

G95Cr18 轴承钢模铸坯夹杂物及碳化物解析

付宇豪¹, 吴 强¹, 朱浩然¹, 季灯平^{1,2}, 刘 斌^{1,3}, 付建勋^{1*}

(1. 上海大学材料科学与工程学院先进凝固技术中心, 省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室, 上海 200444; 2. 浙江青山钢铁有限公司, 浙江 丽水 323000; 3. 鞍钢集团北京研究院, 北京 102200)

摘 要: 基于 Thermo-calc 软件分析了 G95Cr18 轴承钢基体组织、相变及碳化物析出情况, 用金相显微镜、扫描电镜对模铸坯组织、夹杂物和碳化物进行了解析。研究表明, 在 G95Cr18 轴承钢铸坯中, 夹杂物主要成分为 Ce、O、Al、Ca 等, 夹杂物类型主要为稀土氧硫化物 Ce-Al-O-Ca-S, 同时还发现少量镁铝尖晶石 Al-Mg-O, 夹杂物密度为 $31 \sim 48 \text{ mm}^{-2}$, 夹杂物尺寸集中分布在 $2.2 \sim 2.6 \mu\text{m}$, 夹杂物面积占比为 $0.02\% \sim 0.03\%$; 碳化物边部至心部面积占比由 3.0% 逐渐增加到 7.5% , 碳化物形貌有块状→棒状→长条状→网状的转变趋势, 靠近铸坯心部网状碳化物大多沿晶界分布; 碳化物类型为: 亮白色富含 Nb 的 MC 型碳化物和灰色富含 Cr 元素的 M_7C_3 型碳化物。MC 型碳化物的尺寸相较 M_7C_3 型碳化物小, 在晶内以块状碳化物形式存在, 在晶界处以网状碳化物形式存在。

关键词: G95Cr18 轴承钢; 夹杂物; 碳化物; Thermo-calc 软件

中图分类号: TF76

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2024)04-0189-09

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.04.027

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Analysis of microstructures, inclusions and carbides of G95Cr18 bearing steel billets by mold casting

Fu Yuhao¹, Wu Qiang¹, Zhu Haoran¹, Ji Dengping^{1,2}, Liu Bin^{1,3}, Fu Jianxun^{1*}

(1. Advanced Solidification Technology Center, School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, State Key Laboratory of Metallurgy and Manufacture of Advanced Special Steels, Shanghai 200444, China; 2. Zhejiang Qing-shan Iron and Steel Co., Ltd., Lishui 323000, Zhejiang, China; 3. Ansteel Beijing Research Institute, Beijing 102200, China)

Abstract: Based on Thermo-calc software, the matrix structure, phase transformation and carbides precipitation of G95Cr18 bearing steel were analyzed. Metallographic microscope and scanning electron microscope were used to analyze the mold casting billets structures, inclusions and carbides. The research shows that the main components of inclusions in the casting slab of G95Cr18 bearing steel are Ce, O, Al, Ca and a few other elements. The main type of inclusions is rare earth oxygen sulfide Ce-Al-O-Ca-S, and a small amount of magnesia-aluminum spinel Al-Mg-O is also found. The inclusion density is $31 - 48 \text{ mm}^{-2}$, and the average sizes of inclusions are concentrated in a range of $2.2 \mu\text{m}$ to $2.6 \mu\text{m}$ with the inclusion area proportion of 0.02% to 0.03% . The area proportion of carbides from the edge to

收稿日期: 2023-06-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52074179)。

作者简介: 付宇豪, 2002 年出生, 男, 江西抚州人, 本科, 研究方向: 钢铁冶金技术及高品质特殊钢的开发, E-mail: dayifuyuhao@shu.edu.cn; * 通讯作者: 付建勋, 1969 年出生, 男, 博士, 教授, 研究方向: 钢铁冶金技术及高品质特殊钢的开发, E-mail: fujianxun@shu.edu.cn。

the core increases from 3.0% to 7.5%, and the morphology of carbides shows a transforming trend of block $\rightarrow$ rod $\rightarrow$ strip $\rightarrow$ network. Most of the network carbides near the core are distributed along the grain boundaries. These types of carbides are composed of bright white Nb-enriched MC carbides and gray M_7C_3 carbides enriched in Cr, respectively. The sizes of MC carbides are smaller than that of M_7C_3 carbides, and they present as massive carbides in the matrix and network carbides in the grain boundary.

Key words: G95Cr18 bearing steel, inclusion, carbides, Thermo-calc software

0 引言

G95Cr18 是一种典型的高碳高铬不锈钢, 具有较高的硬度、耐腐蚀性、耐磨性以及耐高温能力, 被广泛运用于航空、石油化工以及核工业等特种工业领域^[1-2]。

高碳高铬马氏体轴承钢中的夹杂物及碳化物是影响钢性能的关键因素^[3-7], 杨玉丹等^[8]在对新型高碳马氏体不锈钢的研究中发现, 其退火态组织主要为铁素体与碳化物, 其中颗粒状碳化物弥散分布在铁素体基体中; 孙慎宏^[9]在高碳铬不锈钢的研究中发现, 由于在退火过程中产生了大块状且不均匀的碳化物, 使得钢的塑性变差, 容易发生低温脆裂, 但并未对碳化物及夹杂物的组织形貌进行分析总结; 李照国等^[10]在 6Cr13 马氏体不锈钢淬火组织与性能的研究中发现, 淬火后有少量碳化物固溶于基体中, 溶解量随淬火温度升高而增加, 但过高的淬火温度会增大残余奥氏体含量, 降低硬度; 狄崇祥等^[11]在铸造马氏体不锈钢的研究中发现, 在回火态组织中, 碳化物以颗粒状沿马氏体板条呈链状分布, 并且确定了其碳化物主要为 $M_{23}C_6$ 型碳化物, 但并未提及其对性能的影响; Dennis W Hetzner^[12]等发现, 在 9Cr18Mo 轴承钢中, 碳化物主要有 M_7C_3 型和 $M_{23}C_6$ 型两种, 但也未提及夹杂物对组织的影响。

