DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.10.005

钛和铌对高铬钢的组织及性能影响研究

王海艳[1,2],龙　骏[1,2],郑志斌[1,2],郑开宏[1,2]

(1.广东省材料与加工研究所,广东 广州 510650;2.梅州市粤科新材料与绿色制造研究院,广东 梅州 514768)

摘　要:研究了 Ti 和 Nb 对高铬钢显微组织和磨损性能的影响,并对其磨损机理进行了探讨。结果表明,Ti 和 Nb 能细化高铬钢晶粒,使其力学性能和耐冲击磨损性能有效提高。

关键词:钛;铌;高铬钢;组织;性能

中图分类号:TG142;TG113　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)10-1042-05

Study on the Effect of Titanium and Niobium on the Microstructure and Properties of High Chromium Alloy

WANG Haiyan[1,2], LONG Jun[1,2], ZHENG Zhibin[1,2], ZHENG Kaihong[1,2]

(1.Guangdong Institute of Materials and Processing, Guangzhou 510650, China; 2. Institute of Meizhou Yueke New Materials and Green Manufacturing, Meizhou 514768, China)

Abstract: In this paper, when titanium and niobium are added, the high chromium alloy's microstructure and mechanical properties are researched. The results show that the microstructure of high chromium alloy was refined, impact toughness and dynamic impact of anti-abrasion performance were improved.

Key words: titanium; niobium; high chromium alloy; microstructure; properties

高铬钢由于具有优异的耐磨性,被广泛应用于现代工业生产的各个方面,例如水泥、矿山、冶金等领域的破碎用大型球磨机的衬板和磨球[1,2]。然而,现代工业的飞速发展对高铬钢的性能提出了更高的要求[3-7]。如大型球磨机在破碎物料的过程中,衬板受到磨球和物料的反复高能量冲击和磨料磨损作用,工作环境恶劣,导致其衬板容易失效从而频繁更换,既影响生产的正常运行,又增加了操作工人的劳动强度,因此提高衬板在复杂工况条件下的耐磨损性能、延长其使用寿命对实际生产具有重要意义。本研究以大型球磨机衬板用高铬钢为对象,研究了 Ti 元素单独加入以及 Ti 与 Nb 元素同时加入对高铬钢显微组织和性能的影响,并对其模拟工况下的磨损机理进行了初步探讨。

1　试验材料及方法

1.1　试验材料

本研究通过在高铬钢中添加合金元素 Ti、Ti+Nb 后,探索 Ti、Nb 加入对高铬钢显微组织和性能的影响,设计三种对比材料成分如表 1 所示:1#试样为原始成分,2# 试样在 1# 的基础上加入 0.20%~0.40%的 Ti,3# 试样在 1# 的基础上加入0.15%~0.25%的 Ti 和 0.05%~0.15%的 Nb,其它成分相同。

1.2　试验方法

三种成分钢均采用中频感应电炉熔炼,脱氧后在浇包内采用稀土硅铁孕育变质处理,然后浇注于粘土砂砂型中制备 Y 型试样。

热处理使用洛阳市永泰试验电炉厂制造的 KSS-1400 热处理炉进行,热处理加热温度为退火 900~950 ℃,淬火 1 000~1 050 ℃,回火 200~400 ℃。

采用金相显微镜和扫描电镜分析材料显微形貌,通过 SEM 观察材料的动态冲击磨损形貌。

力学性能测试依据国家标准进行,其中冲击试样为无缺口标准夏比试样,尺寸为 10 mm×10 mm×55 mm。使用吴忠材料试验机厂制造的 HR150-A 型洛氏硬度计对试样进行硬度测试。拉伸性能在 Instron Model 5585 材料试验机上进行,拉伸速率为 2 mm/min,拉伸试样据 GB/T228-2002 的规定制作。

实验室模拟冲击磨损试验在 MLD-10 型动载磨料磨损试验机上进行。该试验机可以模拟铸件的使用工况。考虑到大型设备易磨损件所受的冲击载荷较大,故选择试验机的冲击功为 12 J/cm^2,磨料采用180 目精制新会石英砂,下试样旋转速度为 70 转 / 分,

收稿日期:2019-06-212

基金项目:广东省科学院实施创新驱动发展能力建设专项(2018GDASCX-0117);广东省科技计划项目(2018dr005,2018A050506055,2017A070701029)

