT400-18AL化学成分统计结果

Table 18 The statistical result of chemical compositions for (-40℃)QT400-18AL

$w_B/\%$														
C			Mn			P			Si			S		
要求	统计值	平均值	要求	统计值	平均值	要求	统计值	平均值	要求	统计值	平均值	要求	统计值	平均值
3.6~3.9	3.528~3.900	3.710	$\leq 0.10$	0.040~0.138	0.076	$\leq 0.025$	0.012~0.028	0.021	2.1~2.4	2.029~2.442	2.208	$\leq 0.010$	0.003~0.016	0.009



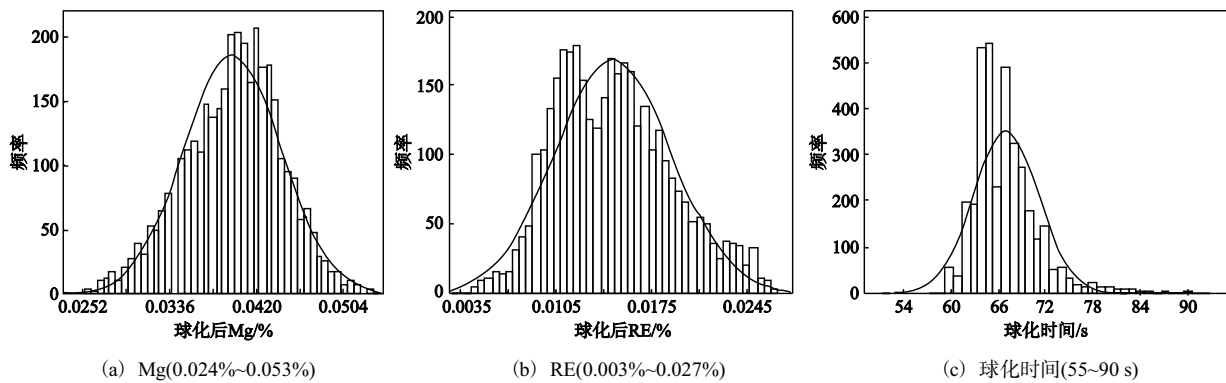
图12 (-40 °C)QT400-18AL Mg<sub>残</sub>、RE<sub>残</sub>与球化时间的统计结果

Fig. 12 The statistical result of remnant Mg, remnant RE and nodularization time for (-40 °C) QT400-18AL

表19 (-40 °C)QT400-18AL转向架轴箱铸件的金相组织

Table 19 The microstructure of (-40 °C)QT400-18AL truck journal box casting

项目	球化率/%	基体	球墨大小	磷共晶+碳化物
指标	90~95	100%铁素体	5~6级	0

## 5 结论

(1) 采用调整、控制Si、Mn、P、Ti含量及加入合金元素Ni的生产技术，能使QT400-18AL在-40 °C、-50 °C、-60 °C的冲击吸收功均 $\geq 12$  J，满足高速列车在高寒地区使用的要求。

(2) 高质量的原辅材料特别是高纯生铁的应用，是生产高性能球铁的基础。

(3) 严格的质量管理和精细的过程控制，是产品质量稳定性的基本保证。

(4) 华德公司生产的低温铁素体球铁，具有较高的上限冲击值，低的塑性-脆性转变温度及在-20 °C至

-60 °C之间冲击值随温度下降平缓的特点。

(5) 华德公司做的0 °C至-130 °C的冲击值与温度的变化曲线及在各冲击值下的断裂面形貌分析对深入研究低温铁素体球铁有重要的意义。其作出的塑-脆性转变温度-74.5~-72.4 °C，对低温铁素体球铁的应用极限温度具有指导意义。

(6) 净化晶界、清除夹杂物是进一步提高低温铁素体球铁的方向。

### 参考文献:

- [1] Larker Richard. 固溶强化铁素体球墨铸铁 [J]. 铸造, 2010, 59 (6): 622-627.
- [2] 吴德海. 球墨铸铁 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [3] Riposan. Influencing factors on the as-cast and heat treated 400-18 ductile iron grade characteristics [C] //Proceeding of the Eighth International Symposium of Science and Processing of Cast Iron, Beijing, China, 2006.

(编辑: 刘冬梅, ldm@foundryworld.com)

(选自《铸造》2015年第3期)