

新材料·新工艺

超低温高韧性球墨铸铁QT400-18AL的研究及应用

马敬仲¹, 丁建中², 尤其光², 曾艺成³

(1. 北京第一机床厂, 北京 101300; 2. 常州华德机械有限公司, 江苏常州 213234; 3. 机械科学研究总院, 北京 100044)

摘要: 转向架轴箱为CRH300型高速列车核心部件, 要求采用QT400-18AL (-40℃) 球铁制造。在分析了生产这种球铁的技术难度及影响因素后, 采用高纯生铁及综合技术措施研制成功全铁素体球铁转向架轴箱, 其缺口冲击值分别为: 20.8 J (20℃)、19.4 J (0℃)、19.2 J (-20℃)、16.8 J (-40℃)、13.6 J (-50℃), 并首次给出这种铸铁的韧性、塑性转变曲线。

关键词: 转向架轴箱; 铁素体球墨铸铁; 低温冲击值; 高纯生铁; 质量控制

中图分类号: TG143.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-4977 (2012) 08-0856-07

Research and Application of 400-18AL Ferrite Ductile Iron with High Toughness at Low Temperature

MA Jing-zhong¹, DING Jian-zhong², YOU Qi-guang², ZENG Yi-cheng³

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

Abstract: The bogie bearing housing is one of the key parts for CRH300 high speed train, and is manufactured with QT400-18AL (-40℃) ferrite ductile iron. According to the demands of mechanical properties, high purity pig iron was used as metal charge. The foundry process, the chemical composition and microstructure are strictly controlled. The impact strength in different temperature are as follows: 20.8 J (20℃), 19.4 J (0℃), 19.2 J (-20℃), 16.8 J (-40℃), 13.6 J (-50℃). The bogie bearing housing has been manufactured with this full ferrite ductile iron on batch production.

Key words: bogie bearing housing; ferrite ductile iron; low temperature impact value; high purity pig iron; quality control

随着国内外工业的迅速发展, 对球墨铸铁中具有低温韧性的全铁素体球墨铸铁的性能要求日益增高, 不仅对其常温下的抗拉强度、断后伸长率、屈服强度有较高要求, 对更低温度下的冲击韧性也提出了要求, 使原有牌号的低温韧性球墨铸铁已不能满足要求, 新的要求突出地表现在我国飞快发展的高速列车转向架轴箱部件上。该件原牌号为EN-GJS-400-18U-LD, 仅有-20℃的冲击功要求, 而随高速列车行驶地域上的拓展, 要求该牌号具有-40℃、-50℃的冲击功性能, 且冲击功值不得低于-20℃的冲击值, 抗拉强度也要保持在400 MPa的高度上, 因此研制QT400-18AL (-40℃) 的超低温、高韧性球墨铸铁迫在眉睫。常州华德机械有限公司 (以下简称华德公司) 与有关专家合作, 开展了对超低温高韧性球墨铸铁QT400-18AL (-40℃) 的研制。

1 高速列车转向架轴箱及其性能要求

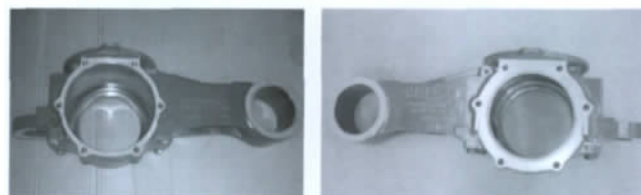
高速列车转向架轴箱的结构如图1、图2所示。

高速列车的转向架轴箱是安装车轮与转向架构架



图1 高速动车组转向架工作状态图

Fig. 1 Functional mode chart of bogie for high speed train



(a) CRH3-300型转向架轴箱

(b) CRH380型转向架轴箱

图2 CRH3系列高速列车转向架轴箱

Fig. 2 CRH3 high speed train bogie bearing housing

的重要部件, 它承载着车体重量, 其质量的优劣直接影响着列车的安全性、稳定性与舒适性。列车运行时,

收稿日期: 2012-05-02。

作者简介: 马敬仲 (1936-), 男, 高级工程师, 主要从事铸铁熔炼及机床铸件的质量控制工作。

转向架轴箱受力复杂，既有线路对车体的冲击与振动，又有轮轨间的阻力摩擦与车轮蛇行运动抗力，皆集中作用在转向架轴箱上。其重要性与可靠性处于列车设计的关键位置，是关系到列车行驶安全的重要部件，性能要求极其苛刻。华德公司2010年研制成功高速列车转向架EN-GJS-400-18U-LT（-40℃）超低温、高韧性球墨铸铁转向架轴箱，并于2011年4月通过铁道动联办审核和批准，获得生产许可证，成为CRH380型高速列车转向架轴箱国内唯一具有资质生产的企业，也是国内唯一对该产品有自主知识产权的企业。

