DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.01.026

船体高强钢焊接接头质量控制的研究现状

孟祥海[1,2],王　伟[3],李孟星[1],张宏博[1],李　欣[1],李运刚[1]

(1. 华北理工大学 冶金与能源学院,河北 唐山 063210;2. 唐山工业职业技术学院,河北 唐山 063299;3. 唐山学院,河北 唐山 063000)

摘　要:研究了船体高强钢焊接接头焊缝区、热影响区和母材区对接头性能的影响。探讨了改善焊接接头塑、韧性及强度控制的技术手段。利用计算机模拟焊接区域温度场分布和焊缝金属组织凝固过程,并依据模拟出的最佳条件冶炼钢种进行验证实验。结果表明,这种方法可以有效改善焊接接头质量。船体高强钢焊接与计算机模拟相结合是未来的发展方向。

关键词:高强钢;热影响区;计算机模拟

中图分类号:TG407　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)01-0101-05

Research Status of Quality Control of Hull High Strength Steel Welding Joints

MENG Xianghai[1,2], WANG Wei[3], LI Mengxing[1], ZHANG Hongbo[1], LI Xin[1], LI Yungang[1]

(1. School of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China; 2. Tangshan Polytechnic College, Tangshan 063299, China; 3. Tangshan University, Tangshan 063000, China)

Abstract: The effect of welding line zone, heat affected zone and matrix materials zone on the welding joint performance of hull high strength steel was studied. The technical means of improving the plastic, toughness and strength control of welded joints were discussed. The temperature field distribution and solidification process of welding metal microstructure were simulated by computer, and according to the simulation of the best conditions for the smelting of steel species verification experiments. The results show that this method can effectively improve the quality of welded joints. Welding and computer simulation of high strength steel hull is the future development direction.

Key words: high strength steel; heat affected zone; computer simulation

现代船体高强度钢正向着高强度、高韧性和易焊接性方向发展[1]。“十三五计划”中提出,下一步应加快我国造船产业转型升级和创新。船舶产量要达到全球份额40%以上;高技术船舶产品的占有率要达到国际市场的30%以上是“十三五计划”期间的奋斗目标。船体高强钢焊接技术是当下造船行业中的重要技术之一,而我国船体高强钢的焊接制造技术明显落后于发达国家,差距较大,难以满足国内造船行业和参与国际竞争的需要,因此如何保证船体高强钢焊接后接头的综合性能和降低焊接成本,成为船体高强度钢研究的热点问题[2-4]。本文分析了焊接方法、焊接工艺及焊接用的填充材料的发展趋势,并且对焊接接头的焊缝金属区、热影响区和母材区进行分析,探讨了其存在的关键问题与发展方向。

1　影响因素

1.1　焊接方法

通常情况下,国内船体高强钢的焊接方法主要有SMAW (手工电弧焊)、SAW (埋弧自动焊)、FCW (药芯焊丝电弧焊)、GTAW(钨极氩弧焊)、EGW(气电立焊)、FCB(焊剂铜衬垫单面焊)等[5]。目前,国内造船产业普遍使用的焊接方式是手工电焊、埋弧自动焊和CO_2半自动气体保护焊[6]。考虑到船体结构的大型化和复杂化,船体很多方面需要手工电弧焊,如吊耳、工装、修补和狭小空间等方面,这就很难完全自动化,降低了焊接效率。而且焊接接头的性能受焊接工艺的影响较大,所以焊接时必须考虑其焊接工艺,国内常用焊接方法的焊接工艺正臻于成熟。但国内焊接技术整体水平还有待提高。

