

高强高韧超低温球墨铸铁的研究与开发

喻光远, 肖恭林, 陈琳, 徐小辉

(中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司, 江苏常州 213011)

摘要: 分别以高强高韧球墨铸铁材料QT500-7和QT600-7为研究对象, 在满足其高强度、高韧性的前提下, 为获得良好的超低温性能进行了试验研究。研究表明, 通过控制镍0.8%~2.0%, 铜0.1%~0.5%, 硫0.004%~0.008%, 可获得高强高韧超低温球墨铸铁材料QT500-7LT和QT600-7LT。采用复合球化孕育工艺可提高QT600-7LT超低温性能。

关键词: 球墨铸铁; 高强高韧; 超低温

近年来, 我国轨道交通业快速发展, 电力机车运行的地域辽阔, 纬度跨度很大, 寒冷地区冬季的温度可达到 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。基于机车运行速度及安全的考虑, 对电力机车用球墨铸铁齿轮箱等铸件的低温冲击韧性的要求越来越高^[1-2]。中国铁路总公司的TJ/JW 065—2015《交流传动机车球墨铸铁齿轮箱暂行技术条件》规定, 球墨铸铁齿轮箱不仅要具备国标GB/T 1348—2009规定的QT500—7A的力学性能, 而且还要兼具较高的伸长率和低温冲击韧性, 即: 伸长率 $A \geq 8\%$, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击功 A_{KV} 均值 $\geq 4\text{ J}$, 单值 $\geq 3\text{ J}$ 。传统的QT500-7A球墨铸铁不能满足这个要求, 国标GB/T 1348—2009中的QT400-18AL材料, 低温 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击功 A_{KV} 均值 $\geq 12\text{ J}$, 伸长率也达到18%以上, 但其抗拉强度 $R_m \geq 400\text{ MPa}$, 屈服强度 $R_{p0.2} \geq 240\text{ MPa}$, 与QT500-7A相差甚远, 且还需要进行高温石墨化退火处理^[3-4]。

基于上述现状, 本公司研发了高强高韧超低温球墨铸铁材料QT500-7LT, 并应用于交流传动机车球墨铸铁齿轮箱箱体。随着铁路向着高速、重载方向的不断深入, 本公司又研究了QT600-7LT的高强高韧超低温球墨铸铁材料, 在保证高强度高韧性前提下, 提高其超低温冲击性能, 满足了轨道交通用关键零部件材料不断升级的需求。

1 试验方法

1.1 试验材料

试验原材料为Q10生铁、高纯生铁、废钢、铁合金、孕育剂、球化剂、硅钢片, 主要炉料成分见表1, 球化剂、孕育剂成分见表2。

1.2 试验设备

熔炼设备为100 kg中频感应电炉, 浇注设备为100 kg球化铁液包, 称量设备为磅秤、电子天平, 随流孕育装置为自制的流量孔为 $\phi 4\text{ mm}$ 的浇注随流孕育加料器。

1.3 试样制备过程

熔炼时, 加料顺序为生铁、废钢、合金; 熔炼温度 $1\ 500\sim 1\ 550\text{ }^{\circ}\text{C}$, 出铁温度 $1\ 500\sim 1\ 520\text{ }^{\circ}\text{C}$, 浇注温度 $1\ 380\sim 1\ 420\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。球化处理采用冲入法进行, 孕育采用包底

作者简介:

喻光远(1982-), 男, 硕士, 工程师, 从事铸铁熔炼及铸造工艺研究工作。E-mail: yuan10122003@163.com

中图分类号: TG255

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)03-0258-06

收稿日期:

2018-09-02 收到初稿,
2018-10-09 收到修订稿。

表1 炉料的化学成分

Table 1 Chemical composition of furnace charge

炉料	C	Si	Mn	P	S	V	Ti	$w_B/\%$
Q10生铁	4.39	0.54	0.06	0.022	0.013	0.01	0.03	
高纯生铁	4.21	0.09	0.04	0.031	0.005	0.01	0.01	
废钢	0.16	0.17	0.61	0.015	0.009			

