



La 处理对 H13 热作模具钢中夹杂物的影响

任吉¹, 燕云², 田家龙¹, 王礼超¹, 蒋成钢¹, 王琳², 姜周华¹

(1 东北大学冶金学院, 沈阳 110819; 2 抚顺特殊钢股份有限公司技术中心, 抚顺 113001)

摘要: 采用真空感应炉熔炼 H13 模具钢, 在氩气保护下加入稀土镧处理钢液并浇铸成钢锭, 研究了 La 处理对 H13 钢中夹杂物转变的影响。结果表明, La 对 H13 钢中夹杂物具有很好的改性效果, 随 La 含量的提高, 夹杂物的数量呈上升趋势, 夹杂物的平均尺寸先减小后增大。不添加稀土时, H13 钢中夹杂物主要为 Al_2O_3 和 MnS; 当 H13 钢中 $w[La]$ 为 0.016% 时, 钢中夹杂物以 La_2O_2S 为主; 当 $w[La]$ 为 0.045% 和 0.073% 时, 钢中夹杂物主要为 LaP 和 La_2O_2S 。热力学计算表明, 在 1600 °C 下钢液中, La 处理后夹杂物的转变过程为 $Al_2O_3 \rightarrow LaAlO_3 \rightarrow La_2O_2S$ 。在凝固过程中, 钢液中首先析出 La_2S_3 , 当温度继续降低, LaP 开始在 La_2S_3 和 La_2O_2S 表面析出, 最终形成复合夹杂物 La_2O_2S-LaP 和 La_2S_3-LaP 。

关键词: H13 热作模具钢; La 处理; 夹杂物; 热力学计算

DOI: 10.20057/j.1003-8620.2024-00092 **中图分类号:** TG142

Effect of La Treatment on Inclusions in H13 Hot Work Die Steel

Ren Ji¹, Yan Yun², Tian Jialong¹, Wang Lichao¹, Jiang Chenggang¹, Wang Lin², Jiang Zhouhua¹

(1 School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2 Technical Center of Fushun Special Steel Co., Ltd, Fushun 113001, China)

Abstract: The effect of La treatment on the transformation of inclusions in H13 steel was investigated by subjecting H13 die steel to vacuum induction melting and subsequently treating the molten steel with La under an argon atmosphere protection. The results demonstrate that La has a beneficial effect on inclusions in H13 steel, the number of inclusions increases with the increase of La content, while the average size of inclusions initially decreases and then increases. The inclusions in H13 steel without the rare earth La additions are primarily Al_2O_3 and MnS. However, with a La content of 0.016% in H13 steel, the dominant inclusions shift to La_2O_2S . When the La content in H13 steel is 0.016%, the inclusions in the steel are mainly La_2O_2S ; Furthermore, when the La content reaches 0.045% and 0.073%, the predominant inclusions in steel become LaP and La_2O_2S . Thermodynamic calculations show that the transformation process of La-treated inclusions is $Al_2O_3 \rightarrow LaAlO_3 \rightarrow La_2O_2S$ in molten steel at 1600 °C. During the solidification process, La_2S_3 is initially precipitated in the molten steel. As the temperature continues to decline, LaP begins to precipitate on the surface of La_2S_3 and La_2O_2S , ultimately forming the composite inclusions La_2O_2S-LaP and La_2S_3-LaP .

Key Words: H13 Hot Work Die Steel; La Treatment; Inclusions; Thermodynamic Calculation

H13 钢具有优异的强韧性、耐磨性、抗热疲劳性、热稳定性和淬透性, 用于制造热挤压模具、压铸模具和热锻模等, 是目前应用最广泛的一种热作模具钢^[1-3]。H13 钢在服役过程中承受磨损、热疲劳和冲蚀等影响, 热疲劳失效是 H13 钢主要的失效形式。钢中夹杂物与基体的线性膨胀系数不同, H13 热作模具钢在服役过程中循环的加热和冷却导致夹杂物与基体之间存在较大的热应力集中。同时脆性夹杂物在热加工不发生塑性变形造成强烈应力集中。在两种应力的共同作用下, 夹杂物周围产生微裂纹, 随着

应力的继续累积, 微裂纹合并长大形成裂纹, 最终导致模具的失效^[4-6]。钢中的大尺寸不规则非金属夹杂物是引起疲劳失效的主要原因, 因此, 改善 H13 钢中夹杂物的种类、数量和尺寸分布有利于提高 H13 钢的各项性能和使用寿命。

稀土(RE)具有改性夹杂物和改善凝固组织的作用, 已被广泛应用于改善钢的性能。不添加稀土时, 钢中夹杂物主要是 MnS 和不规则的 Al-Si-Ca-O 夹杂物。添加稀土后, 主要夹杂物转变为稀土硫化物 (Ce_3S_4 、CeS、YS、 Y_2S_3 、LaS) 和稀土氧硫化物 (Ce_2O_2S 、

基金项目: 辽宁省科学技术计划项目“揭榜挂帅”(科技攻关专项)(2023 JH1/10400051)

