

钒微合金化对汽车零部件用钢性能的影响

马骊歌¹, 李显生²

(1. 吉林交通职业技术学院, 吉林 长春 130012; 2. 吉林大学材料科学与工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 制备了不同钒含量的钒微合金化汽车零部件用钢 42CrMoV_x ($x=0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$), 分析了钒微合金化对汽车零部件用钢拉伸性能、耐磨损和耐腐蚀性能的影响。结果表明, 钒微合金化明显提高了汽车零部件用钢 42CrMo 的拉伸性能、耐磨损和耐腐蚀性能。随钒含量增加, 钢拉伸性能、耐磨损和耐腐蚀性能均先提高后下降。与未添加钒的 42CrMo 钢相比, 添加 0.5% 钒的汽车零部件用钢 42CrMoV0.5 的抗拉强度增大 66 MPa、屈服强度增大 67 MPa、断后伸长率增大 3.5 个百分点, 磨损体积减小 $18 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$, 腐蚀电位正移 88 mV、腐蚀电流减小了 0.771 mA/cm^2 。汽车零部件用钢 42CrMoV 中钒含量优选 0.5%。

关键词: 汽车零部件用钢; 42CrMoV; 微合金化; 钒含量; 拉伸性能; 耐磨损性能; 耐腐蚀性能

中图分类号: TF841.3, TG142.1 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2021)04-0068-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.04.012

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



与作者互动
听语音
聊科研

Effect of vanadium microalloying on properties of steel for automobile parts

Ma Lige¹, Li Xiansheng²

(1. Jilin Communications Polytechnic, Changchun 130012, Jilin, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, Jilin, China)

Abstract: Vanadium microalloyed steel 42CrMoV_x ($x=0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$) for automobile parts was prepared. The effects of vanadium microalloying on tensile strength, wear resistance and corrosion resistance of the steel were analyzed. The results show that the tensile strength, wear resistance and corrosion resistance of 42CrMo steel for automobile parts are improved obviously by vanadium microalloying. With the increase of vanadium content, the tensile strength, wear resistance and corrosion resistance of the steel increase first and then decrease. Compared with 42CrMo without vanadium, the tensile strength, yield strength and elongation after fracture of 42CrMoV0.5 steel increase by 66 MPa, 67 MPa and 3.5% respectively, while the wear volume and corrosion current of 42CrMoV0.5 steel separately decrease by $18 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ and 0.771 mA/cm^2 , with the corrosion potential positively shifted by 88 mV. The vanadium content in 42CrMoV steel used for auto parts is preferred to be 0.5%.

Key words: automobile parts steel, 42CrMoV, microalloying, vanadium content, tensile property, wear resistance, corrosion resistance

收稿日期: 2021-01-25

基金项目: 教育部科技发展中心科研课题 (2018A05024)。

作者简介: 马骊歌 (1967-), 女, 吉林长春人, 硕士, 副教授, 研究方向: 新能源汽车方面。E-mail: kongduan3975867616@163.com。

0 引言

在汽车轻量化的大环境下,汽车零部件用钢性能要求不断提高,市场对新型先进高强钢的需求愈发强烈。汽车零部件用钢也吸引了众多科研人员的研究兴趣,取得了一系列研究成果^[1-2]。张成成等^[3]研究了汽车前轴用 42CrMoH 钢表面脱碳的演变规律及控制方法。卢军辉等^[4]确定了 600 MPa 级汽车大梁钢疲劳极限并分析了疲劳断裂原因。陈泽中等^[5]采用数值模拟方法分析了 22MnMoB 钢汽车后地板横梁热冲压成形工艺。候玉栋等^[6]分析了应变速率对汽车用高强钢组织和性能的影响。赵天天等^[7]研究分析了适用于汽车排气歧管的含钕铁素体不锈钢的组织与力学性能。林少凯等^[8]研究了高端汽车冲压压铸钢件的 3DP 打印砂型铸造技术。薛峰等^[9]研究分析了汽车用低合金高强度 HC340LA 钢板的成形性能。王存宇等^[10]研究了高强度高塑性第三代汽车钢的 M3 组织调控理论与技术。叶燕仙和于娇娇^[11]对含钒汽车齿轮钢 20CrMoV 的精炼工艺进行了优化研究。众所周知,材料成分优化是性能改善的重要途径。合金化是汽车零部件用钢性能提升的有效途径。金属钒是一种有效改善钢材综

