

# 合金元素Mo对蠕墨铸铁高温强度的影响

陶 栋, 李建平, 杨 忠, 段洪波, 杨 伟

(西安工业大学材料与化工学院, 陕西西安 710021)

**摘要:** 采用单因素法、光学金相、扫描电镜、力学性能测试等手段, 研究了添加0~0.8%合金元素Mo对蠕墨铸铁显微组织、不同温度下(室温、400 ℃和500 ℃)的力学性能、强度比(高温强度/室温强度)的影响规律。结果表明: Mo不影响石墨形态和蠕化率, 略微增加珠光体含量并固溶强化基体中的铁素体和珠光体; 随Mo含量的增加, 其抗拉强度、屈服强度均增加, 但伸长率降低; Mo能有效提高蠕墨铸铁的高温力学性能, 尤其是提高高温/室温强度比, 提高高温屈服强度, 含0.8%Mo的蠕墨铸铁的400 ℃/室温的屈服强度比由0.83增加到0.94, 500 ℃/室温的屈服强度比由0.7增加到0.84。

**关键词:** 蠕墨铸铁; 钼; 显微组织; 力学性能; 高温强度

**中图分类号:** TG143.49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2018) 04-0302-06

## Effects of Alloy Element Mo on High Temperature Strength of Vermicular Graphite Cast Iron

TAO Dong, LI Jian-ping, YANG Zhong, DUAN Hong-bo, YANG Wei

(School of Materials and Chemical Engineering, Xi'an Technological University, Xian710021, Shaanxi, China)

**Abstract:** The effects of 0-0.8% alloying elements Mo on microstructure, tensile property at different temperatures, ratio of strength (elevated temperature strength/room temperature strength) were analyzed by single factor method, optical microscopy, scanning electron microscopy and mechanical properties testing in this paper. The results show that the obvious effects of alloying element Mo on graphite morphology and vermicularity are not observed, but the slightly increasing content of pearlite, solid-soluble strengthening the ferrite and pearlite of matrix take place because of adding element Mo. With the increase of Mo content, the tensile strength and yield strength are linearly increased, while the elongation is decreased. Meanwhile, Mo could improve the mechanical properties at elevated temperature effectively, especially yield strength and the ratio of strength. With addition of 0.8% alloying element Mo, the ratio of yield strength is improved greatly, increasing from 0.83 to 0.94 at 400 ℃/room temperature and from 0.7 to 0.84 at 500 ℃/room temperature.

**Key words:** vermicular graphite cast iron; molybdenum; microstructure; mechanical properties; high-temperature strength

蠕墨铸铁具有良好的铸造性能、优异的力学性能、耐热疲劳性能、抗热裂性和耐磨性, 适合在服役工况极其恶劣的部件上使用, 因而在大功率柴油机缸体和缸盖、重型载货汽车的制动盘、刹车鼓、风电轮毂等铸件上具有广泛的应用前景<sup>[1-3]</sup>。

在蠕墨铸铁中添加适量的合金元素, 不仅能够提高珠光体含量, 同时由于合金的强化作用可以提高其高温稳定性, 进而提高了材料的综合性能<sup>[4]</sup>; 但也可能带来其他不利的影响, 为了搞清楚合金元素在蠕墨铸铁中的作用, 国内外相关学者围绕合金元素对蠕铁的影响展开了深入的研究, 通过合金元素(Cu、Mo、Cr、Sn、V、稀土等)的单一添加或者多种合金复合添加来获得实际生产需要的高性能蠕墨铸铁<sup>[5-10]</sup>。Mo是一种中

等的碳化物形成元素, 能够稳定和强化珠光体, 在提高抗热疲劳性能、蠕变和抗裂纹生长等方面是最有效的合金元素<sup>[11]</sup>。工业上广泛研究并应用于中硅钼耐热蠕墨铸铁排气歧管的制造<sup>[12-13]</sup>, 但对于单独添加Mo的研究报道较少, 现有数据不能满足设计需要。基于此, 本文旨在研究合金元素钼对蠕墨铸铁显微组织、室温、400 ℃、500 ℃下力学性能的影响规律, 分析合金元素Mo的添加与材料组织性能变化的内在联系, 尤其是Mo对蠕墨铸铁高温性能的影响, 以期合金化生产综合性能优异的蠕墨铸铁提供一定的理论依据和参考。