2 超低温高韧性球墨铸铁的技术难度

2.1 超低温与高韧性

要求QT400-18AL在-40℃、-50℃下有冲击性能要求，其冲击功大于或等于-20℃时的冲击功，称为超低温高韧性球墨铸铁。

至今为止，对牌号为EN-GJS-400-18U-LT或QT400-18AL的低温韧性球墨铸铁，仅有-20℃的低温冲击功的要求。现在要求-40℃或-50℃下有冲击功，

同时要求其冲击功与-20℃时冲击功相同（≥12 J），这与球墨铸铁的冲击韧性随温度降低而下降的趋势相悖，故技术难度较大。

2.2 抗拉强度与低温冲击值

要求QT400-18AL在-40℃、-50℃的冲击功值达到≥12 J时，其常温抗拉强度仍达到400 MPa。

球墨铸铁的常温抗拉强度与低温冲击功是相互制约的关系，有低温冲击功要求的球墨铸铁，不仅低温冲击功比常温冲击功低，且其常温抗拉强度也低。这在国家标准中QT400-18AR与QT400-18AL的对比中有所体现。如表1所示。

由表1可知，QT400-18AR与QT400-18AL相比，冲击功由15 J降至12 J，抗拉强度要求也降低10~20 MPa。由表2可知，抗拉强度与低温冲击功的制约关系，也可从另外两个牌号的性能对比上看出，在QT400-18AL牌号与QT350-22AL牌号对比中，QT350-22AL有-40℃低温冲击功要求，但抗拉强度仅要求350 MPa，QT400-18AL的抗拉强度为400 MPa时，其低温冲击功的要求仅限于-20℃。

表1 有低温冲击功要求的球墨铸铁对抗拉强度的影响（附铸试样）

Table 1 The effect of ductile iron with low temperature impact energy on tensile strength						
牌号	对冲击功要求	抗拉强度		屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa (最小)	伸长率/% (最小)	冲击功 /J
		壁厚/mm	R_m /MPa(最小)			
QT400-18AR	常温	≤30	400	250	18	>15(23℃)
		≤60	390	250	15	
		>60~200	370	250	12	
QT400-18AL	低温	≤30	380	240	18	>12(-20℃)
		≤60	370	230	15	
		>60~200	360	220	12	

表2 QT400-18AL与QT350-22AL两牌号中抗拉强度与低温冲击功的关系对比（附铸试样）

Table 2 The comparison of tensile strength and low temperature impact energy of QT400-18AL and QT350-22AL						
牌号	铸件壁厚 /mm	抗拉强度 /MPa	伸长率 /%	冲击吸收功 A_{kv} /J		
				试验温度/℃	三个试样平均值	个别值
QT350-22AL	≤30	350	22	-40±2	12	9
	≤60	330	18	-40±2		
	>60~200	330	15	-40±2	10	7
QT400-18AL	≤30	380	18	-20±2	12	9
	≤60	370	18	-20±2		
	>60~200	360	18	-20±2	10	7

由于抗拉性能与低温韧性相互制约的关系，至今尚未有QT400-18AL（-40℃）与QT350-22AL（-50℃）的牌号，因此对于QT400-18AL球墨铸铁在保持抗拉强度400 MPa下，具有-40℃和-50℃低温冲击功的要求，是对材质性能的挑战，加上前面要求的-40℃的冲击功能与-20℃冲击功相等，难度更大。

2.3 低温冲击功与塑性-脆性临界转变温度

对球墨铸铁低温冲击韧性的研究，不仅包括某低

温时的冲击功，还包括其塑性-脆性临界转变温度和冲击功-温度的转变速率。

冲击性能是测定材料在快速变形下其抵抗变形的能力，用断裂时所吸收的能量来表示。

冲击功是试样断裂时的总功，它由弹性变形时的弹性功、塑性变形时的塑性功和裂纹展开时的撕裂功三部分组成。当温度降至-20℃或-40℃以下对球墨铸铁进行冲击时，其冲击韧性由塑性变为脆性，

这可从扫描电镜下进行鉴别，韧性断口为韧窝状，而脆性断裂为解理状，在两者之间的为准解理状。见图3^[1]。

球墨铸铁的冲击性能包括：上限冲击功 Cv_{max} 、

(其断口为100%韧窝时即塑性范围内的冲击功)、塑性-脆性转变温度（有用冲击功开始下降的温度，也有用具有50%脆性断口的温度即FATT50来表示）和转变速率三部分，见图4^[1]。

