DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.07.027

X80管线钢宽厚板坯质量研究

高　燕[1],姜金星[1],左秀荣[2],姬颍伦[2],王慧慧[2]
(1.南京钢铁股份有限公司,江苏 南京 210035;2.郑州大学 材料物理教育部重点实验室,河南 郑州 450052)

摘　要:采用等离子体发射光谱仪、金相显微镜、显微硬度仪研究了X80宽厚板坯厚度方向化学成分、微观组织、硬度的变化规律。研究表明:各元素在白亮带区域发生了负偏析,铸坯中心偏析较轻。Si、Mn、Cr、Cu、Mo、Nb在铸坯厚度方向分布均匀,C、Ni在内弧侧白亮带的上部发生明显的正偏析,在内弧侧白亮带的下部发生负偏析。其它元素在白亮带位置发生了明显的负偏析,白亮带处硬度值显著降低。铸坯中心是最后凝固区域,冷却速度降低导致这个区域的晶粒比较粗大造成铸坯中心处硬度标准偏差较大;在上部靠近内弧侧白亮带处,C、Ni等元素富集导致硬度值异常升高。

关键词:X80管线钢;板坯;偏析;白亮带;微观组织;硬度

中图分类号:TF777.1;TG115　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)07-0740-05

Study on the Quality of Wide and Thick X80 Pipeline Steel Billet

GAO Yan[1], JIANG Jinxing[1], ZUO Xiurong[2], JI Yinglun[2], WANG Huihui[2]
(1. Nanjing Iron and Steel Co., Ltd., Nanjing 210035, China; 2. Key Laboratory of Material Physics, Ministry of Education, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Chemical composition, microstructure and hardness of the slab with the change of thickness were studied by inductively coupled plasma-atomic (optical) emission spectrometry, metallographic microscopy and microhardness tester. Research shows that negative segregation was produced in white band layer, resulting obvious decrease in hardness. Positive segregation layer of C and Ni was located above white band layers in inner arc, and negative segregation layer of C and Ni was located below white band layers. The internal segregation is not serious. Si, Mn, Cr, Cu, Mo and Nb distributed homogeneously in thickness direction. Standard deviation of hardness in billet center was higher than other location. The billet center was the final solidification zone, cooling rate decrease in this zone resulted coarse grains. Positive segregation layer of C and Ni located above white band layers in inner arc resulted the highest hardness in thickness direction.

Key words: X80 pipeline steel; continuous casting slab; segregation; white band; microstructure; hardness

海洋钻井平台、造船、超高层建筑、大型桥梁、大口径石油天燃气输送管线、大型压力容器和储罐、核能对高等级宽厚板需求量较高。高品质无缺陷的宽厚板坯连铸生产是高等级宽厚板的质量保证。随着高寒地带油气田的开发,输送石油、天然气用管线距离急剧增加,管线厚度与口径也随之增加,对管线钢低温韧性的要求也越来越苛刻[1-3]。管线钢铸坯的化学成分、洁净度、组织、中心偏析等因素对铸坯的综合性能,以及后续板材的化学成分分布、组织变化、低温韧性等有直接影响,因此确保铸坯化学成分均匀,控制铸坯偏析有重要意义。

本文以X80宽厚板坯为研究对象,采用IRIS intrepid ⅡXSP型等离子体发射光谱仪、金相显微镜、显微硬度仪研究了铸坯厚度方向化学成分、微观组织、硬度的变化规律,为铸坯质量控制奠定基础。

1　实验过程及实验方案

以国内某钢厂生产的320 mm×2 730 mm规格的X80连铸坯为研究对象,化学成分如表1所示。为保证X80管线钢良好的韧性和焊接性能,采用低碳设计。Mn可以通过固溶强化提高管线钢的强度,同时能限制奥氏体中Nb的扩散性,使碳化铌更加稳定,从而提高管线钢的韧性。X80管线钢中添加的微合金元素主要为Nb、Ti、Mo等碳氮化物的形成元素,这些微合金元素一方面可以在控轧过程中析出碳氮化物,阻止奥氏体晶粒的生长;另一方面可以延迟形变奥氏体的再结晶,从而通过细晶强化、沉淀硬

表1 X80铸坯的化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical compositions of the X80 pipeline steels

C	Mn	P	S	Si	Ni+Cr+Cu+Mo	Nb+Ti	Ceq	Pcm
0.04	1.63	0.006	0.002	0.20	0.60	0.063	0.38	0.15

