

# 镍和硅复合添加对低温高韧性球墨铸铁组织和性能的影响

王文慧, 孙玉福, 肖志云

(郑州大学材料科学与工程学院, 河南郑州 450002)

**摘要:** 采用1.2%~1.8%的镍对低温球墨铸铁进行合金化, 同时加入2.0%~2.5%Si, 并采用石墨化两阶段退火或低温石墨化退火工艺进行热处理。结果表明, 热处理后材料的微观组织由铁素体、球状石墨和极少珠光体组成。当Si量为2.01%, Ni量为1.2%时, -20℃和-40℃的低温冲击功 $A_{KV}$ 都最高, 分别达到16.3 J和13.6 J, 同时抗拉强度大于400 MPa, 伸长率高达23%。因此, 要获得低温高韧性球墨铸铁, 即保证不降低材料低温冲击功的前提下, 提高其抗拉强度, 应该选择合理的镍、硅含量, 其中Ni量不超过1.5%, Si量在1.9%和2.3%之间。

**关键词:** 低温高韧性球墨铸铁; 镍、硅复合添加; 低温冲击韧性; 风电铸件

随着经济技术的发展, 自然资源消耗日益严重, 风力发电作为新能源中发展比较成熟的技术受到越来越多的重视<sup>[1-2]</sup>。风电铸件包括轮毂、底座、力矩支撑、齿轮箱体、行星支架、齿轮箱等, 材质均为球墨铸铁<sup>[3]</sup>, 不仅要求具有优良的常温力学性能, 而且要有良好的低温冲击韧性(-20℃ $A_{KV} \geq 12$  J, 甚至要求-40℃ $A_{KV} \geq 12$  J)<sup>[4]</sup>。

近年来, 许多学者对低温球墨铸铁进行了研究, 并取得了一些较满意的研究成果。吉文哲等<sup>[5]</sup>向球墨铸铁中加入约0.6%的Ni进行合金化, 对其进行热处理得到铁素体+石墨球组织, 在-60℃的试验条件下, 冲击功达到13.2 J; J. Lacaze等<sup>[6]</sup>研究发现, 镍元素的加入会降低共析转变温度, 改善低温冲击韧性; 杨忠华<sup>[7]</sup>从电子层面研究了Si、Ni对铸态球墨铸铁基体组织、固溶强化及韧脆转变温度等方面的影响, 建立Si、Ni扩散的原子模型, 通过计算能量及电子结构, 分析了Si、Ni在固溶强化及韧脆转变等方面的作用。

为了获得低温高强韧性球墨铸铁, 即保证不降低材料低温冲击功的前提下, 提高其抗拉强度, 本研究采用1.2%~1.8%Ni合金化球墨铸铁, 并改变硅的含量, 根据珠光体和渗碳体含量制定石墨化退火工艺, 研究镍和硅复合添加对低温高韧性球墨铸铁的组织 and 性能的影响规律, 最终确定合理的镍、硅含量。

## 1 试验条件和方法

原材料采用铸造生铁、低锰、低磷废钢、微硫增碳剂和电解镍板, 利用中频感应电炉熔炼, 铁液出炉温度控制在1 450~1 500℃, 浇注温度为1 350~1 380℃。Y型单铸试块采用呋喃树脂砂造型, 球化剂选用FeSiMg8Re5, 加入量1.8%, 粒度1~3 mm, 球化工艺为冲入法; 孕育剂选用硅铁和硅钡复合长效孕育剂, 配比为1.0%FeSi75+0.3%SiBa, 加入量1.3%, 粒度1~3 mm, 采用包底孕育工艺。截取Y型试块的有效部位, 利用线切割将其加工成金相、硬度、抗拉、低温冲击、SEM扫描及能谱分析等试验所需试样。

作者简介:

王文慧(1994-), 女, 硕士生, 主要研究方向为抗磨耐热合金材料。  
E-mail:18838906673@163.com

中图分类号: TG255  
文献标识码: A  
文章编号: 1001-4977(2019)05-0456-08

收稿日期:

2018-10-08 收到初稿,  
2019-01-05 收到修订稿。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 成分分析

浇注时取少量铁液分成9组试样, 对其进行光谱分析, 化学成分分析结果如表1所示。

### 2.2 镍、硅对低温高韧性球墨铸铁组织的影响

#### 2.2.1 铸态组织

图1是铸态试样微观组织。按照GB/T 9441—2009《球墨铸铁金相检验》对珠光体以及自由渗碳体数量进行评定, 结果如表2所示。从图1可以看出, 铸态组织由球状石墨、铁素体、珠光体和少量渗碳体组成。各试样的石墨球大小等级均在6级或以上, 石墨球化等级在2级或以上。在试验成分范围内, 镍和硅含量的变化对石墨大小及形态影响不大。在Si含量一定时, 随着Ni含量的增加, 铸态组织中的珠光体量增加, 因为Ni是珠光体稳定元素, 能细化并增加珠光体含量; Ni量一定时, 随Si量的增加铁素体量增加, 因为Si为铁素体形成元素, 所以随着硅量增加, 铁素体量增加<sup>[8]</sup>。

