

# 氮的添加介质和工艺及添加量对灰铸铁力学性能的影响

林勇传<sup>1</sup>, 王 凯<sup>1</sup>, 何春华<sup>2</sup>, 吴宝成<sup>3</sup>, 何胜健<sup>1</sup>, 黄健友<sup>1</sup>

(1. 广西大学机械工程学院, 广西南宁 530000; 2. 广西玉柴机器股份有限公司, 广西玉林 537000;

3. 广西玉林玉柴机器配件制造有限公司, 广西玉林 537000)

**摘要:** 研究了灰铸铁中不同含氮的添加介质和工艺对氮元素吸收率的影响及氮元素添加量对其金相组织和力学性能的影响。结果表明: 氮化锰为最优的添加介质, 而且炉内直接添加最好; 在采用炉内直接添加氮化锰的情况下, 灰铸铁抗拉强度随着氮含量的增加而提高; 当氮含量为0.012 6%时, 灰铸铁抗拉强度达到最大, 其值为360 MPa。

**关键词:** 灰铸铁; 氮; 添加介质及工艺; 力学性能; 添加量

## 作者简介:

林勇传(1972-), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为细微切削加工及自动化。E-mail: loyoco@163.com

## 通讯作者:

黄健友, 男, 博士。E-mail: huangjianyou2000@163.com

中图分类号: TG143.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)01-0017-06

## 基金项目:

广西自然科学基金资助项目(2014GXNSFAA118347); 校企科技合作资助项目(PS-JSZX-20180925)。

## 收稿日期:

2018-10-16 收到初稿,  
2018-11-13 收到修订稿。

灰铸铁因具有优良的铸造成形性、切削加工性、耐磨性、消振性和耐热性等优异性能, 在铸造生产实践中成为许多铸件的首选材料<sup>[1]</sup>。随着现代工业的飞速发展, 对灰铸铁铸件的性能要求越来越高。目前高牌号灰铸铁HT300主要通过向灰铸铁中添加适量的Cu、Cr、Mo、Ni、Sn等合金元素来获得<sup>[2-8]</sup>, 但是使用高合金元素添加生产的灰铸铁铸造工艺性差, 同时随着国内外钼铁和镍等合金价格的不断上涨, 传统工艺生产的高牌号灰铸铁的成本越来越高。在大批量生产中, 如果能够通过添加廉价的氮元素, 以减少甚至取消钼铁和镍等合金的用量, 必将减少生产成本, 提高经济效益<sup>[9-11]</sup>。

在氮元素强化灰铸铁研究方面, 王谦谦<sup>[9]</sup>指出(未公布添加介质及工艺条件), 氮含量增加可以提高灰铸铁试样的抗拉强度和硬度; 冈田千里<sup>[12]</sup>(未公布工艺)通过添加Fe-Mn-N合金发现, 氮元素含量每增加0.001%, 灰铸铁的强度可提高5~7 MPa, 同时硬度可增加HB 3~4; F. A. Mountford<sup>[13]</sup>等人的研究显示, 氮元素含量每增加0.01%, 灰铸铁抗拉强度能提高25%; 翟启杰<sup>[14-15]</sup>和周永寿<sup>[16]</sup>也取得了相似的结论。但以上研究成果均采用单一的含氮添加介质和工艺, 对采用不同含氮添加介质和工艺, 添加氮元素对灰铸铁力学性能的影响却少有报道。本文以添加介质、添加工艺和添加量为变量, 制备了氮含量不相同的灰铸铁试样, 研究了不同含氮添加介质和工艺对氮元素吸收率的影响及氮元素添加量对灰铸铁抗拉强度等力学性能的影响。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试样制备及成分

灰铸铁试样在100 kg酸性中频感应炉中熔炼, 热电偶测温。三种不同的添加介质: 氮化锰、氮化硅和尿素按两种工艺添加, 即炉内直接添加和包内孕育添加, 其中炉内直接添加为在出铁液前3~5 min添加含氮介质至电炉中, 此时铁液温度约为1 600 ℃; 包内孕育添加为将含氮介质随孕育剂一同往包内添加, 孕育剂采用0.4%硅

钙钡。氮元素的添加介质及添加工艺如表1所示。铁液出炉温度1 470~1 490 ℃，充分搅拌后依据GB/T 9439-2010《灰铸铁件》规定，每种试样在同一铸型中浇注4根单铸试棒并编号。试样的氮元素含量采用Eltra ONH-2000氧氮氢分析仪测定。试样基础元素成分设计如表2所示。