收稿日期:2018-10-25

作者简介:高　燕(1976-),江苏南通人,本科,工程师.主要从事管线钢强韧化研究.E-mail:gaoyan1@njsteel.com.cn

化和固溶强化来提高钢的综合性能。

Pcm=C+Si/30+(Mn+Cu+Cr)/20+Ni/60+Mo/15+V/10+5B 计算出 X80 铸坯焊接冷裂纹敏感指数(Pcm)为 0.15。

将铸坯用 10%的硝酸酒精溶液在室温下浸蚀 3 min，进行低倍组织观察。白亮带形貌特征是在酸蚀试样上呈现抗腐蚀能力强，组织致密的白色亮带。测量白亮带距铸坯表面的距离和带的宽度。根据 YB/T 4003-1997《连铸钢板坯低倍组织缺陷评级图》对铸坯的中心疏松评级。用 ϕ1.5 mm 和 ϕ2 mm 钻头分别在白亮带及其内、外侧取样进行 C、Si、Mn、P、S、Ni、Cr、Cu、Mo、Nb、Ti 成分分析。取样位置如图 1 所示。

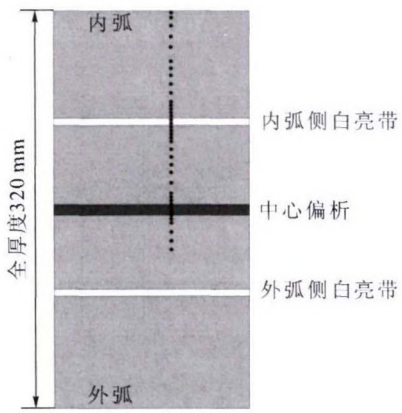


图 1 化学成分分析取样位置

Fig.1 Schematic diagram of the location of chemical composition analysis

利用金相显微镜从内弧到外弧连续观察铸坯厚度方向不同位置横向微观组织。分析铸坯沿厚度方向的微观组织变化规律，以及白亮带组织和正常区域组织差别。硬度试验在 XHD-2000TMSC 数显维氏硬度计上进行，荷载为 2 kg，加载持续时间为 15 s。硬度的测试点包含了试样整个厚度方向。

2 实验结果分析及讨论

2.1 铸坯厚度方向低倍组织变化规律

表 2 为铸坯低倍组织观察结果。等轴晶率为 64.7%。可以清楚的看出在铸坯上有清晰的白亮带区域。测量可知白亮带距内弧 96 mm，白亮带宽度 2 mm，上下白亮带间距 120 mm，铸坯厚度 320 mm。中心偏析 B0.5 级，没有疏松和缩孔；铸坯组织密集，没有发现中间裂纹、角裂、三角区裂纹、针状及蜂窝状气孔。

表2 铸坯低倍组织

Tab.2 Macrostructure of continuous casting slab

位置 /mm	距内弧 0~7	距内弧 7~66	距内弧 66~274	距内弧 274~313	距内弧 315~320
长度 /mm	7	58	207	38	5
铸坯组织	细晶区	柱状晶	粗大等轴晶	柱状晶	细晶区