合性能的合金化元素。但是,目前关于含钒汽车零部件用钢的研究还较少,难以为工业化生产提供有效技术支持。为此,笔者在汽车零部件用钢 42CrMo 中添加不同含量的合金元素钒,研究了钒微合金化对汽车零部件用钢拉伸性能、耐磨损性能和耐腐蚀性能的影响,以期汽车零部件用钢的改性提供思路和试验数据。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

在前期探索性试验基础上,并综合考量钒微合金化在钢材中的作用,设计了几种不同含量的钒微合金化汽车零部件用钢 42CrMoV_x($x=0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$)试样,试验钢的化学成分如表 1 所示。试验钢的实验室制备工艺流程主要分为以下几步:①按成分准确配料;②在中频感应熔炼炉中进行熔炼;③采用下注法将熔融钢液浇注成自耗电极,然后脱模并立即埋入沙中缓冷;④采用电渣重熔制备出试验钢铸锭;⑤780 °C×8 h 退火处理;⑥850 °C 油淬后 560 °C×4 h 回火处理;⑦去除表面氧化物,获得所需的试验钢(圆棒,尺寸 $\phi 100 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$)。

表 1 42CrMoV_x 试验钢化学成分
Table 1 Chemical compositions of 42CrMoV_x test steels

编号	C	Mn	Cr	Mo	Si	V	S	P	Fe
试样1($x=0$)	0.42±0.05	0.75±0.05	1.1±0.05	0.25±0.05	0.20±0.05	0	<0.03	<0.03	Bal.
试样2($x=0.1$)	0.42±0.05	0.75±0.05	1.1±0.05	0.25±0.05	0.20±0.05	0.1	<0.03	<0.03	Bal.
试样3($x=0.3$)	0.42±0.05	0.75±0.05	1.1±0.05	0.25±0.05	0.20±0.05	0.3	<0.03	<0.03	Bal.
试样4($x=0.5$)	0.42±0.05	0.75±0.05	1.1±0.05	0.25±0.05	0.20±0.05	0.5	<0.03	<0.03	Bal.
试样5($x=0.7$)	0.42±0.05	0.75±0.05	1.1±0.05	0.25±0.05	0.20±0.05	0.7	<0.03	<0.03	Bal.
试样6($x=0.9$)	0.42±0.05	0.75±0.05	1.1±0.05	0.25±0.05	0.20±0.05	0.9	<0.03	<0.03	Bal.

1.2 试验方法

用线切割在试样两端和中部位置各切取一个拉伸样(圆棒,夹持端 $\phi 20 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 、平行段 $\phi 10 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$)、磨损样(圆形, $\phi 30 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$)和腐蚀样(圆形, $\phi 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$)。将不同取样位置的 3 个试样测试值的算式平均值作为试验钢性能测试值。在 QX-W550 型拉伸试验机上进行试验钢的室温拉伸试验,拉伸速度 1 mm/min,并用 JSM6510 型扫描电镜观察拉伸断口形貌。在 HT-1000 型摩擦磨损试验机上进行试验钢的室温磨损试验,对磨材料为 45 钢、选择 1 000 r/min 磨轮转速、15 min 磨

损时间、90 mm/min 相对滑动速度等试验参数,记录磨损体积。在 CS360 型电化学工作站上进行试验钢的室温腐蚀试验,腐蚀液用 5%NaCl 水溶液、选择 0.001 V/s 扫描速度,并在试验开始前进行 -1.0 V 条件下的 3 min 恒电位极化,以避免试样表面氧化物对性能测试产生影响。