笔者依托国内某厂生产的 G95Cr18 轴承钢模铸坯展开研究, 基于 Thermo-calc 软件计算了该钢种相转变以及碳化物析出状态, 使用蔡司金相显微镜、扫描电镜对铸坯组织、夹杂物及碳化物形貌与分布规律进行了解析, 为其品质提升奠定了基础。

1 生产工艺及试样分析

某厂 G95Cr18 钢的生产工艺流程为: 30 t 电弧炉冶炼—AOD 精炼—LF 精炼—VD 真空脱气精炼—模铸。对模铸锭开坯后的中间坯靠近尾部锯切一个尺寸为 160 mm×160 mm 的方坯。采用线切割的方式从外弧边部到铸坯中心依次等距取 8 个金相试样, 取样方式如图 1 所示, 铸坯主要化学成分见表 1。

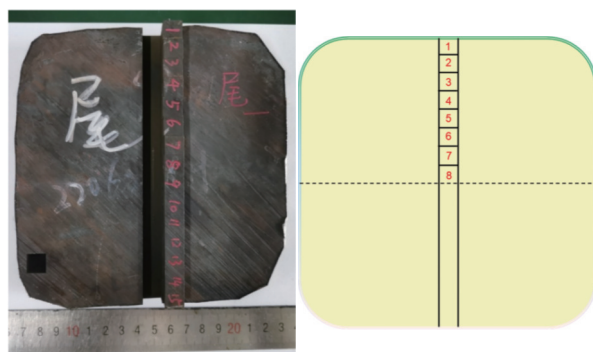


图 1 铸坯取样示意

Fig. 1 Schematic diagram of billet sampling

表 1 G95Cr18 钢主要化学成分
Table 1 Main chemical composition of G95Cr18 steel

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	Al	Ce	%
0.900	0.22	0.38	0.026	0.001	17.29	0.21	0.02	0.014	0.008	0.005	

将八个试样分别依次使用 400 目 (35.75 μm)、600 目 (23.83 μm)、800 目 (17.88 μm)、1 000 目 (14.30 μm)、1 200 目 (11.92 μm)、1 500 目 (9.53 μm)、2000 目 (7.15 μm) 的砂纸进行打磨, 随后使用粒度为 1.5 μm 的金刚石磨砂膏抛光 5 min 后再使用清水抛光, 抛光完成后的样品在清水冲洗后使用酒精清洗, 用以消除水渍及杂质, 使用吹风机吹干。制样

完成后使用蔡司金相显微镜对样品进行连续随机不同部位拍照, 观察夹杂物、碳化物的形貌和分布, 利用扫描电镜、能谱分析仪对夹杂物、碳化物成分进行分析。将磨抛好的试样观察面浸泡在苦味酸腐蚀剂中, 腐蚀至表面颜色变暗后, 然后取出试样用酒精冲洗干净, 最后用吹风机吹干表面, 分析。

为解析 G95Cr18 钢碳化物的三维形貌与空间

分布,对钢坯铸锭进行碳化物三维腐蚀。以铸锭为阳极,铜管为阴极,使铸锭观察面面对阴极,通电使钢铸锭溶解。电流密度为 $0.15 \sim 0.3 \text{ A/cm}^2$, 温度为 -8°C , 电解时间控制在 $25 \sim 30 \text{ min}$, 电解液成分为: 1% 四甲基氯化铵-1% 乙酰丙酮-甲醇, 将试样取出后使用酒精将观察面冲洗干净, 烘干后再次使用扫描电镜对试样进行观察分析。

2 结果与讨论

2.1 铸坯夹杂物分析

对 G95Cr18 钢凝固及冷却过程中的相变行为及平衡相进行热力学分析。用 Thermo-calc 软件计算 G95Cr18 钢平衡状态下从 1600°C 降低至 600°C 的相变及碳化物析出情况, 选取表 1 中成分计算, 结果如图 2 所示。

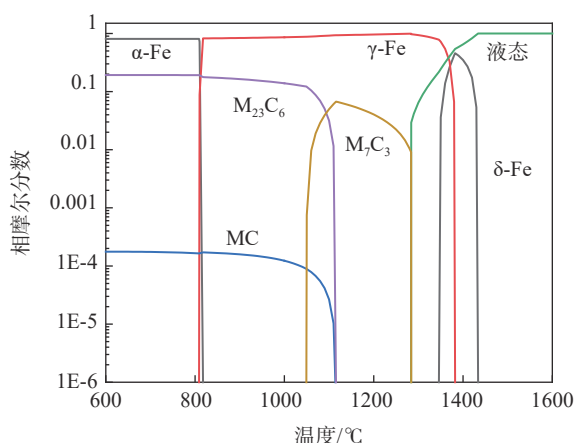


图2 G95Cr18 钢平衡凝固相图

Fig. 2 Equilibrium solidification phase diagram of G95Cr18 steel

计算可知该钢中夹杂物主要类型为: MnS 、 Al_2O_3 、 Ce_2S_3 、 $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}_1$ 。为确定钢中最终夹杂物实际种类与数量, 使用扫描电镜、金相显微镜对 G95Cr18 轴承钢铸坯试样进行拍照, 对模铸试样中夹杂物类型和数量进行统计分析。

使用扫描电镜对 G95Cr18 轴承钢模铸坯中夹杂物进行观察, 利用扫描电镜自带能谱对夹杂物进行成分分析, 选取典型照片如图 3 所示。结果显示, 夹杂物主要为亮白色 Ce-Al-O-Ca-S 复合夹杂物, 呈球形分布。其中 O 含量分布在 $37\% \sim 62\%$, Ce 含量分布在 $9\% \sim 19\%$, 其中心部样品中的 Ce 含量略高于边部含量; 另还含有 10% 左右的 La 和 Cr。黑色夹杂物主要为 Al-Mg-O 夹杂物, 初步判断其形成原因为: 在精炼过程中, 采用的是 Al 脱氧, 钢中会存在

一定量的 Al_2O_3 夹杂, 在加入稀土 La 和 Ce 之后, Al_2O_3 被改质^[13-16], 形成了 Al-Mg-O 和 Ce-Al-O-Ca-S 的复合夹杂物。与热力学计算对比, 发现 G95Cr18 轴承钢中 MnS 很少, 几乎没有单独 MnS 存在, 原因是实际生产中钢中硫控制极低, MnS 与强脱氧元素氧化物形成复合夹杂, 很少单独存在。