### 1 试验材料与方法

试验合金的基本成分(质量分数)为: 3.8%~4.0%

**基金项目:** 陕西省创新人才推进计划-科技创新团队 (2017KCT-05)。收稿日期: 2017-08-18收到初稿, 2017-12-03收到修订稿。

**作者简介:** 陶栋 (1989-), 男, 助理工程师, 研究方向为高性能铸造合金。E-mail: 744120177@qq.com.cn

C、2.0%~2.2% Si、 $Mn \leq 0.2\%$ 、 $P \leq 0.06\%$ 、 $S \leq 0.09\%$ ，在此基础上，设计加入合金元素Mo的含量分别为0、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%。合金制备在西安工业大学中试基地进行，熔炼采用GGW-0.012中频感应炉。蠕化孕育处理采用堤坝式包底冲入法，蠕化剂为专用RE-Mg-Si合金，加入量0.45%，孕育剂为75硅铁，加入量0.6%，处理温度在1430~1460℃。Mo以55钼铁的形式加入炉中，试样采用砂型铸造，造型为Y型试块，依据GB/T26655—2011《蠕墨铸铁件》中规定的设计（图1）；浇注后取Y型试块下部进行组织分析、性能测试。

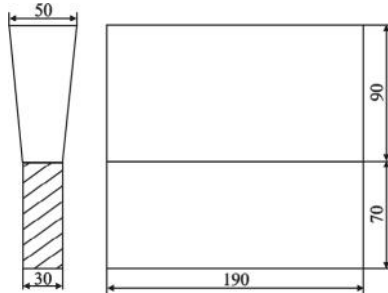


图1 铸型示意图

Fig. 1 Schematic for mold of compacted graphite cast iron

采用NIKON 300型金相显微镜进行显微组织观察分析，使用DT2000金相分析软件评定试验合金的蠕化率和珠光体含量，布氏硬度测试在HL-1000电子布氏硬度计上进行，显微硬度测试在HVS-1000显微维氏硬度计上进行，其中蠕化率、珠光体含量、硬度均取自10个数据的平均值。拉伸性能测试在CMT5105A型电子万能试验机上进行，按照GB/T228—2010加工成

$\Phi 6$  mm的试样，拉伸速度为1 mm/min。400℃和500℃拉伸时，保温30 min后进行试验，测得抗拉强度、屈服强度并计算出伸长率，结果取3个试样平均值。显微组织分析在QUANTA400F型扫描电镜（SEM）上进行。

## 2 试验结果分析

### 2.1 Mo对石墨和基体组织的影响

图2为未腐蚀的蠕墨铸铁石墨形态组织。由图可见，Mo含量的变化对石墨形态、大小影响不大，Mo含量的增加不影响蠕化率，均为较多蠕虫状石墨加少量的球状石墨，且无取向地均匀分布；这主要是因为Mo虽然阻碍石墨化，但其能力较弱，若Si的石墨化系数为+1，则Mo的石墨化系数为-0.3<sup>[4]</sup>。

图3为用4%硝酸酒精腐蚀后的蠕墨铸铁基体组织。可以看出，基体以铁素体为主，随着Mo含量的增加，基体中的铁素体含量降低，珠光体含量略有增加，层片状珠光体分布不均匀，较为聚集。为了进一步量化组织，使用DT2000金相分析软件对蠕化率和珠光体含量进行测量，结果如表1所示。结合图2可见，在试验条件下，无论是否添加合金元素Mo，其蠕化率都在80%~85%之间，没有明显的变化趋势。Mo促进珠光体形成的作用有限，未添加Mo合金的珠光体含量为18.78%，而0.8% Mo合金珠光体含量为30.78%，每0.2% Mo使珠光体含量增加约为2%~3%。虽然Mo在共晶、共析过程均阻碍石墨化，促进珠光体生成，但其能力较弱，因而使珠光体含量略有增加。

