

镁处理易切削钢硫合金化后夹杂物演变行为研究

白云 张庆松 孟羽

(江阴兴澄特种钢铁有限公司, 江阴 214400)

摘要 为开发含镁硫系易切削钢,采用高温模拟实验及热力学计算相结合的方法研究了夹杂物演变。探究了硫合金化对钢液中不同镁系夹杂物的影响及作用机理。实验结果显示,硫合金化会导致钢液中镁系夹杂物沿着 $MgO_{(s)} \rightarrow 2MgO \cdot SiO_{2(s)} \rightarrow MgO-SiO_2-MnO_{(l)}$ 的路径转变。热力学计算结果表明,随着钢液中硫含量的增加, $[Mg]-[S]$ 平衡取代 $[Mg]-[O]$ 平衡成为钢液中 $[Mg]$ 的决定性因素。当 $[S] \leq 0.12\%$ 时,钢液中平衡 $[Mg]$ 在 0.000 78% 以上,平衡产物为固溶体 MgO ; 当 $0.12\% \leq [S] \leq 0.46\%$ 时,钢液中平衡 $[Mg]$ 在 0.000 15% ~ 0.000 78%,平衡产物为固溶体 $2MgO \cdot SiO_2$ 和 $(Mg, Mn)S$; 当 $[S] > 0.46\%$ 时,钢液中平衡 $[Mg]$ 在 0.000 15% 以下,平衡产物为液相夹杂物 $MgO-SiO_2-MnO$ 和 $(Mg, Mn)S$ 。

关键词 易切削钢 镁处理 硫合金化 夹杂物 热力学

A Study on Evolution Behaviour of Inclusions after Sulfur Addition in Free-Cutting Steel with Magnesium Treatment

Bai Yun, Zhang Qingsong and Meng Yu

(Jiangyin Xingcheng Special Steel Works Co Ltd, Jiangyin 214400)

Abstract In order to develop magnesium-containing resulfurized free-cutting steel, the formation and evolution of inclusions are investigated by high temperature simulation experiments and thermodynamic calculations. The effect of sulfur addition on the inclusions in liquid after magnesium treatment and mechanism are specially discussed. The experimental results show that the addition of sulfur causes the transformation of magnesium inclusions in liquid steel along the path of $MgO_{(s)} \rightarrow 2MgO \cdot SiO_{2(s)} \rightarrow MgO-SiO_2-MnO_{(l)}$. The results of thermodynamic calculation show that as a sufficient amount of sulfur is added to the molten steel, the $[Mg]$ in liquid is determined by the equilibrium of $[Mg]-[S]$ instead of $[Mg]-[O]$. When $[S] \leq 0.12\%$, the equilibrium $[Mg]$ exceeds 0.000 78% and the equilibrium product is MgO ; as $0.12\% \leq [S] \leq 0.46\%$, the equilibrium $[Mg]$ is in the range of 0.000 15% ~ 0.000 78% and the equilibrium product is solid solution ($2MgO \cdot SiO_2$) and $(Mg, Mn)S$; as $[S] > 0.46\%$, the equilibrium $[Mg]$ is lower than 0.000 15% and the equilibrium product is liquid inclusions ($MgO-SiO_2-MnO$) and $(Mg, Mn)S$.

Material Index Free-Cutting Steel, Magnesium Treatment, Resulfurization, Inclusions, Thermodynamics

硫系易切削钢是一类通过向钢中加硫来提高其切削加工性能的特殊钢^[1],目前广泛应用于汽车、精密仪表和家用电器等行业。在机械加工不断向高速化、自动化、精密化方向发展的过程中,市场对高品质易切削钢的需求越来越大。在传统硫系易切削钢中,硫化锰夹杂物作为易切削相可降低钢材切削抗力、促进切屑断裂,从而提高钢材的可切削性。然而,硫化锰作为塑性夹杂物,在钢材轧制过程中易沿轧制方向延长变形,进而导致钢材力学性能各向异性^[1-4]。为实现硫系易切削钢力学性能与切削性能的协调匹配,关键是控制钢中硫化物夹杂的形态并抑制其变形。

镁处理可有效控制钢中夹杂物的尺寸和形貌,而且含镁易切削钢的开发也符合易切削钢无铅化的绿色发展方向^[5]。镁处理通过改变硅酸盐夹杂物和铝酸盐夹杂物的成分,可有效控制夹杂物在钢中细