目前,韩国浦项制铁公司、新日本制铁公司已经掌握钢铁材料的先进焊接制造技术。Lee[7]分别采用

收稿日期:2018-09-04
基金项目:河北省高层次(三三三人才工程)人才资助项目(A201500121);国家自然科学基金(51474088)
作者简介:孟祥海(1983-),河北唐山人,副教授.研究方向:熔盐电沉积.电话:15511529311,
E-mail:1114118094@qq.com
通讯作者:王　伟(1983-),女,硕士,讲师.研究方向:机械设计制造及焊接工装夹具设计.电话:13363365154,
E-mail:46957162@qq.com

几种焊接方法对高强钢进行试验，包括激光焊、钨极惰性气体(氩弧焊)焊接和金属活性气体(MAG)焊接，试验结果表明，获得焊缝组织及综合力学性能最优的为激光焊。之后最负盛名的激光电弧复合焊接技术在船舶行业被提出，并已经在工厂进行了实际应用，Atabaki[8]采用该焊接技术对高强钢进行焊接试验，结果表明，焊缝的组织及综合力学性能都很好。

1.2 焊接工艺

焊接工艺一般包含制定施工顺序、选择焊接线能、预热温度、焊后后热及焊后热处理等。为了改善焊接结构的应力状态分布，防止结晶裂纹，应制定合理的施焊顺序和适当的焊缝位置。为了有效降低裂纹倾向出现，船体高强钢焊接时经常采取焊前预热；并且焊接时还应当注意焊接接头型式，不同的接头型式对接头的受力状态、结晶条件和温度的分布影响也不同，从而影响焊缝结晶裂纹的倾向，并且尽量减少在接头处的应力集中，这也有效的降低裂纹倾向出现；船体高强钢厚板焊接时，常采取多层焊，这比单层焊的裂纹倾向有明显缓和，但应当控制各层的熔深；并且焊接时焊接次序也非常重要，一样的焊接材料和焊接方法，由于不同的焊接次序，可能导致结晶裂纹倾向也不同。在各工艺中，采用最广的是焊前预热工艺，它可以降低焊接残余应力和减小焊接热影响区组织的淬硬性，比较有效的降低焊缝氢致冷裂纹的敏感性等。许红等[9]对Q890/Q960高强钢进行焊接试验，焊后静置冷却48 h后，试验结果表明，未经焊前预热的表面均有裂纹，经100~150 ℃焊前预热的试板未发现裂纹。因此，船体高强结构钢焊接时经常都采取焊前预热减少焊接裂纹的产生[10]。

1.3 焊接填充物

焊接填充物在力学性能指标中需强调两点。

一是焊接填充物的强度，填充金属的强度与母材的匹配有关系。在与母材的匹配中，有焊缝强度比母材高(高强匹配，也叫超强匹配)、焊缝强度与母材相等(等强匹配)与焊缝强度比母材低(低强匹配)。天大张莉教授[11]实验验证了，当母材的抗拉强度略低于填充材料时，在断裂测试中结果表明此时的屈服强度较好。并且在实际生产中要做到等强匹配很难，所以目前船体焊接接头一般是采用高强匹配。但高强匹配过高时，焊缝金属的横向裂纹敏感性就过高[12]。因此，必须控制焊缝金属的屈服强度。若填充物的可塑性较大时，主要是较大强度的母材起作用，即使用低强匹配的填充物可以保证母材的强度；提高焊接接头的塑韧性可以通过一种特殊的方式，即利用强度匹配的方法来降低塑性转变时间线，从而得到有效的改善[13,14]。因此选择焊接填充物时必须依据焊接材料本身具有的强度和塑韧性，才能获得具有较好综合力学性能的焊接接头。对于强度级别比较低的钢种来说一般选用高强匹配材料，只要使用高于母材金属材料强度的2/3的焊缝填充物，就可保证焊接接头的强度很高[15]。

