

RAL · NEU 研究报告 No.0016

轴承钢超快速冷却技术 研究与开发

ZHOUCHEGGANG CHAOKUAI SU LENGQUE JISHU YANJIU YU KAIFA

轧制技术及连轧自动化国家重点实验室
(东北大学)



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

NEU 研究报告 No. 0016

轴承钢超快速冷却技术 研究与开发

轧制技术及连轧自动化国家重点实验室
(东北大学)

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2015

内 容 简 介

本研究报告介绍了东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室近几年来在轴承钢网状碳化物方面的研究工作及在生产实际中应用的研究进展。报告分为三个部分,其中第1章介绍了国内外轴承钢的生产现状及发展趋势;第2~5章介绍了在实验室进行的轴承钢实验研究和理论分析,包括轴承钢连续冷却过程中的相变研究、高温变形后控冷工艺模拟、高温终轧后新型冷却工艺实验及轴承钢棒材超快速冷却过程温度场模拟;第6章和第7章介绍了轴承钢超快速冷却系统温度模型与自动化系统的实现及其超快速冷却工业化生产。报告中的大部分研究成果已经在工业化生产中得到成功应用,并取得了明显的效果。

本书对冶金企业、科研院所从事特殊钢生产,尤其是轴承钢网状碳化物控制的工艺开发和设备研制的人员具有重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

轴承钢超快速冷却技术与开发/轧制技术及连轧自动化国家重点实验室(东北大学)著. —北京:冶金工业出版社, 2015. 10

(RAL·NEU 研究报告)

ISBN 978-7-5024-7066-1

I. ① 轴… II. ① 轧… III. ① 轴承钢—冷却—研究
IV. ① TG142. 41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015) 第 233278 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

策 划 任静波 责任编辑 卢 敏 李 臻 美术编辑 彭子赫

版式设计 孙跃红 责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7066-1

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2015 年 10 月第 1 版, 2015 年 10 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 10.5 印张; 162 千字; 152 页

59.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

研究项目概述

1. 研究项目背景与立题依据

我国的钢产量已经连续多年居世界第一位，成为世界上最大的钢铁生产国。尽管我国已成为世界第一产钢大国，但还不能称为钢铁强国。钢铁强国的标准应该是具有世界上先进的生产能力和技术水平，拥有生产大批量高性能、高技术含量和高附加值产品的能力，在满足国内市场的同时，在国际市场上也占有重要位置。虽然近年来我国的轧制设备得到了飞速发展，但目前生产的高精尖的钢铁产品较少，一些高档次、高附加值、高技术含量的钢材品种大多不能生产，或质量与国外相比还有较大的差距，大量高档钢材仍需进口。因此，要成为钢铁强国，国内的钢铁企业就必须把发展的重点放在优化产品结构、提高质量，开发高技术含量、高附加值的钢铁产品上。

轴承作为重要的基础机械零件，在各行业中的应用十分广泛，其质量直接决定着所装备的机械设备的可靠性、精度、性能以及使用寿命。随着科学技术的发展，轴承的工作环境也越来越恶劣，对轴承的要求也越来越高。因此轴承及轴承钢的生产和发展水平是一个国家机械工业化水平高低的重要标志之一。由于轴承的工作特点是承受强冲击载荷和交变载荷，因此要求轴承钢应具备高硬度、高弹性极限、高接触疲劳强度、良好的韧性、一定的淬透性及在润滑剂中的耐腐蚀性能。为此对轴承钢的化学成分、非金属夹杂物含量和类型、碳化物粒度和分布、脱碳程度等指标的要求都非常严格。

我国已成为世界上的轴承钢生产大国。近几年来国内外对轴承材料和性能的研究取得了一系列的科研成果，使得轴承材料具有更高的纯净度、可靠性和疲劳寿命，而这是冶金工艺的现代化、炉外精炼技术的普遍采用以及应用控轧控冷技术的结果。工业比较发达的瑞典是当今世界上轴承钢生产技术水平较高的国家之一，掌握着轴承钢生产的前沿技术，其制定的国际标准已