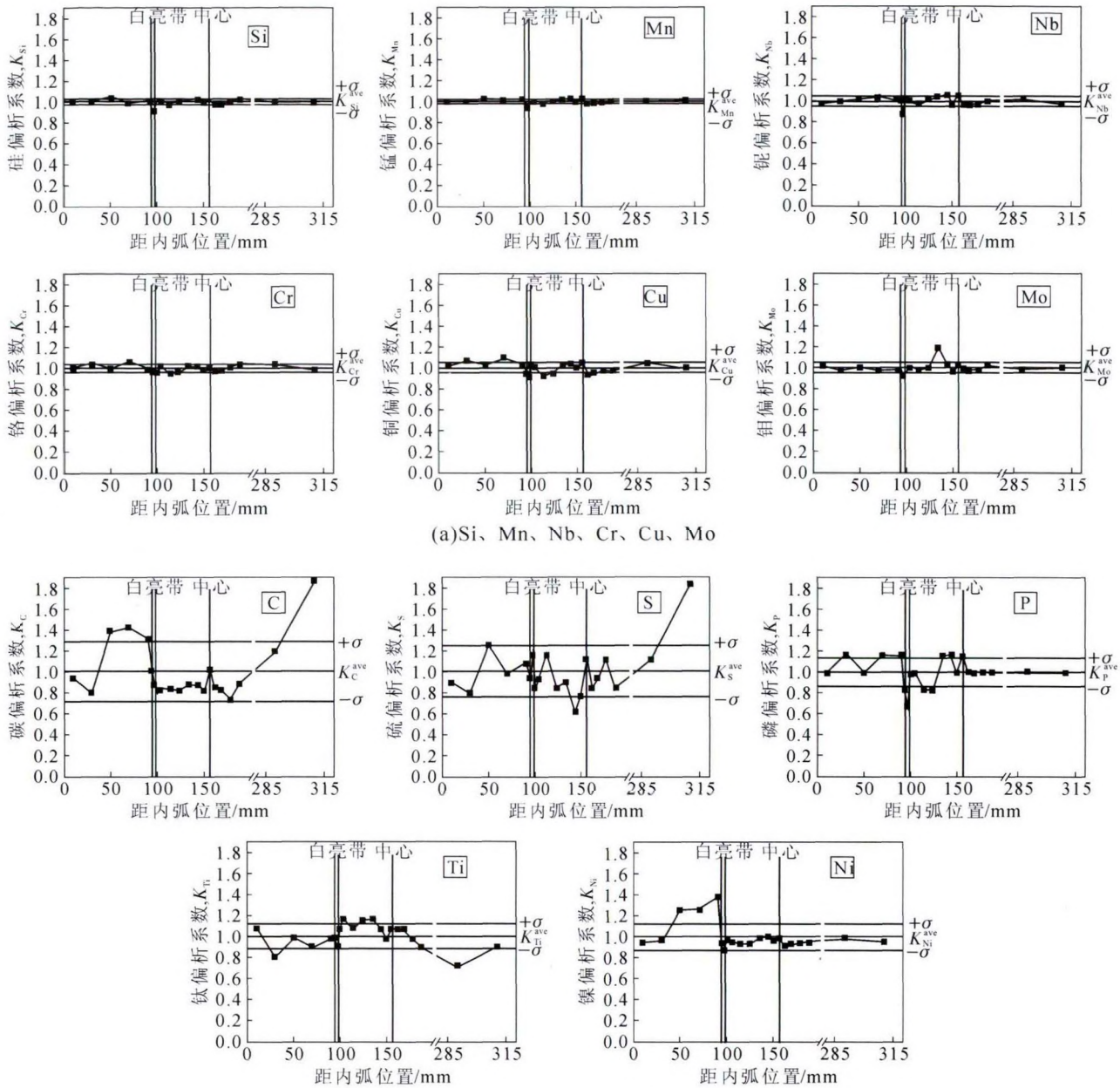
2.2 铸坯厚度方向化学成分变化规律

铸坯中碳的偏析程度通常用偏析系数 K_C 来表示[4]，为取样位置的碳含量 C_0 与铸坯上的平均碳含量 C_B 的比值，即 $K_c=\frac{C_0}{C_B}$。根据铸坯不同厚度的碳含量求出偏析系数 K_C、K_C^{ave}（$K_C^{ave}=\frac{\Sigma K_{C1}+\cdots\cdots+K_{Cn}}{n}$），计算出标准差 σ，然后作出铸坯厚度方向偏析系数曲线。同理，计算出其他元素的偏析系数、标准差，并做出偏析系数曲线。

各元素偏析系数如图 2 所示。从中可见，整个横截面各元素在白亮带区域发生了负偏析，在铸坯中心附近偏析较轻，其中 C、P、S、Ti、Ni 在不同位置含量波动较大，Si、Mn、Cr、Cu、Mo、Nb 波动不明显，分布均匀。C、Ni 在内弧侧白亮带的上部发生明显的正偏析，在内弧侧白亮带的下部发生负偏析，Ti 反之。白亮带形成机理有多种，包括溶质洗涤机理、凝固速率突变机理、液相线速度变化机理、溶质析出-扩散机理、致密低溶质浓度晶杆析出机理等[5]。这些机理从不同的方面说明了白亮带是由于溶质化学成分负偏析所致。在钢坯中，成分偏析是形成带状组织的先决条件，元素偏析越严重，对应的带状组织也越严重，最终会导致管线钢板力学性能恶化[6-8]。铸坯上宏观偏析对枝晶偏析起决定性作用，加快冷速有助于减轻碳、镍元素的偏析。