作者简介:王海艳(1973-),女,河北迁安人,硕士,教授级高工.主要从事金属材料成形与加工方面的工作.
电话:020-61086183,E-mail: whywhyp@163.com

表1 高铬钢设计成分表 w(%)

Tab.1 Designed chemical composition of high chromium steel

试样	C	Cr	Si	Mn	Ti	Nb	P、S	RE	余量
1#	0.9~1.2	10~12	0.4~0.8	0.4~0.8	0	0	≤0.04	微量	Fe
2#	0.9~1.2	10~12	0.4~0.8	0.4~0.8	0.20~0.40	0	≤0.04	微量	Fe
3#	0.9~1.2	10~12	0.4~0.8	0.4~0.8	0.15~0.25	0.05~0.15	≤0.04	微量	Fe

上试样冲击频率为 57 次 /min，上试样从高铬合金铸铁磨球(HRC58)上取样，每实验 30 min 称量一次失重[8-12]。

2　试验结果与分析

2.1　成分分析

取样后，采用光谱分析仪测试铸造试样的化学成分，按质量百分比成分如表 2 所示：

表2 高铬钢成分表 w(%)

Tab.2 Measured chemical composition of high chromium steel

试样	C	Cr	Si	Mn	Ti	Nb	P、S	RE	余量
1#	1.12	11.0	0.73	0.64	0	0	≤0.04	0.3	Fe
2#	0.94	10.2	0.85	0.87	0.33	0	≤0.04	0.3	Fe
3#	0.91	10.1	0.85	0.88	0.25	0.11	≤0.04	0.3	Fe

2.2　显微组织分析

2.2.1　金相分析

图 1 分别为 1#~3# 试样的金相显微组织。由图 1a、b 可知，未添加合金元素 Ti、Nb 的高铬钢铸态组织由球粒状珠光体、奥氏体以及网状分布的碳化物构成。由于合金元素钛能够提高晶粒的粗化温度，细化晶粒，因此添加合金元素 Ti 的 2# 高铬钢热处理后得到尺寸更细小的组织，见图 1c、d。而铌是强碳化物形成元素，加到钢中能与碳形成高熔点的稳定碳化物，在凝固过程中可作为非均质晶核增加形核率、细化组织。同时在奥氏体化温度下，NbC 质点的存在，能阻止奥氏体晶粒的长大，见图 1e、f。综上可知，2#、3# 试样晶粒明显比 1# 细化，共晶碳化物网状断开且部分溶入基体，碳化物尺寸减小并发生球