使用蔡司金相显微镜对 G95Cr18 轴承钢铸坯试样进行拍照, 对模铸试样中夹杂物进行统计, 图 4 为从边部至心部 100 倍典型金相照片。从图 4 中可以看出, 从 1#样到 8#样, 夹杂物的数量、形态、尺寸均有明显差别, 且均具有夹杂物数量少、尺寸小、形态为规则的椭圆形或圆形、分布较为均匀的特点。为了更直观地反映夹杂物的属性, 使用 Image Pro Plus 软件对铸坯不同部位各 50 张 100 倍视野下夹杂物进行统计, 统计结果如图 5 所示。图 5(a) 中, 各试样中夹杂物等效直径集中分布在 $0 \sim 5 \mu\text{m}$ 内, 约占总比例的 94% , 其中小于 $2 \mu\text{m}$ 的夹杂物约占 47% 。图 5(b) 中, 夹杂物密度介于 $31 \sim 48 \text{ mm}^{-2}$, 其中 1#样中夹杂物密度最高, 为 48 mm^{-2} 。夹杂物等效直径介于 $2.2 \sim 2.6 \mu\text{m}$, 其中, 5#样的等效直径最大, 为 $2.6 \mu\text{m}$ 。夹杂物面积占比集中分布在 $0.018\% \sim 0.030\%$, 其中 5 号样夹杂物面积占比最高, 为 0.030% 。铸坯中小于 $5 \mu\text{m}$ 的夹杂物占比高达 94% , 由边部至心部夹杂物密度、等效直径、面积比例相差较小。即钢中夹杂物数量较少且分布均匀, 而钢中均匀分布的非弥散细小夹杂物会对位错运动产生一定程度的阻碍; 同时也会增加钢中出现裂纹的概率, 对钢的塑性变形能力产生危害^[17-18]。

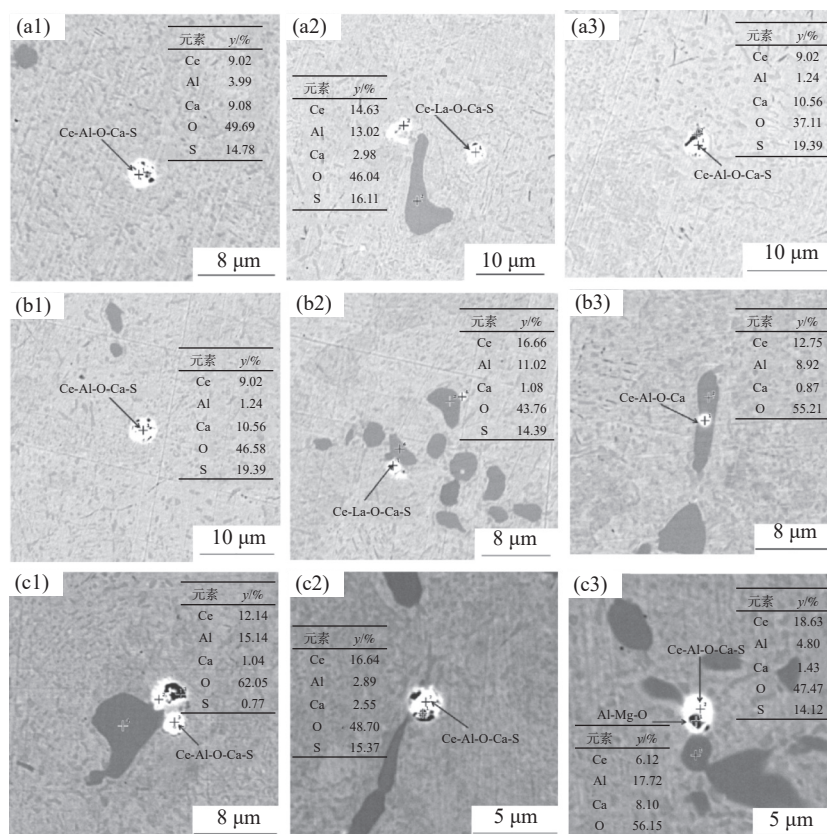
2.2 铸坯组织及碳化物解析

使用苦味酸腐蚀试样后, 将试样放置于金相显微镜下, 选取典型金相组织照片如图 6 所示。可以看出, 腐蚀后的钢体晶界被清晰地展现出来, 在同等放大倍数下, 越靠近心部的钢体晶粒尺寸越大, 并且在晶界附近有沿晶界析出成团的深黑色颗粒相, 部分深黑色相分布于晶内。这些深黑色相沿基体均匀分布, 该类分布均匀的碳化物可提高基体的韧性, 减弱了显微裂纹的形成与扩张能力, 能一定程度上提升基体的耐磨性^[19]。

为清晰观察钢中碳化物的微观组织, 利用扫描电镜对试样中的碳化物进行扫描分析。图 7 为边部至心部 1000 倍放大后的组织形貌。从图 7 中可以看出, G95Cr18 钢中的碳化物由边部至心部, 有着由块状—棒状—长条状—网状的转变, 碳化物的连续

性增强,且面积占比增大。在靠近心部的组织中,网状碳化物大多沿晶界分布,少部分存在于晶界间,存在割裂组织的情况。出现这种情况的原因可能是在铸坯凝固过程中,由于内外凝固速率的不同,外表面

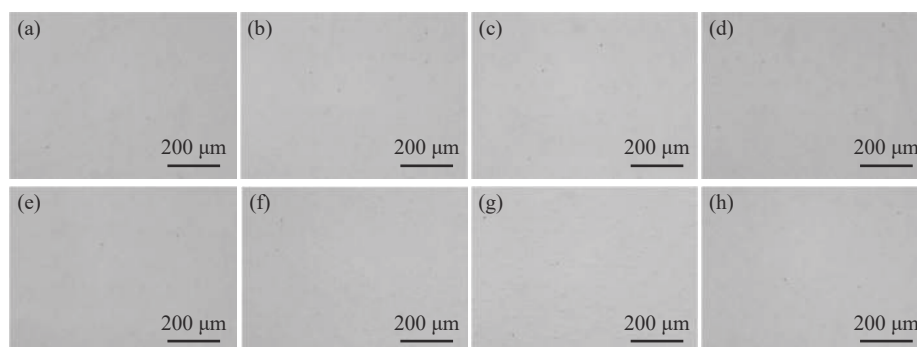
处凝固速率较快、偏析程度较高,对碳化物的生成不利,所以仅存在少量块状碳化物;而越靠近心部时,凝固速率下降,微观偏析增加,碳化物形态则越趋向于网状^[20]。