2 试验结果及讨论

2.1 拉伸性能

钒微合金化汽车零部件用钢 42CrMoV_x($x=0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$)的拉伸试验结果如图 1 所示。从

图1可以看出,合金元素钒的添加,提高了试验钢的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率。钒微合金化有助于改善试验钢的拉伸性能。此外,从图1还可以看出,随钒含量的增加,试验钢的强度表现出先增后减的变化趋势,断后伸长率则表现出先增加再基本不变然后急剧下降的变化趋势。当钒含量为0.5%时,试验钢的抗拉强度(1148 MPa)和屈服强度(998 MPa)达到最大值,断后伸长率(15.7%)也维持在较好水平。与未添加合金元素钒的42CrMo相比,添加0.5%钒的汽车零部件用钢42CrMoV0.5的抗拉强度增大66 MPa、屈服强度增大67 MPa、断后伸长率增大3.5个百分点;0.5%钒的添加显著改善了汽车零部件用钢42CrMo的拉伸性能。图2是未添加钒的汽车零部件用钢42CrMo以及添加0.5%钒的钒微合金化汽车零部件用钢42CrMoV0.5的拉伸断口形貌。从图2可以看出,与未添加钒的

42CrMo相比,添加0.5%钒的42CrMoV0.5拉伸断口中韧窝更多、更细,撕裂棱分布更加均匀,表现出更好的拉伸性能。

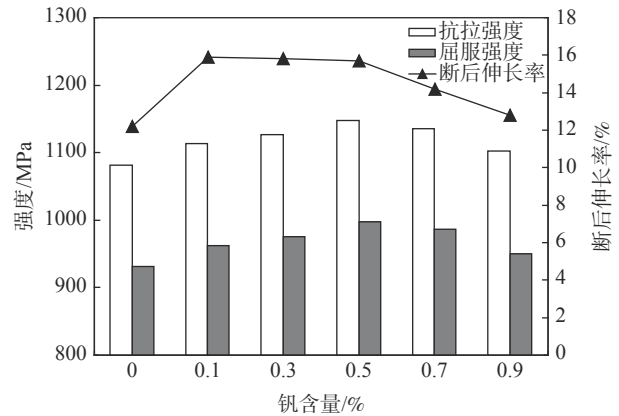


图1 42CrMoV_x 试验钢拉伸试验结果
Fig. 1 Tensile results of 42CrMoV_x test steels

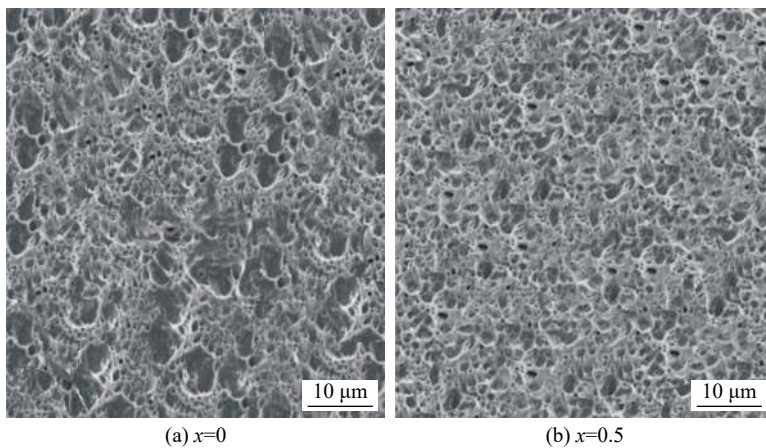


图2 42CrMoV_x 试验钢拉伸断口形貌
Fig. 2 Tensile fracture morphologies of 42CrMoV_x test steels

