

GCr15 轴承钢连铸坯冷却速度与入炉温度对其组织和性能的影响

Effect of Cooling Rate and Charging Temperature on Microstructure and Property of GCr15 Bearing Steel Casting Slab

供稿|孙复年¹, 任能², 任本福¹, 康欣蕾³ / SUN Funian¹, REN Neng², REN Benfu¹, KANG Xinlei³

内容导读

轴承被称为“工业的心脏”，轴承钢由于工作环境恶劣需具有较高的力学性能，尤其是疲劳寿命，影响轴承钢疲劳寿命的主要因素起源于连铸。高碳铬轴承钢是使用最广，应用最久的轴承钢，其中 GCr15 轴承钢是一种典型的高碳低合金结构钢。本文以 GCr15 轴承钢连铸坯为研究对象，研究不同冷却速度和入炉温度对连铸方坯的微观组织的影响，同时结合有限元方法对不同冷却速度下连铸方坯的热应力进行了分析。结果表明：GCr15 轴承钢连铸坯冷却速度控制在 3~4 °C/min 时，可抑制网状碳化物产生，降低热应力，减少裂纹缺陷，提高轴承钢的组织性能；热装与冷装对材料的金相组织没有显著影响，实际生产中建议采用热装的入炉方式。

随着国内外经济形势和工业技术的进步，高技术含量高附加值的特种钢材近年来得到钢铁企业的高度重视，并迎来了很大的发展。然而，受制于生产经验、技术积累、装备水平差异等因素，生产工艺需要不断完善。产品的生产初期也常伴有质量问题，如微裂纹和断裂等缺陷^[1]，严重影响了正常的生产节奏和高附加值产品的开发。在产品整个工艺过程中，炼钢、加热和轧制等阶段，都会对最终产品的质量产生不同程度的影响，其中钢坯从连铸到加热炉运输过程中的冷却速度是产生产品缺陷的一个关键因素，冷却速度会影响到组织成相，而不当的组织与加热过程中热应力的叠加是裂纹和断裂产生

的主要原因^[2-3]。为此，本文以 GCr15 轴承钢为研究对象，以其组织性能和热应力为指标，对入炉温度和冷却速度进行了研究，分析不同生产工艺参数下的金相组织和热应力，确定合理的生产工艺参数，为建立连铸坯传热过程的数学模型和合理装炉方式提供一定的技术支持。

实验

实验材料取自现场冶炼的 GCr15 轴承钢连铸方坯。连铸过程采用 3 种不同的冷却速度（0.97、1.94、3.89 °C/min），入炉采用热装（600 °C）和冷装（环境温度）2 种方式。连铸坯实验钢样经研

作者单位：1. 安徽长江钢铁股份有限公司，安徽 马鞍山 243100；2. 安徽工业大学能源与环境学院，安徽 马鞍山 243002；3. 安徽工业大学冶金工程学院，安徽 马鞍山 243032

磨、抛光、侵蚀并清洗、吹干，在金相显微镜下观察显微组织并测量铁素体晶粒尺寸。GCr15 轴承钢连铸坯规格为 320 mm×480 mm×900 mm，采用 ANSYS 有限元软件进行全模型计算，单元类型选择 Solid70，单元总数为 16986 个。GCr15 轴承钢密度、比热、导热率等热物性参数随温度变化见相关文献资料^[3-4]。

结果分析

冷却速度对 GCr15 组织性能的影响

网状碳化物形成

图 1 为 GCr15 管坯钢连铸坯在 3 种不同冷却速

度从 1200 °C 冷却至 700 °C 下的金相组织。由图 1 可见，当连铸坯以 0.97 °C/min 的冷却速度时，金相组织可观测到明显的网状碳化物，网状碳化物较为粗大且连续；随着冷却速度增加到 1.94 °C/min 时，析出的网状碳化物明显减少，且变得更为细小不连续；冷却速度进一步增加到 3.89 °C/min 时基本没有网状碳化物的形成。由此表明，冷却速度对轴承钢中网状碳化物^[5]的析出具有显著的影响，随着冷却速度的提高，网状碳化物（如下图中白色网格状）的析出也逐步减少，当冷却速度达到一定的数值时就可以完全抑制网状碳化物的形成。因此，对于 GCr15 连铸坯，将冷却速度控制在 3~4 °C/min，可抑制网状碳化物形成。