从表2可知, 1<sup>#</sup>~3<sup>#</sup>试样都有渗碳体出现。这是因为1<sup>#</sup>~3<sup>#</sup>试样含硅量较低, 试样白口化倾向大, 而镍的石墨化作用仅有Si的1/4~1/3<sup>[9]</sup>, 不能弥补Si量的降低, 因此会有渗碳体的出现。为使基体组织中铁素体量大于95%, 需要对1<sup>#</sup>~3<sup>#</sup>试样进行石墨化两阶段退火, 4<sup>#</sup>~9<sup>#</sup>试样进行低温石墨化退火, 工艺如图2和图3所示。

#### 2.2.2 热处理后组织

图4是热处理后的试样组织, 表3为热处理后的组织分析结果。从图4中可以看出, 热处理后, 各试样中的渗碳体消失, 只有2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>分别含有5%、10%的珠光体, 其余试样铁素体含量均超过了95%, 满足了低温高韧性球墨铸铁组织要求。镍是促进珠光体形成元素, 低温退火阶段(包括两阶段退火中的低温退火阶段), 镍元素的存在阻止了珠光体分解为铁素体和石墨。而硅是铁素体形成元素, 硅的存在使退火朝着形

成铁素体方向发展。所以镍含量越高, 硅含量越低则退火难度越大, 试样退火组织中残留未分解的珠光体越多, 即含硅量较低、含镍量高的2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>试样中有较多的残留未分解珠光体。

图5是热处理后8<sup>#</sup>试样的SEM能谱面扫描, 从图中可以看出, Ni、Si均匀固溶于铁素体基体中。

### 2.3 镍、硅对低温高韧性球墨铸铁常温力学性能的影响

图6是热处理后试样的布氏硬度、抗拉强度以及伸长率检测结果。由图6可知, 各试样的抗拉强度都大于400 MPa, 符合试验要求。当含硅量一定时, 随着镍含量的增加, 抗拉强度、布氏硬度升高, 伸长率降低。1<sup>#</sup>~3<sup>#</sup>与4<sup>#</sup>~9<sup>#</sup>试样不同, 基体组织中残留有较多的珠光体, 常温力学性能不仅受镍固溶强化影响, 还受珠光体含量的影响<sup>[10]</sup>。3<sup>#</sup>试样珠光体量及镍含量都最多, 因此布氏硬度、抗拉强度较高, 而伸长率较低。4<sup>#</sup>~9<sup>#</sup>试样没有或者仅有少量珠光体, 因此只受Ni固溶强化作用的影响, 随镍含量增加, 布氏硬度、抗拉强度提高, 伸长率降低。当含镍量一定时, 随着硅量的增加, 抗拉强度、布氏硬度先减后增, 伸长率降低。硅固溶于铁素体基体中, 使晶格产生畸变, 随硅量的增加, 晶格畸变程度增加, 材料的硬度、抗拉强度提高, 而伸长率显著降低, 而且硅量越高, 脆性断裂越明显<sup>[11]</sup>, 因此低温高韧性球墨铸铁硅含量不能超过2.5%<sup>[12]</sup>。镍含量为1.2%的1<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>试样, 随着硅含量的增加, 硬度、抗拉强度先减后增, 1<sup>#</sup>试样约有3%珠光体, 4<sup>#</sup>试样约有1%珠光体, 珠光体使1<sup>#</sup>试样的硬度、抗拉强度高于4<sup>#</sup>试样, 而伸长率较之降低; 7<sup>#</sup>试样含硅量较高, 硅的固溶强化作用使7<sup>#</sup>试样的硬度、抗拉强度高于4<sup>#</sup>试样, 但伸长率显著降低, 所以1<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>试样随着含硅量的增加, 硬度、抗拉强度先减后增, 伸长率不断降低。镍含量为1.5%的2<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>试样以及镍含

表1 化学成分分析结果  
Table 1 Chemical compositions of nine samples

试样	C	Si	Ni	Mn	P	S	Mg <sub>残</sub>	RE <sub>残</sub>
1 <sup>#</sup>	3.91	2.01	1.20	0.21	0.034	0.027	0.053	0.036
2 <sup>#</sup>	3.86	2.07	1.52	0.19	0.034	0.028	0.054	0.036
3 <sup>#</sup>	3.80	2.03	1.78	0.18	0.032	0.022	0.055	0.038
4 <sup>#</sup>	3.84	2.20	1.19	0.20	0.036	0.022	0.048	0.029
5 <sup>#</sup>	3.87	2.22	1.45	0.22	0.035	0.025	0.046	0.027
6 <sup>#</sup>	3.82	2.20	1.77	0.19	0.034	0.023	0.047	0.032
7 <sup>#</sup>	3.93	2.45	1.18	0.17	0.028	0.021	0.047	0.034
8 <sup>#</sup>	3.92	2.48	1.50	0.17	0.030	0.023	0.056	0.043
9 <sup>#</sup>	3.84	2.46	1.74	0.17	0.028	0.021	0.058	0.039

量为1.8%的3<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>、9<sup>#</sup>试样，硬度、抗拉强度和伸长率的变化原因也是如此。

为了进一步说明镍、硅对抗拉强度及伸长率的影响，分别对3<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>、9<sup>#</sup>拉伸试样断口形貌进行SEM图像分析，结果如图7所示。从图中可以看出，6<sup>#</sup>、9<sup>#</sup>试样断口存在大量韧窝及石墨空洞，空洞四周由密集分