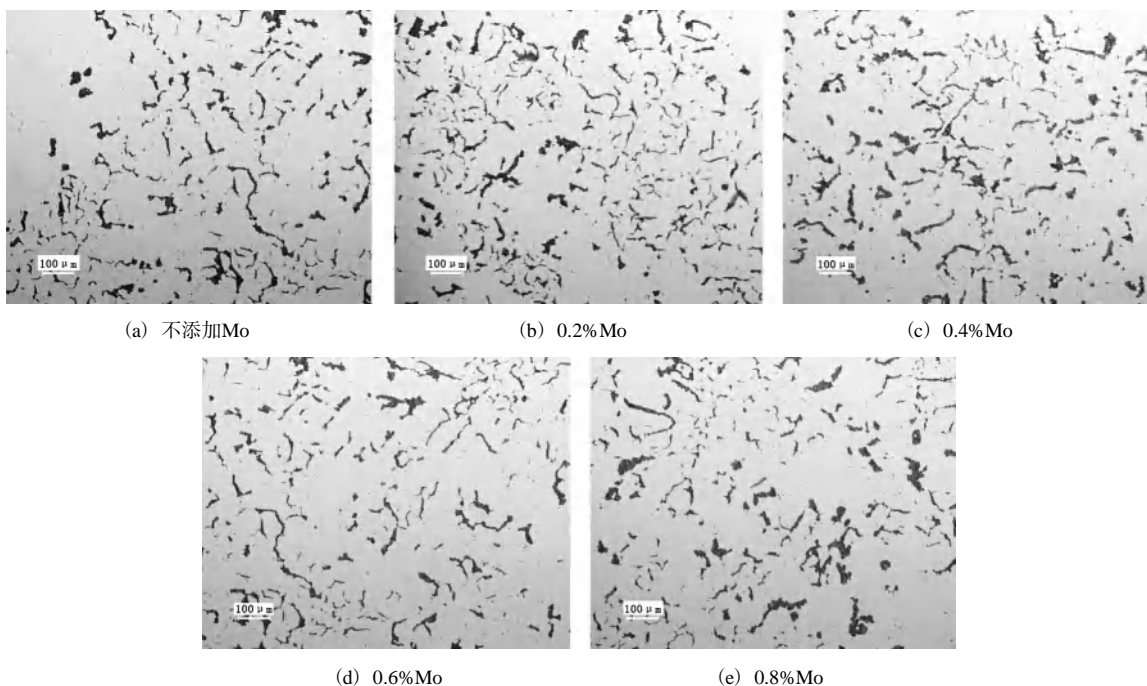


图2 不同Mo含量蠕墨铸铁的石墨形态

Fig. 2 Graphite morphologies in vermicular graphite cast iron with different Mo contents