2.2 耐磨损性能

钒微合金化汽车零部件用钢42CrMoV_x($x=0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$)的磨损试验结果如图3所示。从图3可以看出,合金元素钒的添加,减小了试验钢的磨损体积,提高了试验钢的耐磨损性能。表明钒微合金化有助于改善试验钢的耐磨损性能。此外,从图3还可以看出,随钒含量的增加,试验钢的磨损体积表现出先减后增的变化趋势,试验钢耐磨损性能呈现出先提高后下降的变化趋势。当钒含量为0.5%时,试验钢的磨损体积最小($15 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$),耐磨损性能最佳。与未添加合金元素钒的42CrMo相比,添加0.5%钒的汽车零部件用钢42CrMoV0.5的磨损体积减小 $18 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$,0.5%钒的添加显著改善了汽车零部件用钢42CrMo的耐磨损性能。

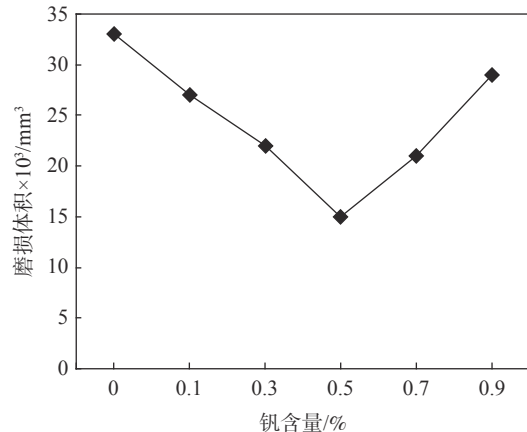


图3 42CrMoV_x 试验钢磨损试验结果
Fig. 3 Wear results of 42CrMoV_x test steels

2.3 耐腐蚀性能

钒微合金化汽车零部件用钢 42CrMoVx(x=0,0.1,0.3,0.5,0.7,0.9)的电化学腐蚀试验结果如表 2 所示。从表 2 可以看出,合金元素钒的添加,使试验钢的腐蚀电位正移、腐蚀电流减小,提高了试验钢的耐腐蚀性能。钒微合金化有助于改善试验钢的耐腐蚀性能。此外,从表 2 还可以看出,随钒含量的增加,试验钢的腐蚀电位表现出先正移后负移的变化趋势、腐蚀电流表现出先减小后增大的变化趋势,试验钢耐腐蚀性能呈现出先提高后下降的变化趋势。当钒含量为 0.5% 时,试验钢的腐蚀电位最正(-0.401 V)、腐蚀电流最小(0.534 mA/cm²),试验钢耐腐蚀性能最佳。与未添加合金元素钒的 42CrMo 相比,添加 0.5% 钒的汽车零部件用钢 42CrMoV0.5 的腐蚀电位正移 88 mV、腐蚀电流减小了 0.771 mA/cm²,0.5% 钒的添加显著改善了汽车零部件用钢 42CrMo 的耐腐蚀性能。

表 2 42CrMoVx 试验钢电化学腐蚀试验结果

Table 2 Electrochemical corrosion results of 42CrMoVx test steels

编号	腐蚀电位/V	腐蚀电流/(mA·cm ⁻²)
试样1(x=0)	-0.499	1.305
试样2(x=0.1)	-0.445	0.846
试样3(x=0.3)	-0.421	0.751
试样4(x=0.5)	-0.401	0.534
试样5(x=0.7)	-0.418	0.722
试样6(x=0.9)	-0.459	0.917

2.4 讨论与分析

由此可以看出,钒微合金化有助于改善汽车零部件用钢 42CrMo 的拉伸性能、耐磨损和耐腐蚀性能。但是钒含量过高或过低都难以使汽车零部件用钢 42CrMoV 获得理想的拉伸性能、耐磨损和耐腐蚀性能。已有的研究表明在钢中添加合金元素钒主要起到脱氧、细化晶粒、使晶粒致密化,提高钢的强