二是关于焊接接头的韧性问题。韧性是材料的断裂前吸收能量和进行塑性变形的能力，所以韧性也对船体的安全有相当大的影响。温度的变化也对材料的韧性有影响，一般温度降低，韧性也降低；下降速度决定材料韧性的好坏，越慢越好，反之亦然。因此，验收焊接材料的韧性质量时检测温度越低就说明焊接接头的安全性就越高[16]。另有很多影响韧性的因素，如细晶强化和少数固溶元素也可以改善韧性，还有此外可降低船体高强钢的韧性和提高船体高强钢的韧脆转变温度的强化元素[17]。

2 组织区域

2.1 焊接金属区

焊接金属区经历加热熔化、凝固结晶以及固态相变3个阶段，它是在熔焊时由焊接填充物及一部分熔化的母材金属在熔池中混合冷却凝固而成。20世纪80年代Dollby教授在国际焊接会议上提出环宇焊缝金属组织分类的准则，船体高强钢焊缝的形貌结构有针状铁素体、侧板条铁素体和先共析铁素体，并伴有及少量粒状贝氏体、马氏体以与M/A组元等。陈茂爱等[18-20]通过分析M/A组元的形成及冶金学特点，得出了金属焊接时基体组织的主要决定因素有合金元素的种类和焊后的热处理温度下速率的快慢。其总体趋势是随着焊缝金属合金化程度提高，伴随焊缝中针状铁素体含量增多，而侧板条铁素体、先共析铁素体含量恰恰相反。当焊缝合金化增加到某指定的程度时，就可得到全部的针状铁素体，并且清华大学陈伯氢教授[21]提出焊缝金属中针状铁素体含量达到100%后，还可通过细化针状铁素体进一步提高焊缝的强韧性。但是若焊缝合金化超过一定程度，则可能产生贝氏体或者马氏体组织。

近几年来，船体高强钢焊缝金属韧性研究成果是突破性的，结果表明，针状铁素体是可以改善原始焊缝金属的低温冲击韧度的。针状铁素体是通过切变机理形核及长大，其转变温度在500 ℃左右，并伴随产生大量的位错和剧烈的塑性变形，其位错密度高达1 023 m^{-2}左右，远高于其他形式的铁素体[22]。因

此，焊缝金属中含针状铁素体的量越高，越能显著提高其低温冲击韧度。

2.2 热影响区

焊接热影响区是指焊缝两侧在焊接热循环作用下组织和性能发生明显变化的母材金属区域[23]。由于热影响区不同部位受到的热循环作用不同，导致热影响区的晶粒大小、组织和性能与距焊缝的远近不同而产生明显的差异，可能使得热影响区成为整个焊接接头中性能薄弱的区域。因此，为了解决焊接问题并提高焊接质量，对焊接热影响区的晶粒大小、组织和性能在焊接热循环作用下的变化规律的研究很有意义[24]。目前有研究表明，船体高强钢的热影响区中可获得针状铁素体组织，并且当热影响区中的针状铁素体达到一定含量时，就会使焊接热影响区具有良好的强韧性[25]。Sudarsanam 和 Miyannoto 等[26,27]通过增加晶内形核部位和保持焊缝金属的冷却速度的方法，来提高针状铁素体的含量，结果表明，某些非金属夹杂物和细小的奥氏体晶粒对针状铁素体的形成起了重大作用。总之，在船体高强钢焊接过程中，其热影响区不同部位受到焊接热循环的作用效果不同，导致其晶粒大小、组织和性能也不同[28]。

2.3 母材区

母材原始状态对焊接接头的性能存在着显著影响。钢的所有化学成分中，对焊接后钢的塑性转变温度影响最大的是碳。有研究表明：钢每增加 0.1%的含碳量，其转变温度大约提高 31 ℃。Mn 和 Ni 是有利成分，对保持低的塑性转变温度；而 Si 是不利的，它提高韧脆转变温度。在焊接条件下，焊前经过正火处理的钢，充分脱氧的钢，其塑性转变温度比半镇静钢低。钢的热过程和机加工过程也对焊接后高强钢的塑性转变温度有显的影响。焊接前经过正火或调制处理的高强钢，其焊前和焊后的缺口韧性相比轧制状态的板材都得到了改善。