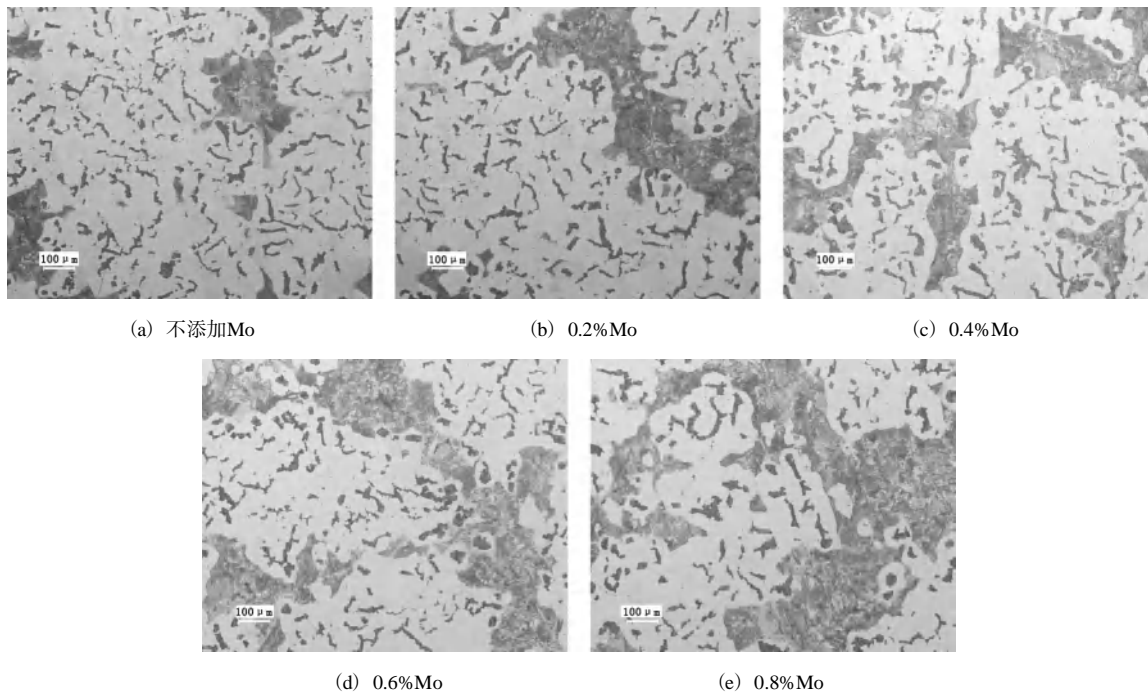


图3 不同Mo含量蠕墨铸铁的基体组织

Fig. 3 Microstructure of vermicular graphite cast iron with different Mo contents

表1 不同Mo含量蠕墨铸铁的蠕化率、珠光体含量

Table 1 The percent of vermiculation and pearlite content of vermicular graphite cast iron with different Mo contents

Mo含量/%	蠕化率/%	珠光体含量/%
0	84.54	18.78
0.2	81.75	22.13
0.4	82.93	24.38
0.6	83.71	26.78
0.8	82.43	30.84

图4为500倍下不同Mo含量蠕墨铸铁组织,可进一步看出,随着Mo含量的增加,基体组织中的铁素体片区减少,珠光体片区增加。此外还发现,在含Mo蠕墨铸铁基体中珠光体分布的区域,发现了少量亮白色的不规则碳化物相,这些相被均匀包围在珠光体中,呈细长条孤岛状分布,随着Mo含量的增加,珠光体中碳化物的数量略有增加,且略有增大。

钼是一种过渡族元素,与Fe能形成有限固溶体,Mo同时与C有较强的亲和力,是形成碳化物、阻碍石墨化的元素,含量较低时以固溶体的形式存在于铁基体中,当Mo含量增加时,一部分固溶于基体中,其余以碳化物的形式存在于珠光体中,含Mo碳化物主要有MoC、Mo<sub>2</sub>C、以及溶于渗碳体所形成的(Fe, Mo)3C。且Mo在基体组织中分布是不均匀的,微观偏析较明显,凝固结束时,易在共晶团边界的渗碳体中富集。对0.8%Mo的蠕墨铸铁试样,碳化物相在扫描电镜下的显微形貌如图5所示,通过EDS分析发现,该相为复杂的含钼碳化物,且有少量的Cr、V、Mn、P富集。试验过程均未单独添加这些元素,是由于原材料中的生铁

引入的,Cr、Mo、V、Mn等合金同为较强的碳化物形成元素,在凝固过程中微观偏析富集于渗碳体中,当局部区域P含量较高时,也可使磷共晶中富集这些元素,可能形成了含Mo的四元磷共晶<sup>[14-16]</sup>。

## 2.2 Mo对室温力学性能的影响

硬度是反映金属材料在一定压力作用下对局部塑性变形的抵抗能力,宏观布氏硬度是试验材料各项性能的综合反应,显微维氏硬度是反映基体中各组织和相的硬度。表2为试验材料的布氏硬度和基体中珠光体和铁素体的显微维氏硬度,可以看出:随着合金元素Mo加入量的增加,试验材料的布氏硬度在增大;不加Mo的布氏硬度为129.9,加入0.8%Mo的材料的布氏硬度为176.7,增加了约HBW47。随着Mo含量的增加,珠光体和铁素体的显微硬度略有增加,对比添加Mo和未添加Mo的硬度,其珠光体和铁素体的显微硬度均明显增大。因为Mo元素是以置换固溶体存在于基体中的,Mo元素的原子半径远大于Fe元素的,在晶格中引起严重的晶格畸变而强化基体<sup>[7]</sup>,因此随着Mo含量的增加,基体各组织的显微硬度增大,同时由于珠光体含量的增加,共同作用使其布氏硬度增大。