经成为生产高质量轴承钢领域普遍使用的标准。

轴承钢中的碳化物是脆性相，常常是裂纹的发源地。碳化物越小、越均匀分布，将大大提高轴承寿命，这已成为国内轴承行业的共识。如何控制轴承网状碳化物及其分布已经成为我国轴承钢研究的热点课题之一。

轴承钢网状碳化物的形成和析出主要在热轧阶段产生，目前普遍采用控制轧制与控制冷却的方法来控制网状碳化物。控轧控冷是将轧件产生塑性变形的热加工成型过程与控制改善钢材组织状态、提高钢材性能的物理冶金过程有机结合起来，采用控轧控冷工艺，通过控制轧制温度、轧制速度、变形量、轧后冷却温度和冷却速度，对钢材进行形变强化和相变强化，既能提高钢材强度，又能改善钢材的韧性。

大量的研究表明，轴承钢网状碳化物析出强烈的温度区间在 $700 \sim 850^{\circ}\text{C}$ ，在生产过程中应当尽量避免轴承钢在该温度区间长时间停留，使得较少网状碳化物析出。钢材的终轧温度对碳化物网状组织有十分明显的影响，随着终轧温度的降低，轴承钢的晶粒更加细化，使得沿晶界析出的一定数量的碳化物分布在较大的晶界面上，这些碳化物网络在球化退火过程中容易溶断，从而得到较低的网状级别。这种控制轧制方法虽然可以降低网状碳化物的级别，但不能完全消除，同时由于轧制温度较低，轧制力明显增加，导卫磨损严重，故障率提高，对轧机能力和电机功率提出了更高的要求。

现在的轴承钢生产线基本都采用全连轧工艺，轧制速度快、产量高，温度控制更加精确，若在成品轧机后对轴承钢进行超快速冷却，则可以缩短轧件在碳化物析出强烈区域的停留时间，减少甚至完全避免碳化物的析出，达到降低网状碳化物级别的目的。

东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室对 GCr15 轴承钢的变形行为和组织转变过程进行了大量的实验研究，同时对棒材超快速冷却工艺开发、设备研制及相关的自动化控制系统积累了一定的经验，为轴承钢超快速冷却技术的工业化应用奠定了基础。

2. 研究进展与成果

轴承钢采用轧后超快速冷却技术可以有效地控制网状碳化物的形成。本课题组在王国栋院士的指导下，对轴承钢超快速冷却条件下的转变机制、不

同工艺参数对网状碳化物的影响等在东北大学 RAL 国家重点实验室开展了大量的实验研究,同时结合生产工艺条件,先后与宝山钢铁股份有限公司特殊钢分公司、江阴兴澄特殊钢有限公司及石家庄钢铁有限责任公司等企业合作,针对生产现场的特殊条件开发出轴承钢棒材超快速冷却的关键设备,将轴承钢的基础理论研究工作成果应用到实际生产中,并取得了明显的经济效益和社会效益。这一研究对于提高我国轴承钢棒材质量、促进我国经济和社会发展具有着重要指导意义。

本项研究工作取得的研究进展和成果主要有以下几个方面:

(1) 对 GCr15 轴承钢的冷却过程进行热模拟实验。研究了连续冷却过程中二次碳化物的析出和珠光体随变形量与冷却速度的变化规律,研究结果表明:

1) GCr15 轴承钢在连续冷却过程中二次碳化物的析出和珠光体的转变,随着变形量增加,二次碳化物和珠光体的开始析出温度升高,珠光体球团直径减小,但变形量变化对二次碳化物厚度影响较小;而低温条件下的变形促进晶界处二次碳化物的碎断,珠光体球团直径和片层间距减小。

