

38MnVS5 钢连铸坯中硫化物形貌及形成机制的研究

邓锋云¹ 李国忠² 涂益友¹ 惠荣² 王新社² 蒋建清¹

(1 东南大学材料科学与工程学院,南京 211189; 2 江阴兴澄特种钢铁有限公司,江阴 214429)

摘要 用扫描电镜观察分析了 38MnVS5 钢 320 mm × 300 mm 连铸坯中硫化物的三维形貌,结果显示,从铸坯表面到心部硫化物类型由球状变成杆状,并且在偏析严重区域呈片状或片状-杆状共存。球状硫化物是由包晶反应生成的,杆状硫化物为稳态共晶反应的产物。当合金元素含量较高时,由于过冷导致硫化物生长速度较快,杆状硫化物向片状硫化物转变。

关键词 38MnVS5 钢 硫化物 三维形貌 形成机制

A Study on Formation Mechanism and Morphology of Sulfide in Billet of Steel 38MnVS5

Deng Fengyun¹, Li Gouzhong², Tu Yiyu¹, Hui Rong², Wang Xinshe² and Jiang Jianqing¹

(1 School of Material Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189;

2 Jiangyin Xingcheng Iron and Steel Co Ltd, Jiangyin 214429)

Abstract The three-dimension morphology of sulfide in 320 mm × 300 mm concasting billet of steel 38MnVS5 has been observed and analyzed by using scan electric microscope. The results indicated that the morphology of sulfide changed from spheroidic in billet surface to elongated in centre of billet, and the morphology of sulfide in serious segregation zone was laminar or laminar + elongated. The spheroidic sulfide formed by peritectic reaction, and the elongated sulfide was e-equilibrium eutectic reaction products. With higher alloy elements content the sulfide grew quick due to supercooling, led to elongated sulfide transforming to laminar sulfide.

Material Index Steel 38MnVS5, Sulfide, Three-Dimension Morphology, Formation Mechanism

近 20 年来,随着夹杂物控制工程的引入和发展^[1],夹杂物对钢性能的影响认识也更加深入,如钢中 MnS 可作为铁素体在奥氏体晶内形核核心,常被用来细化铁素体组织^[2,3]。硫化物(MnS)在钢中的另一个重要作用是作为易切削相改善钢的切削性能^[4-6]。本文研究的易切削非调质钢 38MnVS5,是在 MnS-V 系列非调质钢的基础上通过增加 S 的含量(0.050% ~ 0.090%)来改善钢的切削性能,常被用作汽车曲轴等形状复杂的零部件。

1 试验材料及方法

38MnVS5 钢生产工艺为 100 t EAF-LF-VD-CC。其中增 S 方式采用的是出钢后向钢包中喂 S 线,通过该方法得到的 S 含量均匀稳定。连铸坯的尺寸为 320 mm × 300 mm,取样方式为沿铸坯的对角线从边缘到中心依次取样,编号为 ZP-1 ~ ZP-6。

样品经预磨、抛光后直接观察硫化物分布情况,并采用电解腐蚀的方法对样品进行深腐蚀观察硫化物的三维形态。电解液配方:1 g 氯化四甲基氨 + 10 ml 乙酰丙酮 + 90 ml 甲醇溶液;电解电流 1A;时间 8 min。电解腐蚀后能较好显示硫化物的三维形貌。

用 FEI Sirion 场发射扫描电镜观察显微组织。成分分析采用 ARL3460 直读式光谱仪。

2 试验结果及分析

用光谱法测定 ZP-1 ~ ZP-6 样品的成分偏析情况,各样品成分如表 1 所示。铸坯边缘的合金含量较低,在铸坯的 1/4 处属于偏析最严重的区域,合金含量较高,铸坯中心的合金含量较低。38MnVS5 钢铸坯的合金含量波动属于正常偏析。

图 1(a)、(b)为 ZP-1 样品中的液滴状硫化物,其形貌为近似液滴的椭球状或哑铃状。图 1(c)、(d)为 ZP-2 中的杆状硫化物,杆状硫化物一般聚集

表 1 38MnVS5 钢铸坯从对角线边缘到中心的化学成分/%
Table 1 Chemical compositions of steel 38MnVS5 casting billet along diagonal from edge to center/%

