

0.7%Mn 和 2%Mn 片状石墨铸铁中合金元素添加对力学性能和组织的影响

堀江皓

(岩手大学, 日本)

摘要: 为进一步提升高Mn片状石墨铸铁的抗拉强度, 研究了石墨化促进元素 (Cu、Sb、Sn) 和碳化物稳定元素 (Cr、V、Mo) 对该铸铁冷凝固白口倾向和力学性能的影响。结果表明, 向高Mn试样中添加Cu可降低冷凝固白口深度并提高抗拉强度。10%Cu试样具有D型石墨形态, 并形成了冷硬白口。在10%Cu试样中, 通过Fe-C-Cu三元相图的二元偏晶反应, 从熔融铁液中形成包含MnS的球状Cu相。在添加Sb和Sn的高Mn试样中, 抗拉强度没有变化, 但冷凝固白口深度在一定元素范围内呈降低趋势。随试样中Sb和Sn添加量增加, 在共晶胞晶界分别观察到Sb和Sn的高浓度相。在添加Cr和V的高Mn试样中, 冷凝固白口深度和抗拉强度增加, 并分别形成包含Cr、V和Mn的复合碳化物。在添加Mo的高Mn试样中, 随着Mo添加量的增加, 贝氏体形成量增加, 并相应观察到抗拉强度的大幅增加。

关键词: 高Mn片状石墨铸铁; 冷凝固白口; 力学性能; 合金元素 (Cu、Sb、Sn、Cr、V、Mo)

中图分类号: TG143.7; TG25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 06-0695-08

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0090

Effects of Alloying Elements on Mechanical Properties and Microstructures of 0.7%Mn and 2%Mn Flake Graphite Cast Irons

HORIE Hiroshi

(Iwate University, Japan)

Abstract: For the purpose of further increasing the tensile strength of high-Mn flake graphite cast iron, the effects of graphitization promoting elements (Cu, Sb, Sn) and carbide-stabilizing elements (C, V, Mo) on the chilling tendency and mechanical properties of this cast iron were investigated. The following results were obtained. The addition of Cu to high Mn specimens decreased the chill depth and increased tensile strength. The specimens to which 10%Cu was added had a D-type graphite structure, resulting in chill formation. In the 10%Cu-added specimen, spherical Cu crystals, including MnS crystallized by the binary monotectic reaction of the Fe-C-Cu ternary phase diagram, were crystallized. In high Mn specimens with Sb and Sn additions, tensile strength did not change but the chill depth decreased up to a certain amount of these elements. In the specimens with increased amounts of Sb and Sn, formation of high-concentration phases of Sb and Sn was observed at the eutectic cell boundaries, respectively. In high Mn specimens with Cr and V additions, Chill depth and tensile strength increased and complex carbides containing Cr, V and Mn as a solid solution formed, respectively. In high Mn specimens with Mo addition, the amount of bainite formed increased with increasing Mo addition, and a large increase in tensile strength was observed accordingly.

Key words: high-Mn flake graphite cast iron; chilling; mechanical properties; alloying elements (Cu, Sb, Sn, Cr, V, Mo)

此前, 作者以汽车车身中使用的高Mn钢板废料回收利用为目的, 开发了高Mn片状石墨铸铁。高Mn片状石墨铸铁含有约1.5%~2%的Mn, 与常规Mn含量约0.7%的片状石墨铸铁相比, 抗拉强度高出约50~100 MPa, 具有优异的石墨化和力学性能。此外, 通过含有Ca或稀土元素 (RE) 的孕育剂进行孕育, 这些性能会进一步提高, 并且通过减少碳当量 (CE值) 或壁厚, 可以

获得超过500 MPa的高抗拉强度, 这一点在以往的研究中已被证明。

近年来, 为提高汽车燃油效率, 发动机、制动器等汽车部件正在向薄壁化、轻量化方向发展, 这对所用铸铁材料的高强度化提出强烈需求。然而, 铸铁的薄壁化会造成构件截面积减少, 因此需要进一步提高铸铁材料本身的强度。

收稿日期: 2026-03-10。

作者简介: 堀江皓 (1942-), 男, 教授, 博士, 研究方向为铸铁材料开发。

引用格式: 堀江皓. 0.7%Mn 和 2%Mn 片状石墨铸铁中合金元素添加对力学性能和组织的影响 [J]. 铸造, 2026, 75 (6): 695-702.

HORIE Hiroshi. Effects of alloying elements on mechanical properties and microstructures of 0.7%Mn and 2%Mn flake graphite cast irons [J]. Foundry, 2026, 75 (6): 695-702.

铸铁材料的高强度化可以通过降低碳当量（减少导致裂纹萌生和扩展的石墨量），以及添加能够强化基体组织的合金元素来实现，其中碳当量的影响在以往研究中已明确。因此，本课题以高Mn片状石墨铸铁的进一步高强度化为目的，将对基体组织强化起有效作用的合金元素分为石墨化促进元素（Cu、Sb、Sn）和碳化物稳定元素（Cr、V、Mo），研究了这6种元素对高Mn片状石墨铸铁的冷硬白口及力学性能的影响。

1 试验方法

使用高纯生铁（4.0%C、0.01%Si、0.06%Mn、0.01%P、0.01%S）、电解铁（99.9%Fe）、纯Si（99.9%Si）、Fe-Mn（72%Mn）、Fe-S（28%S）作为成分调整材料，每次熔炼量为3 kg，使用3 kHz、12 kW高频熔炼炉，将试样的化学成分调整为符合JIS标准FC250要求（3.3%C、2.1%Si、0.02%P、0.05%S）。试样的Mn含量设为两种：普通铸铁Mn含量0.7%和高Mn含量2.0%，前者记为普通Mn试样，后者记为高Mn试样。