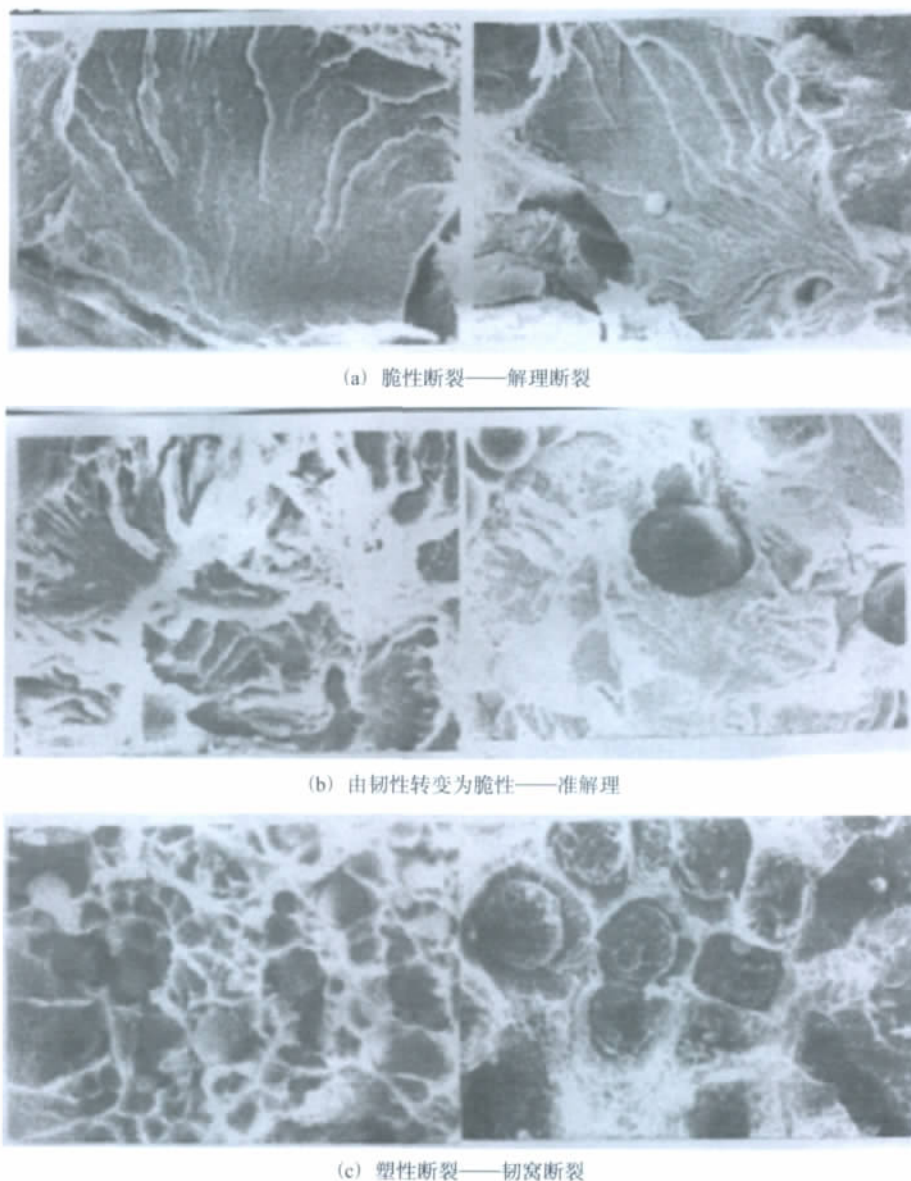


图3 球墨铸铁三种类型的冲击断面

Fig. 3 Impact fracture surface of three types of ductile iron

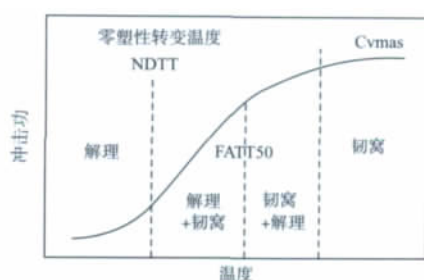


图4 冲击试验随温度下降对冲击功的影响

Fig. 4 The effect of temperature on impact energy

由图4可知，仅研究某一特定低温下的冲击功值是不够的。如测定温度是在塑性-脆性转变区，温度稍有

变化即可使冲击值较大幅度地变化。因此，在研究球墨铸铁低温冲击韧性时，除上限冲击值、塑性-脆性转变温度外，还必须要研究其塑性-脆性转变曲线中的变化速率。好的低温高韧性铁素体球铁应具有高的上限冲击值、低的塑性-脆性转变温度和低的冲击功-温度变化速率。