度和韧性等作用。由于钒与氧、氮、碳都有很大的亲和力,在汽车零部件用钢 42CrMo 中添加合金元素钒不仅可以很好地起到脱氧、脱气作用而得到致密细晶组织,而且由于碳化钒(VC)的弥散度很高且极其稳定,从而显著提高了汽车零部件用钢的拉伸性能、耐磨损和耐腐蚀性能。这也是为什么与不添加钒相比,钒微合金化汽车零部件用钢 42CrMoV 的拉伸性能、耐磨损和耐腐蚀性能均得到明显提高的原因。

如果在汽车零部件用钢 42CrMo 中添加的钒含量过低,则合金元素钒在钢中的积极作用难以充分发挥,晶粒细化效果不够显著,脱氧、脱气作用也未能充分发挥出来,导致获得的微合金化汽车零部件用钢拉伸性能、耐磨损和耐腐蚀性能不够理想。提高汽车零部件用钢 42CrMo 的合金元素钒含量,有助于充分发挥钒在钢中的积极作用,获得致密细晶组织,从而获得理想的拉伸性能、耐磨损和耐腐蚀性能。但是,如果汽车零部件用钢 42CrMoV 中钒含量过高,很容易形成粗大的含钒化合物,并且增大钢的回火脆性,使得汽车零部件用钢的拉伸性能、耐磨损和耐腐蚀性能非但没能进一步提高,反而有所下降。

综上所述,钒微合金化明显提高了汽车零部件用钢 42CrMo 的拉伸性能、耐磨损和耐腐蚀性能;汽车零部件用钢 42CrMoV 中钒含量优选 0.5%。

3 结论

1) 钒微合金化明显提高了汽车零部件用钢 42CrMo 的拉伸性能、耐磨损和耐腐蚀性能,合金元素钒含量不宜过高也不宜过低,优选 0.5%。

2) 与未添加合金元素钒的 42CrMo 相比,添加 0.5% 钒的汽车零部件用钢 42CrMoV0.5 的抗拉强度增大 66 MPa、屈服强度增大 67 MPa、断后伸长率增大 3.5 个百分点,磨损体积减小 $18 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$,腐蚀电位正移 88 mV、腐蚀电流减小了 0.771 mA/cm²,其拉伸性能、耐磨损和耐腐蚀性能得到明显改善。

参考文献

- [1] Liu Qingmei, Feng Jiaojie. Development and current situation of advanced high-strength steel under the condition of automobile light weight[J]. Steel Rolling, 2020, 37(4): 65-70, 90.
(刘清梅,封娇洁.汽车轻量化条件下先进高强钢的发展及现状[J].轧钢,2020,37(4):65-70,90.)
- [2] Jin Xuejun, Gong Yu, Han Xianhong, et al. A review of current state and prospect of the manufacturing and application of advanced hot stamping automobile steels[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(4): 411-428.
(金学军,龚煜,韩先洪,等.先进热成形汽车钢制造与使用的研究现状与展望[J].金属学报,2020,56(4):411-428.)
- [3] Zhang Chengcheng, Ma Xiaolei, Zhang Chaolei, et al. Evolution and control of surface decarburization in automobile front