使用金属Cu（纯度99%）、金属Sn（纯度99%）、金属Sb（纯度99%）、Fe-Cr（63%Cr）、Fe-V（82%V）以及Fe-Mo（62%Mo）添加强化合金元素。各合金元素的添加量为0.25%~10.0%Cu、0.1%~3.0%Sb、0.1%~3.0%Sn、0.2%~1.0%Cr、0.1%~1.0%V、0.1%~1.0%Mo。为了详细研究各合金元素过量添加对高Mn片状石墨铸铁石墨化、力学性能以及组织的影响，以上合金元素添加量远超普通铸铁的元素添加量。

将最高熔炼温度设为1 753 K，在1 723 K时以Si量为0.3%加入Ca-Si（63%Ca）进行孕育后，将铁液浇注到冷硬白口试验片壳型、拉伸试样壳型（ $\Phi 30$ mm \times 200 mm）和成分分析用金属铸型中。对由 $\Phi 30$ mm拉伸试样铸型获得的圆棒试样（JIS8C）测量抗拉强度，观察显微组织，然后测量其布氏硬度、石墨面积率、珠光体量和珠光体层间距，并进行电子探针（EPMA）观察。

2 试验结果

2.1 冷硬白口深度的变化

图1、图2分别为添加石墨化促进元素Cu、Sb、Sn的试样以及添加碳化物稳定元素Cr、V、Mo的试样的冷硬白口深度测量结果。Cu添加试样中，与Cu无添加试样相比，普通Mn试样和高Mn试样的冷硬白口深度均降低，即使增加Cu添加量，冷硬白口深度也持续降

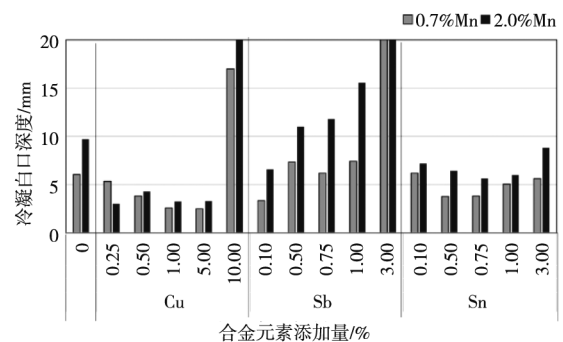


图1 Cu、Sb和Sn添加对不同Mn含量试样中冷硬白口深度的影响
Fig. 1 Effects of Cu, Sb and Sn additions on solidified chill depth in specimens with different Mn contents

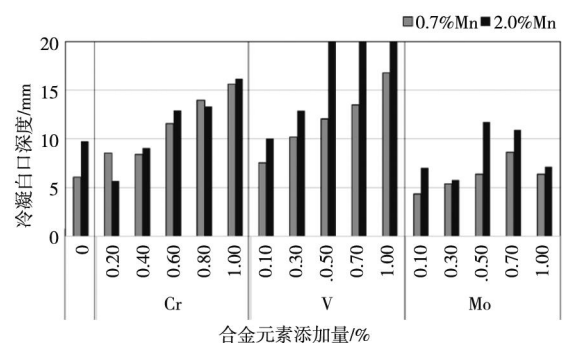


图2 Cr、V和Mo添加对不同Mn含量试样中冷硬白口深度的影响
Fig. 2 Effects of Cr, V and Mo additions on solidified chill depth in specimens with different Mn contents

低，但从10%Cu试样开始，冷硬白口深度急剧增加。Sb添加试样中，与Sb无添加试样相比，普通Mn试样和高Mn试样在0.1%Sb添加量下冷硬白口深度最低，但超过该量的Sb添加试样中冷硬白口深度增加，该趋势在高Mn试样中表现显著。Sn添加试样中，与Sn无添加试样相比，普通Mn试样和高Mn试样在0.75%Sn添加量下冷硬白口深度降低，但添加超过该量的Sn后其值增加。

在Cr添加试样中，普通Mn试样和高Mn试样，与Cr无添加试样相比，冷硬白口深度均随Cr添加而增加，V添加试样也呈现与Cr添加试样相同的趋势。Mo添加试样中，冷硬白口深度随Mo添加略有增加。由此可知，添加碳化物稳定元素Cr、V、Mo的试样，冷硬白口深度随合金元素添加量的增加而增加。Cr、V、Mo是降低铁液中碳活度的元素，通过稳定碳化物等方式促进Fe-C相图中的亚稳态凝固，因此随着这些元素含量的增加，冷硬白口深度增加。

另一方面，添加石墨化促进元素Cu、Sb、Sn的试样中，在一定添加量范围内，冷硬白口深度降低，但超过该添加量后冷硬白口深度反而增加，该趋势在Cu、Sb添加试样中尤为显著。Cu、Sb、Sn是增加铁液

中碳活度的元素，通过加快石墨析出促进Fe-C相图中的石墨稳态凝固。但本研究中，增加这些元素的添加量反而促进了凝固白口形成。这表明，共晶凝固过程中，这些元素的过量添加对促进渗碳体亚稳态凝固产生了某种影响。