图5为有缺口与无缺口试样对铁素体球墨铸铁冲击功值及塑性-脆性转变温度的影响^[2]。由图可知，有缺口试样与无缺口相比，上限冲击功下降70%，塑性-脆性转变温度上升约70℃。因此如果要求QT400-18AL在常温23℃、0℃、-20℃、-40℃、-50℃的冲击功

皆≥12 J。则使高速列车的QT400-18AL（-40℃）材质的转向架轴箱在使用中处于更安全、更稳定的位置。当然，这无疑增加了其技术与生产的难度。

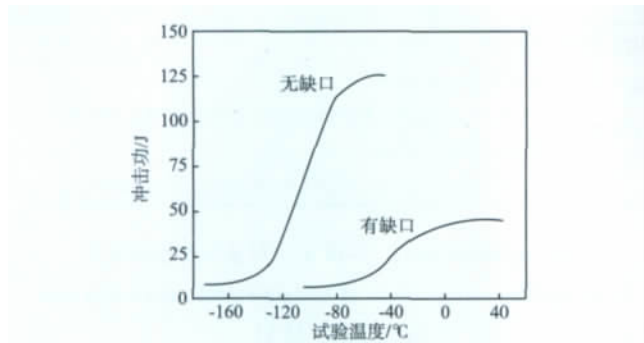


图5 有缺口与无缺口试样对全铁素体球墨铸铁冲击功及塑性-脆性转变温度的影响
Fig. 5 The effect of notched and without notched specimen on impact energy and brittle transformation temperature of ferrite ductile iron

3 全铁素体球墨铸铁 QT400-18AL（-40℃）在高速列车转向架轴箱中的应用

常州华德机械有限公司于2010年成功研制了QT400-18AL（-40℃），2011年4月取得了铁道部关于生产CHR3型转向架轴箱的生产许可证。

表3为60炉次采用承德宝通公司高纯生铁生产转向架轴箱的性能统计（附铸试块25 mm），表4为16炉次采用河北龙凤山高纯生铁生产的转向架轴箱的性能统计。两者皆获得了很好的结果。

表3 转向架轴箱60炉次的性能统计
Table 3 The performance statistic of 60 heat bogie

bearing housing			
项目	平均值	最高值	最低值
抗拉强度/MPa	407.0	414.6	400.3
断后伸长率/%	25.1	27.2	22.0
冲击吸收功(-40℃)/J	15.5	17.8	13.6

由表3、表4可知，研制的QT400-18AL（-40℃）性能特点如下。

3.1 具有较高的常温抗拉强度与伸长率

在-40℃低温冲击值要求下，抗拉强度皆能大于

表7 QT400-18AL的常温性能与金相组织
Table 7 The room temperature performance and metallurgical microstructure of QT400-18AL

试样编号	力学性能				金相组织					
	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	硬度(HBW)	球化级别	石墨大小	铁素体	珠光体	渗碳体	磷共晶
1	387.0	255.0	25.8							
2	390.0	260.0	25.7	135	2级	6级	100%	0	0	0
3	391.0	260.0	25.8							
平均值	389.3	258.3	25.8							

注：以上为热处理后的性能。

表4 转向架轴箱16炉次的性能统计
Table 4 The performance statistic of 16 heat bogie

bearing housing			
项目	平均值	最高值	最低值
抗拉强度/MPa	412.9	422.4	403.3
断后伸长率/%	24.2	26.6	23.0
冲击功(-40℃)/J	15.8	16.9	15.2

400 MPa，平均值分别为407 MPa和412 MPa，最高值分别为414 MPa和422 MPa；伸长率皆大于18%，平均值分别为24.2%和25.1%，最高值分别达到26.6%和27.2%，远大于-20℃时QT400-18AL对常温抗拉强度与伸长率的要求。

3.2 具有较高的低温（-40℃）冲击功

在常温抗拉强度400 MPa下，-40℃时仍有较高的低温冲击功，平均值分别达到15.5 J和15.8 J，最高分别达到16.9 J和17.8 J，远大于QT400-18AL在-20℃时对冲击功的要求（≥12 J）。

3.3 具有较低的塑性-脆性转变温度

低的冲击功-温度曲线的应变速率，使生产的高速列车转向架轴箱在使用中更安全，显著地提高了列车行驶的安全稳定性。

采用模拟试块凝固条件，浇注基尔试棒（25 mm），其配料、熔炼、化学成分见表5和表6，试样的常温性能与金相组织见表7。铸型为树脂砂型。试样在不同温度下的冲击功值见表8。