(a1)~(a3) 边部; (b1)~(b3) 1/4 处; (c1)~(c3) 心部

图 3 G95Cr18 钢模铸坯典型夹杂物成分及形貌

Fig. 3 Composition and morphology of typical inclusions in mold casting billets of G95Cr18 steel



(a)~(h) 分别对应边部到心部 1#~8# 样品

图 4 G95Cr18 钢模铸坯由边部到心部金相照片

Fig. 4 Metallographic photos of G95Cr18 mold billets sampled from edge to center

利用 Image Pro Plus 软件统计铸坯碳化物面积占比以及面积分布,使用 Origin 处理后结果如图 8 所示。由图 8 可知,从铸坯边部至心部,碳化物平均面积所占比例有较大上升,由边部的 3% 增长到心

部 7.5%,出现该现象的原因可能是铸坯内部不同区域的冷速存在一定差异,导致碳化物出现偏析、分布不均及颗粒粗大的情况^[21],碳化物面积主要分布在 2~50 μm²,碳化物面积与样品位置关联性不大。

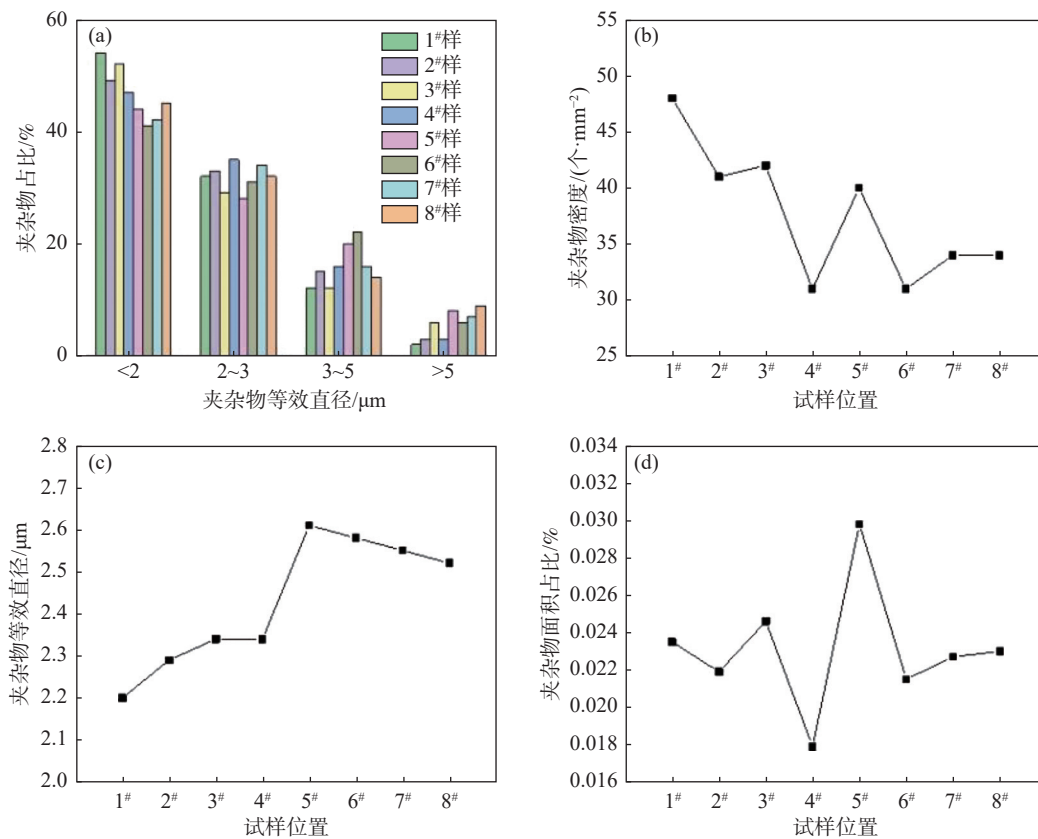
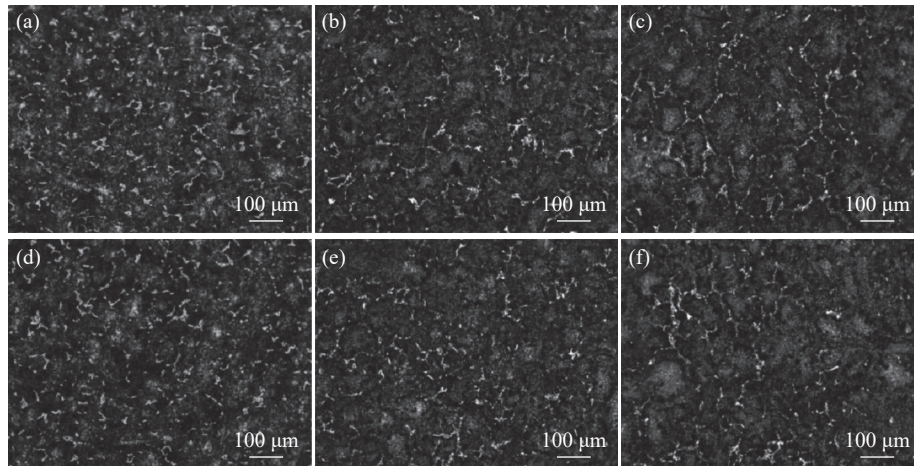


图5 G95Cr18 钢模铸坯不同部位夹杂物分布情况

Fig. 5 Distribution of inclusions in different parts of G95Cr18 mold casting billets



(a)(d) 为边部 2# 样, (b)(e) 为 1/4 处 5# 样, (c)(f) 为心部 8# 样

图6 G95Cr18 钢模铸坯典型碳化物金相组织电镜扫描

Fig. 6 Electron microscope scanning photos of typical carbides microstructures of G95Cr18 mold casting billets