3 计算机模拟

计算机模拟是包含模拟焊接热过程、焊接冶金过程以及焊接接头凝固过程等多个过程的技术手段。焊接是一个复杂的过程，包括传热、冶金及力学等学科。一旦在焊接过程中实现了计算机模拟，就能通过计算机模拟软件来确定焊接过程中的最佳设计方案、工艺方法和焊接参数。此外，计算机模拟还应用于分析焊接结构及检测焊接接头的强度和性能等问题上。在此仅着重介绍计算机模拟焊接区域温度场分布和模拟焊缝金属组织凝固过程。

近年来，随着计算机科技技术和有限元法的发展，20 世纪末提出了计算机模拟方法，焊接三维数值模拟的研究也成为了焊接领域的前言，这对焊接技术的发展有了质的飞跃[29]。焊接热过程、焊接冶金过程、焊接接头凝固过程的前提是焊接温度场的准确测量[30]。焊接温度场使用有限元法进行计算分析是 20 世纪 70 年代。1975 年有限元法研究焊接温度场的可能性被加拿大的 Poley 和 Hibbert 证实。基于有限元法用 ANSYS 计算机软件模拟分析焊接过程的温度场，其可分为稳态热分析和瞬态热分析。而焊接温度场分析属于的非线性瞬态热分析过程，其步骤可通过此流程图展现（如图 1）[31-33]。

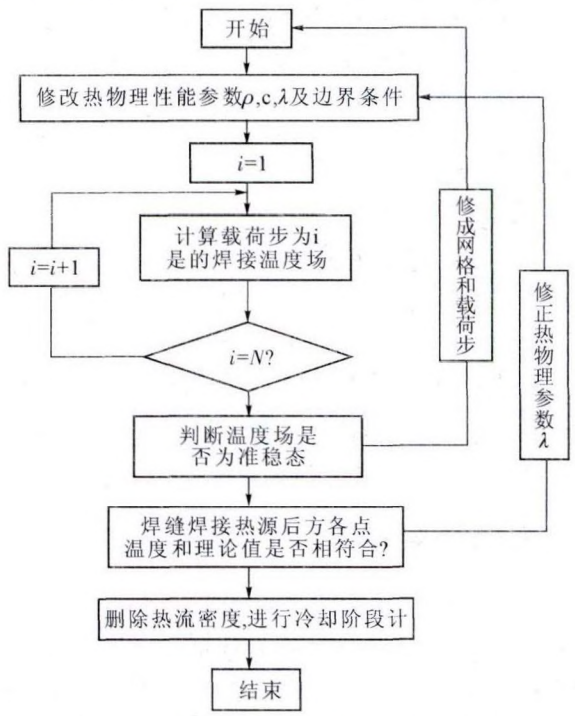


图 1 温度场分析流程图

Fig.1 Flow chart of temperature field analysis

随着日益发展的焊接技术，人们要求的焊接性能越来越高，尤其对船体高强钢的要求，其性能的好坏直接影响船体的安全性，而焊缝组织对焊接性能起着至关重要的作用。近年来，张林[34,35]、Gandin 等[36]采用元胞自动机方法模拟了合金凝固过程；严卫东和 Rappaz 等[37,38]采用凝固温度场模拟和晶粒组织形成模拟相藕合的方法，对高温合金凝固晶粒组织进行了模拟；结果都表明，合金的实际凝固过程与模拟过程相近似，证明模拟可以近似表明晶粒组织凝固过程。然而对焊缝金属组织凝固过程的模拟还不成熟[39,40]。基于发展的要求，为了更深入地研究焊缝金属组织凝固过程，于是建立了焊缝金属组织凝固的元胞自动机模型。图 2 为焊缝金属组织凝固的元胞演化过程的计算的流程图[41]。利用计算机模拟研究