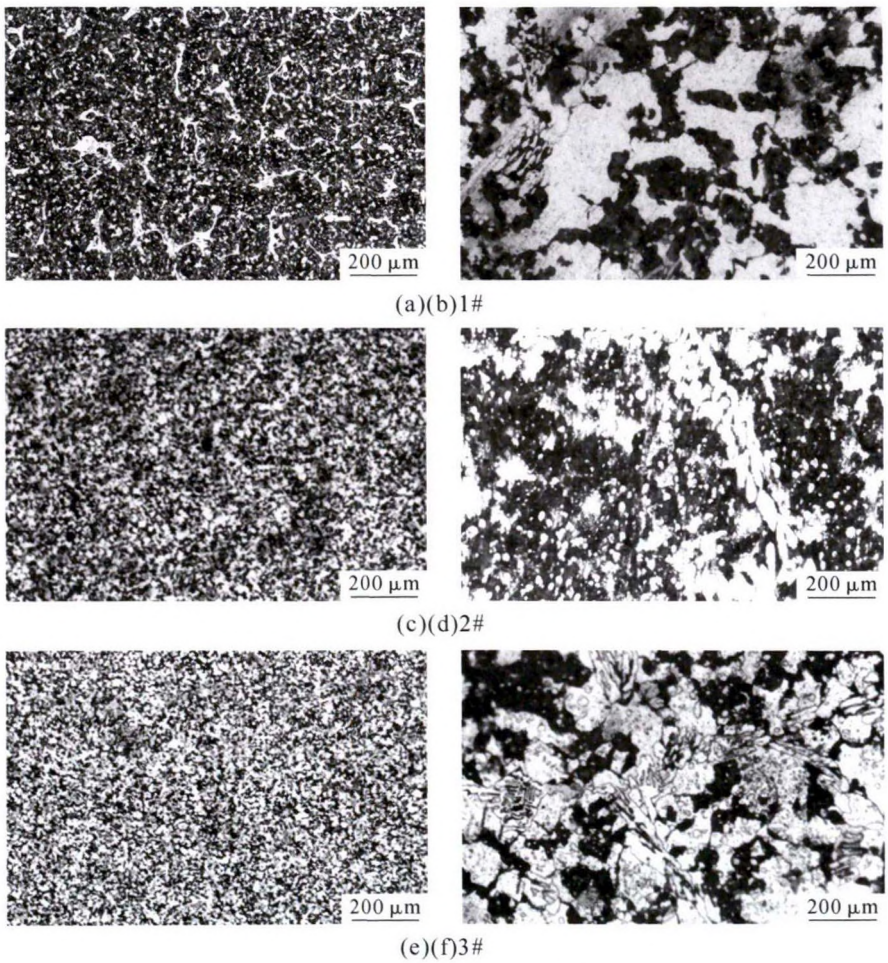


图 1　三种材料的金相显微组织

Fig.1　Microstructure of the three materials

化，热处理后获得以马氏体及残余奥氏体为主的组织，有利于提高其综合力学性能。

2.2.2 扫描电镜分析

图 2 为 1#~3# 试样在扫描电镜下的微观形貌及其相对应特征点的能谱分析图。对比图 2(a)可以发现，Ti 的加入使高铬钢组织中碳化物片层增厚，部分出现断网并出现粒化倾向，碳化物边角亦出现明显钝化或圆整化；同时有细小的二次碳化物析出，这些细小的碳化物能够在高铬钢变形或断裂过程中对位错产生“钉扎”作用，阻碍裂纹的扩展，提高基体的强度和韧性。在高铬钢中同时加入合金元素 Ti 和 Nb 后，高铬钢组织中的晶粒发生进一步细化，但效果不是特别明显，如图 2(c)所示；但随着 Nb 元素的加入，析出的弥散碳化物 NbC 数量明显增多。

2.3 力学性能分析

表 3 为各试样的力学性能测试结果。由表可知，添加合金元素 Ti 的 2# 试样具有最高洛氏硬度与抗拉强度，但其伸长率相对 1#、3# 试样略有降低；而同时添加合金元素 Ti、Nb 的 3# 高铬钢也表现出优异的综合力学性能。整体来说，相对于未添加 Ti、Nb 的 1# 合金钢，经 Ti、Ti+Nb 合金化的 2#、3# 合金钢的洛氏硬度、抗拉强度以及冲击韧度都得到了有效的提高。特别是，2#、3# 试样的冲击韧度分别比 1# 试样提高 57.5%和 100%，充分表明 Ti、Ti+Nb 合金化能有效提高高铬钢的力学性能。

表3 各试样的力学性能

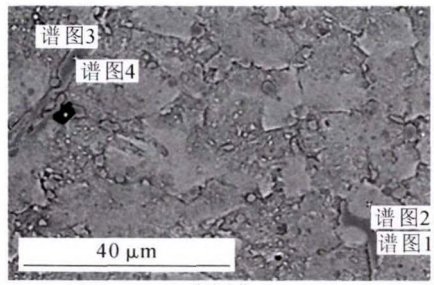
Tab.3 Mechanical properties of each specimen

试样	硬度(HRC)	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率(%)	冲击韧度 α_{ku} /J·cm^{-2}
1#	45.2	820	2.7	4
2#	47.4	860	2.1	6.3
3#	47.0	830	3.5	8

2.4 动态磨损实验分析

动态冲击磨损实验模拟大型球磨机工作时衬板的使用工况，因此上试样选用磨球材质——高铬铸铁并加工成相同的形状和尺寸，但对上试样的失重不作分析，其得出的实验数据仅作为下试样失重的参考；下试样则选用本研究材质，正式测试前先进行 3 min 预磨损，以避免因上下试样接触面状态不同对实验结果造成影响。实验失重结果见表 4 所示。