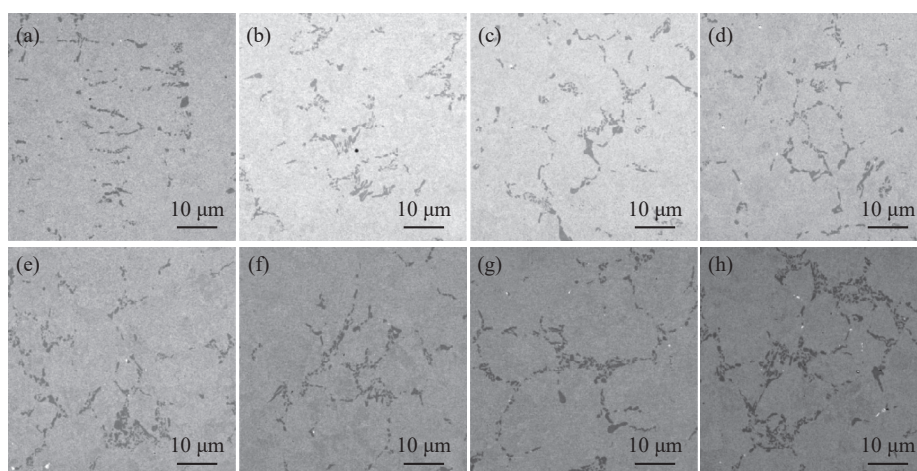
进一步分析前文图2中 G95Cr18 轴承钢的凝固过程, 液相线与固相线温度分别为 1 433 $^{\circ}\text{C}$ 与 1 284 $^{\circ}\text{C}$; 当温度降低至 1 433 $^{\circ}\text{C}$ 时, 发生匀晶转变, $\delta\text{-Fe}$ 开始从液相析出, 1 384 $^{\circ}\text{C}$ 时发生包晶反应, 即为 $\text{L}+\delta\text{-Fe}\rightarrow\gamma\text{-Fe}$, $\gamma\text{-Fe}$ 开始析出; 1 284 $^{\circ}\text{C}$ 时开始形成 M_7C_3 类碳化物, 1 199 $^{\circ}\text{C}$ 时开始形成 MC 类碳化物, 1 103 $^{\circ}\text{C}$ 时开始形成 M_{23}C_6 类碳化物。因此

G95Cr18 钢平衡凝固及冷却过程中的主要相转变行为可描述为 $\text{L}\rightarrow\text{L}+\delta\text{-Fe}\rightarrow\text{L}+\delta\text{-Fe}+\gamma\text{-Fe}\rightarrow\text{L}+\gamma\text{-Fe}\rightarrow\text{L}+\gamma\text{-Fe}+\text{M}_7\text{C}_3\rightarrow\gamma\text{-Fe}+\text{M}_7\text{C}_3+\text{MC}\rightarrow\gamma\text{-Fe}+\text{M}_7\text{C}_3+\text{MC}+\text{M}_{23}\text{C}_6\rightarrow\gamma\text{-Fe}+\text{MC}+\text{M}_{23}\text{C}_6\rightarrow\alpha\text{-Fe}+\text{MC}+\text{M}_{23}\text{C}_6$ 。

使用 Thermo-calc 软件计算 G95Cr18 钢中凝固析出的不同类别碳化物的成分随温度变化的情况, 计算结果如图9所示。图9(a)中 M_7C_3 型碳化物中

所含主要元素为 Cr、Fe、C、V 和 Mn, 含量分别为 63%、25%、9%、2%、1%, 随着温度的下降, Cr 的含量略微上升, Fe 的含量略微下降, 其他元素含量基本不变; 图 9(b) 中, MC 型碳化物中所含元素主要为 Nb、C、Cr、Fe, 含量分别为 86%、11%、2%、1%, 随着温度的下降, 各元素的含量基本不变; 图 9(c) 为 $M_{23}C_6$ 型碳化物所含元素主要为 Cr、Fe、C, 含量分别为 57%、37%、6%, 此外还含有微量的 V 和 Mo。随着温度的降低, C、V、Mo 的含量基本不变, 但 Cr 的含量逐渐上升, Fe 的含量逐渐下降。这表

明在冷却过程中, Cr 原子不断地向 $M_{23}C_6$ 型碳化物中转移, 并不断替代其中的 Fe 原子, 并且在 810~820 °C 区间内出现了与原本变化趋势相反的变化情况, 这可能与钢基体在此时发生马氏体转变有关。上述计算可知, 室温下 G95Cr18 轴承钢中的基体主要为马氏体和碳化物, 碳化物包括富 Cr 的 M_7C_3 相、 $M_{23}C_6$ 相和富 Nb 的 MC 相。在冷却过程中, M_7C_3 相逐渐减少, 故理论上在常温的钢中 M_7C_3 含量较少, MC 相和 $M_{23}C_6$ 相占比较高。



(a)~(h) 为边部到心部

图 7 G95Cr18 轴承钢碳化物形态转变

Fig. 7 Form transformation of carbides in G95Cr18 steel

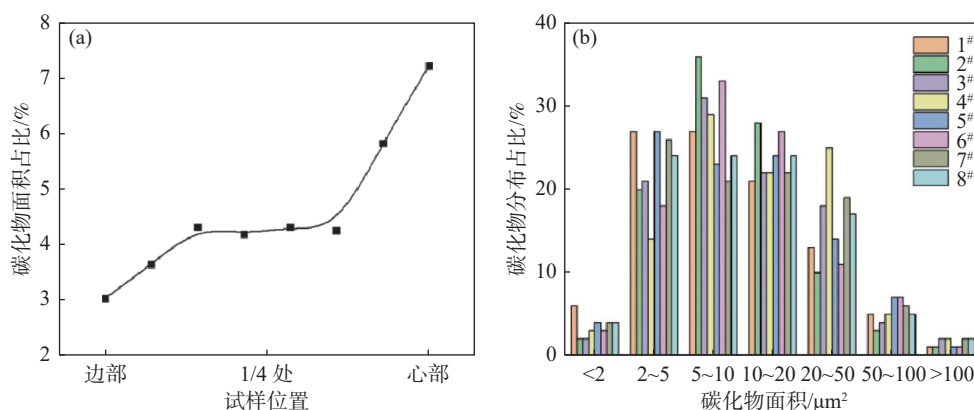


图 8 G95Cr18 轴承钢碳化物面积占比及分布

Fig. 8 Area proportion and distribution of carbides in G95Cr18 steel

为得到 G95Cr18 轴承钢铸坯中析出碳化物所含主要成分, 对典型碳化物进行面扫描分析以观察碳化物的形貌与元素分布。图 10、11 为碳化物面扫描图片, 可以看出, 钢中的碳化物中主要元素为 Fe、Cr 及 C 元素。