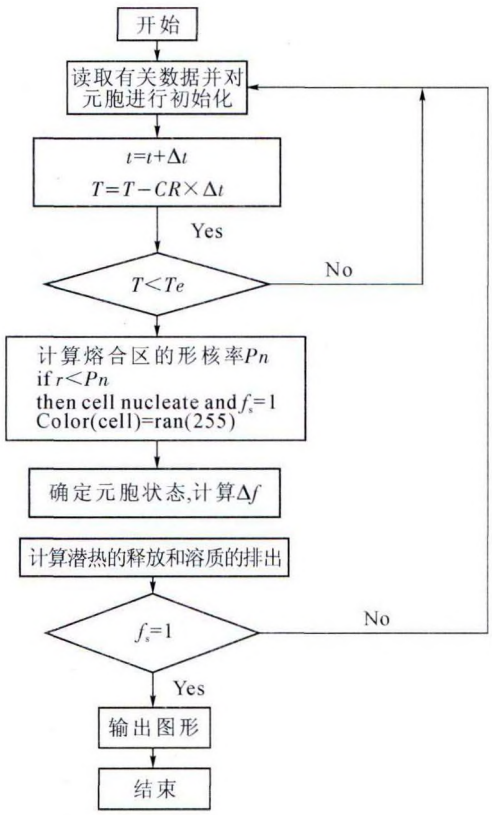


图 2 凝固计算流程图

Fig.2 Flow chart of solidification calculation

焊缝的凝固过程获取良好的焊缝组织,提高焊接性能已是当下不可避免的趋势。

4 结语及展望

由于船体高强钢的焊接部位受到海水持续的腐蚀和冲击,这就要求船体高强钢拥有更高综合性能的焊接热影响区,传统的焊接技术很难以满足焊接 HAZ 韧性的要求。焊接热影响区作为整个焊接接头中性能薄弱的区域,是评测焊接接头质量重要组成部分。焊接热影响区仍达不到高强钢要求,且其综合性能已经满足不了现阶段焊接要求。由于船体的大型化和复杂化,给船体高强钢焊接的实际操作带来了困难。在寻求高质量焊接接头过程中不仅耗时耗力还浪费大量资源。为提高船体建造速度和降低船体建造成本从而提出计算机模拟焊接区域温度场分布和焊缝金属组织凝固过程的计算机模拟。

计算机模拟时代的高速发展,给焊接技术及焊接质量带来了更好的前景。利用计算机对船体高强钢焊缝热影响区域金属相变过程进行模拟,寻找能够阻止晶粒长大或促进晶内铁素体形核的物质,来确定焊接填充物,从而增强焊缝热影响区的塑性、强度,并在实验室冶炼该钢种;采用热模拟试验机按照计算机模拟出的温度场对冶炼的钢种进行热处理,结合光学显微镜和扫描电子显微镜,观察和检测试样处理前后的相变组织,分析其力学综合性能,并找出最佳条件和钢种添加物,再冶炼出该钢进行实际的焊接试验验证,最终确定最佳焊接工艺条件。该种方法能够合理利用计算机模拟、焊接接头冶炼以及模拟焊接过程热处理简化焊接流程,避免了实际船体钢体积大、操作困难等问题;同时能准确检验不同焊接条件下船板钢焊接接头性能,确定最优工艺条件。

然而目前我国焊接模拟水平有限,较国际水平不足,满足不了我国焊接需求。未来我国可以在计算机模拟焊接区域温度场分布及焊接焊缝组织凝固过程有更高的突破。利用计算机模拟技术来优化船体高强钢焊接是未来的发展方向。

参考文献:

[1] 杨才福, 张永权. 新一代易焊接高强度高韧性船体钢的研究[J]. 钢铁,2001, 36(11): 50-54.

[2] 唐卓. 船用厚板高功率激光焊接工艺适应性研究[D]. 上海:上海交通大学,2008.