表5 试样的配料、熔炼、浇注参数
Table 5 The parameter of charging, melting, pouring

配料/kg						出炉温度	浇注温度	浇注时间
生铁	回炉料	废钢	硅铁	球化剂	孕育剂	/℃	/℃	/s
470	520	60	0.5	11.5	6.5	1 521	1 374	144

表6 试样的化学成分
Table 6 The chemical compositions of samples

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	Mg	RE
原铁液	3.731	1.361	0.080	0.025	0.022	0.014	0.012	0	0
球化后铁液	3.422	2.212	0.098	0.022	0.011	0.016	0.015	0.03	0.008

将图6与资料[3-5]介绍的冲击功-温度曲线相比（图7、图8）可看出，华德公司研制的QT400-18AL（-40℃）材质具有较低的冲击功-温度应变速率。

表8 QT400-18AL在不同温度下的冲击功

Table 8 The impact energy under different temperature of QT400-18AL

温度 /℃	冲击功/J			
	1	2	3	平均值
20	18.5	21.0	23.0	20.8
0	19.5	19.0	19.7	19.4
-20	17.8	19.9	19.8	19.2
-40	17.3	17.3	15.8	16.8
-50	13.7	12.9	14.2	13.6

注：以上为热处理后的性能。

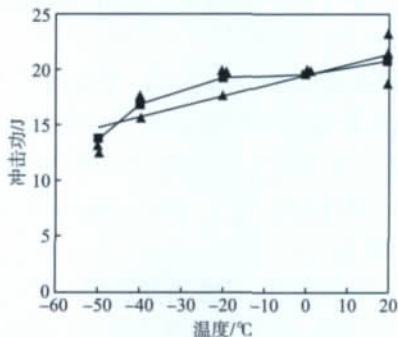


图6 (-40 °C) QT400-18AL在不同温度下的冲击功

Fig. 6 The impact energy under different temperature of QT400-18AL

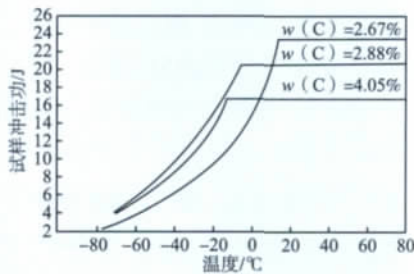


图7 碳对铁素体球铁V形缺口试样冲击功的影响

Fig. 7 The effect of carbon on ferrite ductile iron V shape notched specimen impact energy

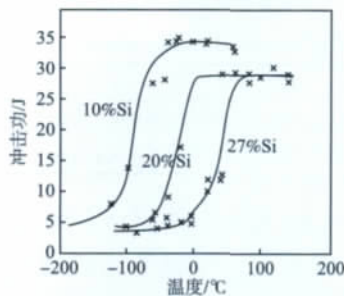


图8 硅对铁素体球铁冲击转变曲线的影响

Fig. 8 The effect of Si on ferrite ductile iron impact transformation curve

3.4 严格的化学成分、金相组织控制

高速列车转向架轴箱的QT400-18AL (-40 °C) 材质在生产中控制十分严格，化学成分范围见表9，金相组织要求见表10。

图9、图10为QT400-18AL (-40 °C) 球墨铸铁转向架轴箱的球化率与基体组织。

值得注意的是，华德公司在生产超低温、高韧

表9 QT400-18AL (-40 °C) 化学成分要求

Table 9 The chemical compositions of QT400-18AL

项目	质量分数/%						
	C	Si	Mn	P	S	Mg _残	RE _残
化学成分	3.6~3.9	2.2~2.4	<0.1	<0.025	<0.01	0.03~0.05	<0.01
球化指数： K_T	<0.6						
干扰元素	$K_T=4.4Ti+2.0As+2.3Sn+5.0Sb+290Pb+370Bi+1.6Al$						
珠光体指数： P_s	<0.6						
	$P_s=0Mn-2.65(Si-2.0)+7.75Cu+96Sn+3.57Pb+333Bi$						

表10 QT400-18AL (-40 °C) 对金相组织的要求

Table 10 The requirement of metallurgical microstructure for QT400-18AL

组织	基体	球化率	球数个/mm ²	晶界夹杂物
指标	100%铁素体	1~2级	>90~150	碳化物+磷共晶≈0

性的QT400-18AL (-40 °C) 球墨铸铁转向架轴箱时对质量控制十分严格，以保证各种性能十分稳定。图11、图12和图13分别为用龙凤山高纯生铁生产的120炉次转向架轴箱性能波动、成分波动和工艺因素波动图。