取样处	编号	C	Mn	Si	S	Cr	Ni	V
边缘	ZP-1	0.367	1.37	0.56	0.059	0.13	0.14	0.09
	ZP-2	0.375	1.40	0.56	0.073	0.14	0.14	0.10
1/4 处	ZP-3	0.383	1.43	0.57	0.077	0.14	0.14	0.10
	ZP-4	0.368	1.43	0.57	0.082	0.14	0.14	0.10
	ZP-5	0.362	1.37	0.55	0.063	0.13	0.14	0.09
中心	ZP-6	0.361	1.35	0.55	0.066	0.13	0.13	0.09

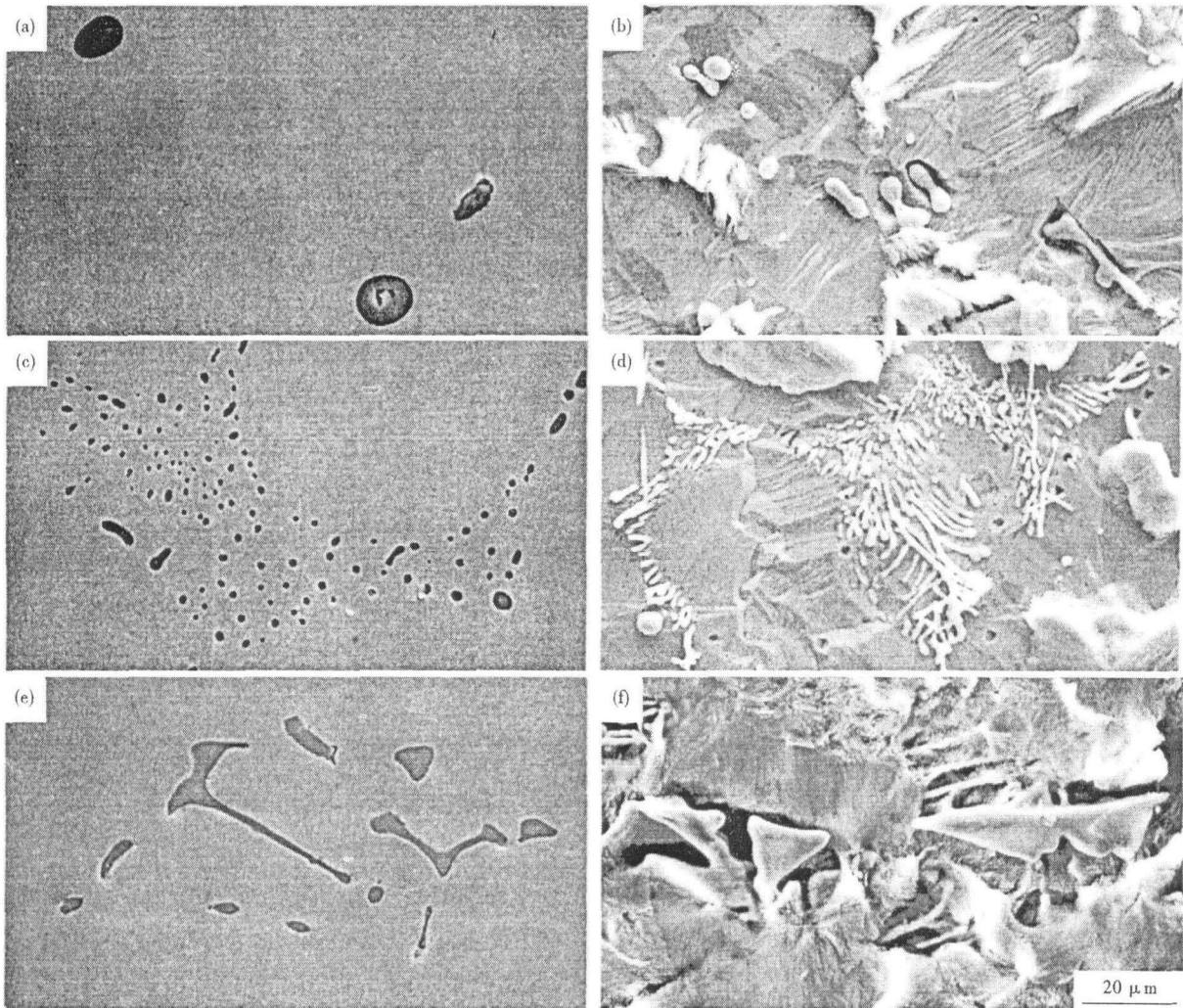


图 1 38MnVS5 钢铸坯硫化物的形貌:(a) 球状,未腐蚀;(b) 球状,三维,电解腐蚀;(c) 杆状,未腐蚀;(d) 杆状,三维,电解腐蚀;(e) 片状,未腐蚀;(f) 片状,三维,电解腐蚀