作者简介: 任吉(1996—), 男, 博士; **E-mail:** renji202310@163.com; **收稿日期:** 2024-04-15

通信作者: 姜周华(1963—), 男, 博士, 教授; **E-mail:** jiangzh@smm.neu.edu.cn

Y_2O_3 、 La_2O_3)^[7-12]。Ce-S可作为 γ -奥氏体的成核核心,作为成核核心的Ce-S最有效的尺寸是1~2 μm ,其次是2~3 μm ,尺寸>3 μm 的Ce-S作用最小^[13]。稀土夹杂物通过促进奥氏体形核从而减小二次枝晶间距和抑制一次碳化物长大^[14]。当RE含量增加时,主要合金元素的偏析首先减弱后加剧,富含V的M(C,N)碳化物数量减少^[15-16]。钢中添加适量的RE对细化夹杂物有显著效果,可以提高冲击韧性和断裂韧性。然而,过量添加RE使大尺寸夹杂物的体积分数迅速增加,从而严重降低冲击功、拉伸强度和伸长率^[17-20]。

综合众多学者研究发现,稀土Ce和混合稀土有净化钢液和改性夹杂物的作用,有利于钢的力学性能和疲劳性能。但是,单独La处理以及La含量对H13夹杂物的影响目前研究较少。因此,研究通过冶炼不同La含量的H13钢,观察和统计了夹杂物的种类、形貌、数量和尺寸分布等特征,并利用Fact-sage 8.2软件进行热力学计算,分析不同La含量对夹杂物的影响及其机理,为稀土处理H13钢提供一些依据。

1 实验材料及方法

采用真空感应炉冶炼不同稀土La含量的H13热作模具钢。原料为成分合格的H13棒材和高纯稀土La。原料H13钢熔化后充入氩气保护,通过料仓加入稀土La,等待5 min后浇铸成钢锭。使用Leco TC500氮氧分析仪测定钢中氮、氧的含量,利用碳硫分析仪检测钢中的碳、硫的含量,利用电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-AES)检测La含量,借助直读光谱仪测定其它元素的含量,实验钢的化学成分见表1。

从距离铸锭底部150 mm的截面1/2半径处进行取样,通过线切割获得铸态钢样品。研磨抛光后,采用扫描电子显微镜(SEM)和能谱(EDS)分析夹杂物的种类和形貌。采用金相显微镜(OM)和Image Pro Plus 6.0软件对夹杂物的数量和尺寸进行统计。采用Factsage 8.2热力学软件Equilib模块对稀土La改性

夹杂物的机理进行理论计算。

2 实验结果

2.1 夹杂物的形貌和种类

未加稀土La的H13钢(S1钢)中典型夹杂物有 Al_2O_3 和MnS两类,如图1所示。稀土La对H13钢中夹杂物有很好的改性效果,钢中夹杂物全部转变为含La夹杂物。S2钢添加0.016%La,钢中夹杂物主要为 La_2O_3 还有少量LaS,夹杂物形状规则且尺寸较小,如图2所示。S3钢(0.045%La)和S4钢(0.073%La)中夹杂物全部为含La和P的复合夹杂物,如图3所示。分析图3(a)中的元素分布可以发现,S和O分布在夹杂物中心,P分布在夹杂物外层。说明LaP能以 La_2O_3 为核心生成复合夹杂物 La_2O_3 -LaP。由图3(b)中可以看出,S只在夹杂物中心少量分布,说明LaP能以LaS为核心形成复合夹杂物LaS-LaP。

2.2 夹杂物的数量和尺寸

对不同La含量的实验钢夹杂物数量和尺寸进行统计,结果如图4所示。随着La含量增加,夹杂物数量密度显著增加,夹杂物的平均直径先减小后增大,如图4(a)所示。添加0.016%La夹杂物数量密度由43.6个/ mm^2 增加到110.2个/ mm^2 ,主要增加的是0~3 μm 的夹杂物,夹杂物平均直径由2.7 μm 减小到2.0 μm ;当 $w[\text{La}]$ 增加到0.045%,夹杂物数量密度为116.7个/ mm^2 ,但是3~5 μm 的夹杂物大量增加,平均直径增加到2.4 μm ;当 $w[\text{La}]$ 增加到0.073%时,夹杂物数量密度达到243.9个/ mm^2 ,平均直径大于3 μm 的夹杂物数量密度大幅增加,平均直径大于不添加La时的平均直径,增加到2.9 μm 。

根据统计结果可知,添加适量的稀土La可以减小夹杂物平均直径,过量的稀土La(0.073%)反而大幅增加大于3 μm 夹杂物,导致夹杂物平均直径增大。这是因为钢液中添加少量La时生成 La_2O_3 夹杂,形貌多为规则的球形且尺寸较小,减小了夹杂物平均尺寸。当稀土过量时,钢液中形成过量的细小弥散的 La_2O_3 夹杂物,稀土有较高表

表1 H13热作模具钢的主要化学成分(质量分数)