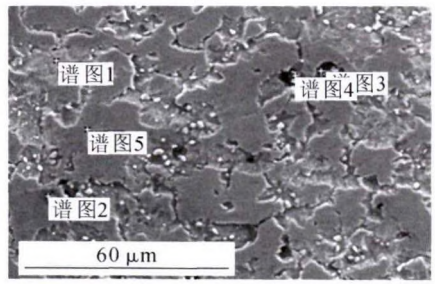
设动态冲击磨损试验后试样的总失重量为 W，则如表 4 所示，$W_{2\#}$(0.293 3 g)≈$W_{3\#}$(0.304 1 g)，都



(a)1#

处理选项：已分析所有元素(已归一化)

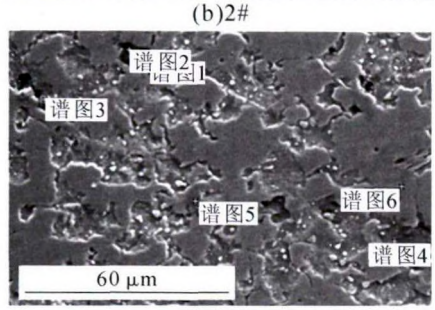
谱图	C	Si	Cr	Mn	Fe	总的
谱图 1	26.40		43.09	1.07	29.44	100.00
谱图 2		1.24	8.56	0.97	89.23	100.00
谱图 3		1.10	12.20	1.03	85.67	100.00
谱图 4	27.58		41.19		31.22	100.00



(b)2#

处理选项：已分析所有元素(已归一化)

谱图	C	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	总的
谱图 1		1.28		9.47	0.72	88.53	100.00
谱图 2			91.79	3.68		4.53	100.00
谱图 3	45.86	1.19	0.25	15.11	0.97	35.93	100.00
谱图 4	61.92	0.46	17.95	7.34	0.30	11.01	100.00
谱图 5		1.63		9.53	0.90	87.94	100.00



(c)3#

处理选项：已分析所有元素(已归一化)

谱图	C	Si	Ti	Mn	Cr	Fe	Nb	总的
谱图 1	49.26	49.32	0.24		0.26	0.92		100.00
谱图 2	40.16	41.30		0.30	4.61	13.63		100.00
谱图 3	43.68		41.38		3.97	8.66	2.31	100.00
谱图 4	35.28	1.49	0.31	1.08	21.03	40.41		100.00
谱图 5			92.32		1.75	2.30	3.63	100.00
谱图 6					9.61	90.39		100.00

图 2 三种材料的扫描电镜照片及相对应特征点的能谱分析

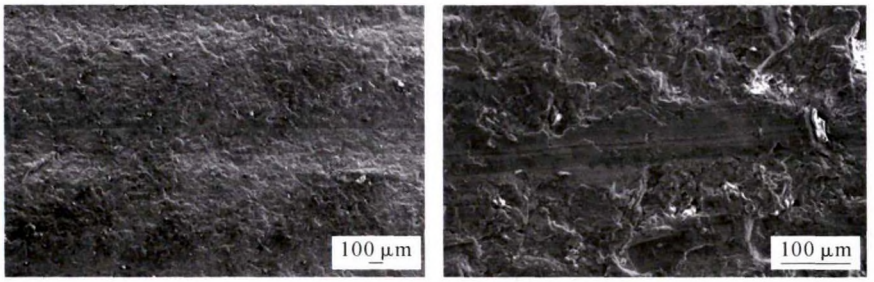
Fig.2 SEM images of the three materials and EDS results of corresponding points in the pictures

表 4 动态冲击磨损试验结果/g
Tab.4 Test results of dynamic impact wear

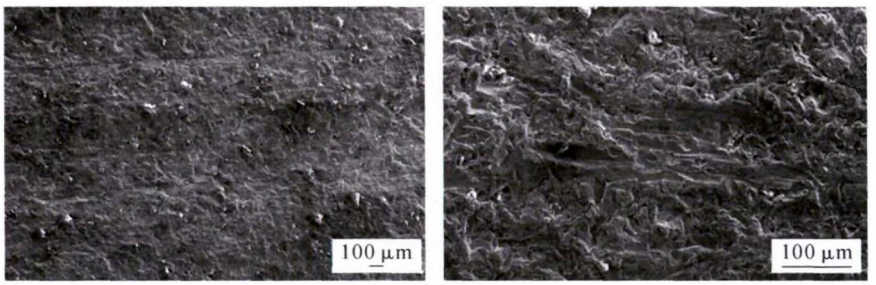
试样	第一次冲击磨损失重（加砂，30 min）	第二次冲击磨损失重（加砂，30 min）	总失重 W
1#	0.234 6	0.201 6	0.436 2
2#	0.154 2	0.139 1	0.293 3
3#	0.168 6	0.135 5	0.304 1