[3] Liu S, Olson D L. The role of inclusions in controlling HSLA steel weld microstructures [J]. Welding Journal, 1986, 65(6): 139-145.

[4] Zhang H, Lei Y T, Wei J S. Development of High Strength Low Alloy Ship Hull Steel[J]. Steel Construction, 2004, 19(2): 38-42.

[5] 陈和兴,易江龙. 海洋工程焊接技术现状与分析[J]. 中国材料进展, 2015, 34(12): 938-943.

[6] 刘新华. E 级钢埋弧自动焊工艺研究 [J]. 造船技术,2006 (6): 39-41.

[7] Lee J H, Park S H, Kwon H S, et al. Laser, tungsten inert gas, and metal active gas welding of DP780 steel: Comparison of hardness, tensile properties and fatigue resistance [J]. Materials & Design, 2014, 64: 559-563.

[8] Atabaki M M, Ma J, Yang G, et al. Hybrid laser/arc welding of advanced high strength steel in different butt joint configurations[J]. Materials & Design, 2014, 64: 573-576.

[9] 许红,李亚江,马群双,等. 液压支架用 Q890/Q960 高强钢焊接裂纹敏感性研究[J]. 现代焊接,2014(6): 30-33.

[10] 林浩. 高强度船体结构钢焊接性及其焊接裂纹的形成和预防的研究[D]. 上海:上海海事大学,2006.

[11] 张莉,张玉凤,霍立兴. 强度匹配对钢结构梁柱节点断裂行为的影响[J]. 焊接学报. 2004, 25(3): 35-38.

[12] 林云,王元清,张延年,等. 高强度钢及其焊缝断裂韧性的研究进展[J]. 钢结构, 2010: 105-109.

[13] 佐藤邦彦. 焊接接头的强度与设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1983.

[14] 李亚江,邹增大,江全昌. HQ130 低碳耐磨高强钢的组织性能及应用[J]. 钢铁, 2001,36(9): 50-54.

[15] 谭力. 船用钢焊接接头组织及其耐蚀性研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2015.