布的韧窝组成了撕裂岭，撕裂岭呈封闭状态。试样断口在铁素体基体上出现大量韧窝，此种断裂为韧性断裂。当石墨或石墨空洞被撕裂岭完全封闭时，裂纹较难扩展到邻近的石墨中去，同时石墨被铁素体基体所包围，6<sup>#</sup>、9<sup>#</sup>试样铁素体量都超过95%，铁素体量大，表明试样在断裂前表现出充分的塑性变形。3<sup>#</sup>试样的断

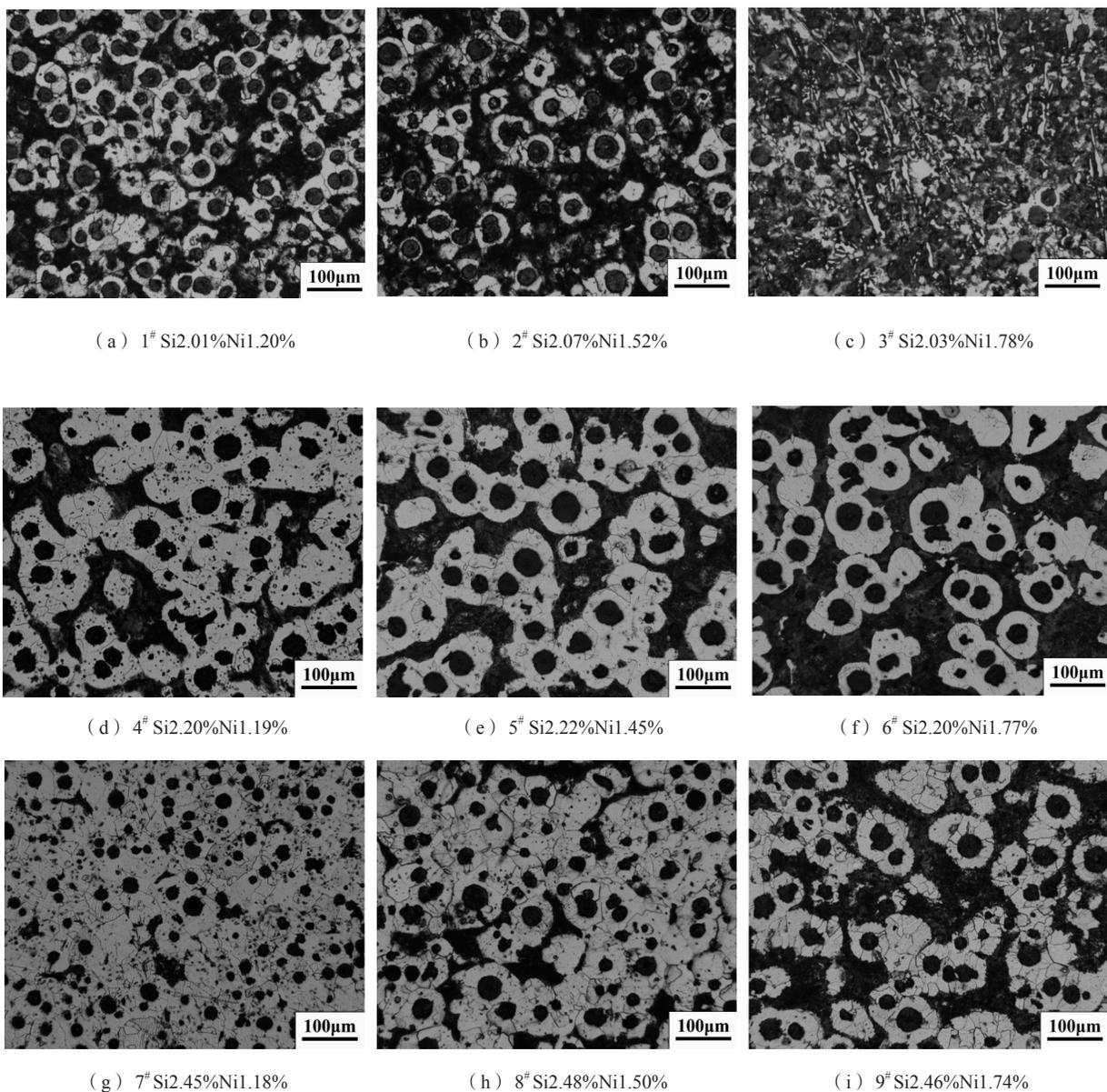


图1 铸态试样金相组织

Fig. 1 Microstructures of as-cast samples

表2 铸态组织中珠光体和渗碳体含量

Table 2 Proportions of pearlite and cementite in as-cast microstructures of nine samples

项目	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	6 <sup>#</sup>	7 <sup>#</sup>	8 <sup>#</sup>	9 <sup>#</sup>
珠光体数量	45	55	65	25	35	50	8	20	35
渗碳体数量	3	4	10	1	1~2	2	0	0	0