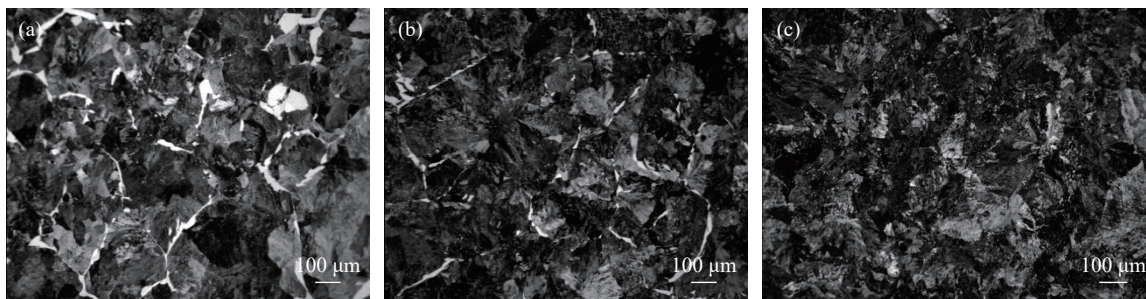


图 1 不同冷却速率下 GCr15 连铸坯的金相组织: (a) 0.97 °C/min; (b) 1.94 °C/min; (c) 3.89 °C/min

网状碳化物析出的临界温度区间

图 2 为 GCr15 轴承钢连铸坯以 0.97 °C/min 的冷却速率缓冷至不同温度的金相组织。从图 2 可看

出，GCr15 轴承钢在 930 °C 时开始析出碳化物；在 930~850 °C 之间有少量碳化物析出，表现为沿晶界分布呈不连续的细小颗粒状；在 850~750 °C 开始大

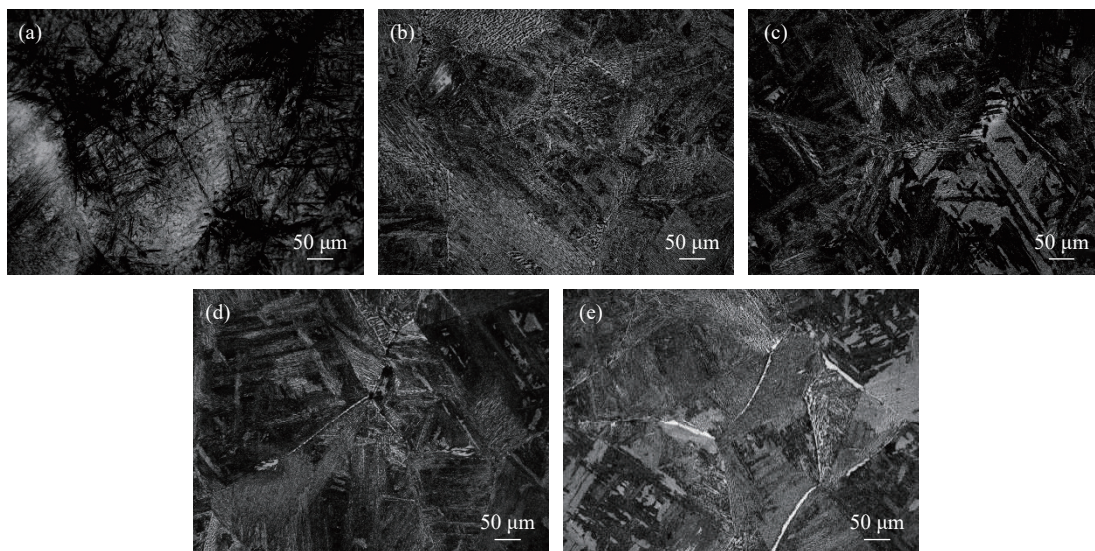


图 2 缓冷至不同温度下 GCr15 轴承钢的网状碳化物: (a) 950 °C; (b) 930 °C; (c) 900 °C; (d) 850 °C; (e) 750 °C

量析出碳化物,形成比较粗大且连续的网状。由此,可判定 930℃ 为 GCr15 钢网状碳化物析出的临界温度。

由于先共析渗碳体的析出过程只会发生在渗碳体析出温度 A_{cm} (约 930℃) 和珠光体转变温度 A_1 (约 730℃) 之间^[6-7],因此为了避免网状碳化物的析出,就必须加快此温度区间的冷却速度。为了防止网状碳化物的形成,从 930℃ 开始直到 A_1 温度,应以大于 4℃/min 的冷却速度冷却以抑制先共析渗碳体的形成。在高于 930℃ 和低于 A_1 的温度区间应采用较慢的冷却速度来降低由于内外温差造成

