

汽车用低合金高性能铸钢材料的开发研究

唐正连^{1,2} 张新平¹ 张红霞² 韩庆艳³

(1 华南理工大学材料科学与工程学院, 广东 广州 510641; 2 湖北汽车工业学院材料工程系, 湖北 十堰 442002; 3 东风精密铸造有限公司, 湖北 十堰 442714)

摘要 针对汽车轻量化的要求,对汽车用铸钢进行研究.首先进行了成分设计,然后通过实验和软件模拟计算主要分析了 Mo、V 及 Si-Ca 对钢力学性能与显微组织的影响,最后获得了能达到较好综合力学性能的铸钢成分.实验结果表明:铸钢中质量分数为 0.15%~0.20% 的 Mo 和 0.08%~0.10% 的 V 以及 RE-Ca 进行复合变质处理时,加入质量分数为 0.1% 的 Si-Ca,其综合力学性能达到最佳,其抗拉强度、屈服强度分别为 1 306 和 1 245 MPa,伸长率为 12.7%.

关键词 高强度钢; 铸造; 塑性; 钼; 钒; 硅钙

中图分类号 TG142.1; TG260 **文献标志码** A **文章编号** 1671-4512(2014)04-0022-04

Research and development of kind of low-alloy high-performance cast steel used for the automobile

Tang Zhenglian^{1,2} Zhang Xinping¹ Zhang Hongxia² Han Qingyan³

(1 School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2 Department of Materials Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, Hubei China; 3 Dongfeng Investment Casting Co., Ltd., Shiyan 442714, Hubei China)

Abstract The automobile lightweighting puts forward higher requirements on automotive cast steel, it must have high strength and adequate ductility. In order to obtain the high performance cast steel, the related studies were conducted. Firstly, the composition of the cast steel was designed. Then, the effects of Mo, V and Si-Ca on mechanical properties and microstructure of the cast steel were investigated through experiments and software simulation. Finally, the ingredient which can make cast steel obtain good comprehensive mechanical properties was gotten. The experimental results indicate that containing 0.15%~0.2% Mo, 0.08%~0.10% V in the cast steel and adding 0.1% Si-Ca when modifying with RE-Ca are the best to the comprehensive mechanical properties of the cast steel. The cast steel with the ultimate tensile strength of 1 306 MPa and the yield strength of 1 245 MPa plus the total elongation (TEL) of 12.7% was got.

Key words high strength steel; casting; ductility; Mo; V; Si-Ca

当前,汽车轻量化正逐步深入.钢因其所具有的优异特性、经济性、可再循环利用等特点,在汽车轻量化的进程中发挥了十分重要的作用^[1-2].现代制造要求汽车用铸钢件既要有高强度又要轻量化,同时要有好的综合力学性能.本研究根据汽车用铸钢材料的性能要求,结合企业需求、考虑生产

成本控制等实际因素,利用现有的比较便宜的低碳废钢和 45 钢等废钢材,在尽量不添加或少添加贵金属的前提下,通过成分设计、材料强韧化机理的运用和必要的常规热处理工艺,使得强度和塑性协调提升,最终以较低成本开发出具有高强度和高塑性的铸钢.

收稿日期 2013-06-05.

作者简介 唐正连(1973-),男,博士研究生, E-mail: tangzhenglian@qq.com.

基金项目 国家自然科学基金资助项目(51001049).

1 实验方案

1.1 成分设计与优化

根据材料开发的要求,低合金高强度钢(HSLA)是首选,因为低合金高强度钢具有高的强度和良好的塑性,并且成本相对低廉,生产工艺比较简单.参照相关国家标准^[3-4],结合各合金元素的作用^[5-11],在运用JMatPro软件对材料的性能进行预测后,初步确定材料的成分(质量分数)如下: $w(\text{C})$ 为0.3~0.35; $w(\text{Si})$ 为0.7~1.4; $w(\text{Mn})$ 为0.8~1.2; $w(\text{Cr})$ 为0.6~1.4; $w(\text{RE})$ 为0.04~0.10; $w(\text{Mo})$ 为0.1~0.4; $w(\text{V})$ 为0.06~0.15; $w(\text{Nb})$ 为0.02~0.14; $w(\text{S})$ 和 $w(\text{P}) \leq 0.03$.针对该合金成分,首先进行正交试验来探索Mo、V和Nb三种合金元素对钢力学性能的影响,三元素各水平取值见表1.为了减小C、Si、Mn、Cr和稀土含量的波动对正交试验结果的影响,将它们控制在一个合理的很小范围内.在此基础上,再就硅钙的加入量与钢力学性能的关系进行研究.