/%

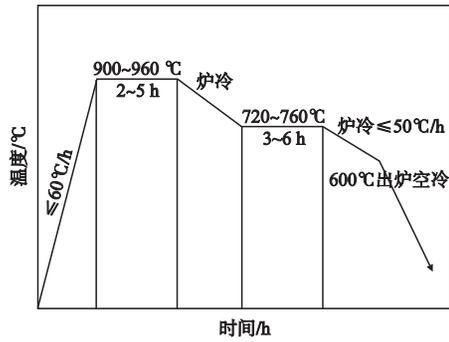


图2 石墨化两阶段退火工艺

Fig. 2 Two-stage annealing process of graphitizing

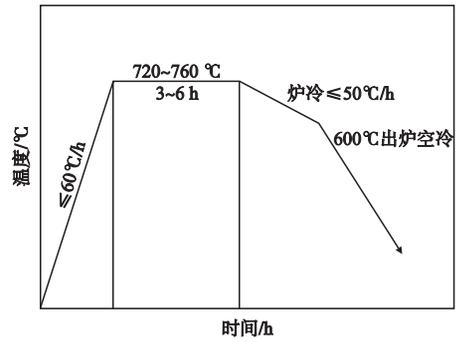


图3 低温石墨化退火工艺

Fig. 3 Low temperature graphitization annealing process

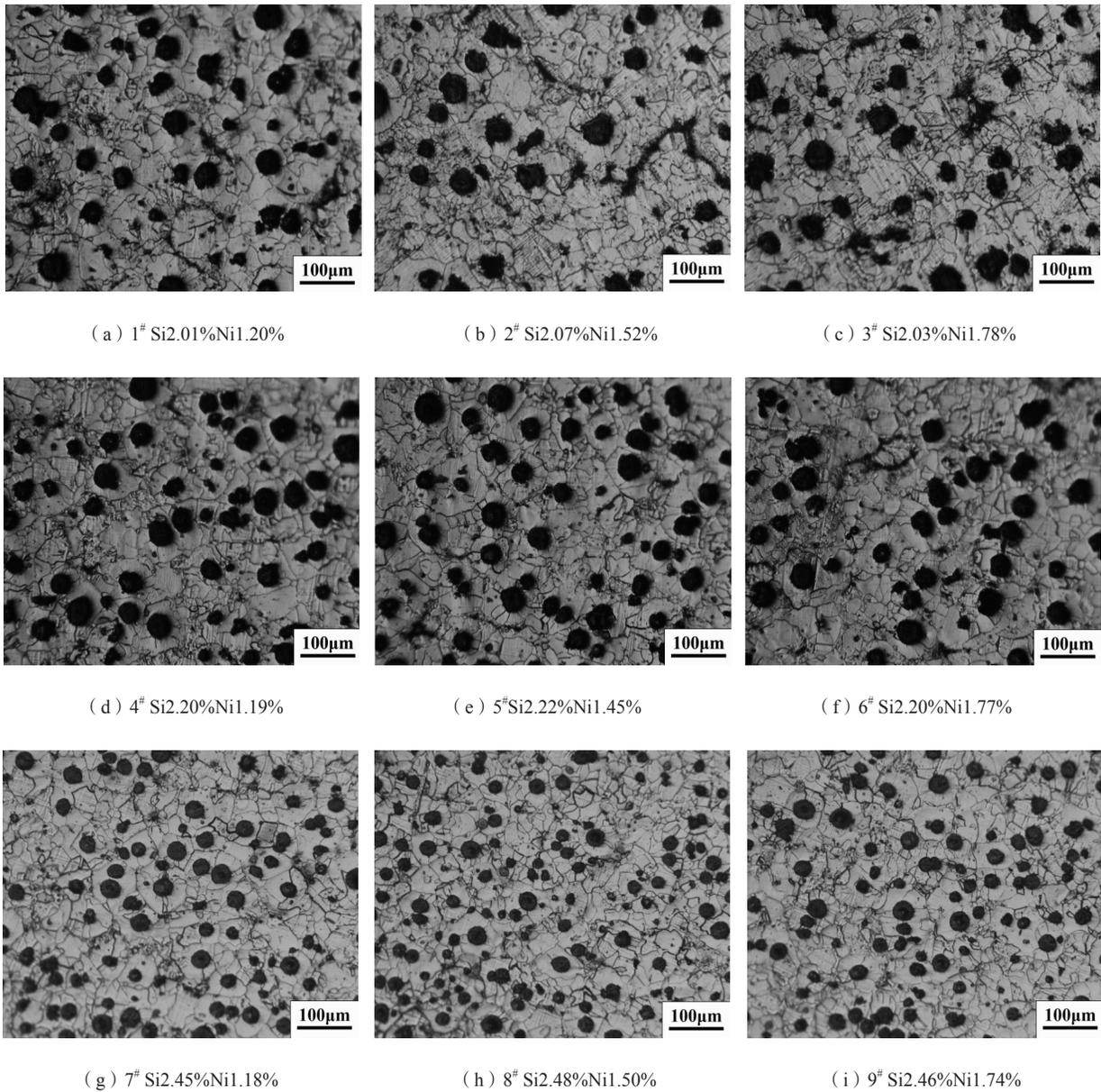


图4 热处理后试样金相组织

Fig. 4 Microstructures of samples after heat-treatment

口形貌中不仅有韧窝，而且有少量的解理面以及解理台阶，甚至有少量小型“河流”花样，并有裂纹向石墨延伸。由此可知，3<sup>#</sup>试样的断口是以韧性断裂为主的混合型断裂。因为3<sup>#</sup>试样中铁素体量为90%，其中有10%的珠光体，珠光体的塑性变形不足，不能有效阻止裂纹向石墨扩展，降低了3<sup>#</sup>试样的伸长率。总之，各试样的拉伸试样断口特征都以韧性断裂为主。