图6为试验蠕墨铸铁的室温抗拉强度、屈服强度和伸长率随Mo含量变化关系曲线,由图可见,随着合金元素Mo加入量的增加,其抗拉强度增加,屈服强度增加,伸长率降低。0.8%Mo的蠕墨铸铁相对于未添加Mo的蠕墨铸铁其抗拉强度提高了约100 MPa,屈服强度提高了近70 MPa,但伸长率从4.7%降到了2.6%。Mo含量的增加略有提高蠕墨铸铁的珠光体含量,同时固



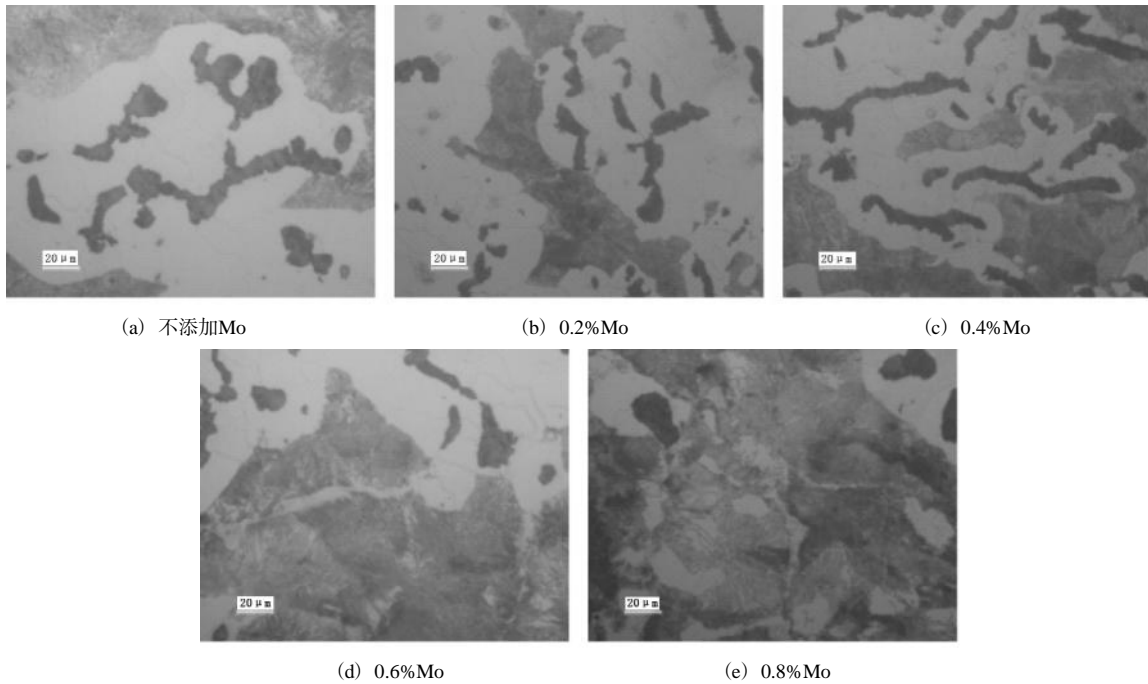


图4 高倍下不同Mo含量蠕墨铸铁的组织

Fig. 4 Microstructure of vermicular graphite cast iron with different Mo contents with high magnification