表1 因素水平表

	水平		
	1	2	3
$w(\text{Mo})/\%$	0	0.15~0.20	0.20~0.25
$w(\text{V})/\%$	0	0.08~0.10	0.12~0.14
$w(\text{Nb})/\%$	0	0.06~0.09	0.10~0.13

1.2 实验材料与方法

使用的材料是企业正在使用的废钢以及硅铁、锰铁、铬铁、稀土硅铁、钼铁、钒铁、铌铁、硅钙($w(\text{Ca})30.9\%$, $w(\text{Si})56.8\%$)等.

铸钢的熔炼在150 kg工频炉中进行.熔炼过程中,取试样测试炉前成分,根据需要向炉内添加硅铁、锰铁、铬铁、钼铁、钒铁.铌铁在浇包中加入,稀土硅铁和硅钙采用冲入法添加.钢液最终通过熔模铸造的方法制成基尔试块.

试样的热处理工艺参数通过Thermo-Calc,ProCAST软件对钢的平衡相的计算和前期试验确定为:920℃正火,920℃淬火,560℃回火.

实验过程中,通过QS7500直读光谱仪检测钢的成分;利用Thermo-Calc,ProCAST软件和OMNIMET图像分析系统与扫描电镜(JOE6510)来模拟、观察和分析钢的组织与成分;采用万能拉力试验机(SNT4305)、台式布氏硬度计(HB-3000)来分别测试材料的强度、伸长率和硬度.

2 实验结果与分析

2.1 Mo、V和Nb对钢力学性能和组织的影响

正交实验得出的Mo、V和Nb对力学性能的影响结果如图1所示.从中可以看出:三种合金元素对抗拉强度 R_m 的影响大小顺序为 $\text{Mo} > \text{V} > \text{Nb}$,最优水平组合为 $a_3 b_3 c_3$;对伸长率 A 的影响大小顺序为 $\text{Nb} > \text{V} > \text{Mo}$,最优水平组合为 $a_1 b_1 c_1$.综合来看,Mo取第1水平时,虽然 A 达到了8.6%,但 R_m 相对太低,仅1162 MPa;取第3水平时, R_m 虽达到了1304 MPa的最高值,但 A 仅6.5%;取第2水平 R_m 与第3水平相差仅28 MPa时,而 A 却能达到7.7%.所以,Mo的添加量应取第2水平.Nb取第1水平时,其 A 为9.3%, R_m 为1227 MPa.取第2和3水平时, R_m 分别达到了1256 MPa和1260 MPa,但仅分别增加了29 MPa和33 MPa;而 A 却分别下降到了7.1%和6.3%.再考虑到Nb很贵,所以它取第1水平(见表1),即钢中不添加该元素.同样,为了获得最佳的综合力学性能,V应取第2水平.综合以上分析,最终优化方案是 $a_2 b_2 c_1$,即钢的成分中, $w(\text{Mo})$ 为0.15%~0.20%, $w(\text{V})$ 为0.08%~0.10%,不添加Nb.

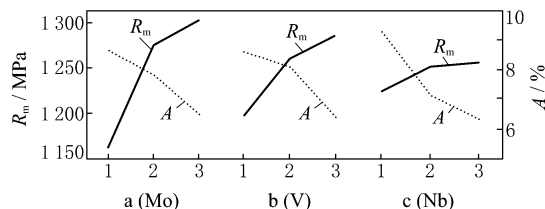


图1 合金元素对力学性能的影响

基于正交实验获得的成分可以使钢获得较好的综合力学性能已得到了验证,如表2所示.显然,含Mo为0.175%,V为0.106%钢的综合力学性能为最佳.这是因为钢中适当含量的Mo和V不仅可以使得组织细小,而且偏析也小^[12].