## 2.4 镍、硅对低温高韧性球墨铸铁低温冲击性能的影响

将各个试样在低温（-20℃、-40℃）下进行冲击试验，结果如图8所示。

从图中可以看出，当Si含量为2.01%，Ni含量为1.20%时（即1<sup>#</sup>试样），材料-20℃和-40℃的低温冲击功 $A_{KV}$ 都最高，分别达到16.3 J和13.6 J。从这三个图中可知，在Si含量一定时，随Ni含量的增加，冲击功不断降低；Ni含量一定时，随着Si量的增加冲击功下降。

一般情况下，元素固溶于基体中，与位错有交互作用，偏聚于位错周围形成柯氏气团，柯氏气团使位错处于比较稳定的状态，给位错的运动造成困难，即位错运动阻力增大；同时柯氏气团对位错造成钉扎作用，使钉扎常数增大。位错运动阻力和钉扎常数使球墨铸铁的脆性增大<sup>[13]</sup>。在低温下，位错运动的阻力急剧升高，因而大幅度增加球墨铸铁的脆性。

表3 热处理态组织中珠光体和渗碳体含量

项目	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	6 <sup>#</sup>	7 <sup>#</sup>	8 <sup>#</sup>	9 <sup>#</sup>
珠光体量	3	5	10	≤1	1	2	无	无	无
渗碳体量	无	无	无	无	无	无	无	无	无

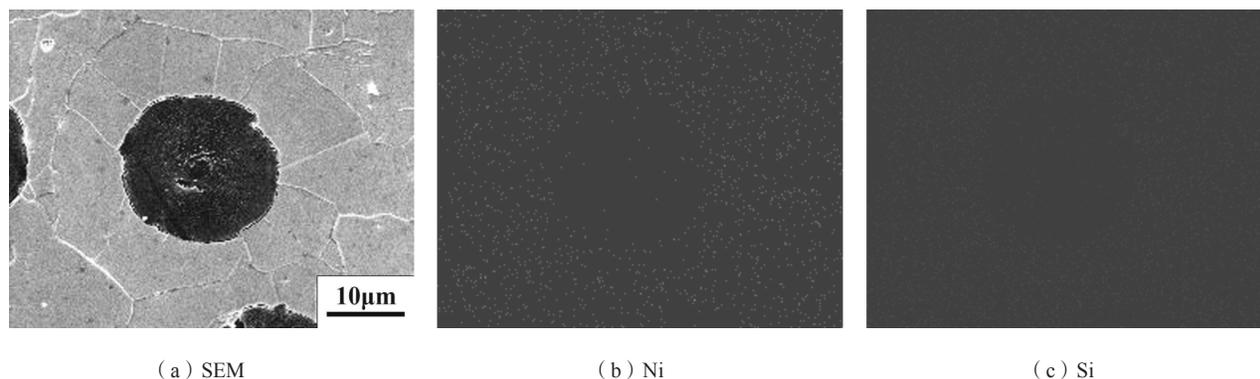


图5 SEM能谱分析结果

Fig. 5 Results of surface scanning with SEM energy spectrum analysis

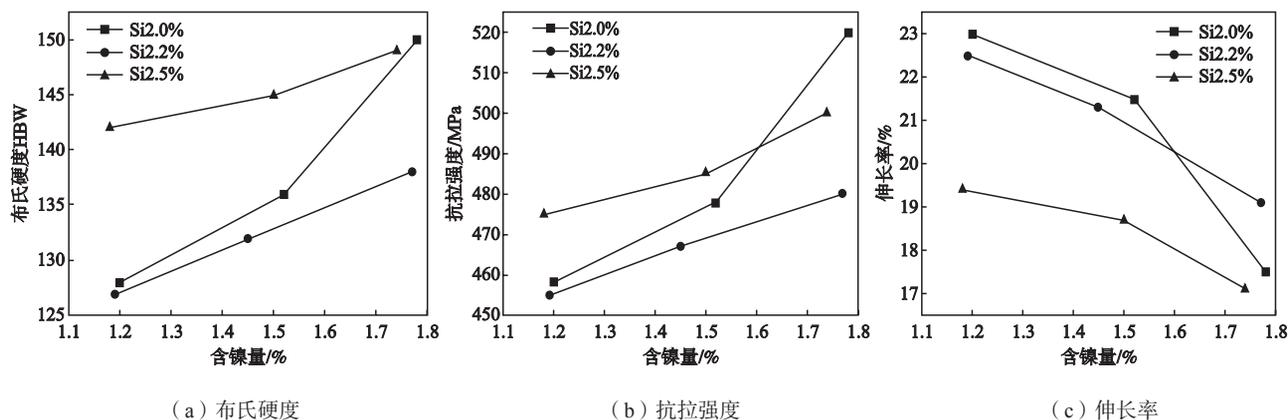


图6 镍、硅含量对低温高韧性球墨铸铁常温力学性能的影响

Fig. 6 Effect of combined addition of nickel and silicon on room-temperature mechanical properties of low-temperature high-ductility ductile iron