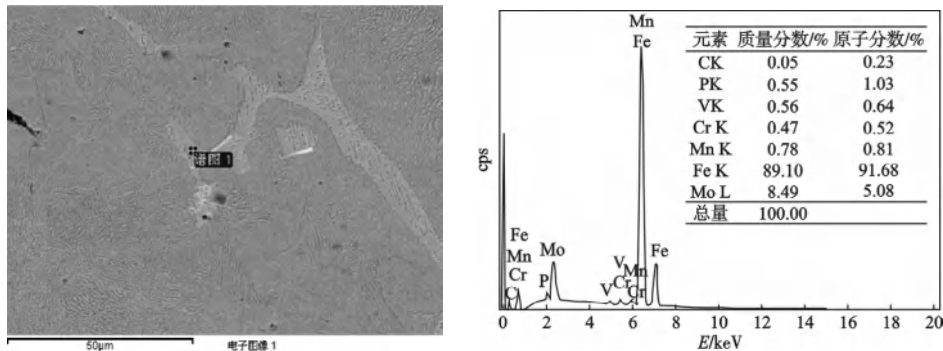


图5 含0.8%Mo蠕墨铸铁试样中碳化物相的扫描分析结果

Fig. 5 SEM analysis result of carbide phase in sample containing 0.8% Mo

溶强化铁素体和珠光体基体，从而提高了合金的强度，降低了韧性。

表2 不同Mo含量蠕墨铸铁的硬度

Table 2 Hardness of vermicular graphite cast iron with different Mo contents

Mo含量/%	HBW	HV(铁素体)	HV(珠光体)
0	129.9	140.3	253.6
0.2	138.8	148.4	304.2
0.4	146.3	152.6	315.3
0.6	167.2	153.1	317.1
0.8	176.7	154.0	321.7

### 2.3 Mo对高温力学性能的影响

图7a、7b分别为400 °C和500 °C时，添加不同Mo含量与蠕墨铸铁力学性能关系曲线。从图可看出，无论在400 °C还是500 °C时，随着Mo含量的增加，其抗拉强度、屈服强度均增加，伸长率降低。0.8%Mo的蠕墨铸铁400 °C抗拉强度从261 MPa提高到353 MPa，提

高了约92 MPa；500 °C抗拉强度从207 MPa提高到296 MPa，提高了约90 MPa，400 °C屈服强度从192 MPa提高到282 MPa，提高了约90 MPa，500 °C屈服强度从172 MPa提高到246 MPa，提高了约84 MPa，但400 °C伸长率从3.83%降到了2.5%。500 °C伸长率从5.54%降到了3.24%。对比不同Mo含量蠕墨铸铁在室温和高温的力学性能还可以得出，虽然添加Mo含量较高时在珠光体中出现了少量含Mo的碳化物相，但不影响强度的变化。

图8为试验不同Mo含量蠕墨铸铁高温与室温强度比，可以看出，随着Mo含量的增加，其抗拉强度比、屈服强度比均增加，但增加的程度不同。0.8%Mo蠕墨铸铁使400 °C与室温的抗拉强度比增加了0.037，500 °C与室温的抗拉强度比增加了0.088；而屈服强度比随着Mo含量增加上升趋势更明显。0.8%Mo蠕墨铸铁使400 °C与室温的屈服强度比由0.83增加到0.94，使500 °C与室温的屈服强度比由0.7增加到0.84。这说明添加Mo元素能有效提高蠕墨铸铁的高温力学性能，尤

其是提高高温屈服强度。这是因为，Mo除了能略微增加珠光体含量以外，Mo以有限固溶体形式存在于基体组织中，稳定强化基体<sup>[16]</sup>，且随着Mo含量的增加，固溶强化效果越明显，基体组织的高温稳定性也同步提高，因而提高了其高温强度。

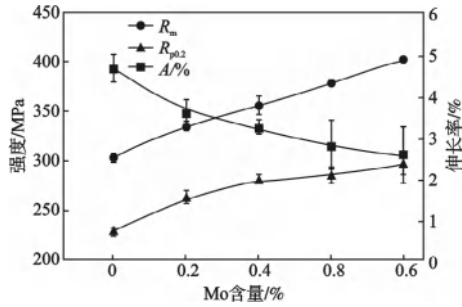
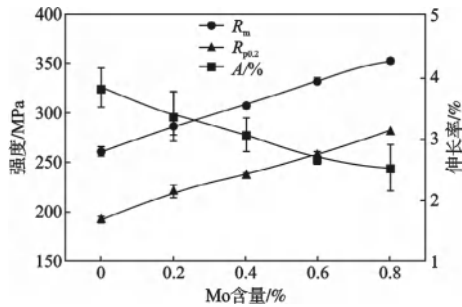
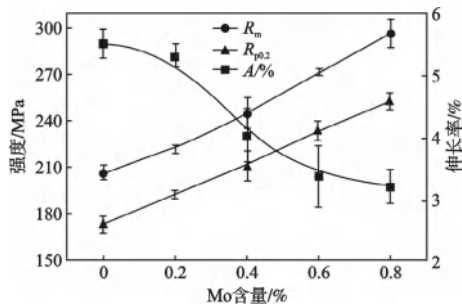