表2 球化剂、孕育剂化学成分

Table 2 Chemical composition of nodulizer and inoculant

项目	Si	Mg	RE	Ca	Ba	Al	MgO	$w_B/\%$
球化剂	44 ~ 47	4.5 ~ 5.5	0.6 ~ 1.0	0.8 ~ 1.2		1.0	0.4	
孕育剂	65 ~ 75			1 ~ 1.2	1.8 ~ 2.5	0.6 ~ 1.0		

覆盖和出4/5铁液后二次冲入孕育。浇注采用随流孕育。浇注的Y形试块尺寸如图1所示。

1.4 检验方法

按照ISO 945的标准, 采用A1m型金相显微镜进行微观组织观察, 使用HB-3000布氏硬度计和JNB-300B摆锤式冲击试验机进行硬度和冲击试验。

成分试块。在保持其他成分相同的情况下, 不同镍含量下铸态试块力学性能及 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 低温冲击性能结果如图2所示, 试块铸态金相组织如表3所示。

由图2、表3可知, 单独加镍的方案能获得较好的低温冲击性能和伸长率。其中, $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 冲击功的四个平均值分别为6.7 J、7.0 J、7.3 J和7.7 J, 且单值 $\geq 6\text{ J}$, 伸

2 试验结果与分析

2.1 合金元素的影响

综合考虑合金化元素的作用, 选择三个方案进行了试验: ①单独添加镍; ②镍+钼复合添加; ③镍+铜复合添加。

2.1.1 单独添加镍

以QT500-7为研究对象, 选取生铁、废钢为主要炉料的配料熔炼工艺, 1.0%~1.5%球化剂、0.8%~1.3%孕育剂, 浇注随流孕育, 一包铁液浇注4种不同镍含量

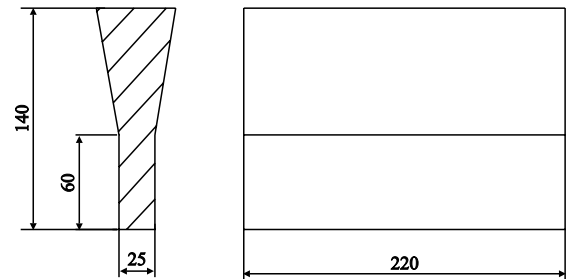
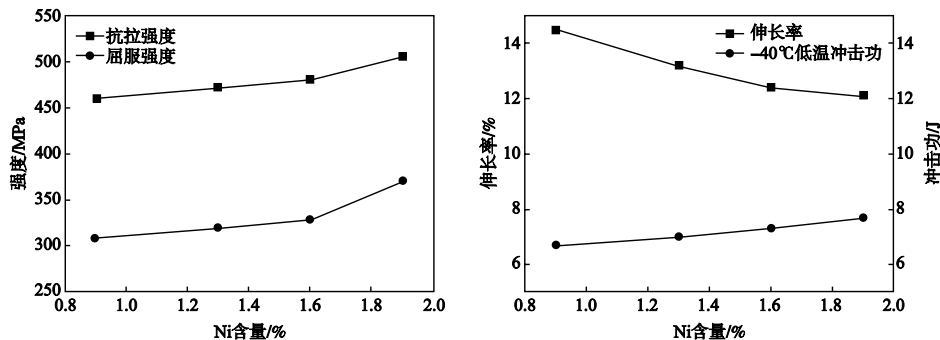


图1 Y形试块

Fig. 1 Y-Type block dimensions



(a) 强度

(b) 伸长率和冲击功

图2 镍含量对QT500-7力学性能的影响

Fig. 2 Effect of nickel content on mechanical properties of QT500-7

长率 $\geq 12\%$ ，但当镍含量达到较高的1.9%时，试验的QT500-7材料抗拉强度才大于500 MPa。说明如果单独加Ni合金，镍加入量 $\geq 1.9\%$ 试棒铸态抗拉强度才能到500 MPa。