用ProCAST模拟的钢的Y形试样的晶粒大小和二次枝晶间距.在其他条件相同的情况下,对钢中Mo和V含量不同时的晶粒大小和二次枝晶间距进行模拟,同一节点上,其结果对比见表3.可以看出:当钢中含Mo为0.18%(0.15%~0.20%中间值)或含V为0.09%(0.08%~0.10%中间值)不变时,随着V或Mo含量的增加,钢的晶粒尺寸和二次枝晶间距都逐渐减小.其中,含Mo为0.18%、含V为0.09%时,钢的晶粒尺寸和二次枝晶间距都仅比含Mo为0.18%、含V为0.13%时及含Mo为0.23%、含V为0.09%

表 2 不同 Mo 和 V 含量的钢的力学性能

编号	$w(\text{Mo})/\%$		$w(\text{V})/\%$		R_m/MPa	$A/\%$	HB
	设计	实际	设计	实际			
1	0	0.006	0	0.003	1 088	11.5	308
2	0.150~0.200	0.175	0.08~0.10	0.106	1 282	9.8	338
3	0.150~0.200	0.179	0.12~0.40	0.134	1 301	7.9	343
4	0.200~0.250	0.243	0.08~0.10	0.080	1 300	8.6	399
5	0.100~0.150	0.144	0.08~0.10	0.091	1 156	10.9	383

时的大,而其他成分的都小.

Mo 和 V 含量不同时,钢的显微组织如图 2 所示.从图 2(b)可以看出:在相同热处理条件下,含 Mo 为 0.175%、含 V 为 0.106% 时,钢的组织相对细小.

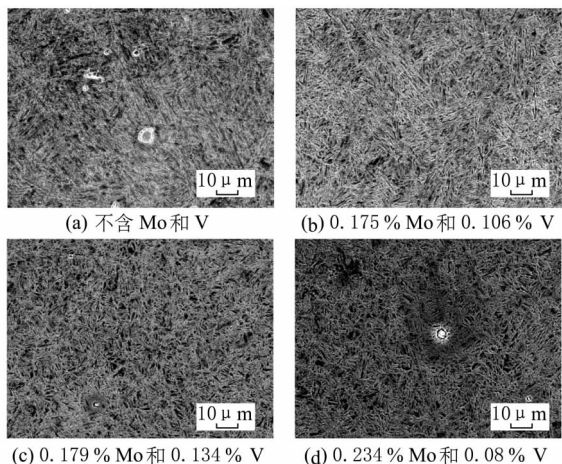


图 2 不同 Mo、V 含量钢的显微组织

而不同 Mo、V 含量钢中的化学元素在各相中的分布,可通过 Thermo-Calc 软件进行平衡计算.从表 3、图 2 和参考文献[11-12]都能得出:Mo 和 V 均是易产生枝晶偏析的元素,且都有细化晶粒和二次枝晶的作用. Mo 和 V 含量低时,钢的综合力学性能随 Mo 和 V 含量的增加而改善;进一步增加 Mo 和 V 含量,综合力学性能却变差.这说明 Mo 和 V 含量适当时,细化枝晶作用明显,各元素的偏析也较低;当 Mo 和 V 含量分别超过 0.2% 和 0.106% 后,细化枝晶作用已不明显,偏

表 3 不同钢的晶粒尺寸与二次枝晶间距

$w(\text{Mo})/\%$	$w(\text{V})/\%$	晶粒大小/mm	二次枝晶间距/mm
0.18	0.00	0.306	0.016
0.18	0.05	0.298	0.015
0.18	0.09	0.294	0.014
0.18	0.13	0.291	0.013
0.00	0.09	0.348	0.019
0.13	0.09	0.300	0.015
0.23	0.09	0.291	0.012

析影响逐渐增大并占据主导地位,导致钢的组织不均匀程度增加,综合力学性能便因此下降.