Table 1 The main chemical composition of H13 hot work die steel

| 编号 | C | Si | Mn | Cr | Mo | V | Al | P | S | O | La |
|----|------|------|-------|------|------|-------|---------|---------|---------|----------|-------|
| S1 | 0.38 | 1.08 | 0.398 | 5.13 | 1.29 | 0.887 | 0.018 2 | 0.017 8 | 0.003 0 | 0.002 20 | - |
| S2 | 0.37 | 1.08 | 0.398 | 5.13 | 1.30 | 0.890 | 0.018 3 | 0.017 6 | 0.000 8 | 0.000 59 | 0.016 |
| S3 | 0.38 | 1.08 | 0.395 | 5.13 | 1.31 | 0.887 | 0.018 5 | 0.017 8 | 0.000 9 | 0.000 39 | 0.045 |
| S4 | 0.37 | 1.07 | 0.396 | 5.13 | 1.30 | 0.889 | 0.018 3 | 0.017 3 | 0.000 8 | 0.000 65 | 0.073 |

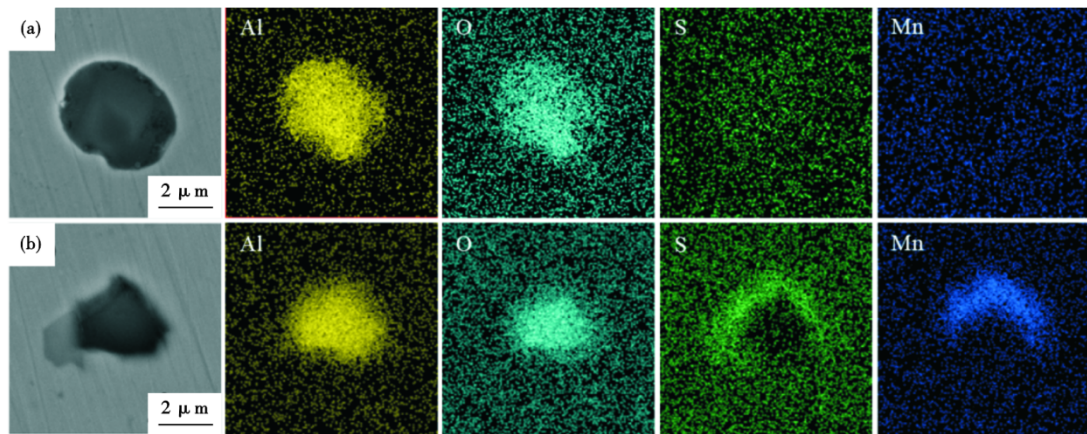


图 1 S1 实验钢中典型夹杂物: (a) Al_2O_3 , (b) Al_2O_3 -MnS

Fig. 1 SEM images and EDS results of typical inclusions in S1 experimental steels: (a) Al_2O_3 , (b) Al_2O_3 -MnS

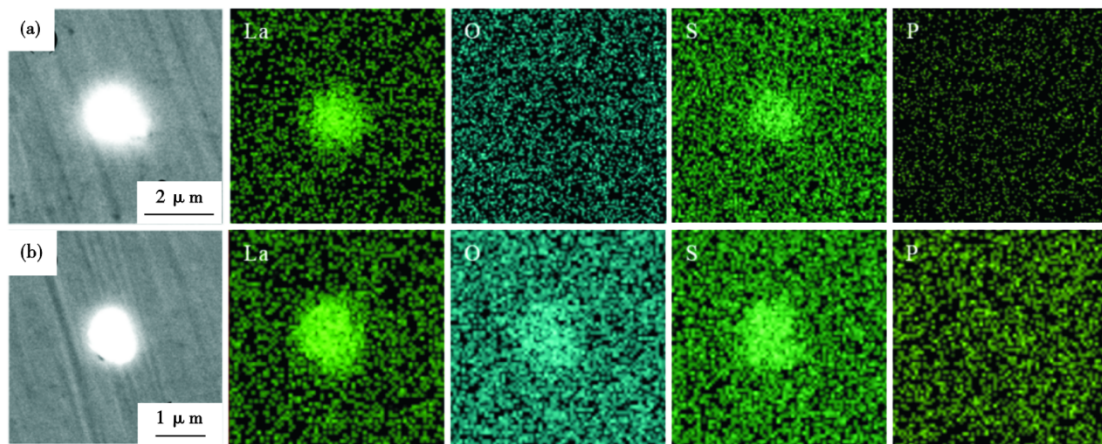


图 2 S2 实验钢中典型夹杂物: (a) LaS, (b) La_2O_2S

Fig. 2 SEM images and EDS results of typical inclusions in S2 experimental steels: (a) LaS, (b) La_2O_2S