2.2 抗拉强度的变化

图3、图4分别为添加石墨化促进元素以及碳化物稳定元素试样的抗拉强度（以下简称 σ ）测量结果。图3所示Cu添加试样中，与普通Mn试样相比，高Mn试样的 σ 更高。此外，与Cu无添加试样相比，普通Mn试样和高Mn试样的 σ 值均随Cu添加而略有增加，Cu添加量5%的普通Mn试样强度增加量约为50 MPa，普通Mn试样的强度较高。与此相比，高Mn试样的 σ 增加量约为30 MPa。这是由于高Mn试样比普通Mn试样的Mn含量多，即使Cu无添加试样中 σ 也处于较高水平。

Sb添加试样中，与Sb无添加试样相比，普通Mn试样和高Mn试样在0.1%Sb添加量下 σ 没有变化，但从0.25%Sb试样开始 σ 降低，在1.0%Sb试样中 σ 大幅降低到100 MPa附近。Sn添加试样也呈现与Sb添加试样相同的趋势，到0.25%Sn试样为止 σ 略有增加，但超过该添加量后试样 σ 降低。

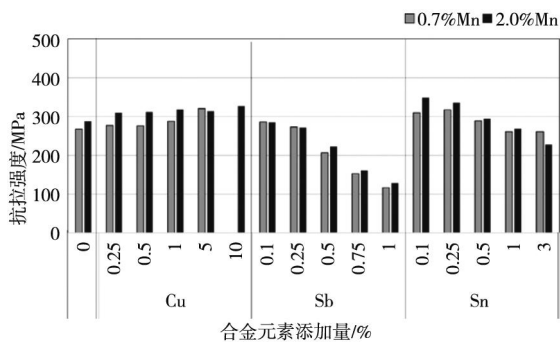


图3 Cu、Sb和Sn添加对不同Mn含量试样抗拉强度的影响
Fig. 3 Effects of Cu, Sb and Sn additions on tensile strength in specimens with different Mn contents

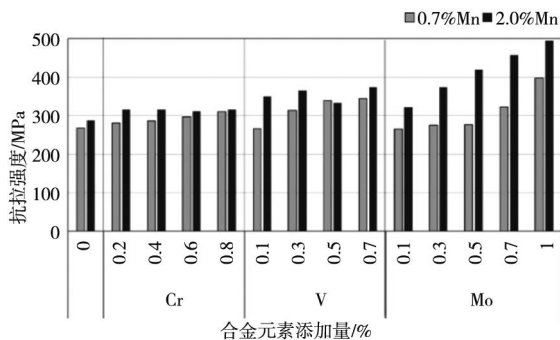


图4 Cr、V和Mo添加对不同Mn含量试样抗拉强度的影响
Fig. 4 Effects of Cr, V and Mo additions on tensile strength in specimens with different Mn contents

图4所示Cr添加试样中，与Cr无添加试样相比，普通Mn试样和高Mn试样的 σ 随Cr添加略有增加，且普通Mn试样的增加趋势更明显，增加量约为40 MPa，高Mn试样则约为20 MPa。V添加试样中，与V无添加试样相比，普通Mn试样和高Mn试样的 σ 随V添加而增加，高Mn试样的增加趋势更明显，普通Mn试样强度增加量约为70 MPa，高Mn试样强度增加量约为90 MPa。Mo添加试样中，与Mo无添加试样相比，普通Mn试样和高Mn试样的 σ 均随Mo添加大幅增加，高Mn试样的增加趋势更明显，普通Mn试样强度增加量约为130 MPa，高Mn试样强度增加量达200 MPa。

总之，从合金元素添加对 σ 的影响来看，添加石墨化促进元素Cu的试样中， σ 随添加量增加略有增加，但Sb、Sn添加试样中 σ 随添加量增加反而降低，Sb添加试样中该趋势显著。另一方面，添加碳化物稳定元素Cr、V的试样中， σ 随这些元素添加量的增加而增加，Mo添加试样与Cr、V添加试样相比， σ 的增加量更大，特别是1%Mo的高Mn试样中 σ 显著增加约200 MPa。

2.3 布氏硬度的变化

图5、图6分别为添加石墨化促进元素以及碳化物稳定元素试样的布氏硬度（HB）测量结果。图5所示Cu添加试样中，与普通Mn试样相比，高Mn试样的布氏硬度整体更高。此外，与Cu无添加试样相比，普通Mn试样和高Mn试样的布氏硬度均随Cu添加量增加而增加，普通Mn试样的增加量约为HB70，高Mn试样约为HB100。Sb以及Sn添加试样也呈现相同的趋势，与Sb、Sn无添加试样相比，普通Mn试样和高Mn试样的布氏硬度均随Sb、Sn添加而增加。Sb添加引起的布氏硬度增加量，普通Mn试样约为HB100，高Mn试样约为HB90；Sn添加引起的布氏硬度增加量，普通Mn试样约为HB110，高Mn试样约为HB100。

图6所示Cr添加试样中，与普通Mn试样相比，高

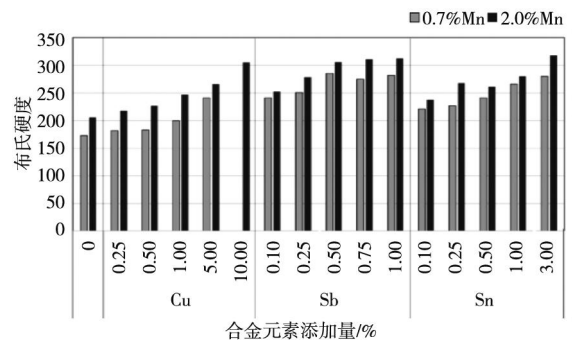


图5 Cu、Sb和Sn添加对不同Mn含量试样布氏硬度的影响
Fig. 5 Effects of Cu, Sb and Sn additions on Brinell hardness in specimens with different Mn contents