Fig. 1 Morphology of sulfide in casting billet of steel 38MnVS5: (a) spheroidal, non-etched; (b) spheroidal, three-dimension, electrolytic etched; (c) elongated, non-etched; (d) elongated, three-dimension, electrolytic etched; (e) laminar, non-etched; (f) laminar, three-dimension, electrolytic etched

于凝固时柱状晶或包状晶晶界。杆的直径为 $1\ \mu\text{m}$ 左右,杆上存在二次甚至三次分枝。图 1(e)、(f) 为 ZP-4 中的不规则大片状的硫化物,直径 $\geq 10\ \mu\text{m}$ 。

试验所取铸坯样品中硫化物的这三类形貌与 Sims 等人对硫化物分类比较符合^[7]。在铸坯的边缘(ZP-1)中,观察到硫化物主要以第 I 类球状或液滴状的硫化物为主,存在少量杆状硫化物,没有发现片状硫化物。凝固向里推进,铸坯中杆状硫化物的数量显著增加。凝固继续进行,片状硫化物开始出现。在铸坯的 1/4 处(ZP-3, ZP-4)硫化物主要为图 1(e)、(f) 所示的片状硫化物。在凝固的最终阶段铸坯中心(ZP-6),片状硫化物又有所减少,杆状硫化物与片状硫化物共存(图 2)。

3 讨论

如图 1 所示的第 I 类球状或液滴状的硫化物,

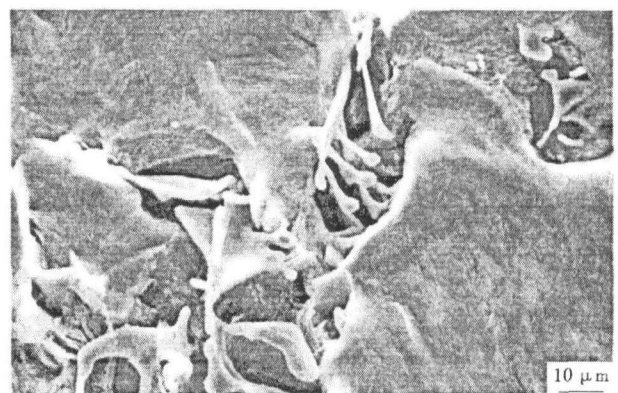


图 2 38MnVS5 钢铸坯心部(ZP-6)杆状 MnS 与片状 MnS 共存形貌

Fig. 2 Morphology of coexisting elongated MnS and laminar MnS in center of casting billet of steel 38MnVS5 (ZP-6)

在凝固开始的铸坯边缘和凝固的最终区域铸坯中心都有发现。在铸坯边缘部分,由于 S 元素的负偏析,

S 含量低于平均成分。样品中硫化物的数量较少,球状或液滴状形貌的硫化物比例较高。第 I 类硫化物由于外形为球状或液滴状,显然硫化物是以液态形式形成的。从试验样品的金相照片上观察,发现

大量球状或液滴状硫化物中心存在深色核心,如图 3(a)。能谱分析显示核心部分(图 3a 中 B 点)的 Fe 含量要明显高于外围(图 3a 中 A 点)。电解深腐蚀后,可以看到大量球状或液滴状硫化物上存在空洞

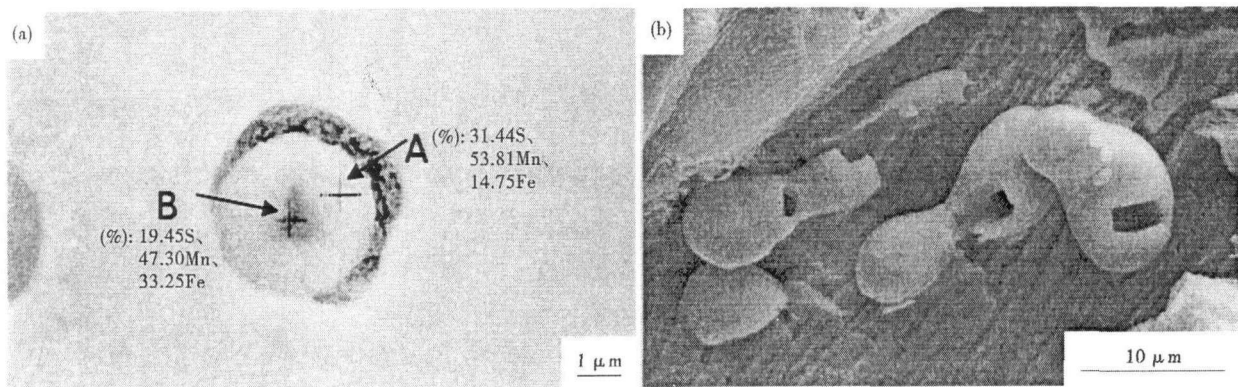


图 3 复合硫化物的能谱分析(a)和电解深腐蚀硫化物上的空洞(b)