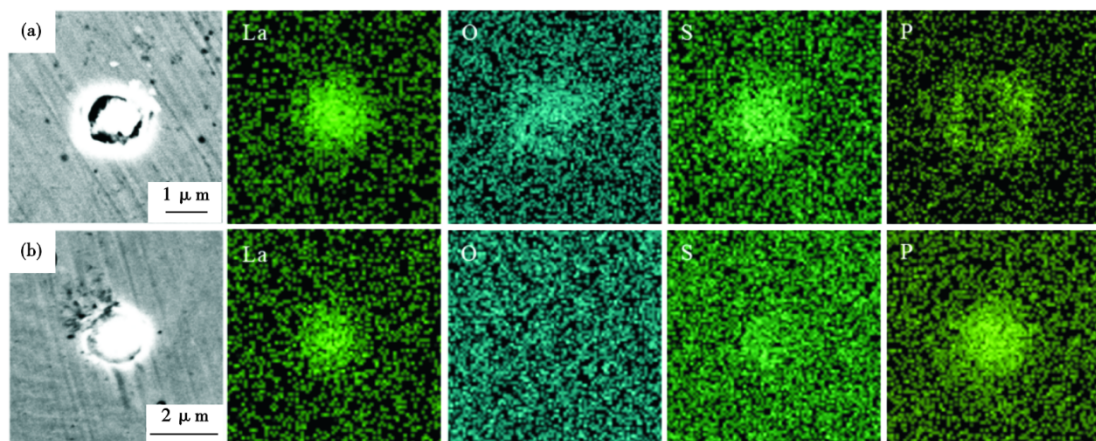


图 3 S3 和 S4 实验钢中典型夹杂物: (a) La_2O_2S -LaP, (b) LaS-LaP

Fig. 3 SEM images and EDS results of typical inclusions in S3-S4 experimental steels: (a) La_2O_2S -LaP, (b) LaS-LaP

面活性导致稀土夹杂物容易在液相和凝固过程中相结合, 导致成大尺寸的稀土夹杂物数量增加^[21]。

3 讨论

3.1 1 600 °C 时夹杂物生成的热力学分析

表 2 显示了实验钢在 1 600 °C 时各元素的活度相

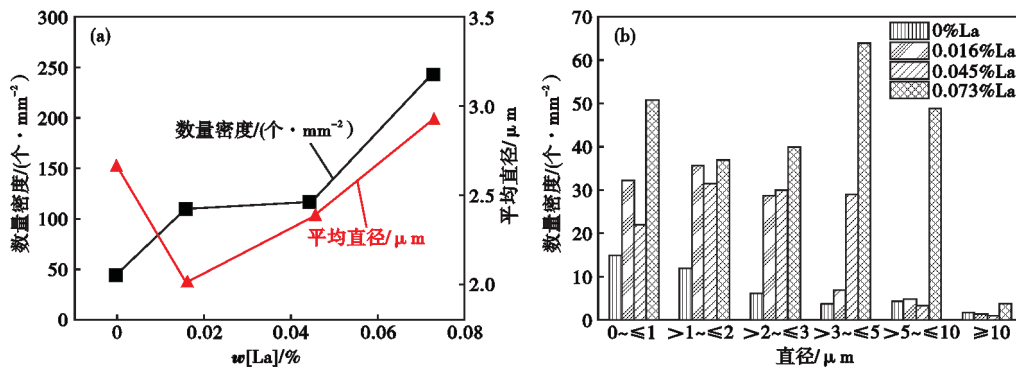


图4 实验钢中夹杂物统计结果: (a) 数量密度和平均直径, (b) 不同直径区间的数量密度

Fig. 4 Statistical results of inclusions in experimental steel: (a) number density and average diameter, (b) diameter distribution

表2 1600 °C时钢液中元素*i*和*j*的相互作用系数

Table 2 Interaction coefficients of elements *i* and *j* in molten steel at 1600 °C

| 元素 | C | Si | Mn | Cr | Mo | V | La | S | Al | O | P | N |
|----|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| La | -0.024 | - | 0.280 | - | - | - | -0.008 | -4.800 | -2.649 | -5.000 | 1.734 | -6.549 |
| O | -0.450 | -0.1310 | -0.021 | -0.040 | 0.0035 | -0.300 | -0.570 | -0.133 | -3.900 | -0.200 | 0.070 | 0.057 |
| S | 0.110 | 0.0630 | -0.026 | -0.011 | 0.0027 | -0.016 | -1.910 | -0.028 | 0.035 | -0.270 | 0.029 | 0.010 |

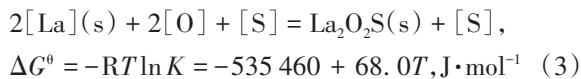
相互作用系数(e_i^j)^[17, 22]。根据公式(1)中计算[La]、[O]和[S]的活度系数,然后根据公式(2)计算组元活度。

$$\lg f_i = \sum_j e_i^j w_j \quad (1)$$

$$a_i = f_i \cdot w_i \quad (2)$$

式中, f_i 表示组元*i*的活度系数, n 表示体系中所有组元, j 表示某个组元, w_i 和 w_j 分别表示元素*i*和*j*的质量百分比, a_i 表示组元*i*的活度。

表3列出了1600 °C下钢中夹杂物反应的标准吉布斯自由能^[17, 22]。LaS和La₂O₂S之间的反应可以写成式(3),通过反应过程的平衡关系可以得到式(4),经过化简得到式(5)。按照同样的方法,计算得到表3其他夹杂物之间的热力学转化条件,见表4。将表4的函数关系式绘制成图5,可以预测夹杂物的生成类型。图5中标注了未进行La处理时钢液的成分点,可以看到初始成分点位于La₂O₃生成区域,首先进行反应2[La] + 3[O] = La₂O₃(s),随着反应进行氧含量下降,成分点向下移动到La₂O₃和La₂O₂S交界区域。接着进行反应2La₂O₃(s)+2[La] + 3[S] = 3La₂O₂S(s)和2[La] + 2[O] + [S] = La₂O₂S(s),最终1600 °C下稳定存在的夹杂物是La₂O₂S。上述计算分析与扫描电镜观察分析结果符合。



$$\lg K = \lg \frac{a_{\text{La}_2\text{O}_2\text{S}} \cdot a_{\text{S}}}{a_{\text{La}}^2 \cdot a_{\text{O}}^2} = 60.34 \quad (4)$$