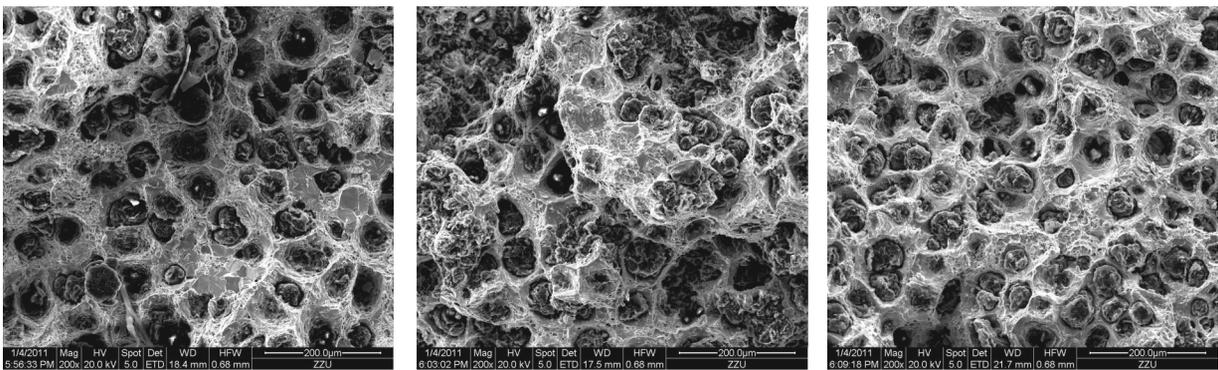
镍元素的固溶对材料冲击韧性的作用可从两方面考虑。一方面，镍元素的固溶能减小球墨铸铁的位错运动阻力和钉扎常数，提高材料的韧性。另一方面，随镍含量的增加，固溶于铁素体基体中的溶质镍元素就越多，柯氏气团的影响也随之增强，位错运动阻力和钉扎常数增大，从而使球墨铸铁的韧性降低。在含镍量较高的情况下，随着镍量的增加，位错运动阻力和钉扎常数的作用越强。所以，硅含量一定时，随着镍量的增加，材料的低温冲击韧性都随之降低。3<sup>#</sup>试样冲击性能变化幅度较大，是因为其基体中珠光体量较多，珠光体对冲击韧性和低温冲击韧性都起着负面的作用。

从图5还可知，硅元素也均匀地固溶于铁素体基体中。镍含量一定时，随着硅量的增加冲击功下降，而且硅量越高其低温冲击性能下降幅度越大。硅能固溶于铁素体基体中，增加球墨铸铁的位错运动阻力和钉

扎常数，增加材料的脆性，降低材料的冲击韧性。随着温度的降低，元素的活性渐低，硅固溶于铁素体中严重阻碍了位错滑移，降低材料的塑性变形，且随着硅含量的增加，固溶于铁素体基体中的溶质元素就越多，柯氏气团的影响也随着增强，致使低温球墨铸铁冲击功大幅度下降<sup>[14]</sup>。而且含硅量越高其低温冲击性能就越低，9<sup>#</sup>试样在-20℃、-40℃时的平均冲击功分别只有8.7 J、5.2 J。因此，制造在低温环境下使用的高韧性球墨铸铁应尽量降低含硅量。

为了更好地说明Ni、Si元素对低温冲击性能的影响，分别对1<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>、9<sup>#</sup>试样的低温冲击断口进行SEM扫描分析，分析结果如图9所示。

1<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>试样镍含量相同，硅含量分别是2.01%、2.45%。从图9可知，1<sup>#</sup>试样-20℃的冲击断口形貌以韧窝为主，其中有少量的解理面，主要以韧性断裂为主；-40℃的冲击断口形貌有大量的解理面，解理面



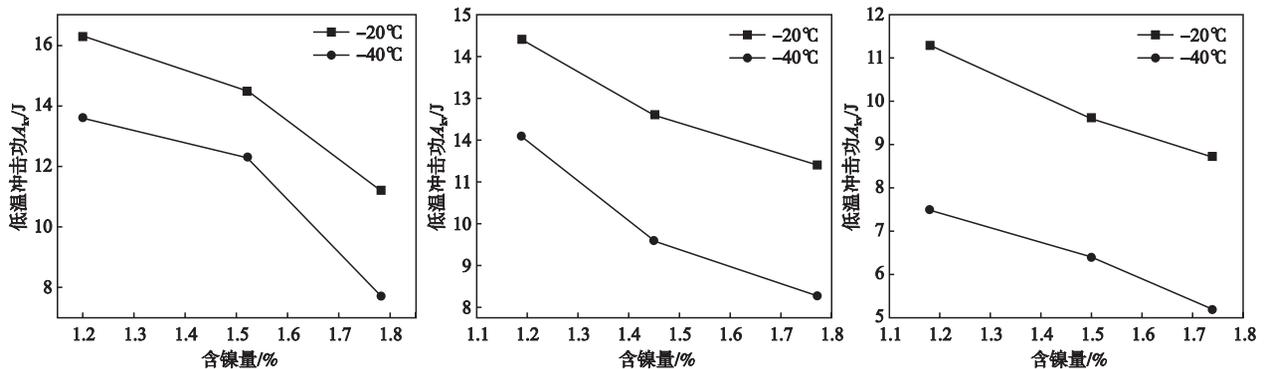
(a) 3<sup>#</sup> Si2.03%Ni1.78%

(b) 6<sup>#</sup> Si2.20%Ni1.77%

(c) 9<sup>#</sup> Si2.46%Ni1.74%

图7 拉伸试验断口形貌

Fig. 7 Tensile fracture morphologies



(a) 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>试样

(b) 4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>试样

(c) 7<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>、9<sup>#</sup>试样

图8 各试样的低温冲击功

Fig. 8 Effects of combined addition of Ni and Si on low-temperature impact energy