镍扩大稳定系Fe-G和介稳定系Fe-FeC之间的共晶温度间隔，共晶期间促进石墨化，并细化石墨，同时固溶强化基体组织，可提高球铁的抗拉强度和冲击韧性^[4]。在 $w(\text{Ni}) < 2\%$ 时，属于弱珠光体形成元素，对球铁的力学性能很难有显著提高。若使抗拉强度大于500 MPa，必须大幅度增加镍的加入量，因此生产成本较高。

2.1.2 镍+钼复合添加

以QT500-7为研究对象，选取Q10生铁、废钢为主要炉料的配料熔炼工艺，1.0%~1.5%球化剂、

0.8%~1.3%孕育剂，浇注随流孕育，在保持其他成分相同的情况下，并确定钼含量为0.17%，一包铁液浇注5种不同镍含量成分试块。不同镍含量下铸态试块力学性能及 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 低温冲击性能结果如图3所示，试块铸态金相组织如表4所示。

由图3、表4可知，镍、钼复合添加能获得较好的低温冲击性能和满足条件的伸长率。其中，试验3-5中 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 的三个平均值分别为5.3 J、4.7 J和4.3 J，尽管单值和平均值均大于4 J，但抗拉强度 $< 500\text{ MPa}$ ，达不到要求。

Mo能降低球墨铸铁的脆性转变温度，低Mn球墨铸铁加入少量Mo可提高铸态冲击韧性^[4]，但少量的Mo ($\leq 0.2\%$) 对抗拉强度的提高非常有限，但提高Mo含量则会因珠光体量增加使伸长率和低温冲击韧性大大

表3 铸态试块的金相组织
Table 3 Metallographic structure of as-cast specimens

试验序号	Ni含量/%	石墨级别	金相组织
1	0.9	85%VI5/6+15%V5/6	F+<10%P
2	1.3	85%VI5/6+15%V5/6	F+(10~20)%P
3	1.6	85%VI5/6+15%V5/6	F+(15~25)%P
4	1.9	85%VI5/6+15%V5/6	F+(25~35)%P

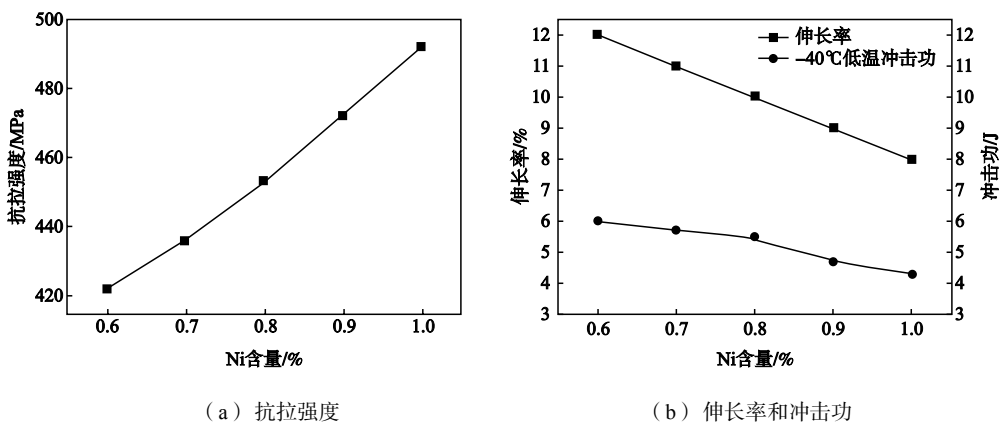


图3 镍含量对QT500-7 (0.17%Mo) 力学性能的影响
Fig. 3 Effect of nickel content on mechanical properties of QT500-7 with 0.17% Mo

表4 铸态试块的金相组织
Table 4 Metallographic structure of as-cast specimen with 0.17% Mo

试验序号	Ni含量/%	石墨(ISO 945)	金相组织
1	0.6	85%VI5/6+15%V5/6	F+(5~10)%P
2	0.7	85%VI5/6+15%V5/6	F+(10~20)%P
3	0.8	80%VI5/6+20%V5/6	F+(15~25)%P
4	0.9	80%VI5/6+20%V5/6	F+(25~35)%P
5	1.0	80%VI5/6+20%V5/6	F+(25~35)%P