小弥散化分布^[6-9]。Kimura^[10]通过高温共聚焦显微镜观察了低碳钢中 $MgO-Al_2O_3$ 复合夹杂物在钢液表面的运动行为,结果显示 $MgO-Al_2O_3$ 夹杂物偏聚成簇的趋势显著低于 Al_2O_3 夹杂物。从氧化物冶金的角度来看,细小弥散分布的含镁氧化物夹杂可在钢液凝固过程中作为硫化锰夹杂异相形核的核心^[11-13]。Ohta^[14]研究了 Fe-10% Ni 合金中脱氧产物对硫化锰夹杂析出和分布行为的控制,实验结果发现 MnS 在被推向钢液凝固末端前沿的 MgO 颗粒上结晶析出。当塑性硫化锰夹杂包裹着硬质氧化物夹杂析出,一方面可避免硬质氧化物夹杂带来的危害,另一方面可有效避免单相硫化锰夹杂物易变形的特性。因此,本研究希望将镁处理技术引入到硫系易切削钢中来实现切削性能与力学性能的协调控制。

通常来说,硫作为有害元素需要从钢中尽可能脱除,但在硫系易切削钢中硫元素作为有益元素最

高质量分数可达到 0.4% 甚至更高^[15-16]。但目前镁处理技术的研究主要集中在低硫钢,而对硫系易切削钢这类高硫特殊钢中的研究鲜有报道,特别是硫合金化对镁系夹杂物的影响。为此,本文通过高温模拟实验研究了硫合金化前后镁系夹杂物的成分及形貌变化并结合热力学计算探究了镁系夹杂物的转变机理。

1 实验方法

1.1 实验过程

图 1 为高温热态模拟实验所用高温立式管式炉,该设备以 MoSi₂ 棒为发热元件,最高使用温度可达 1 700 ℃。双 B 型热电偶为测温与控温元件,分别放置在坩埚下部和侧面,控温精度为 ± 3 ℃。MgO 坩埚用来盛放钢液并被放置在炉膛内恒温区位置。为防止加料和取样过程中因钢液飞溅而损坏炉管,将高纯石墨坩埚套在 MgO 坩埚外。实验过程中,从炉体下部通入氩气,以防钢液增氧及石墨坩埚烧损。

本研究共开展了 3 组实验(A~C),实验过程如图 2 所示,实验原材料主要成分已列于表 1。为了获得不同类型的镁系夹杂物,三组实验中镍镁合金加入量成倍增加。实验中,首先将工业纯铁和锰铁合金装入 MgO 坩埚并随炉加热至 1 600 ℃,保温 10 min 后加入化学纯硅进行脱氧,5 min 后加入镍镁合金进行镁处理。硫化铁在镍镁合金之后加入且间隔时间为 10 min。在硫合金化前 1 min 和硫合金化后 5 min 时取样,分别用直径 5 mm 的石英玻璃管抽取钢液并及时插入冰水中进行淬冷。

1.2 钢的成分及夹杂物检测分析方法

实验结束后,从坩埚样上钻取碎屑进行成分分析,其中 C、P、S、Si、Mn、Mg 等元素的成分委托给国家钢铁材料测试中心进行测定,钢液中 O 含量采用 DWY-IV 型定氧仪测定。

将石英玻璃管所抽取的钢样切割成高 10 mm 的圆柱,随后用砂纸对钢样横截面进行研磨,并在研磨膏辅助下将钢样表面抛光处理至光洁、无划痕,最后用酒精冲洗表面并吹干。在每个样品横截面上随机选择至少 20 个夹杂物,利用 Zeiss Ultra Plus 型扫描电镜(SEM,加速电压 15 kV)及附带能谱仪(EDS)对其形貌、尺寸、成分及元素分布进行分析。

2 结果及讨论

2.1 钢液成分

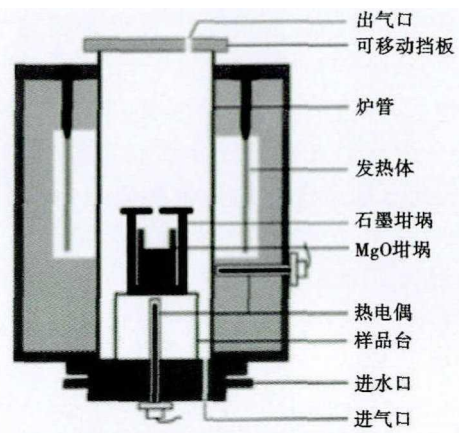


图 1 高温立式管式炉示意图

Fig. 1 Schematic of high temperature tube type furnace

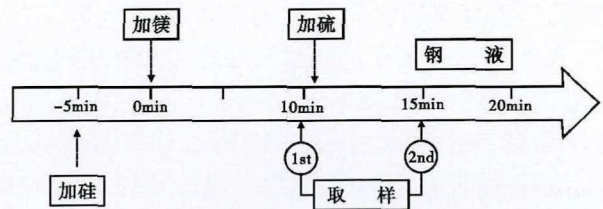


图 2 实验过程加合金和取样示意图

Fig. 2 Schematics of addition of alloys and sampling procedures during the experiment