为进一步了解 G95Cr18 钢中碳化物的具体类型与成分, 使用扫描电镜、能谱仪对典型碳化物组织形貌及成分进行分析。将试样腐蚀后, 使用扫描电镜对试样进行观察, G95Cr18 轴承钢模铸坯典型碳化物形貌如图 12 所示, 表 2 为图中碳化物的能谱成分。

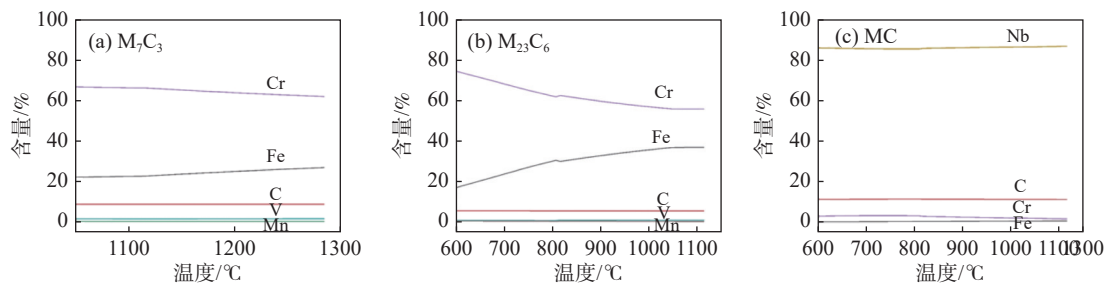
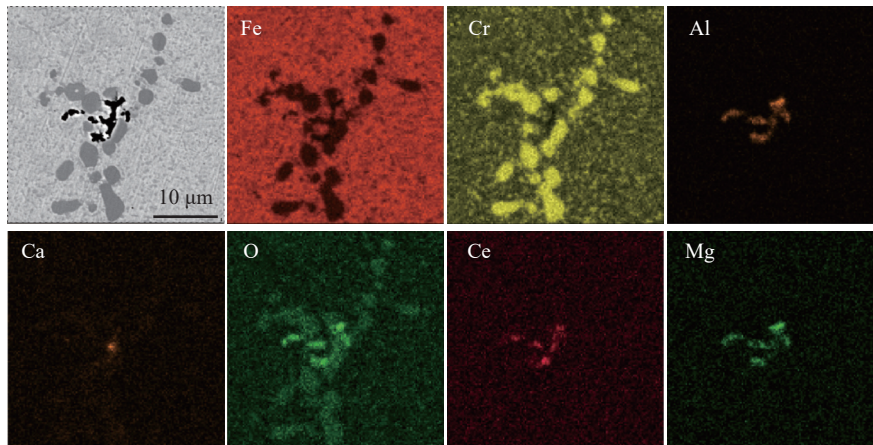
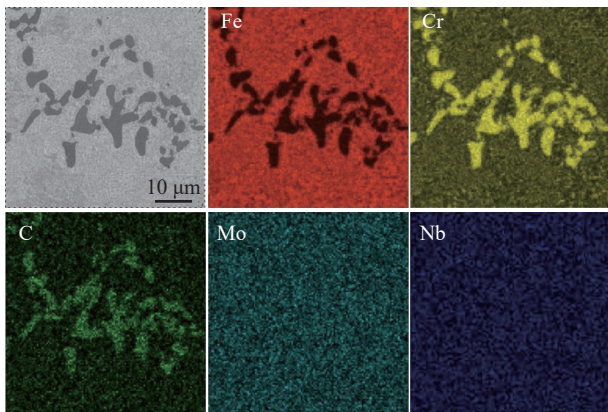


图 9 G95Cr18 钢平衡相所含主要元素

Fig. 9 Main elements contained in the equilibrium phases of G95Cr18 steel

图 10 1[#]碳化物面扫描Fig. 10 Mapping of carbides 1[#]图 11 2[#]碳化物面扫描Fig. 11 Mapping of carbides 2[#]

如图 12 所示,碳化物尺寸约为 5 ~ 20 μm,碳化物类型有两种,在图中分别表现为亮白色富 Nb 型碳化物以及灰色富 Cr 型碳化物。富 Nb 型碳化物中所含的主要元素为 Fe、Mo、C、Nb、Ti,这类碳化物中元素含量并不稳定,部分该类碳化物中不含 Fe, Nb 含量均大于 50%,最高的含量达到了 73.54%,

Ti 含量在 12% ~ 18%;而富 Cr 型碳化物中元素含量较为稳定,Fe 含量在 28% 左右,Cr 含量在 66% 左右,C 含量在 3.5% 左右,其中部分含有微量的 Mo。

由图 12 可知,富 Nb 型碳化物的尺寸相较于富 Cr 型碳化物小,再根据热力学计算中的析出温度以及成分,可以判断出富 Nb 型碳化物应为 MC 型碳化物,而富 Cr 型碳化物为 M_7C_3 型碳化物。

存在这种现象的原因为:G95Cr18 钢属于过共析合金,在凝固时发生成分偏析,当凝固前沿液相中碳的质量分数超过 1% 时,符合亚共晶钢成分,随着液相成分向共晶点移动,最终发生共晶反应,即 $L \rightarrow M_7C_3 + \gamma\text{-Fe}$ 。在分析图 3 过程中也发现,随着温度的降低, M_7C_3 型碳化物逐渐转变为 $M_{23}C_6$ 型碳化物,但实际工况下,钢的凝固过程为非平衡凝固,冷却速度过快,大尺寸 M_7C_3 无法完全转化为 $M_{23}C_6$ 型碳化物,只有从奥氏体晶界或晶内析出的小块 M_7C_3 才可能转变为 $M_{23}C_6$ 型碳化物^[22]。