表3 [La]与[O]和[S]在1600 °C下反应的热力学数据

Table 3 The thermodynamic data of reactions of [La] with [O] and [S] at 1600 °C

| 反应化学方程式 | $\Delta G^0/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$ |
|--|---|
| 2[La] + 3[O] = La ₂ O ₃ (s) | -1511520 + 379.5T |
| 2[La] + 2[O] + [S] = La ₂ O ₂ S(s) | -1425820 + 351T |
| [La] + [S] = LaS(s) | -445180 + 141.5T |
| 2[La] + 3[S] = La ₂ S ₃ (s) | -1200900 + 425T |
| 3[La] + 4[S] = La ₃ S ₄ (s) | -1738380 + 609.60T |

表4 La夹杂物的热力学转变条件

Table 4 Thermodynamic transformation conditions of La inclusions

| 夹杂物转变 | 热力学条件 |
|--|---|
| LaS—La ₃ S ₄ | $\lg a_{[\text{S}]} = -8.30$ |
| La ₃ S ₄ —La ₂ S ₃ | $\lg a_{[\text{S}]} = -3.17$ |
| LaS—La ₂ O ₂ S | $2\lg a_{[\text{O}]} - \lg a_{[\text{S}]} = -60.34$ |
| La ₃ S ₄ —La ₂ O ₂ S | $6\lg a_{[\text{O}]} - 5\lg a_{[\text{S}]} = -164.43$ |
| La ₂ S ₃ —La ₂ O ₂ S | $\lg a_{[\text{O}]} - \lg a_{[\text{S}]} = -26.88$ |
| La ₂ O ₂ S—La ₂ O ₃ | $\lg a_{[\text{O}]} - \lg a_{[\text{S}]} = -4.78$ |

$$2 \lg a_{\text{O}} - \lg a_{\text{S}} = -60.34 \quad (5)$$

为了研究La加入钢液后对H13钢中夹杂物的改性过程,将La作为变量使用FactSage 8.2软件进行平衡计算。在1600 °C下夹杂物成分随钢液中La含量的变化如图6所示。开始向钢液中添加La时,Al₂O₃含量下降同时LaAlO₃含量增加。随着钢液中La含量增加,LaAlO₃减少直至消失,La₂O₂S含量则逐渐增加直至稳定。最终S2-S4钢1600 °C下稳定夹杂物只有

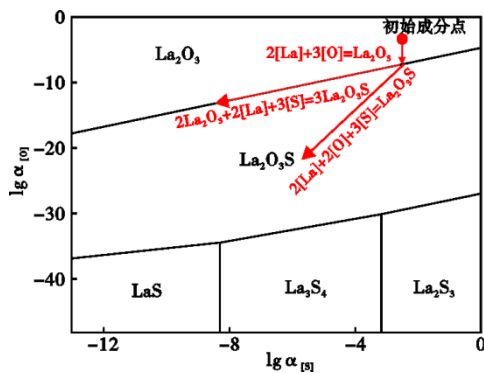


图 5 1600 °C 下实验钢中夹杂物平衡图

Fig. 5 Balance diagram of inclusions in experimental steel at 1600 °C

La₂O₂S, 钢液中添加 La 夹杂物转变过程为 Al₂O₃→LaAlO₃→La₂O₂S。La 脱氧和脱硫原理是:La 处理钢液时生成 La₂O₂S, 一部分夹杂物上浮排出钢液, 所以 La 处理后 H13 钢 S、O 的含量明显下降。

3.2 钢液凝固过程中夹杂物转变的热力学分析

稀土 La 不仅影响钢液中生成夹杂物的种类, 也影响钢液凝固过程中夹杂物的析出。为全面探究 La 处理对 H13 钢中夹杂物转变的影响机理, 使用 Fact-Sage8.2 软件计算了 S1-S4 钢冷却凝固过程中夹杂物成分的变化, 如图 7 所示。由图 7(a) 中计算结果可知, S1 钢在 1600 °C 时夹杂物为 Al₂O₃, 当温度降至

1278 °C 时, MnS 夹杂物开始析出。由图 7(b) 中计算结果可知, S2 钢 1600 °C 时夹杂物是 La₂O₂S, 在 1447 °C 时 La₂S₃ 开始析出, 温度低于 1184 °C 钢中夹杂物成分不再变化。S2 钢凝固后夹杂物主要为 La₂O₂S (0.006 1%), La₂S₃ 和 LaP 含量非常低。由图 7(c) 中计算结果可知, S3 钢 1600 °C 时夹杂物是 La₂O₂S, 在 1571 °C 时 La₂S₃ 开始析出, 在 1370 °C 时 LaP 开始析出, 温度低于 1161 °C 钢中夹杂物成分不再变化。S3 钢凝固后夹杂物为 LaP (0.014%), La₂O₂S (0.004 2%) 和 La₂S₃ (0.001 6%)。由图 7(d) 中计算结果可知, S4 钢 1600 °C 时夹杂物是 La₂O₂S, 在 1510 °C 时 LaS 开始析出, 在 1377 °C 时 LaP 开始析出, 温度低于 1151 °C 钢中夹杂物成分不再变化。S4 钢凝固后夹杂物主要为 LaP (0.019 4%) 和 La₂O₂S (0.006 9%)。可以发现 La 含量越高, LaP 夹杂物含量越高, 这也是添加过量 La 导致夹杂物尺寸增加的原因之一。夹杂物的转变过程计算结果与样品检测结果基本一致。