表 1 实验用原料成分 / %

Table 1 Compositions of raw materials of experiment / %

实验原料	Fe	Ni	Al	Mn	C	Si	Mg	S	其它
工业纯铁	99.90	0.01	0.018	0.03	0.002 1	0.01	-	0.003	0.035
锰铁合金	12.57	-	-	84.20	1.50	1.50	-	0.03	0.20
化学纯硅	-	-	-	-	-	99.90	-	-	0.10
镍镁合金	0.93	80.12	-	-	-	-	17.98	-	0.97
硫化铁	63.32	-	-	-	-	-	-	36.18	0.50

实验钢成分设计参照了典型硫系易切削钢 Y35Mn,钢液化学成分检测分析结果如表 2 所示, [Mg]在 0.000 5% ~ 0.001 9% 内成倍增大, [Si]和 [S]分别在 0.2% 和 0.18% 左右。

2.2 钢中夹杂物

(1) 夹杂物成分。为了直观显示夹杂物成分分布,将夹杂物能谱分析结果转变为相应的氧化物质量分数,并将其标记在 MgO-SiO₂-MnO 三元相图,其结果如图 3 所示。图中虚线代表 1 600 ℃ 等温线,实线表示相界线,空心 and 实心圆圈分别表示加硫前、后

表 2 试验钢液的化学成分 / %

Table 2 Chemical compositions of test liquied steels / %

实验编号	C	Mn	Si	S	P	O	Mg
A	0.34	1.19	0.203	0.191	0.015	0.003 5	0.000 5
B	0.36	1.31	0.194	0.183	0.018	0.001 9	0.001 1
C	0.35	1.22	0.187	0.181	0.017	0.001 0	0.001 9

夹杂物成分检测值,五角星代表夹杂物成分平均含量。

A 组实验进行了低强度镁处理 (0.000 5% Mg), 硫合金化对夹杂物成分影响如图 3 (a) 所示。由结果可知, 硫合金化前夹杂物成分全落在 MgO-SiO₂-MnO 液相区, 硫合金化后夹杂物成分依然全部落在液相区, 但硫的加入导致夹杂物中 MgO 平均质量分数由 11.3% 降低到 5.3%, 成分分布更趋向 SiO₂-MnO 边界。

B 组实验进行了中等强度镁处理 (0.001 1% Mg), 硫合金化前后夹杂物成分变化如图 3 (b) 所示, 加硫前夹杂物成分全部落在 2MgO · SiO₂ 固相区, 但加硫后部分夹杂物成分落在 MgO-SiO₂-MnO 液相区, MgO 平均含量由 56.4% 降低至 29.8%。

C 组实验进行了高强度镁处理 (0.001 9% Mg), 镁处理后钢中夹杂物成分全部落在固相 MgO 所在角部区域, 硫合金化后夹杂物成分变化如图 3 (c) 所示。随着硫的加入, SiO₂ 平均含量提高到 26.2% 而 MgO 平均含量降低至 71.4%, 夹杂物成分沿 MgO-SiO₂ 边界线离散分布。

总之, 镁处理后进行硫合金化会导致夹杂物成

分中 MgO 含量降低, 在硅脱氧钢中有固相 MgO 夹杂物向固相 2MgO · SiO₂ 夹杂物转变或固相 2MgO · SiO₂ 夹杂物向液相 MgO-SiO₂-MnO 夹杂物转变的趋势。

(2) 夹杂物类型。图 4 为在 A 组实验中发现的典型夹杂物, 钢液中 [Mg] 最低。实验结果显示, 加硫前典型夹杂物为球形均相夹杂物 MgO-SiO₂-MnO 系, 加硫后夹杂物依然保持为球形, 但能谱分析结果显示 MgO-SiO₂-MnO 系夹杂物中含有少量的硫, 面扫描分析结果显示 S 元素在夹杂物边缘富集。

图 5 为 B 组实验钢中检测到的典型夹杂物。加硫前钢液中夹杂物为均相球形夹杂物 2MgO · SiO₂, 粒径约 2 μm, 如图 5 (a) 所示。加硫后夹杂物转变为复相夹杂物, 能谱和面扫描分析结果显示内部黑色相 2MgO · SiO₂ 被灰色相 MgO-SiO₂-MnO 包裹, 在夹杂物边缘还存在一圈 MnS 富集层, 如图 5 (b) 所示。