### 1.2 抗拉强度试验

在单铸试棒上截取拉伸试样后，依据GB/T 228.1-2010，制成 $d_0=10$  mm， $L=5d_0$ 的标准拉伸试样。在WDW 3100拉伸试验机上测定4根拉伸试样的抗拉强度，拉伸速度为2 mm/min，取其平均抗拉强度作为试验结果。拉伸试样和金相试样如图1所示。

### 1.3 金相试验

金相试样取自最接近平均抗拉强度的拉伸试样。在经过ZMP-2000智能自动金相磨抛机磨抛后，使用Axio Scope.A1金相显微镜观察试样的石墨形态。每种试样分别在不同放大倍率（100×、200×）下观察，并选择试样的上、中、下、左、右五个视场各拍摄两张金相照片。依据GB/T 7216-2009《灰铸铁金相检验》，对照标准金相图谱并结合Axio Imaging金属金相智能分析系统对石墨类型和长度进行划分。将磨抛完成后的试样用4%硝酸酒精溶液浸蚀后观察，对珠光体数量进行评级，取其平均值作为该试样的珠光体数量。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 添加介质和工艺对氮元素吸收率的影响

各个试样的添加介质、添加工艺、氮元素添加量、氮含量（质量分数，%）及吸收率如表2所示。

氮元素在灰铸铁中的溶解度受铁液温度、晶格类型变化和各种合金元素的影响。在铸造生产条件下，氮在灰铸铁溶液中的溶解度可以用式（1）估算<sup>[17]</sup>：

$$\ln[\%N_s] = -\frac{1298.4}{T} - 2.526 - \frac{1873}{T}(0.235[\%C] + 0.16[\%Si] - 0.030[\%Mn]) \quad (1)$$

由式（1）可以看出，氮在灰铸铁溶液中的溶解度主要受铁液温度及碳、锰、硅等主要元素的影响，其随着碳、硅含量的升高而降低，随着铁液温度、锰含量的升高而升高。

对试验进行组间对比可以发现，在添加工艺相同的情况下，氮化锰和尿素作为添加介质的吸收率要远远高于氮化硅。这是由于氮化锰作为添加介质可以

在局部范围内大幅度提高锰元素的含量，有利于氮元素在灰铸铁溶液中快速溶解；而氮化硅作为添加介质时局部范围内硅元素含量提高，不利于氮元素在灰铸铁溶液中快速溶解；而尿素作为添加介质时，由于尿素高温条件下易分解并产生大量气体，进而发生“炸包”现象，并且由于尿素分解产生 $H_2$ ，其在Al的作用下会发生聚集反应，产生气孔，所以尿素作为添加介质并不适用实际的铸造生产。因此，在添加工艺相同的情况下，氮化锰作为添加介质是最佳的选择，氮化硅和尿素不适合在实际铸造生产中用作氮元素的添加介质。

表1 试样基本元素成分和氮的添加量  
Table 1 The basic element composition of samples and addition amount of nitrogen  $w_B/\%$

试样	C	Si	Mn	S	N添加量
1-1					0
1-2					0.003
1-3	3.198	1.918	0.644	0.078	0.006
1-4					0.009
1-5					0.012
2-1					0
2-2					0.006
2-3	3.174	1.910	0.643	0.077	0.010
2-4					0.012
2-5					0.014
3-1					0
3-2					0.012
3-3	3.204	1.916	0.642	0.078	0.024
3-4					0.012
3-5					0.024
4-1	3.162	1.912	0.654	0.081	0
4-2					0.012

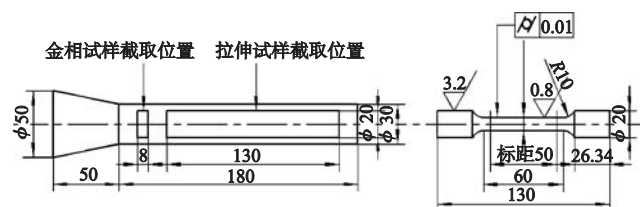


图1 单铸试棒及拉伸和金相试样尺寸/mm  
Fig. 1 Sizes of single cast test bar and tensile and metallographic samples /mm