2.3 铸坯厚度方向微观组织变化

金相显微镜观察铸坯厚度方向的微观组织如图 3 所示。图 3(a)、图 3(b)、图 3(c)、图 3(d)、图 3(e)、图 3(f)分别为铸坯内弧、外弧、内弧侧白亮带上部、白亮带、内弧侧白亮带下部、中心正偏析区域的微观组织。可以看出内、外弧组织比较细小，针状铁素体形貌粗大，这是因为内弧和外弧冷却速度最快，针状铁素体生长速度较快。针状铁素体在长大过程中发生碰撞、交错分布，一定程度上起到细化晶粒的作用[9]。随着向厚度中心靠近，冷速逐渐降低，针状铁素体变短，长宽比变小，同时出现珠光体组织。白亮带位置未发现针状铁素体，组织为块状的铁素体和珠光体，珠光体体积分数较低；靠近内弧侧白亮带的上部组织中铁素体体积分数较低，针状铁素体团加珠光体体积分数较高；靠近内弧侧白亮带的下部组织中铁素体体积分数较内弧侧白亮带上部的组织高，针状铁素体团加珠光体体积分数较低。在铸坯中心位置附近发生正偏析，溶质元素含量较高，在这部分区域出现大面积密集分布的细小针状铁素体。从铸坯表



(a)Si、Mn、Nb、Cr、Cu、Mo

(b)C、S、P、Ni、Ti

图 2 不同位置化学成分偏析系数变化曲线

Fig.2 Segregation coefficient of different element on slab transverse section

面至中心化学成分及冷速的变化造成针状铁素体形态和数量的变化[10]。

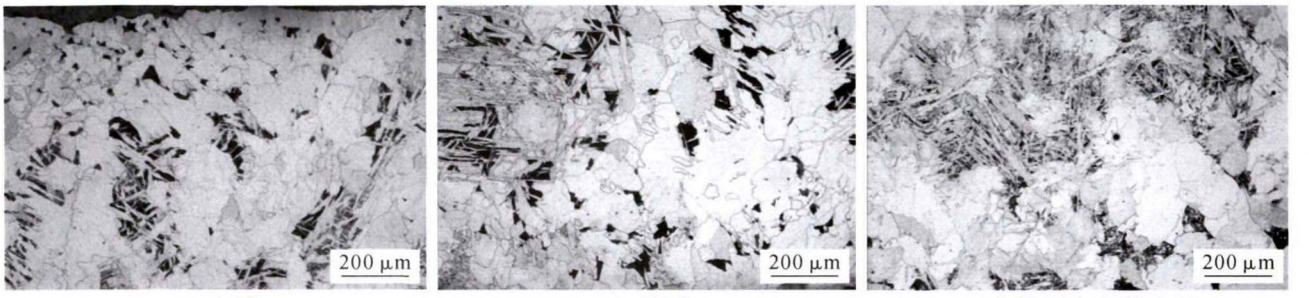
2.4 铸坯厚度方向硬度变化

铸坯内弧和中心针状铁素体显微硬度如图 4 所示。图 5 为铸坯厚度方向硬度的变化。由图 4 可见,铸坯表面针状铁素体团的硬度(226 HV)明显低于中心处(231 HV),主要由于中心处冷速较低,且存在溶质正偏析所致。由图 5 可见,铸坯硬度数值从表面向里逐渐升高,白亮带处硬度数值显著降低,这是由于凝固过程中,溶质元素在白亮带位置发生了负偏析;铸坯中心处硬度数值标准偏差较大,这是由于铸坯中心是最后凝固的区域,冷却速度降低导致这个区域的晶粒比较粗大。在靠近内弧侧白亮带上表处,硬度数值异常升高且差异巨大,是 C、Ni 等元素在此富集导致。