图 6 为在 C 组实验中观察到的典型夹杂物, 钢液中 [Mg] 最高。加硫前钢液中存在的典型夹杂物如图 6 (a) 所示, 典型夹杂物为方形 MgO 系夹杂物, 粒径在 1 μm 以下。硫的加入导致夹杂物形貌转变

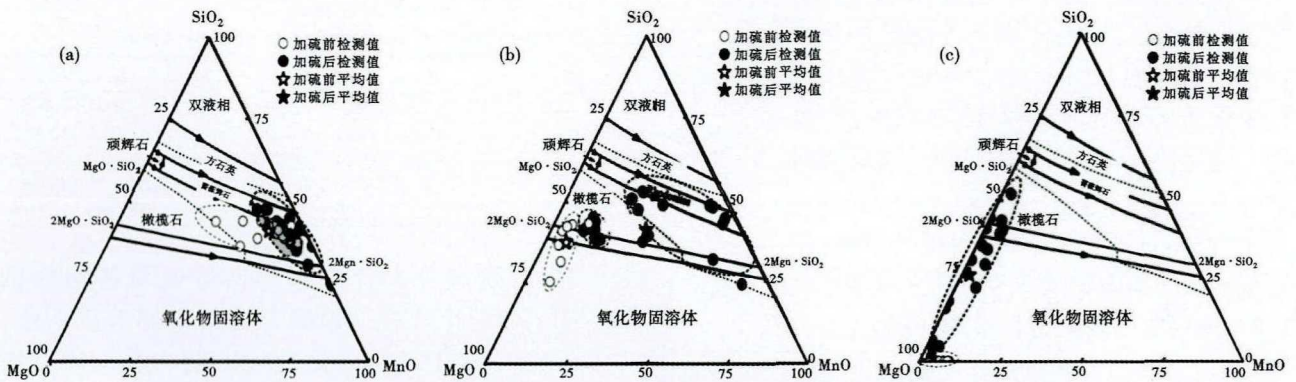


图 3 硫合金化对钢中夹杂物成分的影响: (a) A 组, (b) B 组, (c) C 组
Fig. 3 Effect of sulfur addition on composition of inclusions in steels: group (a) A, (b) B, (c) C

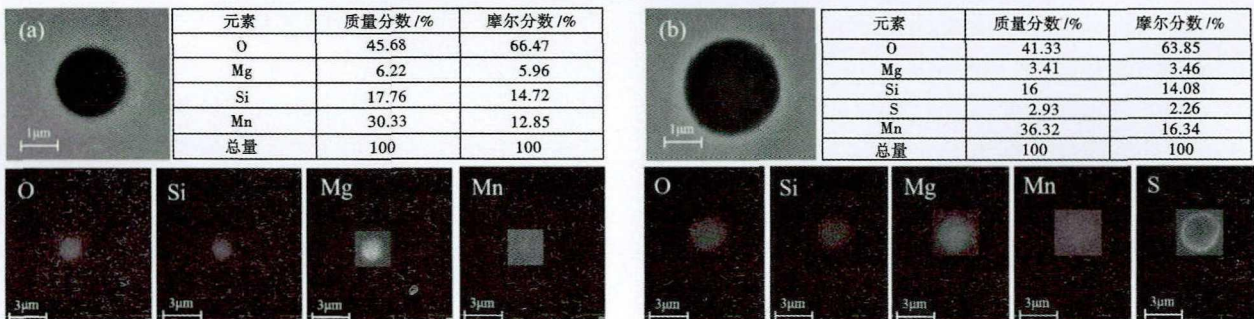


图 4 A 组实验中典型夹杂物的类型: (a) 硫合金化前, (b) 硫合金化后
Fig. 4 Typical inclusion type detected during group A experiment: (a) before sulfur addition and (b) after sulfur addition