3.3 La 处理后 H13 钢中夹杂物的转变机理

基于对不同 La 含量 H13 钢中夹杂物的实验观察和热力学分析, 可以得出, La 处理对 H13 钢中夹杂物的改性机理, 夹杂物形成示意图, 如图 8 所示。1600 °C 时 H13 钢钢液中夹杂物主要是 Al₂O₃ 夹杂物, 钢液中 La 含量较低时, Al₂O₃ 夹杂物转变为 LaAlO₃ 夹

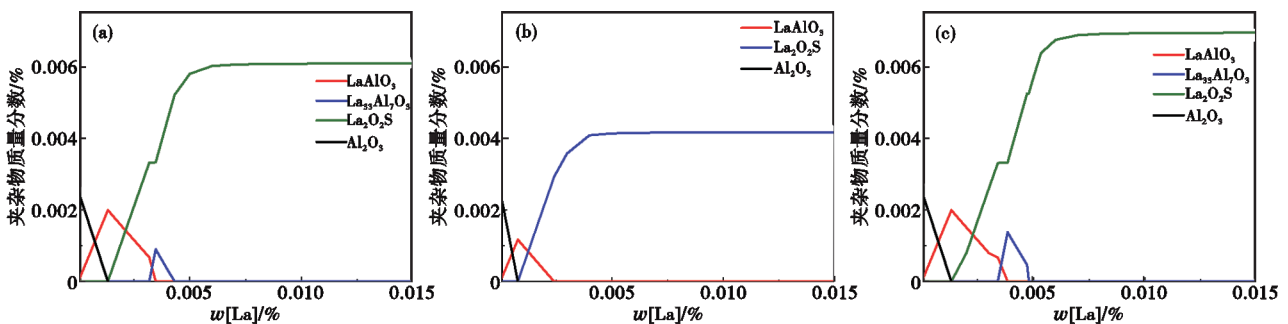


图 6 1600 °C 时 La 处理夹杂物转变: (a) S2, (b) S3, (c) S4

Fig. 6 Transformation of La treated inclusions at 1600 °C: (a) S2, (b) S3, (c) S4

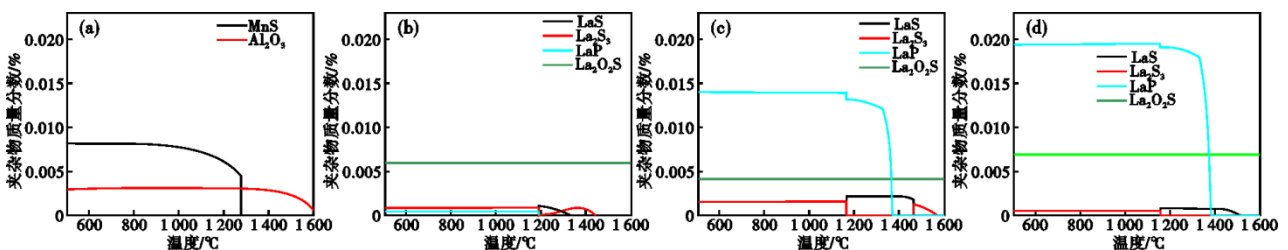


图 7 冷却凝固过程中夹杂物转变: (a) 不添加 La, S1; (b) 0.016%La, S2; (c) 0.045%La, S3; (d) 0.073%La, S4

Fig. 7 Transformation of inclusions during cooling and solidification: (a) no La added, S1; (b) 0.016%La, S2; (c) 0.045%La, S3; (d) 0.073%La, S4

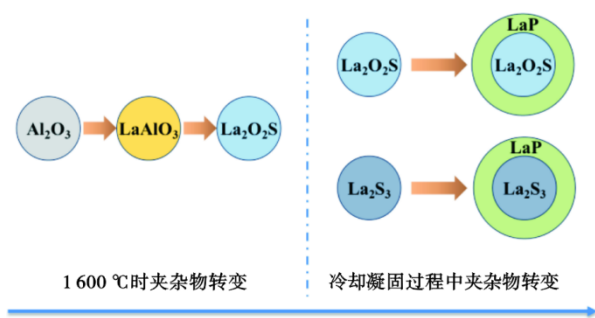


图 8 钢处理后夹杂物形成示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the formation of inclusions after La treatment

杂物,随着钢液中 La 含量增加,夹杂物全部转化为 $\text{La}_2\text{O}_2\text{S}$ 。在冷却凝固过程中, La_2S_3 析出温度比 LaP 高,钢液中首先析出 La_2S_3 。当温度继续降低至 LaP 析出温度时,LaP 开始在 La_2S_3 和 $\text{La}_2\text{O}_2\text{S}$ 表面析出,形成了如图 3 所示的复合夹杂物 $\text{La}_2\text{O}_2\text{S}$ -LaP 和 La_2S_3 -LaP。