图6 不同Mo含量蠕墨铸铁的室温力学性能

Fig. 6 Mechanical properties of vermicular graphite cast iron with different Mo contents at room temperature



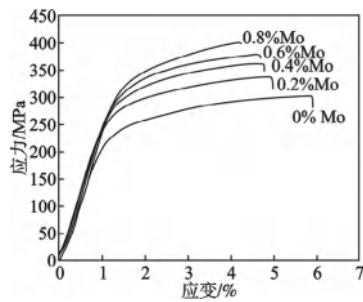
(a) 400 °C



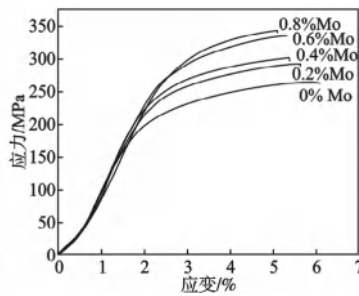
(b) 500 °C

图7 不同Mo含量蠕墨铸铁的高温力学性能

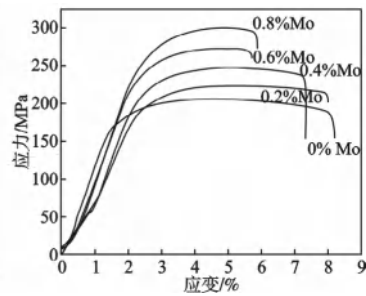
Fig. 7 Mechanical properties of vermicular graphite cast iron with different Mo contents at high temperature



(a) 室温



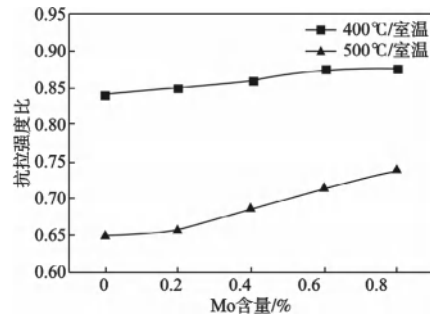
(b) 400 °C



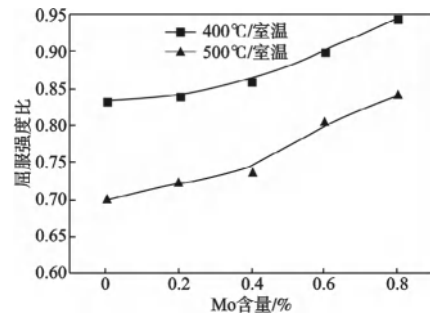
(c) 500 °C

图9 不同Mo含量蠕墨铸铁的应力—应变曲线

Fig. 9 The stress-strain curves of vermicular graphite cast iron with different Mo contents



(a) 抗拉强度比



(b) 屈服强度比

图8 不同Mo含量蠕墨铸铁的拉伸强度比

Fig. 8 The strength ratio of vermicular graphite cast iron with different Mo contents

图9分别为在室温、400 °C、500 °C时，不同Mo含量蠕墨铸铁的应力—应变曲线，可以看出，无论在室温还是高温，随着Mo含量的增加，拉伸时蠕墨铸铁的断裂应力增加，应变逐渐减小。0.8%Mo蠕墨铸铁拉伸时的变形量最小。对比不同温度下的应力—应变曲线表明，随着温度的升高，应力—应变曲线均出现不同程度的下降，且室温和400 °C拉伸时的应变变化量相近，而500 °C拉伸时的应变变化量明显增加，屈服平台显著增长，这主要是因为相对于室温，500 °C时蠕墨铸铁的强度降低，韧性增加引起的。