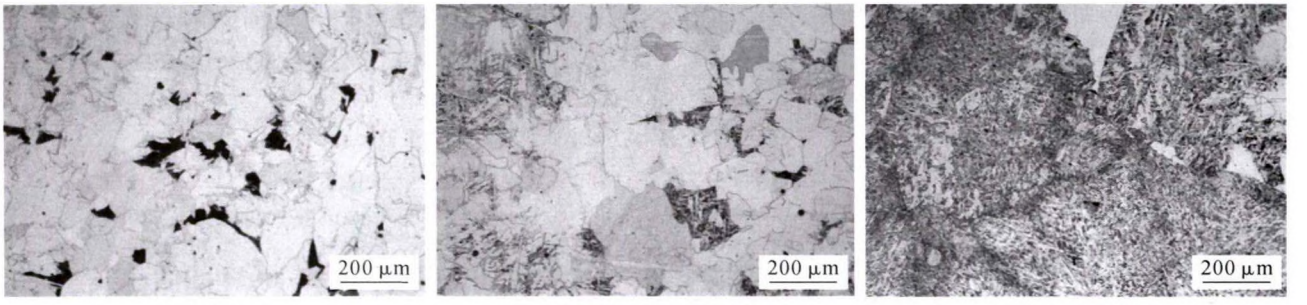
3 结论

(1)各元素在白亮带区域发生了负偏析,在铸坯中心偏析较轻。Si、Mn、Cr、Cu、Mo、Nb 在铸坯厚度方向分布较均匀,C、Ni 在内弧侧白亮带的上部发生明显的正偏析,在内弧侧白亮带的下部发生明显的负偏析,Ti 反之。

(2)铸坯硬度数值从表面向里逐渐升高,白亮带处硬度数值显著降低,这是由于凝固过程中,后凝固区域的溶质元素含量要比先凝固区域的溶质元素含量高,且溶质元素在白亮带位置发生了负偏析;铸坯



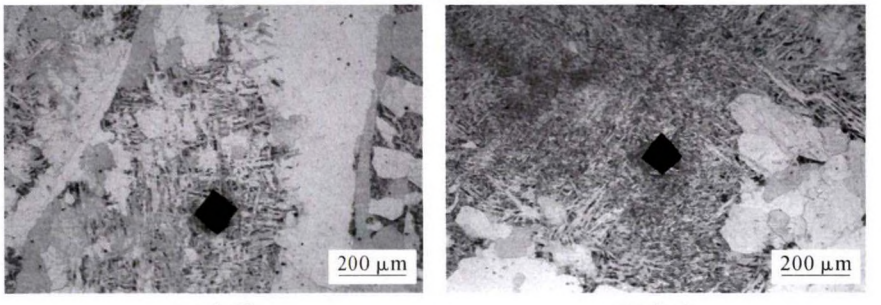
(a)内弧　　(b)外弧　　(c)内弧侧白亮带上部



(d)白亮带　　(e)内弧侧白亮带下部　　(f)中心正偏析区

图 3 铸坯不同厚度组织变化

Fig.3 Microstructure of the slab from the inner arc to the outer arc



(a)内弧　　(b)中心

图 4 铸坯内弧和中心针状铁素体显微硬度

Fig.4 Microhardness of inner arc and center in acicular ferrite

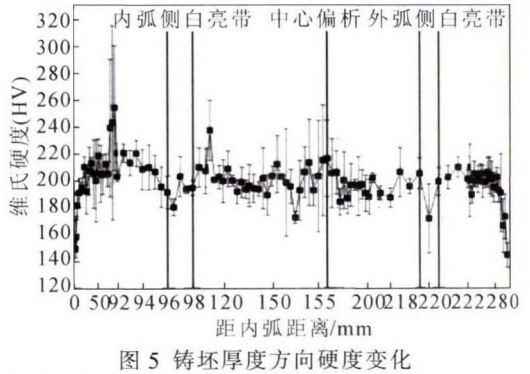


图 5 铸坯厚度方向硬度变化

Fig.5 Microhardness from the inner arc to the outer arc

中心处硬度数值标准偏差较大,这是由于铸坯中心冷却速度降低导致这个区域的晶粒比较粗大;在铸坯靠近内弧侧白亮带上表处,硬度数值异常升高,是 C、Ni 等元素在此富集导致。

参考文献:

[1] Hong S, Shin S Y, Lee S, et al. Effect of Specimen Thickness and Notch Shape on Fracture Modes in Drop Weight Tear Test of API X70 and X80 Linepipe Steels [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42(9): 2619-2632.

[2] Orlov V V, MALYSHEVSKII V A, KHLUSOVA E I, et al. Production Technology for Artic Pipeline and Marine Steel[J]. Steel in Translation, 2014, 44(9): 696-705.