3 结论

(1) 稀土 La 将钢中 Al_2O_3 和 MnS 夹杂改性为稀土

夹杂物 ($\text{La}_2\text{O}_2\text{S}$ 、 La_2S_3 、LaP),夹杂物的组成取决于 La 含量。当 H13 钢中 $w[\text{La}]$ 为 0.016% 时,钢中夹杂物以 $\text{La}_2\text{O}_2\text{S}$ 为主。当 $w[\text{La}]$ 为 0.045% 和 0.073% 时,钢中夹杂物主要为 LaP 和 $\text{La}_2\text{O}_2\text{S}$ 。

(2) 添加稀土 La 后, H13 钢中夹杂物数量显著增加,夹杂物平均尺寸先减小后增大。添加适量的稀土 $w[\text{La}]$ (0.016%) 可以减小夹杂物平均直径,过量的稀土 $w[\text{La}]$ (0.073%) 反而大幅增加直径 $> 3 \mu\text{m}$ 的夹杂物数量,导致夹杂物平均直径增大。稀土过量时,钢液中过量的稀土夹杂物容易在液相和凝固过程中聚集长大,最终形成大尺寸的稀土夹杂物。

(3) 1600 °C 时,添加 La 后钢液中夹杂物转变过程为 $\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{LaAlO}_3 \rightarrow \text{La}_2\text{O}_2\text{S}$ 。钢液中 La 与氧硫结合生成 $\text{La}_2\text{O}_2\text{S}$ 夹杂物并且上浮排出,因此,可以同时脱氧和脱硫。在凝固过程中,钢液中首先析出 La_2S_3 。当温度继续降低至 LaP 析出温度时,LaP 开始在 La_2S_3 和 $\text{La}_2\text{O}_2\text{S}$ 表面析出,形成了复合夹杂物 $\text{La}_2\text{O}_2\text{S}$ -LaP 和 La_2S_3 -LaP。添加过量 La 使 LaP 增多,导致夹杂物尺寸增大。

参考文献

- [1] 刘松涛,王奕,朱浩然,等. H13 模具钢模铸坯夹杂物及碳化物分布解析[J]. 冶金分析, 2023, 43(12): 8-16.
- [2] 孙晓林,王飞,毛明涛,等. H13 钢中富钒初生碳化物的形成及影响因素[J]. 钢铁, 2018, 53(5): 68-75.
- [3] 谢有,成国光,陈列,等. H13 热作模具钢大尺寸析出相特征及生成机制[J]. 中国冶金, 2016, 26(4): 32-37.
- [4] 王昊,李晶,史成斌,等. 国内外电渣重熔 H13 钢中夹杂物的对比[J]. 中国冶金, 2019, 29(2): 17-22.
- [5] 黄宇,成国光,鲍道华. H13 钢中一次碳化物的特征及控制进展[J]. 工程科学学报, 2020, 42(10): 1244-1253.
- [6] 魏兴钊,朱伟恒,朱繁康,等. 4Cr5MoSiV1 钢制热作模具若干失效形式与对策探讨[J]. 热处理技术与装备, 2009, 30(3): 19-29.
- [7] Wang Y G, Liu C J. Evolution and Deformability of Inclusions in Steel Containing Rare-Earth Element Under Different Deoxidation Conditions [J]. steel research international, 2022, 93(8): 2200027.
- [8] Pan C, Hu X J, Lin P, et al. Evolution of Inclusions after Cerium and Titanium Addition in Aluminum Deoxidized Fe-17Cr-9Ni Austenitic Stainless Steel: Fundamentals of High Temperature Processes[J]. ISIJ International, 2020, 60(9): 1878-1885.
- [9] Luo S, Shen Z S, Yu Z M, et al. Effect of Ce Addition on Inclusions and Grain Structure in Gear Steel 20CrNiMo [J]. steel research international, 2020, 92(3): 2000394.
- [10] Lin B, Zhu H Y, Zhao J X, et al. Effect of Rare Earth La on Inclusion Evolution in High Al Steel [J]. steel research international, 2021, 93(2): 2100347.
- [11] Zhong L Q, Wang Z G, Chen R C, et al. Effects of Yttrium on the Microstructure and Properties of 20MnSi Steel [J]. steel research international, 2021, 92(11): 2100198.
- [12] Guo Z H, Li X Y, Liu Y, et al. Effect of Rare Earth Yttrium on Inclusion Characteristics of Grain-Oriented Silicon Steel [J]. Crystals, 2023, 13(6): 896.
- [13] Bao D H, Chen G G, Huang Y, et al. Refinement of Solidification Structure of H13 Steel by Rare Earth Sulfide [J]. steel research international, 2021, 93(1): 2100304.
- [14] Huang Y, Cheng G G, Li S J, et al. Effect of Cerium on the Behavior of Inclusions in H13 Steel [J]. steel research international, 2018, 89(12): 1800371.
- [15] Zhang Y, Xiao J, Liang J H, et al. Effect of rare earth elements on the segregation behavior and microstructure of super austenitic stainless steel [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 19: 20-29.
- [16] Ji F, Xu R, Gao Y L, et al. Effect of Ti and rare earth on microsegregation and large-sized precipitates of H13 steel [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2021, 28(12): 1591-1604.
- [17] Gong W, Wang C, Wang P F, et al. Effect of La on inclusions and fracture toughness of low-alloy ultra-high-strength 40CrNi2Si2MoVA steel [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2021, 28(11): 1408-1416.
- [18] Lian X T, Chen L, Fan Z W, et al. Effects of Modified Inclusions and Precipitates Alloyed by Rare Earth Element on Corrosion and Impact Properties in Low Alloy Steel [J]. Acta Metallurgica Si-