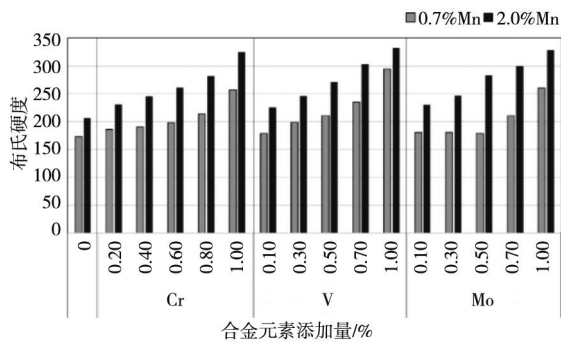


图6 Cr、V和Mo添加对不同Mn含量试样布氏硬度的影响
Fig. 6 Effects of Cr, V and Mo additions on Brinell hardness in specimens with different Mn contents

Mn试样的布氏硬度整体更高。此外，与Cr无添加试样相比，普通Mn试样和高Mn试样的布氏硬度随Cr添加量增加而增加，普通Mn试样的增加量约为HB85，高Mn试样约为HB120。V以及Mo添加试样也呈现相同的趋势，与V、Mo无添加试样相比，普通Mn试样和高Mn试样的布氏硬度均随V、Mo添加量增加而增加。V添加引起的布氏硬度增加量，普通Mn试样约为

HB120，高Mn试样约为HB125；Mo添加引起的布氏硬度增加量，普通Mn试样约为HB87，高Mn试样约为HB120。

2.4 光学显微镜组织观察结果

合金元素无添加试样的光学显微组织（以下简称组织）中，普通Mn试样的石墨组织为A型，基体组织在石墨周围析出铁素体，高Mn试样的石墨组织亦为A型，基体组织为全珠光体。向试样中添加合金元素时，如图7所示，Cu添加试样中，普通Mn试样和高Mn试样的石墨组织为A型，基体组织为珠光体。在Cu添加量5%范围内，随Cu添加量增加石墨组织略微细化，仍为A型。然而，添加10%Cu的高Mn试样中石墨组织变为D型，基体组织为珠光体，同时观察到有少量冷硬白口存在。此外，图7中还可观察到大量球形相，以及包含有棱角异相的球形相。

Sb添加试样中，如图8所示，普通Mn试样和高Mn试样的石墨组织为A型，基体组织为全珠光体，随Sb添加量增加，A型石墨变细、变小。添加

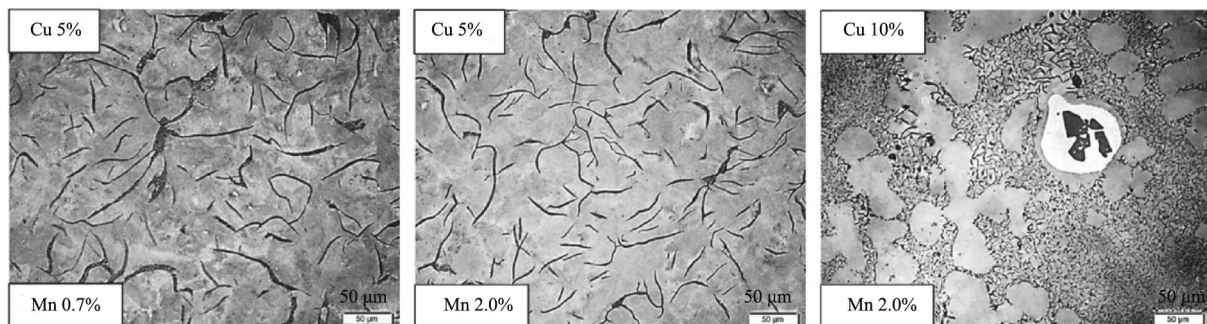


图7 Cu添加对不同Mn含量 $\Phi 30$ mm试样组织的影响

Fig. 7 Effects of Cu additions on microstructure in $\Phi 30$ mm specimens with different Mn contents

0.75%Sb的高Mn试样中，石墨形状变得不规则，基体中观察到冷硬白口。Sn添加试样也显示出与Sb添加试样相同的趋势，石墨组织从A型变成细小A型石墨。添加2%Sn的高Mn试样与Sb添加试样相同，石墨形态变为不规则形状，并且在不规则形状石墨附近观察到冷硬白口。

Cr和V添加试样中，如图9所示，普通Mn试样和高Mn试样的石墨组织均为A型，基体组织为珠光体，分别在添加0.5%Cr、0.3%V的高Mn试样基体中观察到冷硬白口。而且随Cr以及V添加量增加，A型石墨变细，基体的冷硬白口增加。Mo添加试样中，当添加量较少时，普通Mn试样和高Mn试样的石墨组织为A型，基体组织为珠光体。添加0.3%Mo的高Mn试样基体中可观察到贝氏体，随Mo添加量增加，贝氏体量增加。图10为1.0%Mo试样组织，与普通Mn试样相比，高Mn试样的

基体组织贝氏体量更多。

2.5 石墨面积率测量结果

图11为Cu、Sb和Sn添加试样的石墨面积率变化。Cu无添加试样中，高Mn、普通Mn试样的石墨面积率均约为10%，但从0.5%Cu试样开始石墨面积率增加，从3%Cu试样开始降低。Sb、Sn添加试样中，高Mn、普通Mn试样的石墨面积率均随这些元素添加量的增加而降低。