2) GCr15 轴承钢在连续冷却过程中,晶界处二次碳化物为 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ 型碳化物,抑制网状二次碳化物析出的临界冷却速度为 $8^\circ\text{C}/\text{s}$;完全发生珠光体转变的临界冷却速度为 $5^\circ\text{C}/\text{s}$,在 $756 \sim 510^\circ\text{C}$ 温度范围内保温 $20 \sim 200\text{s}$ 就可以完全发生珠光体转变;随着连续冷却速度增加,二次碳化物和珠光体开始析出温度降低,晶界处二次碳化物由紧密的网状分布转变为半网状、短条状最后弥散析出,二次碳化物厚度减小,晶界处二次碳化物中 C、Cr 含量减小,珠光体球团直径和片层间距减小,显微硬度值增大,并有退化珠光体生成。

3) 轴承钢高温变形后以一定冷却速度快速冷却到不同温度的等温过程中,随快速冷却阶段冷却速度的增加和等温温度的降低,二次碳化物沿晶界析出减弱,珠光体球团直径减小,珠光体片层结构变细变短,并有退化珠光体生成。以一定冷却速度快速冷却到不同温度进行缓慢冷却过程中,随着缓慢冷却速度的增加,珠光体球团直径减小,晶界处二次碳化物析出减少,缓慢冷却速度过大,将有淬火马氏体生成,晶界处无网状二次碳化物析出,珠光体组织大部分为铁素体和渗碳体层叠生长的片层状结构,有少量退化珠光体生成。

(2) 在实验室条件下对高温终轧后的 GCr15 轴承钢进行快速冷却工艺实验, 分析不同冷却工艺对轴承钢组织性能的影响。研究表明, 轴承钢热轧后经过表面冷却速度大于 $100^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的超快速冷却, 整个断面均为细小珠光体组织, 抑制了网状二次碳化物析出; 由于其心部冷却能力相对表面减弱, 因此心部珠光体片层间距较表层有一定程度增大; 随着终冷温度的降低, 珠光体球团直径和片层间距减小, 网状碳化物级别降低, 其球化退火后的冲击韧性值和硬度增大。

(3) 采用 ANSYS 软件对不同规格轴承钢棒材高温保温后超快速冷却过程的温度场进行模拟, 根据超快速冷却后棒材表面温度不低于马氏体转变温度而返红后最高温度不超过 700°C 的原则, 运用一段式或多段式超快速冷却, 解决了大断面棒材内部不易冷却的难题, 棒材断面不同位置的冷却速度均可以达到抑制网状碳化物析出、残余奥氏体完全发生珠光体转变的要求, 为生产工艺设计和参数的制定提供了指导。

(4) 分别将轴承钢超快速冷却技术成功应用于宝山钢铁股份有限公司特殊钢分公司、江阴兴澄特殊钢有限公司及石家庄钢铁有限责任公司等企业。在不改变原有热连轧生产工艺的基础上, 在连轧机组后安装三组超快速冷却系统, 通过调节水压、喷嘴孔大小以及冷却水管数量, 针对不同规格棒材进行高温终轧后超快速冷却, 其瞬时冷却速度可达到 $400^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 以上。经过超快速冷却后, 不同规格棒材断面不同位置的冷却速度均可以达到抑制网状碳化物析出、残余奥氏体完全发生珠光体转变的要求, 网状碳化物级别均不大于 2 级, 达到轴承行业标准。

(5) 针对棒材超快速冷却系统的特点, 设计了完善的自动化控制系统, 实现了冷却温度的闭环控制, 通过采用流量控制模式, 可对棒材出口温度进行精确设定和控制。

3. 论文与专利

论文:

(1) 孙艳坤, 吴迪. 用超快速冷却新工艺生产 GCr15 轴承钢[J]. 钢铁研究学报, 2009, 21(1):22~25.

(2) 孙艳坤, 吴迪. 超快冷终冷温度对轴承钢棒材组织性能影响[J]. 东北大学学报, 2008, 29(11):1572 ~ 1575.

(3) 孙艳坤, 吴迪. 轴承钢棒材超快速冷却新工艺的应用研究[J]. 钢铁, 2008, 43(7):47 ~ 50.

(4) 赵宪明, 孙艳坤, 吴迪. GCr15 轴承钢高温变形后控冷工艺的研究[J]. 材料科学与工艺, 2010, 18(2):216 ~ 220.