- nica, 2022, 35(10): 1719-1730.
- [19] Liu H H, Fu P X, Liu H W, et al. Effects of Rare Earth elements on microstructure evolution and mechanical properties of 718H pre-hardened mold steel [J]. Journal of Materials Science Technology, 2020, 50: 245-256.
- [20] Gao J Z, Fu P X, Liu H W, et al. Effects of Rare Earth on the Microstructure and Impact Toughness of H13 Steel [J]. Metals, 2015, 5(1): 383-394.
- [21] 赵晓栋, 姜 江, 李国宝, 等. 钢中大尺寸稀土夹杂物的形成动力学研究[J]. 中国稀土学报, 2004, 22(1): 142-144.
- [22] Wang H P, Xiong L, Zhang L, et al. Investigation of RE-O-S-As Inclusions in High Carbon Steels[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2017, 48(6): 2849-2858.
- [23] 杨振国, 张继明, 李守新, 等. 高周疲劳条件下高强度钢临界夹杂物尺寸估算[J]. 金属学报, 2005, 41(11): 1136-1142.
- [24] Guan J, Wang L Q, Zhang C W, et al. Effects of non-metallic inclusions on the crack propagation in bearing steel [J]. Tribology International, 2016, 106: 123-131.
- [25] Huang F, Ling J, Geng R M, et al. Effect of rare earth on inclusion evolution and corrosion resistance of HRB400E steel[J]. Materials and Corrosion, 2022, 74(1): 53-67.
- [26] Liu H H, Fu P X, Liu H W, et al. Carbides Evolution and Tensile Property of 4Cr5MoSiV1 Die Steel with Rare Earth Addition [J]. Metals, 2017, 7(10): 436-436.
- [27] Zhu J, Lin G T, Zhang Z H, et al. The martensitic crystallography and strengthening mechanisms of ultra-high strength rare earth H13 steel [J]. Materials Science Engineering A, 2020, 797: 140139.
- [28] Liu P, Hou X D, Yang C Y, et al. Tailoring microstructure evolution and austenite stability of TRIP steels by Rare-Earth microalloying[J]. Materials Characterization, 2023, 203: 113035.
- [29] Liu Y Q, Wang L J, Chou C K. Effects of Cerium on Resistance to Pitting Corrosion of Spring Steel Used in Fasteners of High-Speed Railway[J]. steel research international, 2014, 85(11): 1510-1516.
- [30] Zhao B, Xia M, Wang J F, et al. Effect of Rare Earth Elements on Microstructure and Hot Workability of AISI T15 High Speed Steel[J]. ISIJ International, 2022, 62(11): 2410-2420.
- [31] Liu X, Liang L J. Thermodynamic Analysis and Observation of Inclusions in H13 Die Steel with Rare Earth[J]. Advanced Materials Research, 2013, 2384(690-693): 193-196.
- [32] Li X, Jiang Z H, Geng X, et al. Evolution Mechanism of Inclusions in H13 Steel with Rare Earth Magnesium Alloy Addition [J]. ISIJ International, 2019, 59(9): 1552-1561.
- [33] Huang Y, Cheng G G, Li S J, et al. Distribution Characteristics and Thermal Stability of Primary Carbide in Cast Ce-H13 Steel [J]. ISIJ International, 2020, 60(2): 267-275.
- [34] Chen R C, Wang Z G, He J G, et al. Effects of Rare Earth Elements on Microstructure and Mechanical Properties of H13 Die Steel[J]. Metals, 2020, 10(7): 918.
- [35] Liu X, Liang L J. Effects of RE on Inclusions and Mechanical Properties of H13 Die Steel [J]. Advanced Materials Research, 2013, 2438(718-720): 33-36.
- [36] 吴翔宇, 董丙成, 王梓菲, 等. La-Ce 对 GCr15 轴承钢中夹杂物的改质效果及机理[J]. 特殊钢, 2024, 45(2): 39-45.
- [37] 雷应华, 刘尚潭, 张 军, 等. 电液控制器用加 Bi-Ce 易切削不锈钢 1.4104 的开发[J]. 特殊钢, 2022, 43(1): 73-77.

《特殊钢》期刊官方投稿网站

www.specialsteeljournal.com

地址:湖北省黄石市黄石大道 316 号、大冶特殊钢有限公司《特殊钢》杂志社

邮编:435001 咨询电话:15961618632 19371518672 0510-80673212

《特殊钢》编辑部邮箱: E-mail: tsghs@sina.com