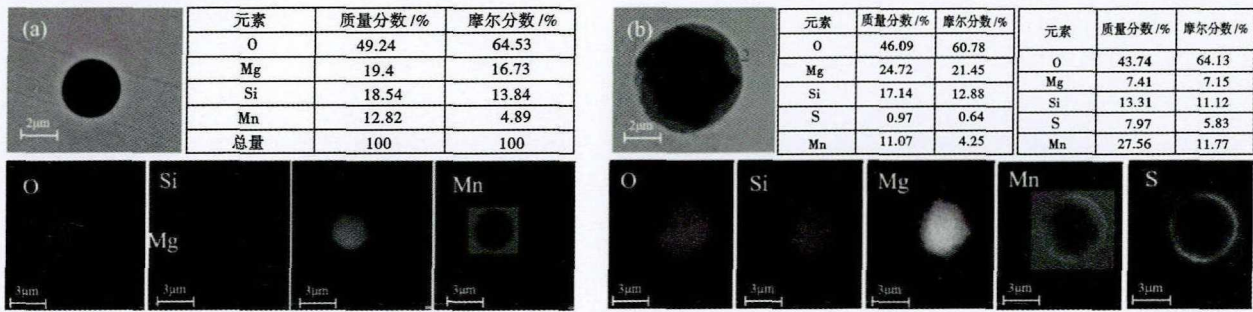


图 5 B 组实验中典型夹杂物的类型:(a)硫合金化前,(b)硫合金化后

Fig. 5 Typical inclusion type detected during group B experiment: (a) before sulfur addition and (b) after sulfur addition

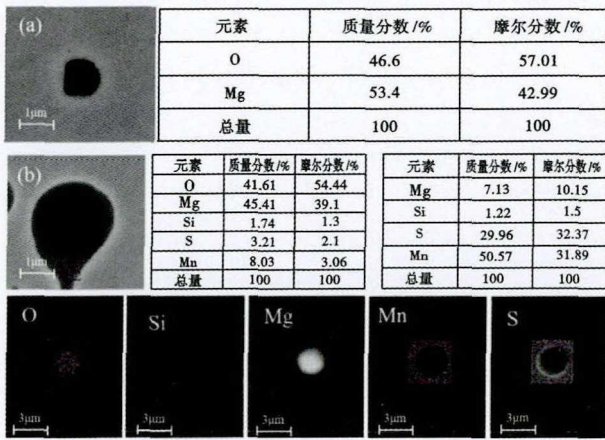


图 6 C 组实验中典型夹杂物的类型:(a)硫合金化前,(b)硫合金化后

Fig. 6 Typical inclusion type detected during group C experiment: (a) before sulfur addition and (b) after sulfur addition

为球形,粒径在1~2 μm。能谱分析结果显示夹杂物边缘成分发生改变,尤其 Si 含量升高。进一步面扫描分析结果显示, Si 元素主要分布在 MgO 核心四周,而夹杂物最外层为 (Mg, Mn)S 富集层。

综合以上的实验结果可知,硫的加入导致高镁钢液体系中析出 (Mg, Mn)S 系硫化物夹杂,促使高镁钢液体系中 MgO 系夹杂物向 2MgO · SiO₂ 系夹杂物转变、中镁钢液体系中 2MgO · SiO₂ 向 MgO-SiO₂-MnO 系液相夹杂物变质、低镁处理钢液体系中 MgO-SiO₂-MnO 系夹杂物中 MgO 含量降低。

2.3 硫合金化后夹杂物演变机制

为了研究加硫后夹杂物的演变机制,本文采用 FactSage 7.1 热力学软件中的 Equilib 模块计算了含镁钢液体系在 1600 °C 下的平衡产物,选用数据库为 FactPS、FToxid 和 FTmisc,热力学计算结果如图 7 所示。

图 7(a)所示为 [Mg]-[O] 平衡关系及平衡产物计算结果,图中虚线表示平衡产物析出量。由计算结果可知,随着钢液中 [Mg] 增加,平衡 [O] 不断降低,平衡产物由 MgO-SiO₂-MnO_(l) 依次向 2MgO · SiO_{2(s)} 和 MgO_(s) 转变。当钢液中 [Mg] 在 0.000 15% 以下时,平衡产物为 MgO-SiO₂-MnO_(l),平衡 [O] 在 0.008 0% ~ 0.006 0%; 当钢液中 [Mg] 在 0.000 15% ~ 0.000 78% 时,平衡产物为 2MgO ·