对比第一轮和第二轮试验,添加介质均为氮化锰,炉内添加氮吸收率均值为50.63%,比包内添加时的14.88%提高3.4倍以上;在第三轮试验中,炉内添加氮化硅时氮吸收率均值4.15%,比包内添加时的1.50%提高2.5倍以上。这是由于在基本元素成分大致相同的情况下,氮在灰铸铁溶液中的溶解度很大程度上受到温度和溶解时长的影响。炉内添加时,铁液温度约为1 600 ℃;包内添加时,铁液温度仅为1 470~1 490 ℃。经溶解度计算公式可得表2中氮的饱和溶解度,可以明显看到炉内添加时氮的饱和溶解度均高于包内添加,而且炉内添加时的溶解时长远远大于包内添加。因此,在添加介质相同的情况下,炉内添加氮的吸收率要高于包内添加,因此,炉内直接添加工艺最佳。

## 2.2 氮添加量对灰铸铁石墨形态的影响

以氮元素吸收率最好的第一轮试验试样为研究对象,对其抗拉强度、石墨形态、基体组织等进行测定,结果如图2所示。石墨类型、长度等级、石墨长宽比如表3所示。

图2所见,视场中石墨形态均呈现无方向、无规则的均匀性分布,可以认定石墨类型均为A型分布。对照金相图谱并结合Axio Imaging金属金相智能分析系统,可以判定石墨长度在2-3级之间。在图2a、2c中,石墨形态基本呈现狭长状、两头尖锐;在图2e中,狭长状的石墨身部略有变粗,部分石墨一头变钝而一头保持尖锐;在图2g中,狭长状石墨与图2e并无较大差异,但视场中却出现了石墨聚集现象;在图2i中其石墨长度大部分变短,并且石墨的曲率变大,出现交错分枝状的石墨。

显然,氮含量在0.006 3%~0.012 6%范围内时,随着氮元素含量的增加,狭长状石墨端部圆钝化,石墨长度略有减小,曲率变大,石墨长宽比显著变小。

## 2.3 氮元素添加量对灰铸铁基体组织的影响

对照标准金相图谱并结合软件对珠光体数量进行评级。对比发现,1-1试样珠光体数量与珠60大致相当;1-2、1-3试样与珠80大致相当,1-4试样与珠90大致相当,1-5试样与珠95大致相当,结果如表3所示。

从图2可以看到,1-3号试样珠光体的数量要高于试样1-2;1-4及1-5试样组织基本为珠光体。在少量添加氮元素后,珠光体数量有一个迅速增加的过程,随着氮元素添加量的逐步增加,珠光体数量增速逐渐变慢,直至基体中基本为珠光体。因此,氮含量在0.006 3%~0.012 6%范围内时,随着氮元素的添加,珠光体数量明显增多,并且随着氮元素添加量的增加,珠光体数量持续增加。

表2 试样的氮元素添加量、氮含量检测结果  
Table 2 Nitrogen bearing addition medium, addition technology, nitrogen addition amount, and nitrogen content in samples & its absorptivity /%

试样	添加介质	添加工艺	氮元素 添加量	氮含量	吸收率	氮的饱和 溶解度
1-1		—	0	0.006 3	—	—
1-2			0.003	0.007 8	50.0	
1-3	氮化锰	炉内直接添加	0.006	0.009 3	50.0	0.014 1
1-4			0.009	0.010 8	50.0	
1-5			0.012	0.012 6	52.5	
2-1		—	0	0.006 2	—	—
2-2			0.006	0.007 2	16.7	
2-3	氮化锰	包内孕育添加	0.010	0.007 7	15.0	0.012 7
2-4			0.012	0.007 9	14.2	
2-5			0.014	0.008 1	13.6	
3-1		—	0	0.006 2	—	—
3-2		炉内直接添加	0.012	0.006 6	3.3	0.014 1
3-3	氮化硅		0.024	0.007 4	5.0	
3-4		包内孕育添加	0.012	0.006 4	1.7	0.012 5
3-5			0.024	0.006 5	1.3	
4-1		—	0	0.006 3	—	—
4-2	尿素	包内孕育添加	0.012	0.008 2	15.8	0.012 7

注:未加入氮添加剂时铁液氮含量为0.006 2%~0.006 3%。

## 2.4 氮元素添加量对灰铸铁抗拉强度的影响

试样抗拉强度如表4、图3所示。可以看到,当氮含量在0.006 3%~0.012 6%范围内时,灰铸铁的抗拉强度随着氮含量的增加而提高,并在右侧端点处取得最大值,即当氮含量为0.012 6%时,试样抗拉强度最大为360 MPa。