[16] 桂赤斌. 高强度钢船体焊接材料的使用要求与发展趋势 [J]. 电焊机, 2007, 37(6): 98-101.
[17] 柴锋. 低合金高强度船体钢焊接热影响区韧化机理研究[D]. 上海：上海交通大学, 2008.
[18] 李亚江. 焊接组织性能与质量控制[M]. 北京：化学工业出版社, 2005.
[19] Fairchild, D P Bangaru, N V Koo, et al .A study concerning inter-critical HAZ microstructure and toughness in HSLA steels [J]. Welding Journal,1991, 70(12): 321-325.
[20] 陈茂爱，楼松年，唐逸民. 低合金高强钢 HAZ 中的 MA 组元及其对接头韧性的影响[J]. 焊接研究与声场, 1997, 6(2): 89-93.
[21] 陈伯氢. 焊接冶金原理[M]. 北京：清华大学出版社, 1991.
[22] Huang H H, Tsai W T, Lee J T. The influences of microstructure and composition on the electrochemical behavior of a 516 steel weldment[J]. Corrosion Science, 1994, 36(6):1027-1032.
[23] 徐杰，李朋朋，樊宇，等. 温度对焊接热模拟 X80 管线钢断裂韧性的影响[J]. 焊接学报, 2017, 38: 22-26.
[24] 刘会杰. 焊接冶金与焊接性[M]. 北京：机械工业出版社, 2007.
[25] 高君. 船舶用异种高强钢焊接接头组织及性能研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学, 2012.
[26] Miyannoto G, Shinyoshi T, Yamaguchi J, et al. Crystallography of intragranular ferrite formed on(MnS+V(C,N)) complex precipitate in austenite[J]. Scripta Materialia, 2003, 48: 371-375.
[27] Sudarsanam, Suresh, Babu. The mechanism of acieular fetrite in weld deposits[J]. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2004, 8: 267-271.
[28] 常铁军，谢辅洲，杨世伟. 10NiSCrMoV 钢焊接热模拟热影响区组织和性能[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2002, 23(5): 66-70.
[29] 王长利. 焊接温度场和应力场的数值模拟[D]. 沈阳：沈阳工业大学, 2005.
[30] 吴言高，李午申，邹宏军，等. 焊接数值模拟技术发展现状[J]. 焊接学报, 2002, 3: 89-92.
[31] 王国强. 实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1999.
[32] 龚曙光. ANSYS 工程应用实例解析 [M]. 北京： 机械工业出版社, 2003.
[33] 谭建国. 使用 ANSYS6.0 进行有限元分析[M]. 北京：北京出版社, 2002.
[34] 张林，王元明，张彩碚. Ni 基耐热合金凝固过程的元胞自动机方法模拟[J]. 金属学报, 2001, 37(8): 882-888.
[35] 张林. 元胞自动机方法模拟材料微观结构演化[D]. 沈阳：东北大学, 2002.
[36] Gandin C A, Desbiolles J L, Rappa M. Three-dimensional finie element-cellulare automation model the prediction of solidification grain structures [J]. Metallurgy Materials Transaction, 1999, 30A (2): 3153-3156.
[37] 严卫东，杨爱民，刘汉武. K4169 高温合金凝固晶粒组织的计算机模拟[J]. 特种铸造及有色金属, 2002, 22(4): 26-28.
[38] Rappaz M. Probabilistic modeling of microstructure formation in solidi-fication process [J]. International Materials Reviews, 1989, 34(3): 93.
[39] Grong O. Metallurgical modeling of welding [M]. London: the Institute of Materials, 1994.
[40] Dilthey U, Pavlik V, Reichel T. Mathematical modeling of the weld Phenomena[M]. London: The Institute of Materials, 1997.
[41] 黄安国，余圣甫，李志远. 焊缝金属凝固组织元胞自动机模拟[J]. 焊接学报, 2008, 29(4): 45-51.

（上接第 96 页）

[2] Hiroyukiyasunka. 第四届国际连铸学术会议文集 [C]. 中国金属学会连续铸钢学会. 1988,61.
[3] 竹内英密. 国外连铸新技术(三)[C]. 冶金部情报研究总所. 1985, 95.
[4] 川上公成. 国外连铸新技术(一)[C]. 冶金部情报研究总所. 1982, 291.
[5] 冯科，韩志伟. 板坯结晶器液压振动同步控制模型的优化设计[J]. 铸造技术, 2009, 30(3):1326-1329.
[6] 漆鑫，唐萍，文光华，等. 结晶器振动参数对连铸坯表面质量的影响[J]. 特殊钢, 2004, 25(5):34-37.
[7] 张洪波. 连铸结晶器振动参数优化理论[J]. 连铸, 1995(6):7-11.
[8] 王昌旭. 选择结晶器振动参数的研究[J]. 连铸, 2002(4):1-3.
[9] 蔡娥. 保护渣物化性能对铸坯与结晶器间摩擦的影响 [J]. 保护渣, 2007(1): 35-38.
[10] 林国强，唐萍，孔凡杰，等. 南钢方坯连铸结晶器振动参数优化的研究[J]. 钢铁, 2005, 40(6):27-29.

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

《铸件均衡凝固技术及应用实例》由西安理工大学魏兵教授编著。共 8 章：1、铸铁件均衡凝固与有限补缩；2、铸铁件冒口补缩设计及应用；3、压边浇冒口系统；4、浇注系统大孔出流理论与设计；5、铸件均衡凝固工艺；6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺；7、浇注系统当冒口补缩设计方法；8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书 320 页，特快专递邮购价 226 元。

邮购咨询：李巧凤 029-83222071，技术咨询：13609155628