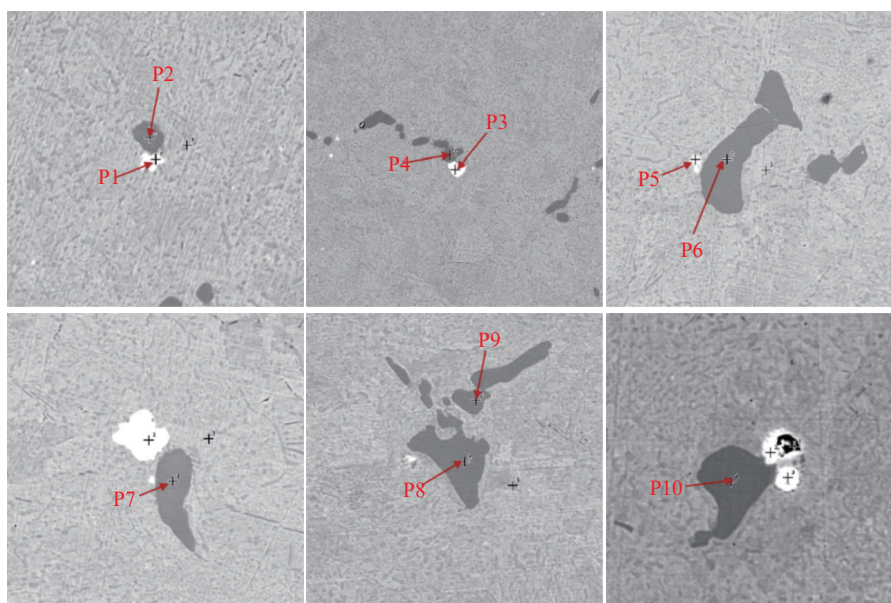


图 12 G95Cr18 钢典型碳化物形貌
Fig. 12 Typical carbides morphology of G95Cr18 steel

表 2 G95Cr18 钢典型碳化物的能谱成分

Table 2 Energy spectrum components of typical carbide in G95Cr18 steel %

能谱点	Fe	Cr	Mo	C	Nb	Ti
P1	18.80	5.61	3.00	5.22	51.05	16.31
P2	29.06	66.34	1.21	3.39	0	0
P3	0	0	6.26	7.35	73.54	12.85
P4	29.14	66.32	1.16	3.38	0	0
P5	4.76	0	3.59	6.74	67.08	17.83
P6	28.71	67.85	0	3.43	0	0
P7	28.92	65.62	1.85	3.61	0	0
P8	28.36	67.95	0	3.69	0	0
P9	28.82	67.59	0	3.59	0	0
P10	27.93	67.62	0.98	3.47	0	0

总之, G95Cr18 轴承钢模铸坯的碳化物由块状-棒状-长条状-网状演变;碳化物连续性、面积占比增大;碳化物相主要为富 Nb、Ti 的 MC 型碳化物和富含 Cr、Fe 及微量 Mo 的 M_7C_3 型碳化物。

3 结论

1) G95Cr18 铸坯中夹杂物主要成分为 Ce、O、Al、Ca 和其他微量元素,夹杂物类型为 Ce-Al-O-Ca-S、Ce-Al-O-Ca 与 Al-Mg-O 体系;夹杂物密度为 $31 \sim 48 \text{ mm}^{-2}$,夹杂物等效直径为 $2.2 \sim 2.6 \mu\text{m}$,夹杂物面积占比为 $0.018\% \sim 0.03\%$ 。

2) G95Cr18 铸坯由边部至心部,碳化物面积占比由 3.0% 增加到 7.5% ,碳化物形貌分布沿块状→棒状→长条状→网状逐步转变,碳化物连续性增强,面积占比增大;在靠近铸坯心部网状碳化物大多沿晶界分布。

3) G95Cr18 铸坯中碳化物类型为:富 Nb 型 MC 型碳化物($M=\text{Nb, Fe}$)、富 Cr 型 M_7C_3 型碳化物($M=\text{Cr, Fe}$),碳化物尺寸在 $5 \sim 20 \mu\text{m}$,富 Nb 的 MC 型碳化物的尺寸相对富 Cr 的 M_7C_3 型碳化物尺寸较小;碳化物在晶内以块状碳化物存在,以网状碳化物在晶界分布。

参考文献

- [1] Jin Lei. Study on stability control of inclusions in G95Cr18 steel[J]. Special Steel Technology, 2021, 27(2): 18-21.
(金磊. G95Cr18 钢夹杂物稳定控制的工艺研究[J]. 特钢技术, 2021, 27(2): 18-21.)
- [2] Yuan Zhaojing. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of G95Cr18 and G102Cr18Mo steels[J]. Shanghai Metal, 2018, 40(2): 59-63.
(袁兆静. 热处理对 G95Cr18 和 G102Cr18Mo 钢的组织 and 力学性能的影响[J]. 上海金属, 2018, 40(2): 59-63.)
- [3] Xu Bin, Li Hongliang, Wang Xuelin, et al. Experimental study on continuous casting billet of 30Cr13 martensitic stainless steel[J]. Gansu Metallurgy, 2021, 43(2): 53-56.
(徐斌, 李鸿亮, 王雪林, 等. 30Cr13 马氏体不锈钢连铸坯的试验研究[J]. 甘肃冶金, 2021, 43(2): 53-56.)