由于随着氮含量的增加,灰铸铁中石墨端部圆钝化,长宽比减小;且石墨的强度只有20 MPa,其在铸铁中的分布,可以看成无数的微裂纹。石墨的长宽比越小、越致密,应力集中作用和对基体的割裂作用就越微弱,其抗拉强度越高<sup>[18]</sup>;同时,随着氮含量的增加,珠光体含量增加,基体中一般只含有珠光体和铁素体,珠光体的抗拉强度和硬度等要比铁素体高得多。因此,随着氮含量的增加,灰铸铁的抗拉强度随之提高。

## 2.5 氮气孔缺陷形成机理及预防措施

在过去的研究中,曾有学者指出当铁液中氮含量超过其临界值(通常大于0.01%)时,氮元素会在凝固



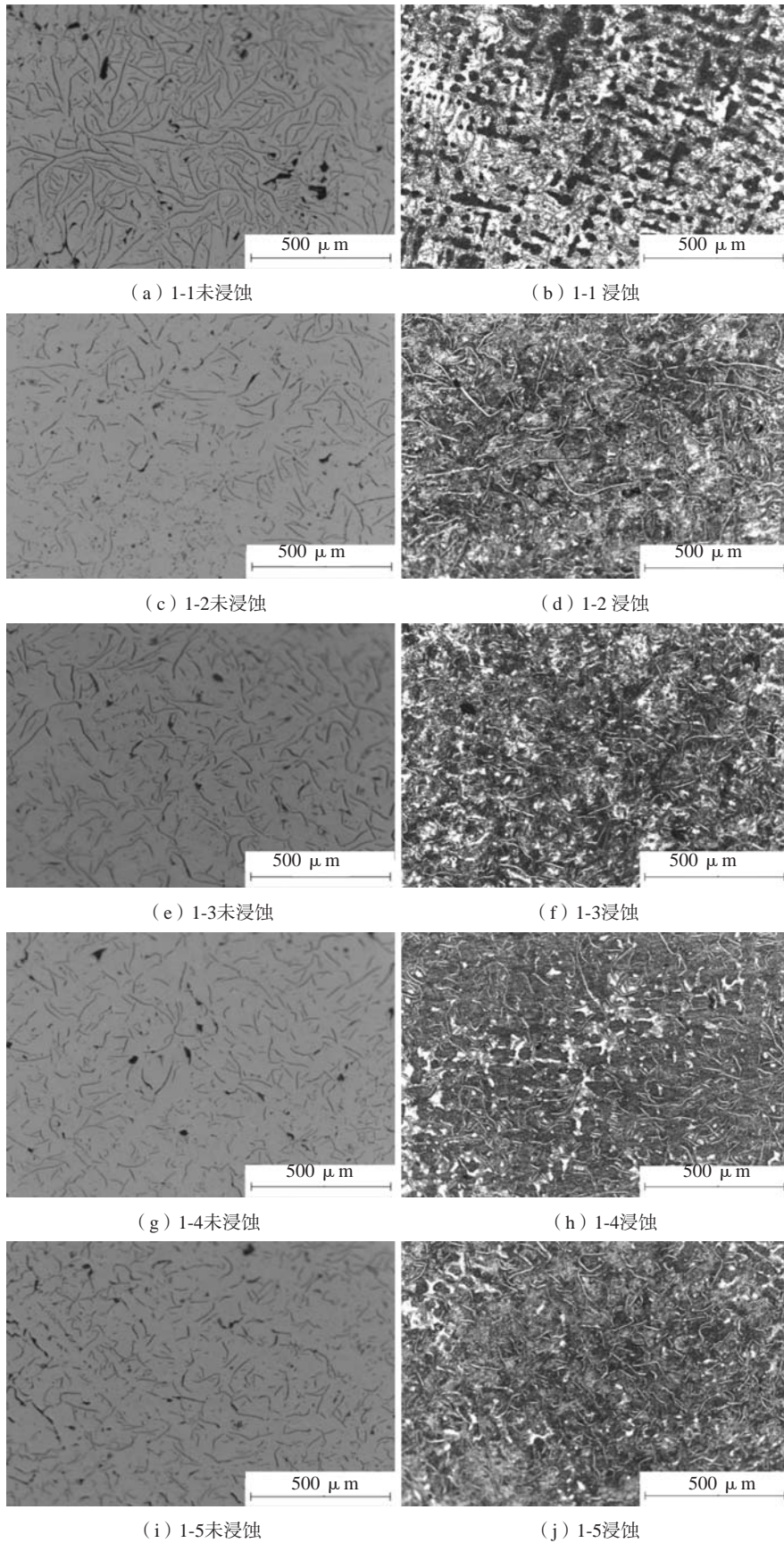


图2 试样石墨形态和基体组织

Fig. 2 Graphite morphology and matrix structure of samples

后期析出,而周围又被固体的枝晶壁所包围,结果便形成枝晶间裂隙状皮下气孔即氮气孔缺陷<sup>[19]</sup>。

然而,在本研究的四轮试验中,通过对氮元素含量严格控制,铸件表面机加工后均未发现有气孔缺陷的情况。为防止高氮含量的情况下有氮气孔缺陷产生,采用了以下几种措施。

(1) 采用铁型覆砂铸造模具取代树脂砂型铸造模具。与砂型铸造相比,铁型覆砂铸造工艺冷却速度快,可以减缓铁液中溶解的氮元素析出,会以氮原子的形式固溶于基体组织中。

(2) 加强铸型排气。在铸型顶部设置排气冒口,在铸型外圆分型面处设置排气槽,使析出的气体能够顺利排出<sup>[20]</sup>。

(3) 炉前快速检测。使用ON-3000脉冲红外热导氧氮分析仪对铁液中氮含量进行炉前快速检测,严格控制氮含量,使其保持在一定范围内,避免氮气孔的产生。