降低。考虑到提高Mo含量对生产成本增加较多以及对抗拉强度的提高有限, 舍弃使用镍+钼的方案。

2.1.3 镍+铜复合添加

以QT500-7和QT600-7为研究对象, 选取Q10生铁、废钢为主要炉料的配料熔炼工艺, 1.0%~1.5%球化剂、0.8%~1.3%孕育剂, 浇注随流孕育, 在保持其他成分相同的情况下, 进行不同镍含量及铜含量试验, 每包铁液浇注1种铜含量4种镍含量成分试块, 连续浇注5包, 不同镍、铜含量下铸态试块的力学性能如图4和图5所示, QT500-7试块铸态金相组织如表5所示。

由图4、图5和表5可知, 当镍含量<0.8%, 抗拉强度<500 MPa, 达不到要求。镍含量在1.0%~1.5%, 铜含量在0.35%~0.45%范围内, 抗拉强度>600 MPa, 屈服强度($R_{p0.2}$) \geq 370 MPa, 伸长率 \geq 7%。V形缺口的珠光体与铁素体复合基体的球墨铸铁, -40℃冲

击吸收功平均值 \geq 4 J。镍、铜复合添加, 能获得较好的力学性能。由于铜的价格比钼便宜很多且能达到技术要求, 因此, 镍+铜的组合方案较好。对于QT500-7 LT, 镍含量控制在0.8%~2.0%, 铜含量控制在0.1%~0.2%, 材料的综合性能最好; 对于QT600-7 LT, 镍含量在1.0%~2.0%, 铜含量在0.2%~0.5%, 材料的综合性能最好。

2.2 硫的影响

以QT500-7为研究对象, 选取生铁、废钢为主要炉料, 与选取高纯生铁、管切头废钢为主要炉料的配料熔炼工艺进行对比, 1.0%~1.5%球化剂、0.8%~1.3%孕育剂、0.3%~1.0%硅钢片、0.1%铜、0.1%锰、0.95%镍, 其他0.3%~1.0%, 一包铁液浇注4个试块, 试块铸态力学性能如图6所示。

由图6可知, 相同的镍、铜含量, 低硫比高硫

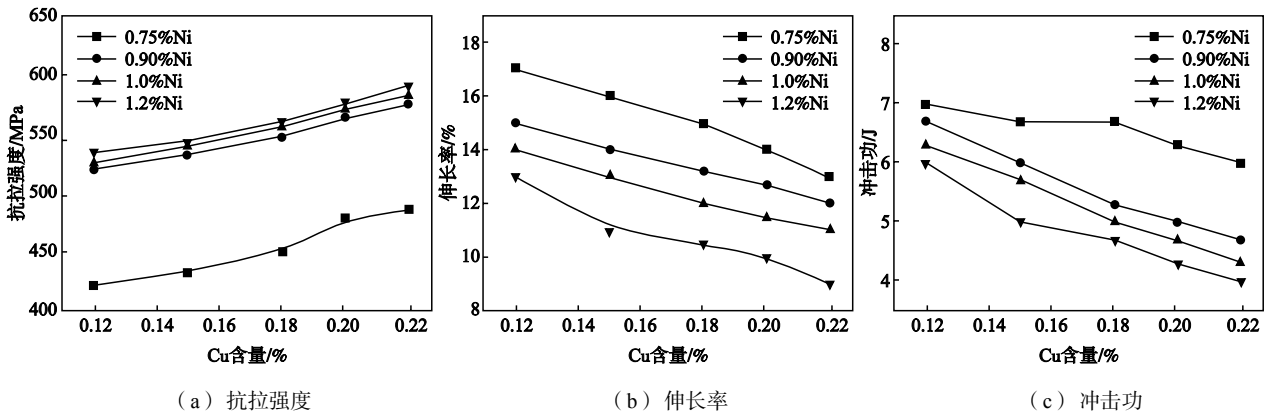


图4 镍含量一定, 不同铜含量对QT500-7力学性能影响
Fig. 4 Effects of copper and nickel addition on mechanical properties of QT500-7