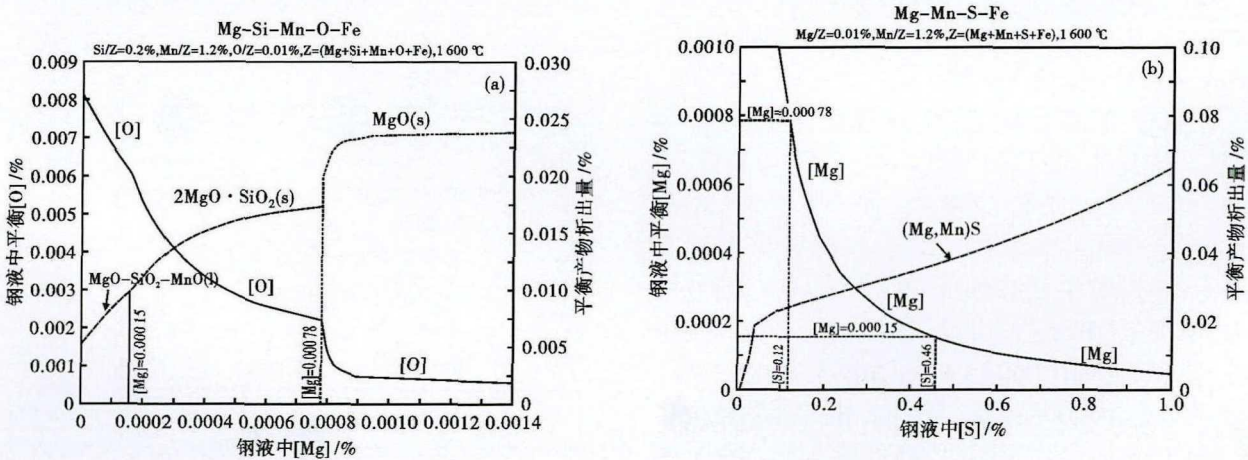


图 7 1600 °C 钢液中 [Mg]-[O] 及 [Mg]-[S] 平衡关系:(a) [Mg]-[O],(b) [Mg]-[S]

Fig. 7 Equilibrium of [Mg]-[O] and [Mg]-[S] in liquid at 1600 °C: (a) [Mg]-[O], (b) [Mg]-[S]

SiO_{2(s)}, 平衡 [O] 在 0.006 0% ~ 0.002 2%; 当钢液中 [Mg] 高于 0.000 78% 时, 平衡产物为 MgO_(s), 平衡 [O] 在 0.002 2% 以下。

图 7(b) 为 1 600 °C 下钢液中 [Mg]-[S] 平衡关系及平衡产物计算结果, 图中实线表示 [Mg]-[S] 平衡关系, 虚线表示平衡产物 (Mg, Mn)S 析出量。由计算结果可知, 随着钢液中 [S] 增加, 与之平衡 [Mg] 逐渐降低。当钢液中 [S] 低于 0.12% 时, 平衡 [Mg] 在 0.000 78% 以上; 当钢液中 [S] 在 0.12% ~ 0.46% 时, 平衡 [Mg] 在 0.000 78% ~ 0.000 15%; 当钢液中 [S] 高于 0.46% 时, 平衡 [Mg] 降低至 0.000 15% 以下。

硫合金化对 [Mg] 及平衡产物的影响如表 3 所

示。[Mg]₁ 和平衡产物 1 分别表示硫合金化前钢液中平衡 [Mg] 和平衡产物, [Mg]₂ 和平衡产物 2 分别表示硫合金化后钢液中平衡 [Mg] 和平衡产物。硫合金化后夹杂物的演变过程取决于镁处理强度及硫的加入量。

在低镁处理条件下, 钢液中 [Mg] < 0.000 15%, 镁处理后平衡产物为 MgO-SiO₂-MnO_(l)。硫合金化后, 当钢液中 [S] < 0.46% 时, 钢液中 [Mg] 由 [Mg]-[O] 平衡决定, 平衡产物依然为 MgO-SiO₂-MnO_(l); 当钢液中 S > 0.46% 时, 钢液中 [Mg] 由 [Mg]-[O] 和 [Mg]-[S] 平衡共同决定, 平衡产物为 MgO-SiO₂-MnO_(l) + (Mg, Mn)S。

在中镁处理条件下, 钢液中 0.000 15% < [Mg]

表 3 硫合金化对 1 600 °C 钢中 [Mg] 及平衡产物的影响
Table 3 Effect of sulfur alloying on [Mg] and equilibrium products in steel at 1 600 °C

[Mg] ₁	平衡产物 1	[S]	[Mg] ₂	平衡产物 2
< 0.000 15%	MgO-SiO ₂ -MnO _(l)	< 0.46%	< 0.000 15%	MgO-SiO ₂ -MnO _(l)
		> 0.46%	< 0.000 15%	MgO-SiO ₂ -MnO _(l) + (Mg, Mn)S
		< 0.12%	0.000 15% ~ 0.000 78%	2MgO · SiO ₂ (s)
0.000 15% ~ 0.000 78%	2MgO · SiO ₂ (s)	0.12% ~ 0.46%	0.000 15% ~ 0.000 78%	2MgO · SiO ₂ (s) + (Mg, Mn)S
		> 0.46%	< 0.000 15%	MgO-SiO ₂ -MnO _(l) + (Mg, Mn)S
		< 0.12%	> 0.000 78%	MgO (s)
> 0.000 78%	MgO (s)	0.12% ~ 0.46%	0.000 15% ~ 0.000 78%	2MgO · SiO ₂ (s) + (Mg, Mn)S
		> 0.46%	< 0.000 15%	MgO-SiO ₂ -MnO _(l) + (Mg, Mn)S