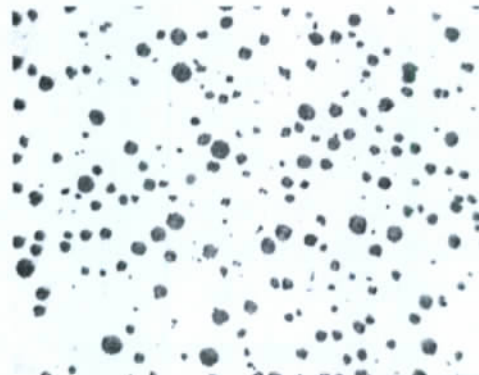


图9 QT400-18AL (-40 °C) 的球化率 100×

Fig. 9 The percent of spheroidization of QT400-18AL

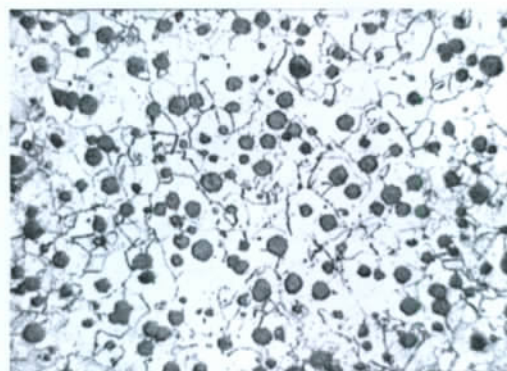


图10 QT400-18AL (-40 °C) 的基体组织 100×

Fig. 10 The matrix microstructure of QT400-18AL

华德公司为了保证生产高速列车转向架轴箱质量的稳定性，将其性能与成分的波动范围控制在一个很窄的范围内，表11为120炉次的性能、组织与成分的波动范围。

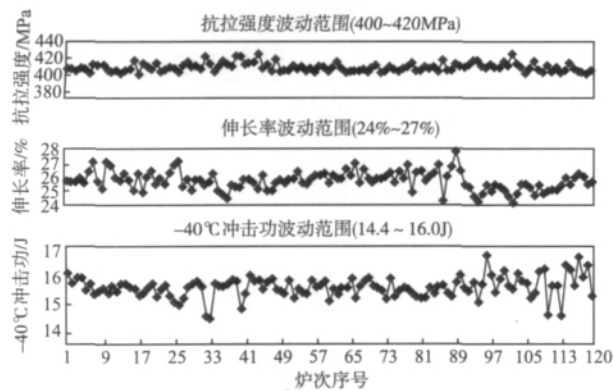


图11 QT400-18AL (-40 °C) 转向架轴箱120炉次性能波动图
Fig. 11 Performance fluctuation of 120 heat QT400-18AL (-40 °C)

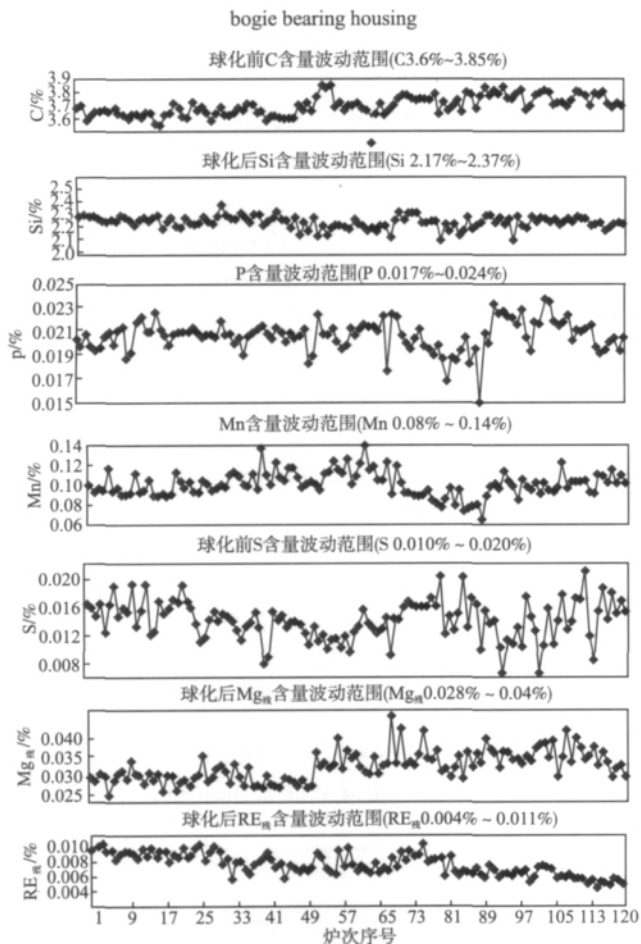


图12 QT400-18AL (-40 °C) 球墨铸铁转向架轴箱120炉次成分波动图
Fig. 12 Composition fluctuation of 120 heat QT400-18AL (-40 °C)