(5) 赵宪明, 孙艳坤, 吴迪. 大断面轴承钢棒材超快速冷却过程温度场模拟[J]. 塑性工程学报, 2010, 17(5):97 ~ 102.

(6) 孙艳坤, 吴迪. 应用超快速冷却技术消除 GCr15 钢网状碳化物[J]. 轴承, 2008, 9: 25, 26, 46.

(7) 孙艳坤, 吴迪. 珠光体共析转变对碳化物粒状倾向的影响[J]. 热加工工艺, 2008, 37 (24): 54 ~ 56.

(8) 赵宪明, 孙艳坤, 王永红. 轴承钢棒材超快速冷却的试验研究[J]. 东北大学学报, 2010, 31 (7): 947 ~ 952.

(9) 孙艳坤, 吴迪. 高碳钢热轧后冷却过程中的组织变化研究[J]. 轧钢, 2005, 25(6): 28 ~ 30.

(10) 何小丽, 赵宪明, 马宝国, 等. GCr15 棒材轧后快冷过程温度场模拟分析[J]. 物理测试, 2008, 26(3): 26 ~ 29.

专利:

赵宪明, 吴迪, 王国栋, 刘相华, 杜林秀. 一种线材和棒材热轧生产用超快速冷却装置, 2008, 中国, ZL200510046822.4.

4. 项目完成人员

主要完成人员	职 称	工 作 单 位
赵宪明	教 授	东北大学 RAL 国家重点实验室
吴 迪	教 授	东北大学 RAL 国家重点实验室
何纯玉	副教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
高俊国	工程师	东北大学 RAL 国家重点实验室
吴志强	讲 师	东北大学 RAL 国家重点实验室
孙艳坤	博士研究生	东北大学 RAL 国家重点实验室
何小丽	硕士研究生	东北大学 RAL 国家重点实验室

5. 报告执笔人

赵宪明、何纯玉。

6. 致谢

在轴承钢的实验研究和现场试轧过程中，实验室王国栋院士和吴迪主任给予了全面指导，为本项目的研究工作指明了方向，尤其在轴承钢超快速冷却过程的碳化物析出控制理论和分析方面起到了关键的作用。

在理论研究和实验室实验过程中，孙艳坤博士做了大量的工作，而本研究报告的很多内容是在其博士论文工作的基础上完成的。

在试验试轧阶段，硕士研究生何小丽对现场的数据采集和组织性能的检验进行了研究，得到了相关的实验数据。

在轴承钢超快速冷却系统开发中，何纯玉副教授、吴志强讲师和高俊国工程师同时开发了计算机控制系统的一级和二级系统，对冷却过程的数学模型进行了开发，为超快速冷却系统的应用和冷却温度的精确控制奠定了基础。

虞晟晨工程师对冷却系统的机械结构进行了设计，并参与全过程的安装和调试，使得项目顺利得到了现场应用。

在此向所有为轴承钢超快速冷却项目做出贡献的各位老师和同学表示衷心的感谢。

目 录

摘要	1
1 绪论	4
1.1 轴承钢的质量控制	4
1.1.1 非金属夹杂物水平	5
1.1.2 碳化物的控制	5
1.2 国内外轴承钢生产现状	9
1.2.1 国外轴承钢生产现状	9
1.2.2 国内轴承钢生产现状	10
1.3 控制轧制和控制冷却技术在轴承钢生产上的应用	13
1.3.1 传统的控制轧制和控制冷却理论	13
1.3.2 GCr15 轴承钢网状碳化物析出理论	13
1.3.3 控制轧制和控制冷却技术在轴承钢生产上的应用	15
1.4 超快速冷却技术的研究现状和发展趋势	20
1.4.1 超快速冷却工艺特征	21
1.4.2 超快速冷却工艺的应用	21
2 轴承钢连续冷却过程中的相变研究	25
2.1 实验方法	26
2.1.1 实验材料及设备	26
2.1.2 实验方案的制定	27
2.2 实验结果与分析	28
2.2.1 不同变形量条件下 CCT 曲线	28
2.2.2 不同工艺参数对二次碳化物析出的影响	30