### 3 结论

(1) 在添加工艺相同的情况下,氮化锰作为添加介质是最佳的选择,氮化硅和尿素不适合在实际铸造生产中用作氮元素的添加介质。

(2) 在氮化锰作为添加介质的情况下,炉内直接添加是最佳的添加工艺,其氮元素吸收率可以达到50%以上。

(3) 在采用炉内直接添加氮化锰的情况下,随着氮含量的增加,狭长状石墨端部变得圆钝,石墨长度略有减小,曲率变大,石墨长宽比显著变小,珠光体数量明显增加。

(4) 在采用炉内直接添加氮化锰的情况下,灰铸铁抗拉强度随着氮含量的增加而提高;当氮含量为0.012 6%时,灰铸铁试样最大的抗拉强度为360 MPa。

表3 试样石墨类型、长度及长宽比  
Table 3 Type, length grade and aspect ratio of graphite and pearlite amount in sample

试样	石墨类型	石墨长度	长宽比	珠光体数量/%
1-1	A	2-3级	34.7	珠60
1-2	A	3级	30.3	珠80
1-3	A	2-3级	28.6	珠80
1-4	A	3级	23.7	珠90
1-5	A	3级	19.8	珠95

表4 第一轮试验不同含氮量灰铸铁试样的抗拉强度  
Table 4 Tensile strength of samples with different amounts of nitrogen

试样	氮含量/%	抗拉强度/MPa
1-1	0.006 3	316
1-2	0.007 8	330
1-3	0.009 3	342
1-4	0.010 8	351
1-5	0.012 6	360

