1228 **转造** FOUNDRY 铸钢 · 铸铁

# 不同流化床热处理工艺对低碳 Mn-Si 铸钢组织的影响

### 吕刚磊,刘军,刘乾坤

(郑州科技学院机械工程学院,河南郑州 450064)

摘要:流化床热处理可消除低碳Mn-Si铸钢结晶后的结构缺陷,通过流化床热处理可消除铁素体结构、改变碳化物形态和实现基体最佳性能。通过金相研究,硬度/显微硬度测量和拉伸强度检测,研究了流化床热处理(FBHT)对低碳Mn-Si铸钢强度及延展性的影响。结果表明:流化床热处理工艺效果明显,ZG35Si Mn性能得到了改进。 关键词:铸钢;热处理;金相组织;流化床

低碳铸钢ZG35SiMn由于其良好的可焊性广泛应用于金属工业中。通过合金的添加可以增加它的强度,降低其材料价格而扩展其在许多行业中的应用。通常,由于它的晶粒尺寸的多样性和针状平衡结构的特性,可以很容易使铸钢ZG35SiMn材料的应力消除。但目前的标准建议对材料进行热处理没考虑它们的合金元素偏析,因此这些热处理工艺后的结构不能得到所需的性能<sup>[1-3]</sup>。材料的铁素体和贝氏体-马氏体组织在合金中一旦达到高含量的区域,会造成这些材料损坏和裂缝,并且也不能通过标准热处理消除<sup>[4-8]</sup>。本文研究了FBHT热处理,消除了ZG35SiMn铸钢缺陷,材料获得了较好的强度和延展性。

### 1 材料和热处理工艺方法

铸钢ZG35SiMn在刚玉流化床中进行热处理,流化床反应器中的气体介质是空 气。流化床的型号为:SHX(SHF)循环流化床,采用双锅筒横置式结构,燃料由 给煤机送入炉膛,与从等压风箱送来的空气混合燃烧,在300~1000℃范围内冷却速 度介于90~100℃水的冷却速度,在150~450℃范围内冷却速度较水低,而与油的冷 却速度相当。流化床的冷却速度还与流化剂的流速有关。流化床的冷却速度随着流 速的增加而增大<sup>[4-6]</sup>。铸钢ZG35SiMn的化学成分如表1所示。FBHT工艺过程设计有4 组,如图1-4所示。

试验分别进行金相观察(RLM和SEM),能量色散X射线微量分析(SEM-EDX),硬度/显微硬度测量和强度测试,及观察不同FBHT后的结构特性。

# 2 结果与讨论

#### 2.1 显微组织研究

在铸钢ZG35SiMn铸态微观结构图5a中,显示出针状铁素体-珠光体,且含有大量的铁素体。这是合金在结晶过程中偏析的结果。

必须改变热处理参数来实现合金元素偏析,消除针状铁素体,改变碳化物形态。在流化床中等温硬化后,消除了针状铁素体和增大了结构成分的分散,导致相对于材料铸态的延展性增加。FBHT之后,由于流化床独特的热性质导致的奥氏体成核速度增加,有利于结构成分分散。铸态和不同FBHT工艺微观结构,如图5所示。

作者简介: 吕刚磊(1983-),男,副 教授,主要从事机械设计 制造及其自动化研究工作。 电 话:0371-67899901, E-mail:328993407@ qq.com 通讯作者: 刘 军(1952-),男,教授, 硕士生。电话:0371-67899 901, E-mail:747992975@ qq.com

中图分类号:TG161 文献标识码:A 文章编号:1001-4977(2019) 11-1228-04

基金项目:

河南省科技厅科技攻关 (172102210536;1821022 10550;182102210551); 郑州地方高校骨干教师培 养计划;河南省骨干教师 培养计划。 收稿日期: 2019-03-21 收到初稿, 2019-06-13 收到修订稿。



表1 铸钢ZG35SiMn的化学成分要求

(d) 工艺3 图5 不同FBHT工艺处理后的铸钢ZG35Si Mn组织 Fig. 5 Microstructure of ZG35SiMn Cast steel after different FBHTs

# 1230 **转造** FOUNDRY 铸钢 · 铸铁

#### 2.2 硬度测试

ZG35SiMn铸钢在不同FBHT工艺处理后的硬度如 表2所示。结果表明,使用FBHT工艺后,铸钢的硬度 增加甚至达到31.90%。在FBHT工艺4中,通过在温度 643 K下在流化床中等温硬化,得到了相对于铸态的最 高硬度增量。

试样拉伸强度测试后,宏观断裂面和SEM图像如 图6所示。拉伸强度测试证实,FBHT之后的ZG35SiMn 钢强度性能和伸长率都显著提高,如表3和4所示。

Table 2	Table 2 Hardness of ZG35SiMn cast steel after   different FBHTs				
工艺	硬度HV30	硬度增量/%			
铸态	279				
1	301	7.89			
2	350	25.45			
3	320	14.70			
4	368	31.90			