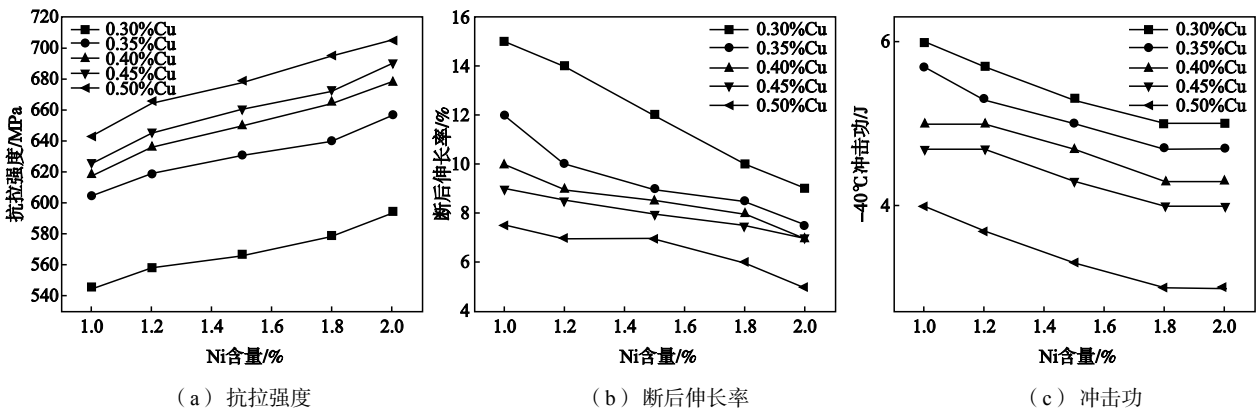


图5 铜含量一定, 不同镍含量对QT600-7力学性能影响
Fig. 5 Effect of nickel and copper addition on mechanical properties of QT600-7

获得了较好的力学性能。当采用高纯生铁硫含量 $\leq 0.008\%$ ，抗拉强度 > 550 MPa；但采用普通Q10生铁硫含量稍高，硫含量 $\geq 0.012\%$ ，抗拉强度 < 500 MPa。由此可见，铁液中硫含量控制得低有利于提高力学性能，试验结果显示最佳的硫含量在 $0.004\% \sim 0.008\%$ 之间。

2.3 球化孕育的影响

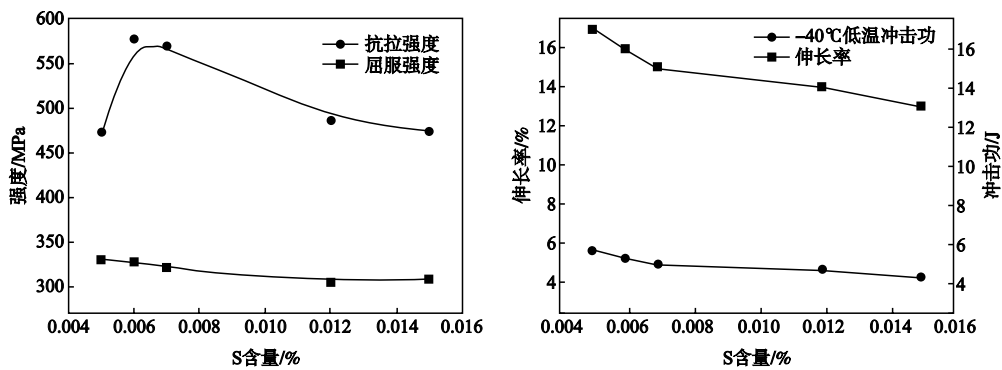
以QT600-7LT为研究对象，选用两种不同的球化孕

育工艺进行对比试验，其他条件相同，方案1选用常规球化孕育，方案2采用复合球化孕育，每个方案浇注三个试块，试验结果如表6所示。

由表6可知，采用复合球化孕育工艺，可提高球墨铸铁的球化级别和细化石墨球，同时促进铁素体的形成，相同铁液成分条件下，有利于提高低温冲击性能，复合孕育比常规孕育的 -40 °C冲击吸收能量提高 $9.3\% \sim 25\%$ 。