2.2.3 不同工艺参数对珠光体转变的影响	43
2.3 小结	53
3 轴承钢高温变形后控冷工艺模拟	55
3.1 实验方法	56
3.1.1 实验材料与装置	56
3.1.2 实验方案	56
3.2 实验结果	58
3.2.1 快冷 + 等温条件下等温时间对相变的影响	58
3.2.2 等温温度对相变的影响	61
3.2.3 快冷冷却速度对等温转变的影响	64
3.2.4 快冷 + 缓冷工艺中缓冷冷却速度对相变的影响	66
3.3 分析与讨论	67
3.3.1 分段冷却过程中二次碳化物的形成	67
3.3.2 分段冷却条件下的珠光体转变	71
3.4 小结	73
4 高温终轧后轴承钢新型冷却工艺实验	75
4.1 实验方法	76
4.1.1 实验材料与设备	76
4.1.2 实验方案	77
4.2 实验结果与分析	78
4.2.1 工艺参数与性能	78
4.2.2 热轧并冷却到室温后的显微组织分析	79
4.2.3 球化退火后组织分析	89
4.3 珠光体球化及抑制机理	91
4.3.1 片状珠光体球化机理	91
4.3.2 通过超快速冷却得到抑制网状碳化物析出的细小珠光体 组织的原理	93

4.4 小结	94
5 不同断面轴承钢棒材超快速冷却过程温度场模拟	96
5.1 实验材料与方法	97
5.2 求解温度场的基本原理	97
5.2.1 传热过程基本方程	97
5.2.2 定解条件	99
5.2.3 有限单元法求解温度场原理	100
5.3 ANSYS 求解温度场过程	102
5.3.1 有限元基本模型的建立	102
5.3.2 材料属性和定解条件的确定	102
5.3.3 有限元模拟流程	104
5.4 轴承钢棒材超快速冷却结果与分析	105
5.4.1 $\phi 30\text{mm}$ 棒材超快速冷却结果分析	105
5.4.2 $\phi 40\text{mm}$ 棒材超快速冷却结果分析	108
5.4.3 $\phi 60\text{mm}$ 棒材超快速冷却结果分析	111
5.5 讨论	118
5.5.1 轴承钢棒材超快速冷却工艺条件下的组织演变	118
5.5.2 轴承钢棒材断面不同位置的冷却规律	120
5.6 小结	121
6 轴承钢超快速冷却系统温度模型与自动化系统的实现	123
6.1 轴承钢超快速冷却数学模型	123
6.1.1 温降差分模型	123
6.1.2 空冷换热系数模型	124
6.1.3 水冷换热系数模型	124
6.1.4 温度滤波方法	125
6.2 过程控制系统开发	125
6.3 小结	130



7 轴承钢棒材超快速冷却工业化生产	131
7.1 化学成分和超快速冷却生产工艺流程	131
7.1.1 化学成分	131
7.1.2 超快速冷却生产设备	132
7.1.3 超快速冷却工艺参数	133
7.2 组织性能检测结果	135
7.2.1 $\phi 30\text{mm}$ 轴承钢棒材工业试验的组织性能分析	136
7.2.2 $\phi 40\text{mm}$ 轴承钢棒材工业试验的组织性能分析	139
7.2.3 $\phi 60\text{mm}$ 轴承钢棒材工业试验的组织性能分析	140
7.2.4 $\phi 60\text{mm}$ 轴承钢棒材工业批量化生产的组织性能分析	144
7.3 小结	145
参考文献	146