表11 QT400-18AL (-40 °C) 转向架轴箱的性能与成分的波动范围

性能波动范围		组织波动范围		成分波动范围	
性能	波动范围	组织	波动范围	成分	波动范围
抗拉强度/MPa	400~420	基体	100%铁素体	球化前C/%	3.6~3.9
伸长率/%	24~26	球化率	1~2级	球化后Si/%	2.2~2.4
-40 °C冲击功/J	14~16	球径大小	6级	球化后P/%	<0.025
屈服强度/MPa	260~290	晶界夹杂物	碳化物+磷共晶≈0	球化后Mn/%	<0.1
硬度(HBW)	140~180			球化后Mg _残 /%	0.03~0.05
				球化后RE _残 /%	<0.01

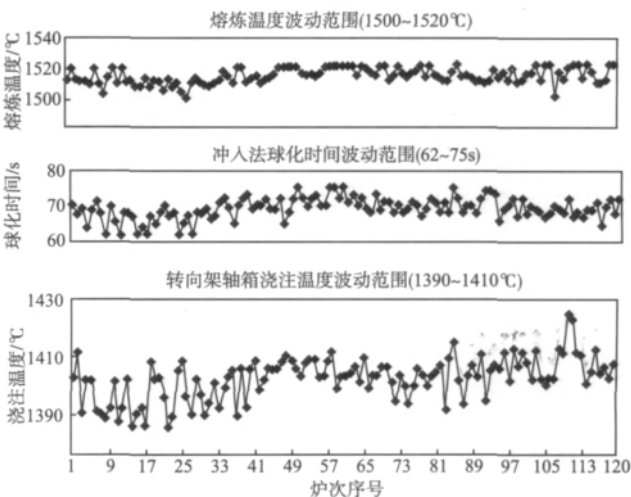


图13 QT400-18AL (-40 °C) 转向架轴箱120炉次工艺因素波动图
Fig. 13 Process factor fluctuation of 120 heat QT400-18AL (-40 °C)

bogie bearing housing

原材料、熔炼、球化、孕育、浇注的严格控制奠定了性能稳定的基础，其控制的工艺因素见表12，表12为QT400-18AL (-40 °C) 在生产中的质量控制要点。

4 结论

自QT400-18Al (-40 °C) 全铁素体球墨铸铁高速列车转向架轴箱研究成功并批量投产已一年多了，通过这一阶段的研究和生产，得出以下结论：

(1) QT400-18Al (-40 °C) 高速列车转向架轴箱的研究和生产是成功的。到目前为止，已生产600多炉，质量非常稳定，完全达到并超过对CRH380转向架轴箱提出的性能要求。

(2) 在QT400-18Al (-40 °C) 力学性能方面有突破，在不加合金元素、保持常温抗拉强度400 MPa的情况下，-40 °C冲击平均值达15.5~15.8 J，-50 °C平均冲击值仍达13.6 J。

(3) 首次做出QT400-18Al (-40 °C) 全铁素体球墨铸铁+20~-50 °C冲击功-温度变化曲线，并积累了大量力学性能数据，为制定低温铁素体球墨铸铁国家标准提供依据。

(4) 高纯生铁是稳定生产超低温、高韧性铁素体球墨铸铁的基础，其他原辅材料、生产过程中造型、

(下转第 864 页)

表6 低温韧性

Table 6 Toughness at low temperature

试验温度/℃	$\alpha_k/(J \cdot cm^{-2})$
20	130.0
-20	99.0
-40	89.0
-60	67.6
-80	65.0
-100	42.0

生成的硫化锰、氧化铝和硅铝酸盐夹杂物中的氧与硫，形成稀土化合物。这些化合物中有部分从钢液中上浮进入渣中，从而使钢液中的夹杂物减少，钢液得到净化。硅和钙对氧的亲合力很大，钙对硫的亲合力也很大，钢中加入硅钙合金脱氧脱硫效果好。由表3可以看出，硅钙合金是很好的复合脱氧剂。

由表4可以看出，钢中加入稀土后，硫化锰将被高温塑性变形能力较小的稀土氧化物或硫化物取代，所以钢中加入稀土可以提高钢的韧性，改善钢的抗疲劳性能，改善夹杂物形态，同时由于稀土在钢中同夹杂物反应生成的稀土化合物熔点较高，在钢液凝固前析出，这些细小的质点，可作为非均质形核中心，降低结晶过程的过冷度，因此，可以减少偏析还可以细化钢的凝固组织微合金化，提高钢的抗氧化能力、高温强度和塑性、疲劳寿命、耐腐蚀性及抗裂性等作用^[2]。