表5 铸态试块的金相组织
Table 5 Metallographic structure of as-cast specimens

试验序号	Cu含量/%	石墨(ISO 945)	金相组织
1	0.12	80%VI6/7+20%V6	F+(5~15)%P
2	0.15	85%VI6/7+15%V6	F+(10~20)%P
3	0.18	85%VI6/7+15%V6	F+(15~25)%P
4	0.2	80%VI6/7+20%V6	F+(20~30)%P
5	0.22	85%VI6/7+15%V6/7	F+(30~40)%P



(a) 强度

(b) 伸长率和冲击功

图6 不同硫含量对QT500-7LT力学性能影响

Fig. 6 Effect of sulphur content on mechanical properties of QT500-7LT

表6 铸态试块的金相组织及低温性能
Table 6 Metallographic structure and low temperature impact energy of as-cast QT600-7LT specimens

方案	石墨 (ISO 945)	金相组织	-40 °C冲击功 (A_{KV2}) /J			
			单值	单值	单值	平均值
常规孕育1-1	80%VI6/7+20%V6	P+(5~30)%F	4	4	5	4.3
复合孕育2-1	85%VI6/7+15%V6	P+(10~35)%F	5	5	5	5
常规孕育1-2	80%VI6/7+20%V6	P+(5~30)%F	4	4	5	4.3
复合孕育2-2	85%VI6/7+15%V6	P+(10~35)%F	5	4	5	4.7
常规孕育1-3	80%VI6/7+20%V6	P+(5~30)%F	4	4	4	4
复合孕育2-3	85%VI6/7+15%V6	P+(10~35)%F	5	5	5	5

3 结论

(1) 单独采用加镍方案和镍+钼方案不适合该材料生产, 成本较高; 采用镍+铜是比较理想的方案, 不仅生产成本低且材料力学性能较好, 镍含量控制在0.8%~2.0%, 铜含量控制在0.1%~0.2%, 满足了铁路标准TJ/JW 065—2015对交流传动机车球墨铸铁齿轮箱材料(QT500-7LT)的要求。

(2) 采用镍+铜的合金化方案制备QT600-7LT, 即镍含量在1.0%~2.0%, 铜含量在0.2%~0.5%, 材料具有更高的力学性能和一定的超低温性能。

(3) 铁液中硫含量对材料的力学性能及稳定性影响较大, 硫含量应控制在0.004%~0.008%之间。

(4) 采用复合球化孕育可以提高球化石墨形态和增加铁素体含量, 有利于提高材料的超低温性能。

参考文献:

- [1] 俞旭如, 李小青.《风力发电机组 球墨铸铁铸件》国家标准介绍 [J]. 现代铸铁, 2009(4): 29-34.
- [2] 相海锋, 刘金海. 耐低温冲击风电球铁铸件生产工艺要点 [J]. 现代铸铁, 2010(3): 51-55.
- [3] 姜士平, 苏文生, 孙鑫志. 耐低温球墨铸铁输送管的生产实践 [J]. 铸造, 2011, (10): 956-958.
- [4] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册第1卷: 铸铁 [M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2002.

Research and Development of Ultra-Low Temperature Ductile Iron with High Strength and High Toughness

YU Guang-yuan, XIAO Gong-lin, CHEN Lin, XU Xiao-hui
(CRRRC Qishuyan Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, Jiangsu, China)

Abstract:

Based on high strength and high toughness QT500-7 and QT600-7 ductile irons, a series of studies were carried out by adding alloying elements to achieve a new type of ductile iron material with high strength, high toughness and good ultra-low temperature performance. The results showed that QT500-7LT and QT600-7LT with high strength, high toughness and ultra-low temperature performance was available when the nickel addition range was controlled between 0.8% and 2.0%, copper addition range between 0.1% and 0.2%, and the sulfur content range between 0.004% and 0.008%. Using the compound spheroidization inoculation process, the ultra-low temperature performance of QT600-7LT could be improved.

Key words:

ductile iron; high strength and high toughness; ultra-low temperature