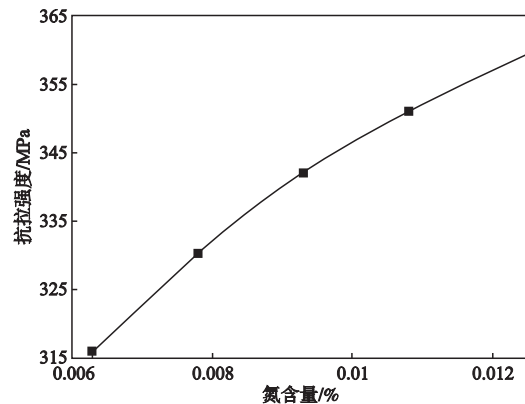


图3 试样抗拉强度变化趋势

Fig. 3 Change trend of tensile strength of samples

#### 参考文献:

- [1] 杭新. HT350高强度灰铸铁组织与性能的研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2014.
- [2] 刘伟, 苏勇, 王东岭, 等. 合金元素的配比对缸体性能的影响[J]. 铸造技术, 2008, 29(12): 1712-1716.
- [3] 张凤丽, 赵学清, 吴大春, 等. 优化发动机缸体缸盖熔炼工艺措施[J]. 铸造, 2014, 63(8): 856-860.
- [4] 刘楠楠, 卢德宏, 刘星舟, 等. 合金灰铸铁成分与力学性能关系的研究[J]. 铸造技术, 2010, 31(4): 437-439.
- [5] 罗刚, 罗晓东, 刘凯, 等. 高强度灰铸铁发动机缸体微合金化研制[J]. 热加工工艺, 2013(23): 61-64.
- [6] 王嘉诚, 谭自盟, 何奥平, 等. 镍铬对灰铸铁显微组织及性能的影响[J]. 铸造技术, 2018(3): 526-529.
- [7] 陈队志, 王昕. 锡对灰铸铁组织性能及耐蚀性的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2004, 30(2): 32-35.
- [8] 杜举团, 王世杰, 王宁. 锡对灰铸铁性能影响的研究[C]// 第六届21省(市、自治区)4市铸造学术会议. 2004.
- [9] 王谦谦, 孙玉福, 靳存文, 等. 氮对合成灰铸铁组织和性能的影响[J]. 铸造, 2015(6): 512-516.

- [10] 肖丽丽. 低成本易切削发动机缸体用灰铸铁材料研究 [D]. 河南: 河南科技大学, 2012.
- [11] 肖丽丽, 任凤章, 李锋军, 等. 灰铸铁不同合金化同等强度下的加工性能对比研究 [J]. 铸造技术, 2012, 33 (5): 512-515.
- [12] 岡田千里. 窒素による鑄鉄の強化とその機構 [J]. 鑄物, 1975, 47: 688-694.
- [13] Mountford F A. The influence of nitrogen on the strength, soundness and structure of grey cast iron [J]. The British Foundryman, 1966: 141-151.
- [14] 翟启杰, 胡汉起. 氮对灰铸铁基体组织的作用 [J]. 金属学报, 1993 (5): 28-30.
- [15] 翟启杰, 胡汉起. 氮对灰铸铁中石墨组织的作用 [J]. 金属学报, 1992 (10): 73-78.
- [16] 周永寿. 氮对提高灰铸铁性能的影响 [J]. 铸造, 1997 (11): 33-36.
- [17] Zhai Qijie, Hu Hanqi. Solubility of nitrogen in molten gray cast iron [J]. Acta Metallurgica Sinica: English Edition, 1992, 5 (7): 71-73.
- [18] 林勇传, 王凯, 黄健友, 等. 石墨形态及金相组织对蠕墨铸铁力学性能的影响 [J]. 铸造技术, 2017 (11): 2582-2585.
- [19] 金仲信. 灰铸铁件裂隙状氮气孔及其防止 [J]. 铸造, 2001, 50 (6): 357-359.
- [20] 王文胜, 曹玉亭, 刘伟. 灰铸铁刹车盘氮气孔的产生原因及防止措施 [J]. 现代铸铁, 2010, 30 (4): 67-70.

---

## Effects of Nitrogen Addition Medium and Process and Addition Amount on Mechanical Properties of Gray Cast Iron

LIN Yong-chuan<sup>1</sup>, WANG Kai<sup>1</sup>, HE Chun-hua<sup>2</sup>, WU Bao-cheng<sup>3</sup>, HE Sheng-jian<sup>1</sup>, HUANG Jian-you<sup>1</sup>  
(1. College of mechanical engineering, Guangxi University, Nanning 530000, Guangxi, China; 2. Guangxi Yuchai Machinery Co., Ltd., Yulin 537000, Guangxi, China; 3. Guangxi Yulin Yuchai Machinery Parts Manufacturing Co., Ltd., Yulin 537000, Guangxi, China)

### Abstract:

This study investigated the effects of three different kinds of addition media containing nitrogen and two addition processes on nitrogen absorption efficiency, and the effect of nitrogen addition amount on the microstructure and mechanical properties of gray cast iron. The results show that manganese nitride is the optimum addition medium among three kinds of media, and the best addition method is the furnace addition. By means of the method, the tensile strength of the produced gray cast iron sample increased with the increase of nitrogen content, and when the nitrogen content was 0.0126%, the maximum tensile strength was obtained with 360 MPa.

### Key words:

gray cast iron; nitrogen; addition medium and process; mechanical properties; addition amount