摘 要

我国的轴承钢产品质量与世界发达国家相比还有一定的差距。我国国民经济的快速发展对轴承钢的产品质量提出了越来越高的要求，现有的生产工艺已经不能满足发展的需求。本书针对国内某特殊钢棒材厂进行连铸连轧机改造后，轴承钢棒材交货状态网状碳化物大量析出的问题，通过实验室热模拟实验、热轧实验和不同冷却工艺控冷实验，对热轧 GCr15 轴承钢的组织与性能进行了研究。重点分析了不同轧制工艺和冷却工艺参数对 GCr15 轴承钢过共析二次碳化物的析出和珠光体转变的影响，探讨了抑制网状二次碳化物析出得到细小珠光体组织的工艺方法。并在原有连轧生产线上增设超快速冷却系统，于终轧后进行超快速冷却工业实验和大批量工业化生产。研究的主要工作如下：

(1) 在实验室自主研发的热力模拟实验机上对 GCr15 轴承钢进行热模拟实验。高温变形促进 GCr15 轴承钢在连续冷却过程中二次碳化物的析出和珠光体的转变，随着变形量增加，二次碳化物和珠光体的开始析出温度升高，珠光体球团直径减小，但变形量变化对二次碳化物的厚度影响甚微；低温变形促进晶界处二次碳化物的碎断，珠光体球团直径和片层间距减小。

GCr15 轴承钢在连续冷却过程中，从高温到低温的相变产物主要有二次碳化物、珠光体和马氏体，随着冷却速度减小，马氏体转变曲线右侧发生抬高现象；晶界处二次碳化物为 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ 型碳化物，抑制网状二次碳化物析出的临界冷却速度为 $8^\circ\text{C}/\text{s}$ ；完全发生珠光体转变的临界冷却速度为 $5^\circ\text{C}/\text{s}$ ，在 $756 \sim 510^\circ\text{C}$ 温度范围内保温 $20 \sim 200\text{s}$ 就可以完全发生珠光体转变；随着连续冷却速度增加，二次碳化物和珠光体的开始析出温度降低，晶界处的二次碳化物由紧密的网状分布转变为半网状、短条状，最后弥散析出，二次碳化物厚度减小，晶界处二次碳化物中 C、Cr 含量减小，珠光体的球团直径和片层间距减小，显微硬度值增大，并有退化珠光体生成。

(2) 在热力模拟实验机上对 GCr15 轴承钢进行高温变形后控冷工艺模拟。GCr15 轴承钢高温变形后以一定冷却速度快速冷却到不同温度的等温过程中, 随等温时间延长, 室温组织中珠光体含量增多的同时, 晶界处二次碳化物析出趋势增大。随快速冷却阶段冷却速度的增加和等温温度的降低, 二次碳化物沿晶界析出减弱, 珠光体球团直径减小, 珠光体片层结构变细变短, 并有退化珠光体生成。以一定冷却速度快速冷却到不同温度进行缓慢冷却过程中, 随着缓慢冷却速度的增加, 珠光体球团直径减小, 晶界处二次碳化物析出减少, 缓慢冷却速度过大, 将有淬火马氏体生成, 晶界处无网状二次碳化物析出, 珠光体组织大部分为铁素体和渗碳体层叠生长的片层状结构, 有少量退化珠光体生成。通过制定不同温度区间的冷却工艺, 增大快冷段冷却速度并配合以合理的缓冷段冷却速度, 就可以达到抑制网状碳化物析出并得到细小片层珠光体的目的。

(3) 在实验室条件下对高温终轧后的 GCr15 轴承钢进行新型冷却工艺实验, 分析不同冷却工艺对轴承钢组织性能的影响。轴承钢热轧后在常规冷却过程中, 表面冷却速度较大, 得到了抑制网状碳化物析出的珠光体组织, 但内部由于冷却能力不足, 室温组织为沿晶界析出的网状二次碳化物和粗大珠光体组织。轴承钢热轧后经过表面冷却速度大于 $100^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的超快速冷却, 整个断面均为抑制了网状二次碳化物析出的细小珠光体组织, 说明其内外部均达到了抑制网状碳化物析出的理想冷却速度; 由于其心部冷却能力相对表面减弱, 因此心部珠光体片层间距较表层有一定程度增大; 随着终冷温度的降低, 珠光体球团直径和片层间距减小, 网状碳化物级别降低, 其球化退火后的冲击韧性值和硬度增大。