图12为Cr、V和Mo添加试样的石墨面积率变化。Cr、V和Mo添加试样中，高Mn、普通Mn试样虽均有一定程度差异，但随添加量增加石墨面积率降低。

2.6 珠光体层间距测量结果

图13为代表石墨化促进元素和碳化物稳定元素的

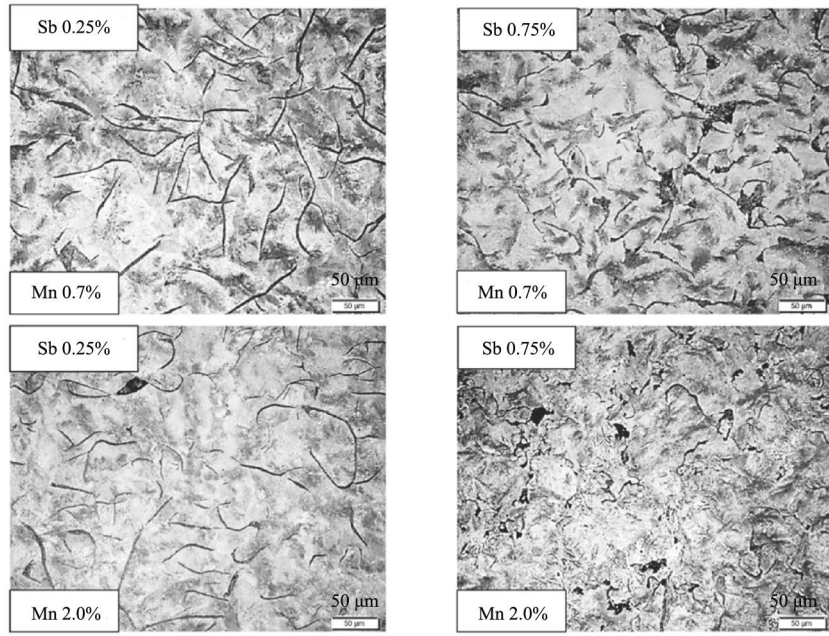


图8 Sb添加对不同Mn含量 Φ 30 mm试样组织的影响

Fig. 8 Effects of Sb additions on microstructure in Φ 30 mm specimens with different Mn contents

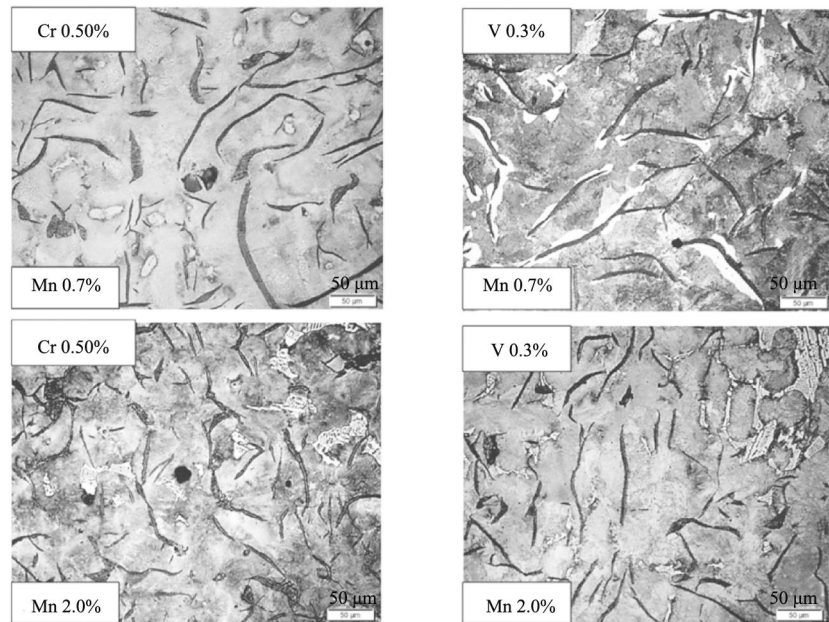


图9 Cr和V添加对不同Mn含量 Φ 30 mm试样组织的影响

Fig. 9 Effects of Cr and V additions on microstructure in Φ 30 mm specimens with different Mn contents

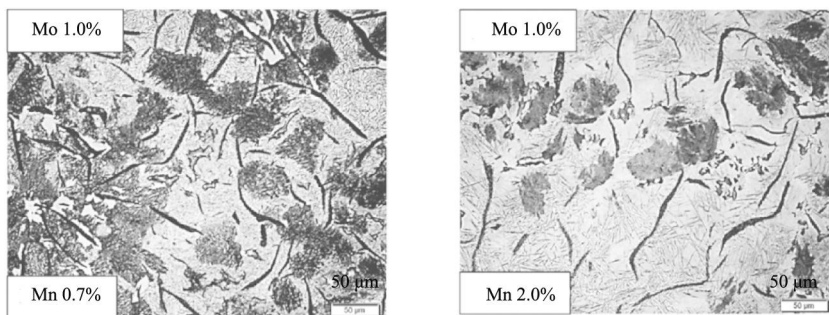


图10 Mo添加对不同Mn含量 Φ 30 mm试样组织的影响

Fig. 10 Effects of Mo additions on microstructure in Φ 30 mm specimens with different Mn contents