- axle steel 42CrMoH[J]. *Materials Review*, 2020, 34(12): 127–131.
(张成成, 马潇磊, 张朝磊, 等. 汽车前轴用42CrMoH钢表面脱碳演变规律及控制[J]. *材料导报*, 2020, 34(12): 127–131.)
- [4] Lu Junhui, Liu Jiaqi, Qiu Shengtao, *et al.* Determination of fatigue limit and analysis of fatigue fracture of 600 MPa automobile frame steel[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(1): 135–140.
(卢军辉, 刘家琪, 仇圣桃, 等. 600 MPa级汽车大梁钢疲劳极限确定和疲劳断裂原因分析[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(1): 135–140.)
- [5] Chen Zezhong, Liu Huan, Xie Honghao, *et al.* Numerical simulation and process analysis of 22MnMoB steel in hot stamping for automobile rear floor crossmember[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2020, 27(2): 13–20.
(陈泽中, 刘欢, 谢洪昊, 等. 22MnMoB钢汽车后地板横梁热冲压成形数值模拟和工艺研究[J]. *塑性工程学报*, 2020, 27(2): 13–20.)
- [6] Hou Yudong, Jing Cainian, Ding Xiaoyun, *et al.* Effect of strain rate on microstructure and properties of high strength steel for automobile[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2020, 45(9): 71–76.
(候玉栋, 景财年, 丁啸云, 等. 应变速率对汽车用高强度钢组织和性能的影响[J]. *金属热处理*, 2020, 45(9): 71–76.)
- [7] Zhao Tiantian, Teng Lvdan, Jin Yangfan, *et al.* Microstructures and mechanical properties of niobium-containing ferritic stainless steel suitable for automobile exhaust manifold[J]. *Shanghai Metals*, 2020, 42(2): 63–68.
(赵天天, 滕铝丹, 金洋帆, 等. 适用于汽车排气歧管的含铌铁素体不锈钢的组织与力学性能[J]. *上海金属*, 2020, 42(2): 63–68.)
- [8] Lin Shaokai, Dong Xuanpu, Guo Ting, *et al.* 3Dp printing sand casting technology for high-graded automobile stamping die casting steel parts[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2020, 40(4): 392–395.
(林少凯, 董选普, 郭艇, 等. 高端汽车冲压模铸钢件的3Dp打印砂型铸造技术[J]. *特种铸造及有色合金*, 2020, 40(4): 392–395.)
- [9] Xue Feng, Sun Yan, Zhao Nan, *et al.* Study on formability of HC340LA low alloy high strength sheet for automobile[J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49(5): 46–48.
(薛峰, 孙岩, 赵楠, 等. 汽车用低合金高强度HC340LA钢板的成形性能研究[J]. *热加工工艺*, 2020, 49(5): 46–48.)
- [10] Wang Cunyu, Chang Ying, Zhou Fengluan, *et al.* M3 microstructure control theory and technology of the third-generation automotive steels with high strength and high ductility[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2020, 56(4): 400–410.
(王存宇, 常颖, 周峰峦, 等. 高强度高塑性第三代汽车钢的M3组织调控理论与技术[J]. *金属学报*, 2020, 56(4): 400–410.)
- [11] Ye Yanxian, Yu Jiaojiao. Refining process optimization of vanadium-bearing steel 20CrMoV for automotive gear[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2019, 40(6): 108–112.
(叶燕仙, 于娇娇. 含钒汽车齿轮钢20CrMoV的精炼工艺优化[J]. *钢铁钒钛*, 2019, 40(6): 108–112.)

编辑 杨冬梅

(上接第51页)

- [7] Carsi Manuel, Bartolome M Jesús, Rieiro Ignacio, *et al.* The effect of heterogeneous deformation on the hot deformation of WE54 magnesium alloy[J]. *Materials & Design*, 2014, 58: 30–35.
- [8] Hu H E, Wang X Y, Deng L. Comparative study of hot-processing maps for 6061 aluminium alloy constructed from power constitutive equation and hyperbolic sine constitutive Equation[J]. *Materials Science and Technology*, 2014, 30(11): 1321–1327.
- [9] Li X W, Lu M X, Sha Ai X, *et al.* The tensile deformation behavior of Ti–3Al–4.5V–5Mo titanium alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 490(1–2): 193–197.
- [10] Gronostajski Z. The constitutive equations for FEM analysis[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 106(1–3): 40–44.
- [11] Gan Chunlei, Zheng Kaihong, Qi Wenjun, *et al.* Constitutive equations for high temperature flow stress prediction of 6063 Al alloy considering compensation of strain[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(11): 3486–3491.
- [12] Moré Jorge J. The levenberg-marquardt algorithm: Implementation and theory[M]//*Numerical Analysis*. Springer, 1978: 105–116.

实习编辑 唐肖

编辑 杨冬梅