### 3 结论

(1) 蠕墨铸铁中加入0~0.8%合金元素Mo，不影响石墨形态和蠕化率，促进珠光体形成的作用有限，每0.2%Mo使珠光体含量增加约2%~3%；Mo能同时固

溶强化基体中的铁素体和珠光体，提高基体的显微硬度；随着Mo含量的增加，珠光体基体中的碳化物有所增加，珠光体中出现有少量Cr、V、Mn、P富集复杂的含钼碳化物。

(2) 无论室温还是400℃、500℃时，随着Mo含量的增加，蠕墨铸铁的抗拉强度、屈服强度均增加，伸长率有所降低；0.8%Mo蠕墨铸铁的室温抗拉强度由300 MPa增加到403 MPa，提高了约100 MPa，500℃抗拉强度由207 MPa增加到296 MPa，提高了约90 MPa。

(3) Mo元素能有效提高蠕墨铸铁的高温力学性能，尤其是提高高温/室温强度比、提高高温屈服强度；0.8%Mo蠕墨铸铁使400℃与室温的屈服强度比由0.83增加到0.94，使500℃与室温的屈服强度比由0.7增加到0.84。

#### 参考文献：

- [1] 李明, 刘庆义, 张行河, 等. 蠕墨铸铁在发动机铸件上的应用 [J]. 应用研究, 2008, 5 (5): 28-32.
- [2] Steve Dawson. Compacted graphite iron-a new material for highly stressed cylinder blocks and cylinder heads [J]. Internationales Wiener Motoren Symposium, 2007 (28): 2215-2219.
- [3] 王有清, 胡飞, 施华武. 蠕墨铸铁在气缸体铸件上的应用与发展 [J]. 现代铸铁, 2010, 6 (23): 23-26.
- [4] 赵靖宇, 吕焯哲, 孙玉福, 等. 锡对蠕墨铸铁组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2013, 10 (62): 948-952.
- [5] 杨通, 郭永春, 李建平, 等. 薄壁蠕墨铸铁的组织与性能研究 [J]. 铸造, 2008, 57 (3): 270-273.
- [6] 杨忠, 杨喜岗, 赵玉厚, 等. Cr、Mo、Cu复合合金化蠕墨铸铁的组织性能 [J]. 铸造技术, 2015 (6): 65-70.
- [7] Shy Yih-hsm, Hsu cheng-hsum, Lee shen-chih. Effects of titanium addition and section size on microstructure and mechanical properties of compacted graphite cast iron [J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 278: 54-60.
- [8] Selin M, Holmgren D, Svensson I L. Influence of alloying additions on microstructure and thermal properties in compacted graphite irons [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2009, 22 (1-4): 283-285.
- [9] 李华基, 洪观镇, 胡慧芳, 等. 钒钛蠕墨铸铁的特点及其应用前景 [J]. 金属铸锻焊技术, 2010, 39 (19): 35-39.
- [10] 王敏毅, 黄颖, 林有希. 钇基重稀土蠕墨铸铁的高温性能研究 [J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2012, 40 (4): 501-507.
- [11] 谢庆智, 夏凌涛, 盛龙海. 钼铈合金化球墨铸铁在重型卡车刹车盘中的应用 [J]. 铸造设备与工艺, 2016 (3): 41-43.
- [12] 金永锡. 中硅钼耐热蠕墨铸铁排气歧管材质和工艺探讨 [J]. 铸造, 2005, 54 (12): 1238-1244.
- [13] 吴明海, 杨士浩. 中硅钼耐热蠕墨铸铁性能的研究 [J]. 铸造技术, 1990 (1): 18-21.
- [14] 吴德海. 球墨铸铁 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [15] 邱汉泉. 蠕墨铸铁及其生产技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [16] 杨忠, 陶栋, 李建平, 等. 多元低合金化对蠕墨铸铁组织与性能的影响 [J]. 铸造, 2014, 163 (2): 115-119.
- [17] 李静. 钼对含碳化物等温淬火球墨铸铁 (CADI) 组织和性能的影响 [D]. 郑州: 郑州大学, 2014.

(编辑: 刘冬梅, ldm@foundryworld.com)

(选自《铸造》2018年第4期)