小于 $W_{1\#}$(0.436 2 g)。从表 4 中可以看出，在高铬钢中加入钛和铌后，经冲击磨损后的失重量相应降低，说明加入钛和铌能有效提高高铬钢的抗冲击磨损性能。综合对比分析上述结果可知，在高铬钢中加入适量的钛和铌，可以改善高铬钢的组织，细化晶粒(见图 2)；同时由于生成了 TiC 和 NbC，高铬钢硬度和韧性都相应提高(见表 3)，因此其抗冲击磨损性能亦相应增强。

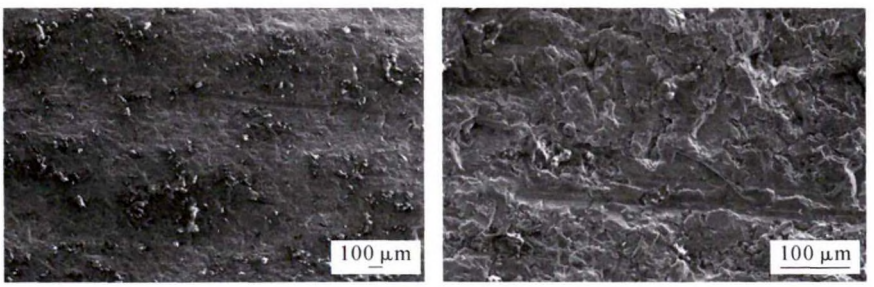
动态冲击磨损试验的原理是试样以一定的速度旋转，承受上试样反复冲击作用，上下试样间有磨料，在冲击载荷作用下，磨料对试验试样进行三体磨损。根据对模拟工况下冲击磨损实验的分析可知，实验试样将承受凿削、切削和疲劳剥落损伤。从图 3 可以看出磨损面损伤形貌主要是犁沟、剥落以及划痕。由于磨料显微硬度为 900~1 360 HV，远大于试验材料显微硬度，在上试样冲击作用下，带有尖锐棱角的磨料将被压入试样表面，在横向力的作用下向前滑动，从而使磨损表面出现较深的犁沟以及较浅的划痕。同时，在冲击载荷及磨料的三体磨损作用下，下试样表面反复承受磨料的碾磨和上试样的冲击，下试样表面发生塑性变形并出现加工硬化；当外载荷作用超过材料的强度时，加工硬化区域脱离基体形成塑变磨屑而出现剥落。



(a)(b)1#



(c)(d)2#



(e)(f)3#

图 3 冲击磨损后形貌扫描
Fig.3 SEM images on impact abrasive corrosion surface

3 结论

(1)在高铬钢中加入 Ti 或 Ti+Nb 合金化处理，均能细化其晶粒。

(2)Ti、Nb 的协同合金化作用，可提高高铬钢的硬度及韧性，其中 Nb 对提高高铬钢的韧性有较好的效果。

(3)在高铬钢中加入 Ti 和 Nb 合金化处理，可以提高高铬钢的耐动态冲击磨料磨损性能。

参考文献：

[1] 梁新毅，朱孔贺，王延生，等. 某钼选厂中高铬钢球替代低铬钢球的应用研究[J]. 现代矿业：2019，4(4)：140-141.

(下转第 1049 页)

参考文献：

[1] 王金辉，金培鹏，张瑞，等. SiCp/Al 复合材料高温蠕变行为[J]. 材料热处理学报，2017，38(1): 14-18.

[2] 张国庆，原梅妮，侯红亮，等. 数值模拟研究 SiCp/2024Al 复合材料动态力学性能[J]. 塑性工程学报，2016，23(4): 112-118.

[3] 刘一雄，郑振兴，朱德智，等. 热处理对 SiCp/7075Al 复合材料组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报，2018，39(9): 1-6.

[4] Holman M C. Autoclave age forming large aluminum aircraft panels [J]. Journal of Mechanical Working Technology, 1989, 20: 477-488.