表2 不同FBHT工艺后的HV30硬度



(a)初始状态: A<sub>5</sub>=0.7%; R<sub>m</sub>=872 MPa



(b) 工艺1: *A*<sub>5</sub>=11%; *R*<sub>m</sub>=935 MPa



(c)工艺2: A<sub>5</sub>=12.3%; R<sub>m</sub>=1 056 MPa
(d)工艺3: A<sub>5</sub>=12.1%; R<sub>m</sub>=1 014 MPa
(e)工艺4: A<sub>5</sub>=14.5%; R<sub>m</sub>=963 MPa
图6 不同工艺的流化床热处理后铸钢ZG35Si Mn断裂形貌

Fig. 6 Fracture morphology of cast steel ZG35SiMn after different FBHTs

表3 FBHT后铸钢ZG35Si Mn强度性能改善 Table 3 Tensile strength of cast steel ZG35Si Mn after different FBHTs			表4 FBHT后铸钢ZG35Si Mn的伸长率 Table 4 Elongation A <sub>5</sub> of cast steel ZG35Si Mn after different FBHTs	
工艺	拉伸强度R <sub>m</sub> /MPa	增量/%(相对铸态)	工艺	伸长率A5/%
铸态	872		铸态	1.6
1	935	7.22	1	12.1
2	1 056	21.10	2	11.1
3	1 014	16.28	3	14.3
4	963	10.44	4	15.5

经过微观结构分析和硬度及强度测试表明,选择 不同流化床热处理工艺可以消除铁素体结构、促使碳 化物形态的改变,其硬度和强度有了改善,基体最佳 性能得以实现。

# 3 结论

(1)不同的FBHT技术可改善材料强度,最高达

#### 参考文献:

- [1] 杨柳,方鸿生,孟至和.Fe-C-Mn-B合金奥氏体等温分解动力学及Mn的再分配 [J].铸造,2015(1):29-31.
- [2] 方鸿生,白秉哲,郑秀华,等.粒状贝氏体和粒状组织的形态与相变 [J].铸造,2016 (4):25-29.
- [3] GUO H, PURDY G R, ENOMOTO M, et al. Kinetic transitions and substitutional solute (Mn) fields associated with later stages of ferrite growth in Fe-C-Mn-Si [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2006 (6) : 227–232.
- [4] CHEN Zhongwei, FAN Qinying, ZHAO Kai. Microstructure and microhardness of nanostructured Al-4.6Cu-Mn alloy ribbons [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2015 (8): 253–256.
- [5] KIM Y L. Effect of aging treatment on microstructural and mechanical characteristics of PEO coatings on Mg-Al alloy [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2008 (1): 23–26.
- [6] ZHONG Xichun, SHEN Xiaoyan, LIU Zhongwu. Magnetocaloric properties, microhardness and corrosion resistance of  $Gd_{100-x}Zr_x$  alloys [J]. Journal of Rare Earths, 2016 (9): 143–146.
- [7] VALDEZ S, SUAREZ M, FREGOSO O A, et al. Microhardness, microstructure and electrochemical efficiency of an Al (Zn/xMg) alloy after thermal treatment [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2012 (3) : 53–56.
- [8] XIE Ziling, XIE Jijia, HONG Youshi, et al. Influence of processing temperature on microstructure and microhardness of copper subjected to high-pressure torsion [J]. Science in China (Technological Sciences), 2010 (6): 50–55.

# Effect of Different Fluidized Bed Heat Treatment Processes on Microstructure of Low Carbon Mn-Si Cast Steel

LÜ Gang-lei, LIU Jun, LIU Qian-kun

(College of Mechanical Engineering, Zhengzhou University of Science and Technology, Zhengzhou 450064, Henan, China)

#### Abstract:

Fluidized bed heat treatment(FBHT) can eliminate the structural defects of low carbon Mn-Si cast steel after crystallization, and fluidized bed heat treatment can eliminate the ferrite structure, change the morphology of carbides and achieve the best performance of the matrix. The effect of FBHT on the strength and ductility of low carbon Mn-Si cast steel was studied by metallographic study, hardness/microhardness measurement and tensile strength test. The results show that the effect of f FBHT process is obvious and the performance of ZG35Si Mn is improved.

#### Key words:

cast steel; heat treatment; metallurgical structure; fluidized bed

到21.10%。

(2) 在流化床中等温硬化后,消除了针状铁素体 和增大了结构成分的分散,相对于初始状态,材料伸 长率(*A*<sub>5</sub>)增加至15.5%。

(3) FBHT之后,由于流化床独特的热性质导致 的奥氏体成核速度增加,有利于结构成分分散。