< 0.000 78%, 镁处理后平衡产物为 2MgO · SiO_{2(s)}。硫合金化后, 当钢液中 [S] < 0.12% 时, 钢液中 [Mg] 由 [Mg]-[O] 平衡决定, 平衡产物不变; 当钢液中 0.12% < [S] < 0.46%, 钢液中 [Mg] 由 [Mg]-[O] 和 [Mg]-[S] 平衡共同决定, 钢液中 0.000 15% < [Mg] < 0.000 78%, 平衡产物为 2MgO · SiO_{2(s)} + (Mg, Mn)S; 当钢液中 [S] > 0.46%, 钢液中 [Mg] 由 [Mg]-S 平衡决定, 由于 (Mg, Mn)S 的生成导致 [Mg] < 0.000 15%, 平衡产物为 MgO-SiO₂-MnO_(l) + (Mg, Mn)S。

在高镁处理条件下, 镁处理后平衡产物为 MgO_(s), 钢液中 [Mg] > 0.000 78%。硫合金化后, 当钢液中 [S] < 0.12%, 钢液中 [Mg] 决定于 [Mg]-[O] 平衡, [Mg] > 0.000 78%, 平衡产物保持为 MgO_(s); 当钢液中 0.12% < [S] < 0.46%, 钢液中 [Mg] 取决于 [Mg]-[S] 平衡, 硫的加入导致钢液中 [Mg] 降低, 此时 0.000 15% < [Mg] < 0.000 78%, 平衡产物为 2MgO · SiO_{2(s)} + (Mg, Mn)S; 当钢液中 [S] > 0.46%, 钢液中 [Mg] 进一步降低至 0.000 15% 以下, 平衡产物为 MgO-SiO₂-MnO_(l) + (Mg, Mn)S。

根据实验和热力学计算结果可得硫合金化对镁系夹杂物的作用机理如图 8 所示。由于镁既是强氧化物形成元素又是强硫化物形成元素, 因此硫合金化后钢液中 [S]、[O] 与 [Mg] 竞争反应。当钢液中加入足量的硫, 则 [Mg]-[S] 平衡取代 [Mg]-[O] 平衡成为钢液中 [Mg] 的决定因素。随着 (Mg, Mn)S 夹杂的生成, 钢液中 [Mg] 降低, 钢液-夹杂物间则要建立新的平衡。在新平衡形成过程中, 夹杂物与钢

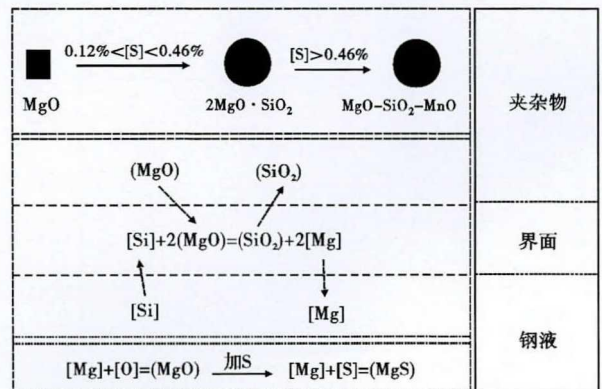


图 8 硫合金化对钢中夹杂物的作用机理图
Fig. 8 Evolution mechanism drawing of effect of sulfur alloying on inclusions in steel

液间发生反应 $\text{Si} + 2(\text{MgO}) = (\text{SiO}_2) + 2\text{Mg}$, 这导致夹杂物中 MgO 含量降低而 SiO_2 含量升高。反之, 如果硫的加入量不足, 则钢液中 $[\text{Mg}]$ 仍取决于 $[\text{Mg}]-[\text{O}]$ 平衡, 硫合金化对夹杂物的作用则可忽略。

3 结论

(1) 硫系易切削钢镁处理后进行硫合金化, 硫的加入会导致 $[\text{Mg}]-[\text{S}]$ 平衡取代 $[\text{Mg}]-[\text{O}]$ 平衡而导致钢液中 $[\text{Mg}]$ 含量变化, 进而促使高镁钢液体系中 MgO 系夹杂物向 $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ 系夹杂物转变、

中镁钢液体系中 $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ 向 $\text{MgO}-\text{SiO}_2-\text{MnO}$ 系液相夹杂物变质、低镁处理钢液体系中 $\text{MgO}-\text{SiO}_2-\text{MnO}$ 系夹杂物中 MgO 含量降低。