2.2 Si、Ca 对钢力学性能与夹杂物的影响

向最佳成分的钢中加入不同量的 Si 和 Ca,并经热处理后,其力学性能如表 4 所示.由表 4 可见:加入 Si-Ca 经 RE-Ca 复合变质处理后,钢的综合力学性能得以提高.其中, Si-Ca 加入量为 0.10% 时,钢的综合力学性能为最佳.

表 4 钢经不同变质处理后的力学性能

$w(\text{Si}, \text{Ca})/\%$	0.00	0.05	0.10	0.15
$w(\text{Mo})/\%$	0.175	0.172	0.198	0.185
$w(\text{V})/\%$	0.106	0.095	0.093	0.103
R_m/MPa	1 282	1 291	1 306	1 294
$A/\%$	9.8	10.4	12.7	11.3
R_{eL}/MPa	1 162	1 220	1 245	1 210
HB	338	372	380	397

分析图 3 可以发现:未加 Si-Ca 的钢中的夹杂物数量多,且呈大块聚集分布;而经加入 Si-Ca 进行复合变质处理后,大块夹杂物逐渐变为球状或近似圆球的细小颗粒,而且由聚集分布变为弥散分布.从图 3(a)至(c)可以明显地看出随着 Si-

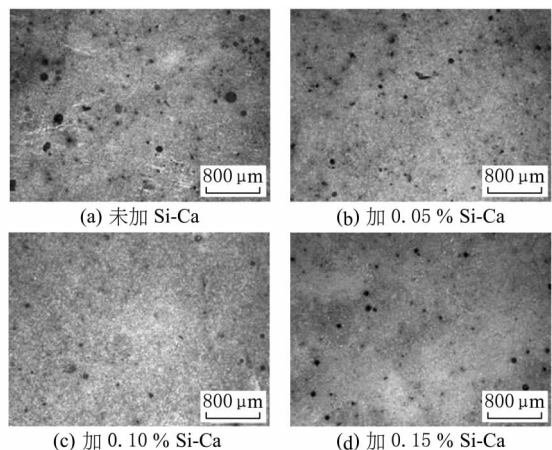
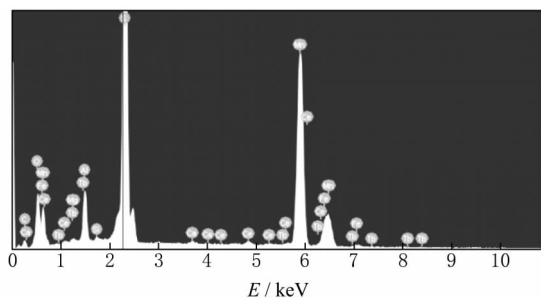


图 3 钢经不同变质处理后的金相组织

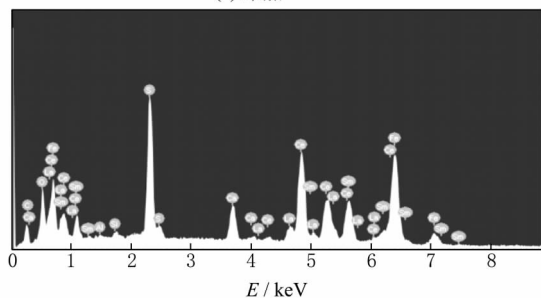
Ca 加入量的增加,夹杂物在逐渐减少,当 Si-Ca 添加量为 0.10% 时,钢中仅残存很少量的夹杂物.而继续添加 Si-Ca 到 0.15% (见图 3(d)),钢中的夹杂又会增加.由此可见,加入 Si-Ca 对净化钢液、减少夹杂的效果很明显.当加入的 Si-Ca 量不足时,不能有效地去除夹杂物;加入量过多, CaO 及 CaS 等夹杂物则会出现于钢中^[13-15].