[5] Ho K C, Lin J, Dean T A. Modelling of springback in creep forming thick aluminum sheets [J]. Internationa Journal of Plasticity, 2004, 20(4): 733-751.

[6] Zeng Y S, Huang X. Forming technologies of large integral panel [J]. ACTA Aeronaut. Astronaut. Sinica, 2008, 29: 721-727.

[7] Zhan L, Li Y, Huang M, et al. Constitutive equation describing creep ageing of 2124 aluminum alloy [J]. J. South China Univ. Technol, 2012(4): 107-111.

[8] 王新建. 2024T4 铝合金蠕变本构关系研究[J]. 航空精密制造技术，2017，53(3): 26-29，20.

[9] 邓运来，张书，王宇，等. Al-0.6Mg-0.4Si 铝合金的蠕变变形行为及稳态蠕变本构模型的建立[J]. 热加工工艺，2018，47(10): 1-6.

[10] Ho K C, Lin J, Dean T A. Constitutive modelling of primary creep for age forming an aluminum alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 153-154(1): 122-127.

[11] 李喜财，湛利华. 基于蠕变时效交互作用机理的 2219 铝合金统一本构建模 [J]. 中南大学学报（自然科学版），2017，48(11): 2942-2948.

[12] 王文熙. 高性能铝合金蠕变时效成形形变行为及本构关系研究[D]. 柳州：广西科技大学，2018.

[13] 尹旭妮，湛利华，赵俊. 2219 铝合金稳态蠕变本构方程的建立[J]. 中国有色金属学报，2014(9): 2250-2256.

[14] Li Yanguang. Experimental study on creep aging behavior and constitutive modeling of 2124 aluminum alloy [D]. Central south university, 2012.

[15] Chen Y, Yi D, Pan S, et al. Effect of temperature on creep behavior of 2024 aluminum alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(4): 632-639.

[16] Zhan L H, Li J, Huang M H. Creep ageing behavior and constitutive equation of 2524 aluminum alloy [J]. Jixie Gongcheng Cailiao (Materials for Mechanical Engineering), 2013, 37 (5): 92-96.

（上接第 1045 页）

[2] 巩瑞浩. 大型球磨机用高铬钢力学性能和耐磨耐蚀性研究 [D]. 济南：山东大学. 2017.

[3] Huang X, W u Y. A High Cr-M o Alloy Iron[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 1998, 7 (4) : 463- 466.

[4] Singh K K, Verm a R S, Murty G M D. Optimizing Wear Resistance and Impact Toughness in High Chromium Iron Mo-Ni Alloy [J] . Journal of Materials Engineering and Performance, 2009,18 (4) : 438-440.

[5] Yen S K, Shih H C. Investigation in to Hydrogen Embrittlement of High-Chromium Stainless Steel by Cathodic Charging [J] .Corrosion Prevention and Control, 1996, 42(6) : 137-144.

[6] 陈茂林，宋延沛，徐林，等. RE 复合变质处理对高碳高铬钢组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金：2014, 34 (7): 700-702.

[7] 崔国明，李兴霞，翟德梅. 热处理对新型高碳高铬钢组织和力学性能的影响[J]. 铸造技术：2013, 34(6): 698-699.

[8] 涂小慧. 钢铁材料在热强碱铝矿浆中的冲击腐蚀磨损的研究[D]. 西安：西安交通大学. 2004.

[9] 赵四勇，林怀涛，曾耀东，等. 筒式球磨机磨球与衬板材质配副性研究[J]. 水利电力机械，1993, 15(6): 51-55.

[10] Zhao S Y, Lin H T, Zeng Y D et al. The Optimal Mating of Balls and Lining Plates in Ball Mills [J]. Wear, 1994, 178: 79-84.

[11] 李卫. 球磨机磨球与衬板的选材及其匹配系统的试验研究 // 中国金属学会耐磨材料学术委员会全国磨球与衬板学术会议[C]，北京：中国金属学会耐磨材料学术委员会，1995.

[12] 孙珍宝，朱谱藩，林慧国. 合金钢手册(上册) [M]. 北京：冶金工业出版社，1984.

技术资料邮购

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

本书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　　电话/传真：029-83222071　　技术咨询：13609155628