的热应力以减少裂纹形成,同时在珠光体转变时能够形成较大的片层。

➤ 连铸坯热应力

将 GCr15 轴承钢连铸坯(规格为 320 mm×480 mm×900 mm)在 4 种典型冷却工艺,即炉冷(1℃/min)、保温罩缓冷(4℃/min)、空冷(60℃/min)以及水冷(600℃/min)条件下冷却至表面 500℃ 时进行热应力有限元分析,沿连铸坯横截面(320 mm×480 mm)中心到拐角等距离(约 36 mm)取 9 个点,热应力有限元分析结果如图 3 所示。

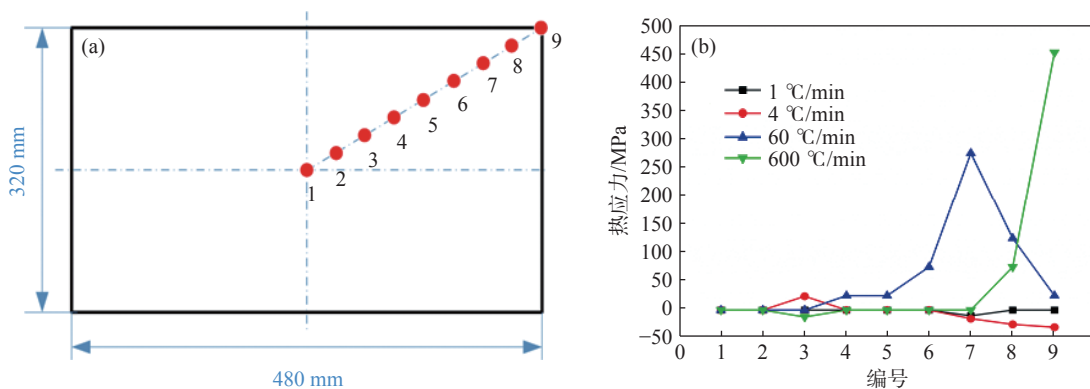


图 3 不同冷却速率下 GCr15 连铸坯的热应力分布: (a) 取样点分布示意图; (b) 热应力分布

由图 3 可以看出,低冷却速度下(1、4℃/min),连铸坯内外热应力较小,几乎为零;随着冷却速度增加(60、600℃/min)时,连铸坯内外热应力急剧增加,最大热应力可达 450 MPa,其强度足以超过该温度下铸坯的高温强度,若此时连铸坯内部存在冶金缺陷,如夹杂物、偏析、疏松等^[8-9],将破坏基体金属的连续性,成为裂纹萌生源,从而造成连铸坯内部和表面质量缺陷。建议将 GCr15 连铸坯的