采用扫描电镜能谱仪对钢中夹杂物微区做定

量分析,结果表明:未加 Si-Ca 的钢中的夹杂物主要为 Al 和 Mn 的氧硫化物;而加入 Si-Ca 经 RE-Ca 复合变质处理后,钢中夹杂物里的 Mn 被 RE 和 Ca 取代而成为了 RE-Ca-Al-O-S 类复合稀土氧硫化物。这表明:RE-Ca 处理能使钢中 Al_2O_3 等氧化物和硫化物夹杂转变为容易上浮而去除的复合稀土氧硫夹杂,从而实现对钢中夹杂物形态、尺寸、分布与数量的控制,进而提升钢的综合力学性能。



(a) 未加 Si-Ca



(b) 加 0.15% Si-Ca 处理

图4 钢中夹杂物成分

对钢试样拉伸断口形貌进行分析发现:未加入 Si-Ca 处理的钢试样的断口在宏观上相对平坦而光亮(图 5(a));断口微观形貌大多为解理和准解理(图 5(c)),从扫描电镜的照片上看到的是多为河流状,仅有少量撕裂岭,故具有脆性特征。而 RE-Ca 复合变质处理的钢试样拉伸的断口宏观形貌为典型的杯锥状(图 5(b)),从其微观形貌上可以看到撕裂岭和大量的韧窝(图 5(d)),即具有延性特征。这种经不同处理的钢试样的拉伸断口形貌的区别,与钢力学性能的差异是相对应的。

3 结论

a. 通过成分设计与试验,开发出了高性能的铸钢。该铸钢经加入 0.10% 的 Si-Ca 复合变质处理和 920 °C 正火,920 °C 淬火,560 °C 回火,其屈服强度和抗拉强度分别可达到 1 245 MPa 和 1 306 MPa;并且,伸长率能达到 12%。

b. 在对应成分的铸钢中,随 Mo 和 V 含量的

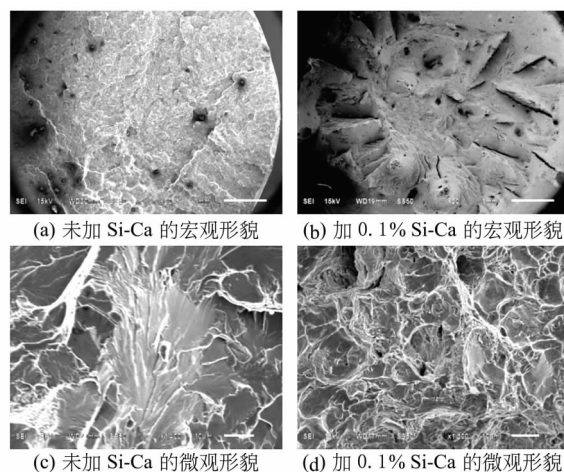


图5 钢经不同变质处理后的拉伸断口形貌

增加,钢的晶粒尺寸和二次枝晶间距逐渐减小,其综合力学性能得以提升;但与此同时,钢中各元素的偏析却随之增加。当 Mo 含量超过 0.2%,V 含量超过 0.106%,钢的综合力学性能下降。

c. 加入硅钙经 RE-Ca 复合变质处理可减少钢中非金属夹杂物的数量,改变其形态、成分与分布,变大块状夹杂物为球状或近似圆球状的稀土复合硫氧化物,并由聚集分布变为弥散均匀分布。向钢中加入 Si-Ca 的量不超过 0.1%,随着 Si-Ca 加入量的增加,夹杂物在逐渐减少。而继续添加 Si-Ca 到 0.15%,钢中的夹杂又会增加。

参 考 文 献

- [1] 马鸣图. 先进汽车用钢[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [2] Kim H J, Keoleian G A, Skerlos S J. Economic assessment of green house gas emissions reduction by vehicle lightweighting using aluminum and high-strength steel[J]. Journal of Industrial Ecology, 2011, 15(1): 64-80.
- [3] 朱学仪. 汽车用钢标准手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [4] 滕长岑. 钢铁材料手册: 第4卷. 合金结构钢[M]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [5] 崔忠圻, 覃耀春. 金属学与热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [6] Wang Liuding, Jiang Laizhu, Zhu Ming. Improvement of toughness of ultrahigh strength steel aemet 100[J]. J Mater Sci Technol, 2005, 21(5): 710-715.
- [7] Lebeau C. Production and control of HSLA steel castings[J]. AFS Transactions, 1984, 92: 645-654.
- [8] Miska K H. High-strength low alloy steel castings[J]. Material Engineering, 1985(1): 37-40.
- [9] 姚贵升, 景立媛. 汽车用钢应用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