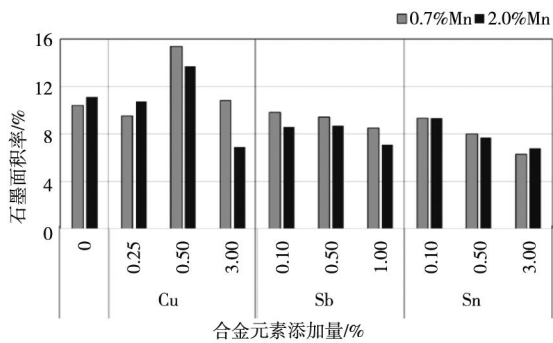


图11 Cu、Sb和Sn添加对不同Mn含量试样中石墨面积率的影响
Fig. 11 Effects of Cu, Sb and Sn additions on graphite area ratio in specimens with different Mn contents

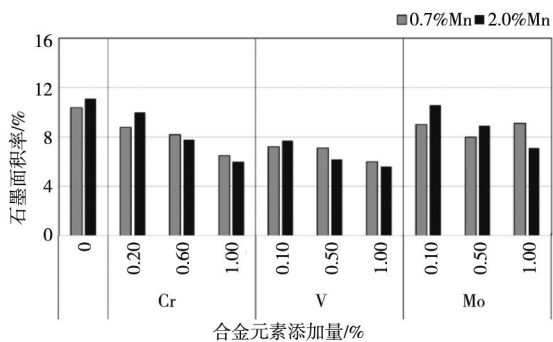


图12 Cr、V和Mo添加对不同Mn含量试样中石墨面积率的影响
Fig. 12 Effects of Cr, V and Mo additions on graphite area ratio in specimens with different Mn contents

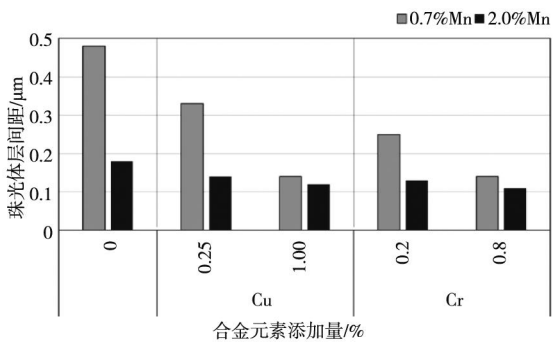


图13 Cu和Cr添加对不同Mn含量试样中珠光体层间距的影响
Fig. 13 Effects of Cu and Cr additions on pearlite lamellar spacing in specimens with different Mn contents

Cu、Cr添加试样的珠光体层间距测量结果。添加Cu的普通Mn试样中，随Cu添加量增加珠光体层间距大幅减少，但高Mn试样中Cu添加量引起的珠光体层间距减少幅度较小。

添加Cr的试样中，高Mn试样的珠光体层间距减少量比普通Mn试样的小。这是由于，与普通Mn试样相比，高Mn试样中Mn本身已表现出减少珠光体层间距的效果，因此Cu、Cr引起的珠光体层间距减少幅度变小。

3 讨论

以高Mn片状石墨铸铁的高强度化为目的，将对基体组织强化有效的合金元素分为石墨化促进元素（Cu、Sb、Sn）和碳化物稳定元素（Cr、V、Mo），从组织变化和凝固过程的角度，讨论添加量远高于普通铸铁添加量的这些合金元素对高Mn片状石墨铸铁冷硬白口以及力学性能的影响。

Cu添加试样中，随添加量增加冷硬白口深度降低，但10%Cu试样中冷硬白口深度急剧增加。与Cu无添加试样相比， σ 随Cu添加量增加略有增加。金相组织方面，在Cu添加量较少时石墨组织为A型，基体组织为珠光体，随添加量增加A型石墨略微细化，该组织变化与冷硬白口和力学性能的结果对应。然而，10%Cu试样中石墨组织为D型，并观察到冷硬白口，同时观察到大量20~30 μm 的球形相和包含有棱角异相的大球形相。

为详细研究10%Cu试样的组织，对 $\Phi 30$ mm试样进行了EPMA分析，结果见图14。分析表明，从球形相内的有棱角异相中检测到Mn和S，从球形相中检测到Cu。而且，通过ZAF法的定量分析，可知球形相的Cu浓度约为91.2%。

根据Fe-C-Cu三元平衡相图可知，通过二元偏晶反应（液相1 \rightarrow 液相2+石墨），铸铁熔液中会形成液相2（Cu浓度约93%的Cu相）和石墨结晶。因此，该球形相对应于二元偏晶反应中形成的液相2高浓度Cu相，在凝固过程中其内包裹了固相MnS。

高Mn片状石墨铸铁通过Ca-Si孕育时，孕育剂中的Ca与熔融铁液中生成的熔点为1 883 K的MnS反应，生成含Ca的球形液相Mn复合硫化物（Mn, Ca）S，在共晶凝固时（Mn, Ca）S作为石墨的晶核起作用，冷硬白口渗碳体被抑制，力学性能提高。

本试验条件下，Cu添加量少的试样中冷硬白口降低， σ 略有增加，可以认为这些试样中含Ca的（Mn, Ca）S对冷硬白口的抑制和力学性能的提高起到有效作用。然而，在Cu浓度高的试样中，根据Fe-C-Cu三元平衡相图，二元偏晶反应形成的液相中高浓度Cu相将MnS包裹在内，使得共晶凝固时作为石墨晶核的（Mn, Ca）S无法有效作用。因此，熔融铁液被过冷，石墨组织成为D型，而且石墨化被抑制，从稳定态石墨共晶凝固转变成亚稳态渗碳体共晶凝固，形成一部分冷硬白口。