(4) 对不同规格轴承钢棒材高温保温后超快速冷却过程的温度场进行模拟, 分析超快速冷却过程中, 棒材断面不同位置温度和冷却速度变化。采用 ANSYS 软件对超快速冷却过程中棒材断面进行温度场分析的过程中, 采用计算超快速冷却终冷温度与实测值一致时停止计算的途径来确认换热系数的较精确值。

对于不同规格的轴承钢棒材, 根据超快速冷却后棒材表面温度不低于马氏体转变温度, 而返红后最高温度不超过 700°C 的原则, 运用一段式或多段式超快速冷却, 解决了大断面棒材内部不易冷却的难题, 棒材断面不同位置

的冷却速度均可以达到抑制网状碳化物析出、残余奥氏体完全发生珠光体转变的要求。

(5) 在不改变原有热连轧生产工艺的基础上,在连轧机组后安装三组超快速冷却系统,通过调节水压、喷嘴孔大小以及开水箱个数,针对不同规格棒材进行高温终轧后的超快速冷却,其瞬时冷却速度可达到 $400^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 以上。经过超快速冷却后,不同规格棒材断面不同位置的冷却速度均可以达到抑制网状碳化物析出、残余奥氏体完全发生珠光体转变的冷却速度要求,网状碳化物级别均不大于 2 级,达到轴承行业标准。

(6) 针对棒材超快速冷却系统的特点,设计了完善的自动化控制系统,实现了冷却温度的闭环控制,通过采用流量控制模式,可对棒材出口温度进行精确设定和控制。

轴承钢棒材超快速冷却工艺的应用解决了不同断面轴承钢棒材高温终轧后网状碳化物级别超标的问题,不仅可以得到抑制网状碳化物析出的细小珠光体组织,利于下一步球化退火工艺,而且保证了连轧生产线的轧制速度和避免待温工序,提高生产效率,使企业取得较大经济效益。这一研究对于提高我国轴承钢棒材质量、促进我国经济和社会发展具有重要的指导意义。

关键词: GCr15 轴承钢; CCT 曲线; 片层珠光体; 过共析二次碳化物; 网状级别; 超快速冷却

1 绪 论

我国的钢铁产量已多年位居世界第一，但是钢铁产业的技术水平与国际先进水平相比还有较大差距，技术含量高、附加值高的合金钢、高强度钢等高端产品比例比较低，我国钢铁行业尚有较大的发展空间。随着国民经济的发展，各行业对钢铁工业提出越来越高的要求。在合金钢领域内，GCr15 轴承钢是检验项目多、质量要求严、生产难度大的钢种之一，用其制作的滚动轴承，在使用中要求抗压、耐磨损、抗疲劳、耐腐蚀和工作寿命长；除了制作滚动轴承外，目前它还广泛用于制造各类工具和耐磨零件。

轴承广泛应用到国民经济各个部门^[1~3]，每个国家轴承的需求量与国民生产总值保持一定的关系。如日本、美国轴承的总需求量大约分别是国民生产总值的 0.11% 和 0.13%，从某种程度上讲，轴承的产量和质量制约着国民经济的发展、国防建设及科学技术现代化的速度和进程。而轴承钢的生产和进步直接影响到轴承工业的发展。工业发达国家历来都十分重视轴承钢的生产、质量、科研及开发工作^[4,5]。随着科学技术的不断发展，轴承的应用范围越来越广泛，其应用环境也日趋恶劣，对轴承钢的要求也越来越高，提高轴承钢的内在质量和疲劳寿命是冶金及机械行业长期以来的目标，为此国内外钢铁行业工作者一直进行着不懈的努力。

1.1 轴承钢的质量控制

为了提高轴承钢的质量，保证其具有较高的疲劳强度、抗压强度、表面硬度和较长的使用寿命，一定要提高钢材的纯净度和钢中碳化物的均匀化程度^[6]。所谓纯净度主要是指材料中夹杂物的含量、夹杂物类型及气体含量；而碳化物的形状、大小和分布的均匀化程度，是决定轴承钢质量的另一个重要标准。