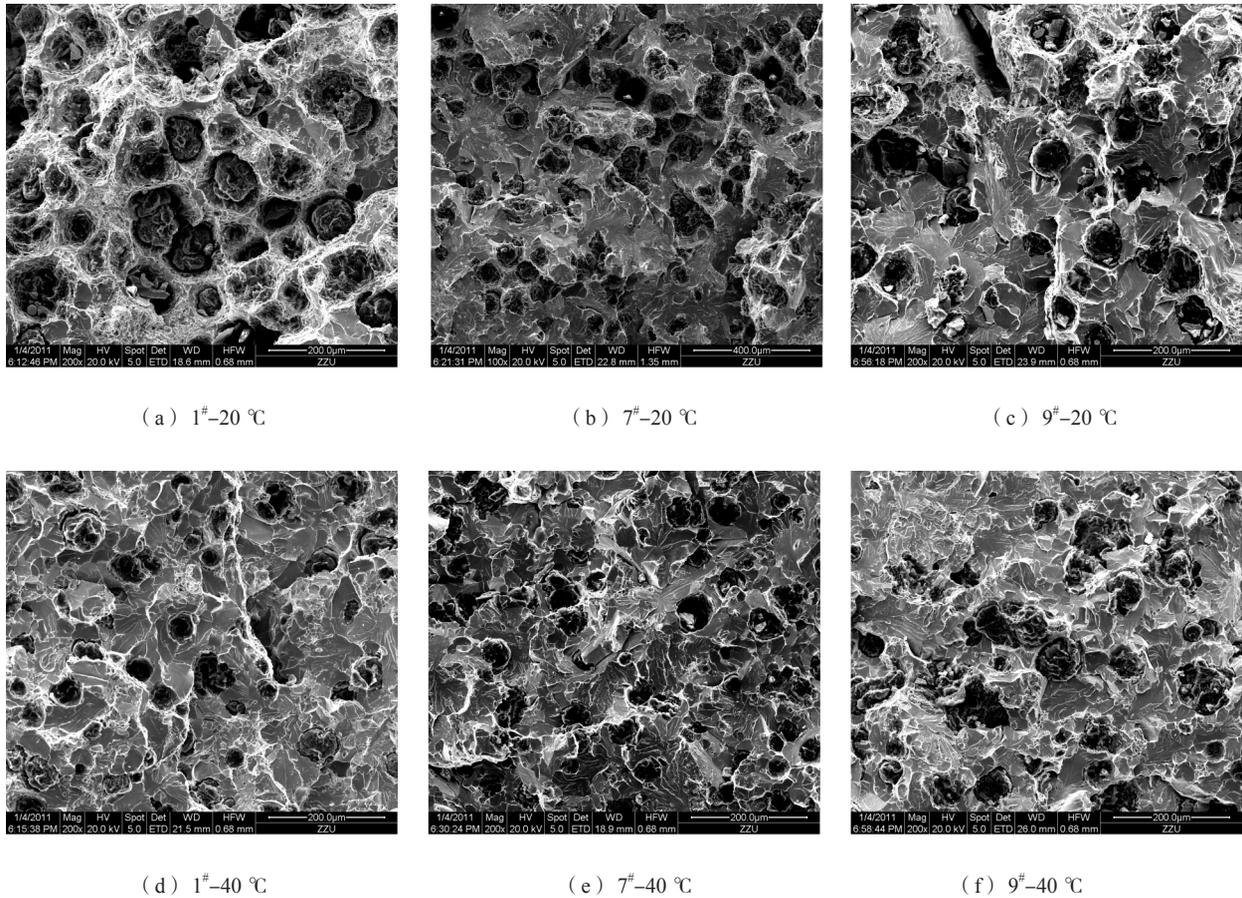


图9 低温冲击试样的断口形貌

Fig. 9 Fracture morphologies of low temperature impact samples

上有明显的解理台阶，其中还有少量的韧窝，主要以脆性断裂为主。可见，含硅量较低的1<sup>#</sup>试样随温度的降低，断口逐渐由韧性断裂变为脆性断裂。而7<sup>#</sup>试样只有在-20 °C的冲击断口形貌中具有少量的韧窝，其余大多是解理面；-40 °C的冲击断口形貌中全是解理面，并且随着温度的降低解理面渐渐组合为“木耳”花样，温度越低“木耳”花样越大越明显，含硅量较高的7<sup>#</sup>试样随温度的降低一直是以脆性断裂为主，而且温度越低脆性特征越明显。可见，在镍量一定时，随着硅量增加脆性断裂特征加剧。

7<sup>#</sup>与9<sup>#</sup>试样硅含量相同，含镍量分别是1.18%、1.74%。从上图可知，9<sup>#</sup>试样-20 °C的冲击断口形貌中出现了大量解理面，有非常少的韧窝；-40 °C的冲击断口形貌中全是解理面，并且随着温度的降低，解理面逐渐组合为“木耳”花样以及小型“河流”花样。可见镍含量也不可太高，否则，冲击断口的脆性断裂特征加剧。但总体来讲，镍对高韧球墨铸铁的低温冲击性能的影响没有硅强烈。