(2) 热力学计算结果显示, 当钢液中 $[\text{S}]$ 低于 0.12% 时, 平衡 $[\text{Mg}]$ 在 0.000 78% 以上, 平衡产物为 $\text{MgO}_{(s)}$; 当钢液中 $[\text{S}]$ 在 0.12% ~ 0.46% 时, 钢液中平衡 $[\text{Mg}]$ 在 0.000 15% ~ 0.000 78%, 平衡产物为 $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_{2(s)}$; 当钢液中 $[\text{S}]$ 在 0.46% 以上, 钢液中平衡 $[\text{Mg}]$ 低于 0.000 15%, 平衡产物为 $\text{MgO}-\text{SiO}_2-\text{MnO}_{(l)}$ 。

参考文献

- [1] Laizhu J, Kun C and Hänninen H. Effects of the Composition, Shape Factor and Area Fraction of Sulfide Inclusions on the Machinability of Re-Sulfurized Free-Machining Steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 58(2-3):160-165.
- [2] Gove K B and Charles J A. Further Aspects of Inclusion Deformation [J]. *Metals Technology*, 1974, 1(1):425-431.
- [3] Luo C and Ståhlberg U. An Alternative Way for Evaluating the Deformation of MnS Inclusions in Hot Rolling of Steel[J]. *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 2002, 31(3):184-190.
- [4] Lou D, Cui K and Jia Y. Study on the Machinability of Resulfurized Composite Free-Cutting Steels[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1997, 6(2):215-218.
- [5] Luiz N E and Machado Á R. Development Trends and Review of Free-Machining Steels[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2008, 222(2):347-360.
- [6] Sakata K and Suito H. Dispersion of Fine Primary Inclusions of MgO and ZrO_2 in Fe-10mass Pct Ni Alloy and the Solidification Structure [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1999, 30(6):1053-1063.
- [7] Ohta H and Suito H. Characteristics of Particles Size Distribution of Deoxidation Products with Mg, Zr, Al, Ca, Si/Mn and Mg/Al in Fe-10mass% Ni Alloy [J]. *ISIJ International*, 2006, 46(1):14-21.
- [8] Ohta H and Suito H. Dispersion Behavior of MgO , ZrO_2 , Al_2O_3 , $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ and $\text{MnO}-\text{SiO}_2$ Deoxidation Particles during Solidification of Fe-10mass% Ni Alloy [J]. *ISIJ International*, 2006, 46(1):22-28.
- [9] Karasev A V and Suito H. Characteristics of Fine Oxides Particles Produced by Ti/M (M = Mg and Zr) Complex Deoxidation in Fe-10mass% Ni Alloy [J]. *ISIJ International*, 2008, 48(11):1507-1516.
- [10] Kimura S, Nakajima K and Mizoguchi S. Behavior of Alumina-Magnesia Complex Inclusions and Magnesia Inclusions on the Surface of Molten Low-Carbon Steels[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2001, 32(1):79-85.
- [11] Kim H S, Lee H G and Kyung-Shik O H. Precipitation Behavior of MnS on Oxide Inclusions in Si/Mn Deoxidized Steel [J]. *Metals and Materials*, 2000, 6(4):305-310.
- [12] Ueshima Y, Yuysms H and Mizoguchi S, et al. Effect of Oxide Inclusions on MnS Precipitation in Low Carbon Steel [J]. *Tetsu-to-Hagané*, 1989, 75(3):501-508.
- [13] Wakoh M, Sawai T and Mizoguchi S. Effect of S content on the MnS Precipitation in Steel with Oxide Nuclei [J]. *ISIJ International*, 1996, 36(8):1014-1021.
- [14] Ohta H and Suito H. Precipitation and Dispersion Control of MnS by Deoxidation Products of ZrO_2 , Al_2O_3 , MgO and $\text{MnO}-\text{SiO}_2$ Particles in Fe-10mass% Ni Alloy [J]. *ISIJ international*, 2006, 46(4):480-489.
- [15] Watson J D. *Microscopy and the Development of Free-Machining Steels [M]*//Applied Metallography. Springer, Boston, MA, 1986:211-236.
- [16] Yaguchi H. Manganese Sulfide Precipitation in Low-Carbon Resulfurized Free-Machining Steel [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1986, 17(11):2080-2083.

白云(1975-),男,硕士(2004年北京科技大学),研究院院长,1995年华东冶金学院(本科)毕业,特殊钢产品研发、工艺、检测、应用技术等研究。E-mail: baiyun@citicsteel.com

收稿日期:2021-01-10