添加4%Cu的球状石墨铸铁中也观察到类似现象，通过二元偏晶反应形成的球状石墨会被同时形成的液相中的高浓度Cu相包围，其在熔融铁液中的自由成长

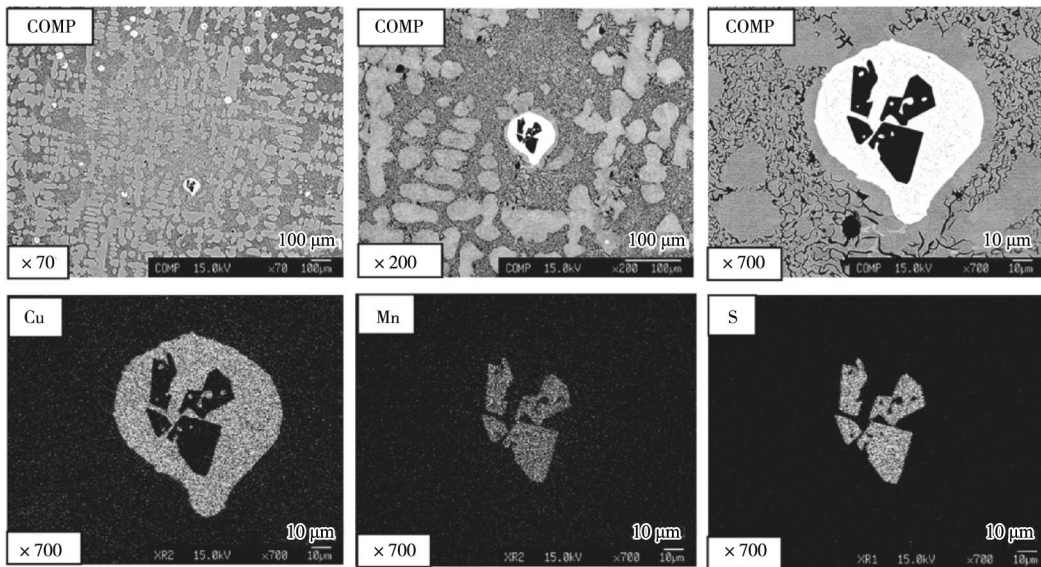


图14 含2%Mn和10%Cu的 $\Phi 30$ mm试样的背散射电子图像和特征X射线图像

Fig. 14 Backscattered electron images and characteristic X-ray images in $\Phi 30$ mm specimen containing 2%Mn with 10%Cu addition

显著受阻，从而生成不规则形状。

Sb、Sn添加试样中，在一定添加量范围内冷凝白口深度降低， σ 没有变化，但超过该添加量时，试样中冷凝白口深度增加， σ 降低。在Sb、Sn添加量达到一定值之前这些组织中为A型石墨，但从冷凝白口深度增加的Sb、Sn添加量附近开始，石墨变细、变小，进一步增大添加量时，石墨变为不规则形状，基体中观察到冷硬白口渗碳体。

因此，对形成不规则形状石墨的1.0%Sb试样进行了EPMA分析，结果如图15所示。从成分组成像（COMP）看，在共晶胞晶界处存在比Fe基体原子序数大的网络状白色相。从特征X射线图像可知，该白色相

为Sb浓度较高的相。另外，Sn添加量多的试样中也观察到共晶胞边界处网络状高Sn浓度的相生成。

Sb的平衡分配系数为0.4，小于1，随共晶凝固的进行被排出到熔融铁液中，并在共晶胞晶界偏析。通常认为亚共晶片状石墨铸铁的共晶凝固过程如下：初生奥氏体上形核的石墨被周围的共晶奥氏体包围，形成球形共晶胞并成长，至残余熔液消失，凝固结束。Sb、Sn添加量多的试样中，在形成共晶胞并成长的共晶凝固过程中，Sb、Sn在共晶胞边界偏析，石墨向熔液中的生长受阻，从而生成不规则形状石墨，而且熔液过冷转变为亚稳态渗碳体共晶凝固，生成冷硬白口渗碳体。

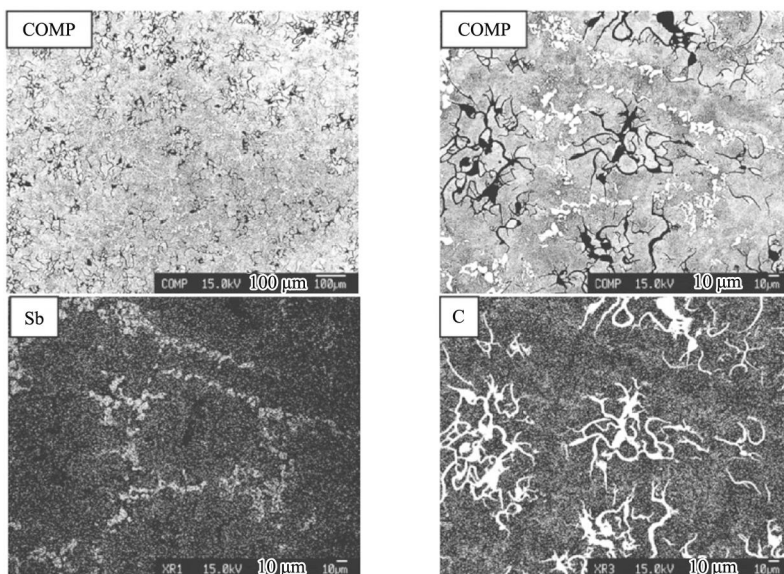


图15 含有2%Mn和1.0%Sb的 $\Phi 30$ mm试样的背散射电子图像和特征X射线图像

Fig. 15 Backscattered electron images and characteristic X-ray images in $\Phi 30$ mm specimens containing 2%Mn with 1.0%Sb addition