表面冷却速度控制在 4℃/min 以下,这样在冷却过程中连铸坯的内外温差相对较小,温度分布较为均匀,不会产生较大的热应力导致裂纹的生成。

GCr15 轴承钢入炉工艺分析

图 4 为不同装炉方式下 GCr15 轴承钢的金相组织图。由图 4 可见,600℃ 热装与冷装(即环境温度)的加热工艺制度对钢的组织影响不大。两种加

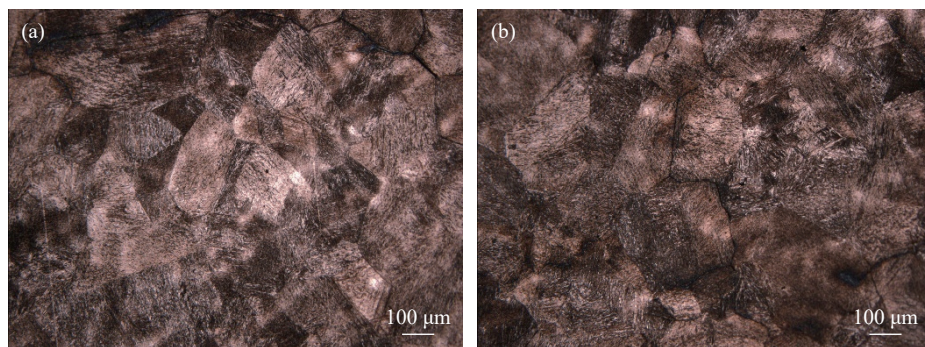


图 4 装炉方式对 GCr15 轴承钢金相组织的影响: (a) 600℃ 热装; (b) 冷装

热方式获得的奥氏体晶粒尺寸相当,并且组织形貌没有明显差别。

从本质上讲,热装热送与冷装的主要差别在于是否经历一次奥氏体的重结晶过程^[10]。若热装(入炉温度)的温度高于950℃,即高于GCr15轴承钢的奥氏体相变温度。由此,在连铸坯冷却到热装进炉,奥氏体完全没有发生相变,组织仍然保持原有的连铸坯状态,这种情况下热装与冷装的组织形态将会有很大的差别,但在现场很难实现这么高的热装温度;当热装的温度在 A_1 和 A_{cm} 的温度之间(730~950℃),这时原有组织中的珠光体会发生分解,形成奥氏体和渗碳体的两相组织,在两相区的停留有利于渗碳体沿晶界的析出而导致晶界网状碳化物,同时由于一次奥氏体和经过相变的二次奥氏体共存,形成混晶,因此应避免此温度区间内的热装工艺;当热装的温度低于 A_1 温度(约730℃)时,由于冷却(缓冷)过程中奥氏体的相变已经完成,这种情况下热装与冷装对材料的金相组织无显著影响。

实际生产过程中的热装一般会在600~700℃,热装与冷装对材料的金相组织没有显著差异,但为了实现生产效率的提高和节约能源^[11]尽可能采用热装方式。

结束语

(1) 冷却速度对GCr15轴承钢中网状碳化物的析出具有明显的作用,建议在加热炉前设置缓冷坑或保温罩将连铸坯的冷却速度控制在3~4℃/min,可抑制网状碳化物形成。

(2) GCr15连铸坯钢网状碳化物析出的临界温度为930℃。从930℃到 A_1 ,应采取较快的冷却速度

(>4℃/min),以抑制先共析渗碳体的形成;而高于930℃和低于 A_1 的温度区间应采用较慢的冷却速度(<4℃/min)以降低由于内外温差造成的热应力,从而减少裂纹形成。

(3) 实际生产过程中热装与冷装的入炉没有显著差异,从提高产效率的提高和节约能源的角度出发,尽可能采用热装的加热方式。

参考文献

- [1] 杨丽霞, 马龙腾, 陈正宗, 等. 9Cr-3W-3Co耐热钢奥氏体晶粒长大行为. 金属热处理, 2018, 43(9): 84
- [2] 祝燮权. 实用金属材料手册. 3版. 上海: 上海科学技术出版社, 2018
- [3] 许学利, 文小明. 低屈强比薄规格管线钢X70 M/A 岛的工艺控制. 金属世界, 2021(3): 62
- [4] 李晓滨, 丁桦, 唐正友, 等. GCr15轴承钢连铸过程中热物性参数的研究. 材料与冶金学报, 2010, 9(4): 241
- [5] 马丙涛, 刘超群, 林洁, 等. GCr15钢加热工艺与液析、带状的关系. 中国冶金, 2012, 22(7): 24
- [6] 宁玉亮, 何康, 刘年富, 等. GCr15轴承钢先共析渗碳体的相变规律. 材料热处理学报, 2019, 40(7): 7
- [7] 徐文胜, 张文征. 先共析渗碳体上形核的珠光体晶体学研究. 金属学报, 2018, 55(4): 496
- [8] 李烈军. 轴承钢组织缺陷的形成机理与控制研究//2015年全国特钢年会. 石家庄, 2015
- [9] 董学涛, 汪海涛, 冯崇伟. GCr15轴承钢表面裂纹缺陷分析. 金属世界, 2017(3): 57
- [10] 余志祥. 连铸坯热送热装技术. 北京: 冶金工业出版社, 2002
- [11] 马佐仓, 孙永喜, 段崇虎, 等. 连铸坯热送热装技术的应用//2005炼钢学术交流会议. 济南, 2005

作者简介: 孙复年(1978—), 男, 安徽省马鞍山市人, 工程师。2000年毕业于安徽冶金职业技术学院电气专业, 主要研究方向: 加热控制。通信地址: 马鞍山市当涂县太白镇安徽长江钢铁公司; E-mail: 1535476119@qq.com。