[3] Kang K B, Chon S H, Yoo J Y. Microstructures and Mechanical Properties of Heavy Gauge API-X80 Linepipe Steel for Arctic Application [C]. Proceedings of the Twenty-second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece, 2012.

[4] Li J C, Wang B F, Ma Y L . Effect of complex electromagnetic stirring on inner quality of high carbon steel bloom [J]. Materials Science and Engineering, 2006, 425(1):201-204.

[5] 李红光,祭程,陈亮,等. 连铸坯白亮带形成机理分析探讨[J]. 钢铁,2017,52(8):55-59.

[6] Choudhary S K,Suvankar Ganguly. Morphology and segregation in continuously cast high carbon steel billets [J] . ISIJ International,2007,47(12):1759-1766.

[7] Young M W,Brian G Thomas. Simple model of microsegregation during solidification of steels [J]. Metallurgical and Materials

(下转第 751 页)

3　结论

将喷砂处理后的铝高压输电线表面先经过碱性预镀，再经过酸性化学镀 Ni-P 处理，能够得到表面不平整、厚度为 0.1 mm 的化学镀 Ni-P 涂层。该化学镀层的硬度为 1 100 HV、表面润湿角为 23.5°。喷淋试验表明，经化学镀 Ni-P 处理后高压输电线表面没有形成大的水珠，水容易吸附在多股铝线的绞缝中形成水膜。经分析可知，高硬度、高粗糙度的化学镀 Ni-P 涂层提高了高压输电线表面对液体的表面张力，使其表面润湿性增大，表面不容易产生水珠，降低了高压输电线电晕放电引起的可听噪音。

参考文献：

[1] 冯治国，张爽，杨嘉祥，等. 雨雾天气对导线电晕放电的影响分析[J]. 黑龙江电力, 2010, 32(2): 145-148.

[2] 刘振亚. 特高压交流输电技术研究成果专辑 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

[3] Miyajima K, Tanabe K. Relationship between wetting property of transmission line and audible noise [R]. Japan : IEICE, 2000.

[4] Miyajima K, Tanabe K. Reduction of audible noise by super-water-repellent treatment of transmission line surfaces [R]. Japan: Trans IEE Japan, 2001.

[5] 冯拉俊，雷阿利. 铸铁表面化学镀工艺参数[J]. 铸造技术，2004, 25(7): 498-499.

[6] 顾惕人，朱瑶，李外郎，等. 表面化学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.

[7] 甄开吉. 表面化学[M]. 吉林: 吉林大学出版社, 1995.

[8] 李小兵，刘莹. 固体表面润湿性机理及其模型 [J]. 功能材料, 2007, 38: 3919-3924.

[9] Adamson A W, Gast A P. Physical Chemistry of Surfaces(6thed) [M]. New York: John Wiley & Sons, 1997.

[10] Levine Ira N. Physical Chemistry (5thed) [M]. New York: Mc Graw-Hill Inc., 2001.

[11] Wright M R. An Introduction to Chemical Kinetics [M]. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2004.

（上接第 743 页）

Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 2001, 32(7): 1755-1767.

[8] Zheng S G, Claire Davis, Martin Strangwood. Elemental segregation and subsequent precipitation during solidification of continuous cast Nb-V-Ti high-strength low-alloy steels[J]. Materials Characterization, 2014, 95(3): 94-104.

[9] Wan X L, Wei R, Wu K M. Effect of acicular ferrite formation on grain refinement in the coarse-grained region of heat-affected zone [J]. Materials Characterization, 2010, 61(7): 726-731.

[10] 杨杰，李春福，申文竹. 针状铁素体形成的研究现状及应用前景[J]. 金属热处理，2013, 38(2): 21-24.

新书邮购

《消失模铸造工艺学》

《消失模铸造工艺学》由化学工业出版社2019年5月20日出版发行。（书号：ISBN978-7-122-34175-4）

《消失模铸造工艺学》作者刘立中，历经三十多年现场实践经验的总结和理论的升华。全书总结136个案例，选用1718帧彩色照片，撰写583千字创造性的提出了消失模铸造“三场理论”，详细解读在“流场、热场、负压场”理论指导下的“消失模铸造浇注系统设计原则”，提出了“借用型腔做浇道，极致简化浇注系统”新的理念，在国内外均属首创。奠定了消失模铸造的理论基础，提出了消失模铸造研究与发展的方向。

定价：498元

邮购咨询：李巧凤　　电话/传真：029-83222071　　微信：13991824906