- [4] Zhu Haoran, Zhou Maohua, Hu Tao, *et al.* Effect of magnesium on carbide evolution and microstructure of H13 steel[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 202, 34(11): 1278-1285.
(朱浩然, 周茂华, 胡涛, 等. 镁对H13钢液析碳化物及组织的影响[J]. *钢铁研究学报*, 2022, 34(11): 1278-1285.)
- [5] Li Haibo, Zhao Dongwei, Zhu Guosen, *et al.* Influence of inclusions on impact properties of J55 steel[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2015, 22: 36-41.
- [6] Xiao Wei, Bao Yanping, Gu Chao, *et al.* Ultrahigh cycle fatigue fracture mechanism of high-quality bearing steel obtained through different deoxidation methods[J]. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 2021, 28(5): 804-815.
- [7] Tang Guozhang, Zeng Yanan, Li Junguo, *et al.* Thermodynamic study of composition change on inclusion precipitation of GCr15 bearing steel during solidification[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2016, 37(1): 122-126.
(唐国章, 曾亚南, 李俊国, 等. GCr15轴承钢凝固过程组分变化对夹杂物析出的热力学研究[J]. *钢铁钒钛*, 2016, 37(1): 122-126.)
- [8] Yang Yudan, Zhao Hongshan, Liu Tengshi, *et al.* Microstructure and properties of new high-carbon martensitic stainless steels[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2020, 32(2): 135-142.
(杨玉丹, 赵洪山, 刘腾轼, 等. 新型高碳马氏体不锈钢的组织与性能[J]. *钢铁研究学报*, 2020, 32(2): 135-142.)
- [9] Sun Shenhong. Research on production technology of high carbon chromium stainless 95Cr18(Mo) drawing rod[J]. *Special Steel Technology*, 2017, 23(1): 12-15.
(孙慎宏. 高碳铬不锈钢95Cr18(Mo)拉拔盘条生产工艺研究[J]. *特钢技术*, 2017, 23(1): 12-15.)
- [10] Li Zhaoguo, Pan Jixiang, Ji Xianbin, *et al.* Effect of quenching process on microstructure and properties of 6Cr13 martensitic stainless steel[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2022, 47(5): 226-229.
(李照国, 潘吉祥, 纪显彬, 等. 淬火工艺对6Cr13马氏体不锈钢组织和性能的影响[J]. *金属热处理*, 2022, 47(5): 226-229.)
- [11] Di Chongxiang, Li Kelei, Jing Jing, *et al.* Effect of tempering process on microstructure and properties of cast martensitic stainless steel[J]. *Foundry*, 2022, 71(12): 1499-1504.
(狄崇祥, 李克雷, 荆静, 等. 回火工艺对铸造马氏体不锈钢组织和性能的影响[J]. *铸造*, 2022, 71(12): 1499-1504.)
- [12] Dennis W Hetzner, William Van Geertruyden. Crystallography and metallography of carbides in high alloy steels[J]. *Materials Characterization*, 2008, 59(7): 825-841.
- [13] Wang Yi, Li Changrong, Wang Linzhu, *et al.* Modification of alumina inclusions in SWRS82B steel by adding rare earth cerium[J]. *Metals*, 2020, 10(12):1696.
- [14] Wang Yi, Li Changrong, Zeng Zeyun, *et al.* Crystallography of alumina modification by rare earth elements in SWRS82B steel[J]. *Iron and Steel*, 2020, 55(10): 69-74, 88.
(王奕, 李长荣, 曾泽芸, 等. SWRS82B钢中稀土元素对氧化铝改性的晶体学[J]. *钢铁*, 2020, 55(10): 69-74, 88.)
- [15] Wang Yi, Li Changrong, Xiong Xingqiang, *et al.* Effect of rare earth lanthanum on alumina inclusions in SWRS82B steel[J]. *Rare Metals*, 2022, 46(9): 1199-1206.
(王奕, 李长荣, 熊星强, 等. 稀土镧对SWRS82B钢中氧化铝夹杂物的影响[J]. *稀有金属*, 2022, 46(9): 1199-1206.)
- [16] Yang Chaoyun. Study on the influence mechanism of rare earth on inclusion-Structure-properties of high carbon chromium bearing steel[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.
(杨超云. 稀土对高碳铬轴承钢夹杂物-组织-性能的影响机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.)
- [17] Guo Shuai, Zhu Hangyu, Han Yun, *et al.* Research progress on the influence of inclusions on the plasticity and toughness of steel[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2022, 34(8): 713-726.
(郭帅, 朱航宇, 韩贇, 等. 夹杂物对钢塑性和韧性的影响研究进展[J]. *钢铁研究学报*, 2022, 34(8): 713-726.)
- [18] Su Mengmeng, Ji Dengping, Yan Daocong, *et al.* Effect of tellurium on machinability of 303Cu free-cutting stainless steel[J]. *Metallurgy in China*, 2023, 33(4): 65-72.
(苏蒙蒙, 季灯平, 严道聪, 等. 碲对303Cu易切削不锈钢切削性能的影响[J]. *中国冶金*, 2023, 33(4): 65-72.)
- [19] Kong Yonghua, Song Dongliang, Xie Lixiong, *et al.* Comparative analysis of microstructure and properties of GCr15 bearing steel collar[J]. *Hot Working Technology*, 2012, 41(10): 55-57, 60.
(孔永华, 宋东亮, 谢黎雄, 等. GCr15轴承钢钢领组织性能的对比分析[J]. *热加工工艺*, 2012, 41(10): 55-57, 60.)
- [20] Yang Yaguang. Research on key technology and industrial trial production of high carbon martensitic stainless steel 95Cr18 continuous casting[J]. *Special Steel Technology*, 2023, 29(1): 17-21.
(杨亚光. 高碳马氏体不锈钢95Cr18连铸关键技术研究及工业试制[J]. *特钢技术*, 2023, 29(1): 17-21.)
- [21] Zhang Yanjun, Min Yong'an, Liu Xiangjiang, *et al.* Structure distribution characteristics and carbide uniformity of GCr15 bearing ring[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2019, 44(12): 6-12.
(张艳君, 闵永安, 刘湘江, 等. GCr15轴承套圈组织分布特点及碳化物均匀性[J]. *金属热处理*, 2019, 44(12): 6-12.)
- [22] Yu Wentao, Li Jing, Shi Chengbin, *et al.* As-cast microstructure and carbides of high carbon martensitic stainless steel 8Cr13MoV steel[J]. *Chinese Journal of Engineering Science*, 2016, 38(9): 1264-1269.
(于文涛, 李晶, 史成斌, 等. 高碳马氏体不锈钢8Cr13MoV钢铸态组织及碳化物[J]. *工程科学学报*, 2016, 38(9): 1264-1269.)