### 3 结论

(1) 低温高韧性球墨铸铁的铸态组织由球状石墨、铁素体、珠光体和少量自由渗碳体组成。随着镍含量的增加，铸态组织中的珠光体量逐渐增加，铁素体数量逐渐减少；随着含硅量的增加，铸态组织中的珠光体量逐渐减少，铁素体数量逐渐增加；镍对石墨大小及形态没有影响，各试样石墨球大小等级均在6级或以上，石墨球化等级在2级或以上。

(2) 热处理后，渗碳体基本消失，铁素体增多，珠光体减少。镍、硅元素均匀固溶于铁素体基体组织中，强化铁素体基体，导致材料随含镍量的增加抗拉强度、硬度升高，而伸长率降低；随着含硅量的增加，抗拉强度、硬度升高，伸长率降低；基体中残留珠光体可提高材料的硬度及抗拉强度，降低其伸长率，且珠光体残留量越多，影响作用越明显。各试样的拉伸断口形貌中有大量韧窝，以韧性断裂为主。各试样的抗拉强度都大于400 MPa，满足试样目标要求。当Si量为2.01%，Ni量为1.2%时，试样具有最高的伸长

率,为23.0%。

(3) 随着材料中Ni和Si含量的增加,低温高韧性球墨铸铁的低温冲击功不断降低,脆性断裂特征加剧。当Si量为2.01%,Ni量为1.2%时,无论是-20℃还是-40℃的低温冲击功 $A_{KV}$ 都最高,分别达到16.3 J和13.6 J。

(4) 要获得低温高韧性球墨铸铁,即在保证不降低材料低温冲击性能的前提下,提高其抗拉强度,则应该选择合理的镍、硅含量,其中Ni量不超过1.5%,Si量不超过2.3%,但也不低于1.9%。

#### 参考文献:

- [1] 钟方国,赵鸿汉.风力发电发展现状及复合材料在风里发电上的应用[J].纤维复合材料,2006(3):1214-1218.
- [2] 吕文春,马剑龙,陈金霞,等.风电产业发展现状及制约瓶颈[J].可再生能源,2018(36):48-54.
- [3] 薛强军.风电装备整机与铸件生产的现状及展望[J].现代铸铁,2009(3):18-22.
- [4] 王广建.硅对风电低温高韧性铸态球墨铸铁组织及性能的影响[D].湖南:湖南大学,2014.
- [5] 吉文哲,王守忠.镍含量对球墨铸铁组织性能的影响[J].热加工工艺,2016(45):81-84.
- [6] LACAZE J, LARRANAGA P, ASENJO I, et al. Influence of 1 wt-% addition of Ni on structural and mechanical properties of ferritic ductile irons[J]. Materials Science and Technology, 2012(28):603-608.
- [7] 杨忠华.Si和Ni在铸态铁素体球墨铸铁中作用的电子机理研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2017.
- [8] 李克锐,曾艺成,张忠仇.我国球墨铸铁生产应用的进展[C]//2008年中国铸造活动周论文集.沈阳:中国机械工程学会铸造分会,2008,12-21.
- [9] 崔峰,刘玉林.消除风电球铁件表面缺陷的涂料组合应用[J].铸造,2010(59):961-963.
- [10] 机械工程学会铸造分会.铸造手册:铸铁[M].第2版.北京:机械工业出版社,2002.
- [11] 梁义田,刘真,袁森.合金元素在铸铁中的应用[M].陕西:西安交通大学出版社,1992.
- [12] 王景德.关于铁素体球铁中的硅与球铁机械性能关系的研究[J].铸造技术,1992(3):24-26.
- [13] 张丽辉.球墨铸铁冲击韧性的改善及其摩擦焊接工艺的研究[D].吉林:吉林大学,2006.
- [14] 郝社平.硅对铸态铁素体球铁低温冲击韧性的影响[J].现代铸铁,1993(1):11-15.

## Effect of Combined Addition of Nickle and Silicon on Microstructure and Mechanical Properties of Low-Temperature High-Ductility Ductile Iron

WANG Wen-hui, SUN Yu-fu, XIAO Zhi-yun

(Material Science and Engineering College, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, Henan, China)

#### Abstract:

Low-temperature ductile iron were alloyed with 1.2%-1.8% Ni and 2.0%-2.5%Si, and then treated through two-stage graphitization annealing or low temperature graphitization annealing process. The results show that the microstructure of ductile iron after heat treatment is composed of ferrite, spherical graphite and small amount of pearlite; when the content of Si is 2.01% and the content of Ni is 1.2%, the low temperature impact energy  $A_{KV}$  is the highest, reaching 16.3 J at -20℃ and 13.6 J at -40℃, respectively, and its tensile strength is greater than 400 MPa, elongation is up to 23%, which implies that low temperature ductile iron with high tensile strength and high toughness in a condition that ensures its low temperature impact energy can be obtained when the content of Ni is not more than 1.5% and that of Si is between 1.9% and 2.3%.

#### Key words:

low-temperature high-ductility ductile iron; combined addition of nickel and silicon; low-temperature impact toughness; wind power castings