2.7.2 热处理工艺对性能的影响

同炉钢铸件在840~920℃淬火水冷（保温8 h）；520~600℃回火，保温5 h，在不同回火热处理工艺条件下，可获得四个等级要求的性能。说明钢的潜力很大，在较高强度等级下使用，其经济性愈显合理。

2.7.3 精炼工艺对性能的影响

根据统计，采取精炼工艺对本钢种屈服极限 σ_s 有明显的影 响。仅采用炉外喂稀土硅钙线处理的 σ_s 的标准方差 $S=10.048$ ；采用炉外喂稀土硅钙线和吹氩联合精炼的 σ_s 的标准方差 $S=2.496$ ，其性能散布小，115-95、135-125、150-135、160-145四个等级范围其 σ_s 均在

（上接第 861 页）

表12 QT400-18AL（-40℃）质量控制要点

Table 12 The quality control points of QT400-18AL（-40℃）

项目	控制要点
原材料	采用高纯生铁与高质量碳素钢
熔炼温度	1 500~1 520℃
球化温度	1 490~1 500℃
球化时间	62~75 s
浇注温度	1 390~1 410℃
浇注时间	球化后5 min浇完
球化控制要点	原铁液 $S<0.02\%$ ，球化后 $Mg_{残}$ 含量控制在 $0.03\% \sim 0.04\%$ ， $RE_{残}<0.01\%$ 。
扒渣	用珍珠岩聚渣，扒渣三次。

853.83 MPa附近（见图1），与原工艺 $\sigma_s \leq 637$ MPa比较，高于原工艺并有一定的储备。表明钢包底吹氩后，钢液得到充分搅拌使氩气泡上浮，钢中气体、夹杂物随之上浮。搅拌使钢液温度和成分均匀，以及炉外喂稀土硅钙线都有利于钢的力学性能提高。

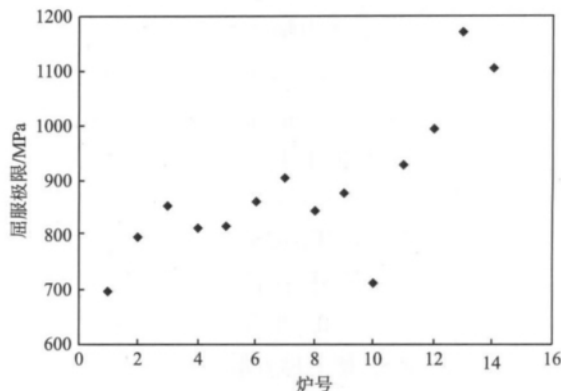


图1 研制钢屈服极限的散布图

Fig. 1 The dispersion pattern of developing steel on yield limit

3 结束语

生产的多元素低合金高强韧稀土铸钢成分设计及经济性合理，具有高强韧结构铸钢的良好综合工艺性能。采用小容量电炉的炉外喂稀土硅钙线、钢包吹氩等精炼技术，是提高钢质的有效途径，方法简单易行，冶金效果良好，具有广泛的应用前景。

参考文献：

- [1] 刘汉宜. 焊接碳当量计算及公式应用 [J]. 承钢技术, 2007 (1): 34-38.
- [2] 周愆武, 彭平, 徐少华, 等. 稀土元素在钢中的应用与研究 [J]. 铸造设备研究, 2004 (3): 35-38.
- [3] 张仲秋, 纪忠民, 李中朝, 等. 纯净铸钢及其精炼 [J]. 铸造, 1998 (1): 49-52.
- [4] 顾钰熹, 王宗杰. 34CrNi3Mo低合金高强度调质钢焊接冷裂纹敏感性研究 [J]. 辽宁机械, 1983 (6): 1-9.

（编辑：刘冬梅，ldm@foundryworld.com）

制芯、熔炼、球化、孕育、浇注等每一工艺环节的控制，是保证质量稳定必不可少的保证。

参考文献：

- [1] 黄志光. 铸件内在缺陷分析与防止 [M]. 北京：机械工业出版社，2011.
- [2] 中国机械工程师学会铸造分会. 铸造手册（第1卷）铸铁 [M]. 第2版，北京：机械工业出版社，2002.
- [3] Richards P J. Low temperature properties of cast iron [C]// Conference on Engineering Properties and Performance of Modern Iron Castings, BCIBA, 1972.
- [4] Gilbert G N J. Ductility of cast iron with special reference to impact properties [C]// Conference on Engineering Properties and Performance of Modern Iron Castings, BCIBA, 1972.
- [5] 吴金寿, 席赞, 祖方道. 低温高韧性球墨铸铁特点及韧性控制因素 [J]. 中国铸造装备与技术, 2009 (6): 1-5.

（编辑：张允华，zyh@foundryworld.com）