Fig. 3 EDX analysis of complex sulfide (a) and void in sulfide with deep electrolytic etching (b)

(图 3b)。由于电解腐蚀的特性,仅 α -Fe 能够被腐蚀,所以硫化物核心部分为 α -Fe。

从图 3 中 MnS 与核心的形貌上看,球状硫化物符合典型的包晶反应产物形貌。在高温时钢液中首先形成 FeS,随着凝固过程中温度降低,发生包晶反应 $L + FeS \rightarrow Fe + MnS$,生成第 I 类 MnS。

第 II、III 类 MnS 占铸坯中硫化物数量的绝大部分。偏析最严重部位,硫化物主要是片状 MnS。在其它部位则观察到同时存在杆状硫化物和片状硫化物。第 II、III 类 MnS 一般认为是共晶反应的产物^[8,9]。共晶反应产物为片状还是杆状取决于共晶组织中两相的体积比 ($V_{\beta} < V_{\alpha}$), β 相/(α 相 + β 相) 大于 $1/\pi$ 时,共晶组织中 β 相形貌为片状,反之 β 相为杆状。由铸坯中 MnS 很大部分都是第 II 类杆状形貌的 MnS,而且合金元素含量越低,杆状 MnS 的体积分数也越大。可以推测稳态凝固下,Fe、MnS 两相共晶生长时硫化物形貌为杆状。随偏析程度的加剧,片状硫化物才开始增多。这可以从第三组元对共晶组织的影响的理论来解释。由于第三组元影响共晶 Fe、MnS 两相的成分过冷程度不一致,加速了 MnS 相的生长,从而导致 MnS 形貌由稳态的杆状向片状转变。

4 结语

38MnVS5 钢的连铸坯样品电解深腐蚀后发现其中硫化物可归类为球状、杆状、片状 3 种形貌。沿铸坯表面向铸坯中心, MnS 形貌由球状逐渐向杆状过渡,在铸坯边缘至中心 1/2 处(铸坯 1/4 处)由于偏

析合金元素含量最高, MnS 的形貌转变为片状,到铸坯的中心又恢复到杆状与片状的共存。球状的 MnS 由包晶反应生成,而杆状和片状的 MnS 则都是共晶反应的产物。

江苏省科技成果转化专项资金项目(编号 BA2004019)

参考文献

- Holappa L E K, Helle A S. Inclusion Control in High-Performance Steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 1995, 53: 177
- Ishikawa F, Takahashi T. The Formation of Intragranular Ferrite Plates in Medium-carbon Steels for Hot-forging and Its Effect on the Toughness. *ISIJ International*, 1995, 35(9): 1128
- Furuhara T, Yamaguchi J, Sugita N, et al. Nucleation of Proeutectoid Ferrite on Complex Precipitates in Austenite. *ISIJ International*, 2003, 43(10): 1630
- 江来珠, 崔昆. 易切削相组成、形态及面积份数对硫系易切削钢切削性能的影响. *机械工程学报*, 1993, 29(2): 58
- Cui Kun. Progress of Study on Free-cutting Mould Steel for Plastics. *Proceedings of an International Conference on Tool Steel for Dies and Moulds*. Shanghai, China, 1998: 14
- Yu Hao, Kang Yonglin, Zhao Zhengzhi, et al. Morphology and Precipitation Kinetics of MnS in Low-Carbon Steel during Thin Slab Continuous Casting Process. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2006, 13(5): 30
- Sims C E, Dahle F B. Effect of Aluminum on the Properties of Medium Carbon Cast Steel. *AFS Trans*, 1938, 46: 65
- Bigelow L K, Flemings M C. Sulfide Inclusions in Steel. *Metallurgical Transactions*, 1975, 6B(2): 275
- Ito Y, Masumitsu N, Matsubara K. Formation of Manganese Sulfide in Steel. *Transactions ISIJ*, 1981, 21: 477

邓锋云(1983-),男,硕士研究生,2005年东南大学毕业,非调质易切削钢中硫化物形貌控制研究。

收稿日期:2007-08-14