(下转第 29 页)

有所下降,但由于热处理之后增强了硼纤维-镍的界面结合强度,因此复合电铸层的抗拉强度反而在热处理之后大幅上升了.这进一步说明了界面结合强度对硼纤维-镍复合电铸层抗拉强度的重要作用.

参 考 文 献

- [1] Tanabe Y, Nishikawa H, Seki Y, et al. Electroforming of Ni mold for imprint lithography using high-aspect-ratio PMMA microstructures fabricated by proton beam writing[J]. Microelectronic Engineering, 2011, 88(8): 2145-2148.
- [2] Tang P T. Electroforming: from rocket engines to nanotweezers[J]. Micro and Nanosystems, 2011, 3(3): 180-187.
- [3] Hart T, Watson A. Electroforming[J]. Metal Finishing, 2000, 98(1): 388-399.
- [4] 章勇,朱增伟,朱荻. 辅助磨擦对镍电铸层力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(5): 1377-1382.
- [5] 申俊杰,田文怀,王雷,等. 电铸液中添加剂含量与电铸镍晶体组织和性能的关系研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2008, 32(1): 69-71.
- [6] Karimi S, Fourlkes F R. Pulse electrodeposition of platinum catalyst using different pulse current waveforms[J]. Electrochemistry Communications, 2012, 19: 17-20.
- [7] Lei Weining, Zhu Di, Qu Ningsong. Synthesis of nanocrystalline nickel in pulse deposition[J]. Transactions of the Institute of Metal Finishing, 2002, 80(6): 205-212.
- [8] Kodandarama L, Krishna M, Murthy H, et al. Development and characterization of electrocodeposited nickel-based composites coatings[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2012, 21(1): 105-113.
- [9] Suchentrunk R. Metal matrix composites produced by electroplating: a review on technology and applications[C]// Nanostructured Thin Films and Nanodispersion Strengthened Coatings. Netherland Dordrecht; Kluwer Academic Publishers, 2004: 241-250.
- [10] Kuboyama K, Ishibashi T, Uchio S. Fabrication of metal matrix composites by electroforming technique[J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2001(16): 67-73.
- [11] Wang W G, Xiao B L, Ma Z Y. Evolution of interfacial nanostructures and stress states in Mg matrix composites reinforced with coated continuous carbon fibers[J]. Composites Science and Technology, 2012, 72(2): 152-158.
- [12] Tzounis P N, Gergidis L N, Matikas T E, et al. Mathematical investigation of interfacial property in fiber reinforced model composites[J]. Composites: B, 2012, 43(6): 2605-2612.
- [13] 文思维,曾竟成,肖加余,等. 单纤维拔出试验表征硼纤维/环氧界面剪切强度研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2007, 34(5): 53-57.

(上接第 25 页)

- [10] 项程云. 合金结构钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.
- [11] 赵军,钟蕊,王家宝. 稀土复合变质处理低合金铸钢的组织与性能[J]. 汽车工艺与材料, 1999(1): 21-24.
- [12] 高瑞珍,陈贞堃,谭作仁,等. ZG20CrMoV 钢中钒的偏析和稀土的作用[J]. 铸造, 1986(12): 7-11.
- [13] 张彩军,蔡开科,袁伟霞. 管线钢硫化物夹杂物及钙处理效果研究[J]. 钢铁, 2006, 41(8): 31-33.
- [14] Dsamu Haida. Mechanism of sulfide shape control in continuously cast HSLA steel slabs treated with Ca and/or RE[J]. Tetsu-to-Hagane, 1980, 66(3): 354-360.
- [15] Blazenko Korousic. Fundamental thermodynamic aspect of the CaO-Al₂O₃-SiO₂ system[J]. Steel Research, 1991, 62(7): 285-288.