另一方面, Cr、V添加试样中, 随添加量增加冷硬白口深度和 σ 增加。石墨组织为A型, 基体组织为珠光体, 随Cr和V添加量增加, A型石墨变细, 石墨面积率(图12)降低, 基体生成冷硬白口组织。图16为0.4%Cr试样的SEM观察及EPMA分析结果。基体组织中观察到渗碳体(Fe_3C)的生成, 且该 Fe_3C 中观察到Cr和Mn的富集。V添加试样, 同样从基体组织的 Fe_3C 中观察到V和Mn的富集。

Cr、V和Mn是碳化物生成元素, 可在 Fe_3C 中固溶, 生成分别包含Cr、V和Mn的复合碳化物(Fe ,

Mn , Cr) $_3\text{C}$ 以及 $(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{V})_3\text{C}$, 从而稳定 Fe_3C 。因此, 向高Mn片状石墨铸铁中添加Cr、V时, Cr、V通过稳定 Fe_3C 促进珠光体化。而且, Cr、V和Mn会降低熔融铁液中的碳活度, 从而降低石墨面积率(图12), A型石墨变小, 这与珠光体的增加以及珠光体层间距(图13)的减少共同作用, 使得 σ 提高。

Mo添加试样中, 随Mo添加量增加贝氏体量增加, 特别是高Mn试样中该趋势显著, 贝氏体的生成使 σ 大幅增加。

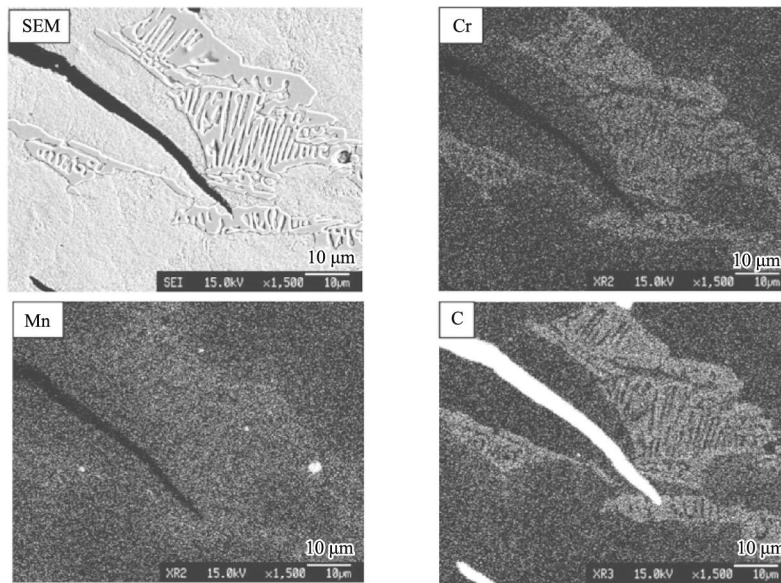


图16 含有2%Mn和0.4%Cr的 $\Phi 30$ mm试样的二次电子图像和特征X射线图像

Fig. 16 Secondary electron image and characteristic X-ray images in $\Phi 30$ mm specimens containing 2%Mn with 0.4%Cr addition

4 结论

以高Mn片状石墨铸铁的高强度化为目的, 将对基体组织强化起有效作用的合金元素分为石墨化促进元素(Cu、Sb、Sn)和碳化物稳定元素(Cr、V、Mo), 研究了添加多于普通铸铁添加量的6种元素对高Mn片状石墨铸铁冷硬组织以及力学性能的影响, 结果如下:

(1) 添加Cu的高Mn试样中, 随Cu添加量增加冷硬白口深度降低, 抗拉强度(σ)增加, 但Cu添加量为10%的试样中石墨组织为D型, 且观察到冷硬白口的生成。

(2) Cu添加量为10%的试样中, 通过Fe-C-Cu三

元平衡相图的二元偏晶反应, 凝固形成了Cu浓度约91%的包含有棱角MnS的球状Cu相。

(3) 添加Sb、Sn的高Mn试样中, 在一定添加量范围内 σ 没有变化, 但冷硬白口降低, 超过该添加量的Sb、Sn添加试样中会形成不规则形状石墨结晶, 冷硬白口增加, σ 随之降低。

(4) 随Sb、Sn添加量增加, 试样共晶胞晶界处分别形成了Sb、Sn的高浓度相。

(5) 添加Cr、V的高Mn试样中, 随着这些元素添加量增加, 冷硬白口深度和 σ 增加。添加Cr、V的高Mn试样中分别生成了包含Cr、V及Mn的复合碳化物。

(6) 添加Mo的高Mn试样中, 随Mo添加量增加贝氏体生成量增加, σ 随之大幅增加。

[来源: 堀江皓. 0.7%Mnと2%Mn片状黒鉛鑄鉄における機械的性質と組織に及ぼす合金元素の影響[J]. 鑄造工学, 2024, 96(1): 22-29.]

翻译: 陈婧(湖南软件职业技术大学) 译审: 雷富军(青海大学) 编辑: 王杰]