DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.08.012

Cr26 型高铬铸铁水泥球磨机耐磨衬板的开发

吕　远[1],眭文杰[1],亓海全[1],秦翔智[2]

(1. 桂林理工大学 广西建筑新能源与节能重点实验室,广西 桂林 541004;2.鑫光热处理工业有限公司(昆山),江苏 昆山 2153331)

摘　要:开发了一种具有高耐磨性的 Cr26 型高铬铸铁水泥球磨机衬板材料,采用正交试验的方法获得试验铸铁最佳热处理工艺,并对其组织及性能进行分析。结果表明,试验材料最佳热处理工艺为 1 050 ℃×3 h 油冷 +300 ℃×2 h 空冷,显微组织为回火马氏体 +$(Fe,Cr)_7C_3$ 共晶碳化物 + 二次碳化物 + 残余奥氏体,硬度 HRC58,冲击韧度 3 J/cm^2。在最佳热处理状态下,该试验材料具有优异的耐磨性,为 12.739 g^{-1},但其冲击韧度较低。经过最佳热处理工艺后该试验材料耐磨性能优异,可作为高耐磨性的水泥球磨机衬板材料。

关键词:Cr26 型高铬铸铁;正交试验;耐磨性

中图分类号:TG257　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)08-0756-05

Development of Wear-resistant Liner of Cr26 High Chromium Cast Iron Cement Ball Mill

LYU Yuan[1], SUI Wenjie[1], QI Haiquan[1], QIN Xiangzhi[2]

(1.Guangxi Key Laboratory of New Energy and Building Energy Saving, Guiling university of technology, Guilin 541004, China; 2. Xinguang Heat Treatment Industry Co., Ltd., (Kunshan), Kunshan 2153331, China)

Abstract: A Cr26 high chromium cast iron cement ball mill liner material with high wear resistance was developed. The optimum heat treatment technology of test cast iron was obtained by orthogonal test. The results show that the optimum heat treatment technology of the test materials is 1 050 ℃×3 h oil cooling +300 ℃×2 h air cooling, the microstructure is tempered Martensite+$(Fe,Cr)_7C_3$ eutectic carbide+secondary carbide+residual austenite, hardness HRC58, impact toughness 3 J/cm^2. In the best heat treatment state, the test material has excellent wear resistance of 12.739 g^{-1}, but its impact toughness is low. After the best heat treatment process, the test material has excellent wear resistance and can be used as the lining material of cement ball mill with high wear resistance.

Key words: Cr26 type high chromium cast iron; orthogonal test; wear resistance

近年来,随着煤炭、水泥、冶金、有色金属等行业的快速发展,能源消耗也在随之上升。磨损是工业领域的普遍现象,也是工业材料和能源消耗的主要缘由之一。据不完全统计,工业发达国家每年由机电设备的磨损所带来的经济损失就超过千亿美元,而每年我国因磨损造成的损失就高达 1 400 亿美元,其中因磨料磨损消耗的金属耐磨材料超过 4.5×10^6 t,并且这个数字还将继续增长。因此,新耐磨材料的开发和抗磨技术的发展具有很大的现实意义[1]。

高锰钢[2-4]作为传统的耐磨材料,由于其具有优良的加工硬化性能,在受到较大冲击的作用下,使材料表层硬度迅速提升,而芯部仍保持较高的韧性,表现为外硬内韧的特点,因此广泛应用于衬板材料。但在实践生产中,高锰钢的耐磨性是有条件的,只有在大冲击高应力的情况下,高锰钢的优点才能体现出来。同时,高锰钢的屈服强度较低,在初次使用时会产生变形,进而造成较大的磨损,因此传统高锰钢(Mn13)用作球磨机衬板材料是不恰当的。随着技术的发展与进步,国内外学者研究开发出新型耐磨衬板-高铬铸铁。高铬铸铁[5-14]代表了目前金属耐磨材料的最高水平,由于其具有优异的综合力学性能而受到国外广大学者及磨粉工业的青睐。一般使用寿命 6~12 年以上,表现出良好的耐磨性。

本文通过合金化设计一种 Cr26 型高铬铸铁材料,采用正交试验获得最佳热处理制度,开发一种具有高耐磨性的水泥球磨机衬板材料,以期实现国产化的同时对国内衬板的发展起到一定积极作用。

收稿日期:2020-05-13

基金项目:广西建筑新能源与节能重点实验室(桂科能19-J-21-13);复杂海洋环境下高抗蚀建设工程材料开发与示范应用(桂科 AA18242007)

作者简介:吕　远(1994-),安徽亳州人,硕士.研究方向:金属材料.电话:13367732215,E-mail:lvyuan328@qq.com

通讯作者:亓海全(1981-),山东莱芜人,博士,副教授.研究方向:材料成形与热处理.E-mail:22664798@qq.com

1　化学成分的选择及铸造

1.1　化学成分的选择

碳和铬：碳和铬是高铬白口铸铁的主要合金元素。增加碳含量可以提高碳化物的体积，从而提高材料的耐磨性。但是碳含量不能过高，过高会形成粗大的过共晶碳化物，造成材料韧性显著降低。其次，过多的碳与铬形成碳化物，会降低基体的铬含量，会对材料的淬透性产生不利影响。碳化物的类型也会影响铸铁的耐磨性，M7C3 型碳化物简称 K2 碳化物，显微硬度 1 300~1 800 HV，细化后具有一定的韧性。M7C3 型碳化物的硬度高于 M3C 碳化物，对基体的分割作用小，因此含有 M7C3 型碳化物能增强耐磨材料的抗磨和抗冲击能力。因此合理选择铬含量和碳含量之比，确定碳化物的类型和数量，从而获得高耐磨件具有重大意义。随着 Cr/C 比的提高，碳化物类型变化顺序为 M3C、M7C3、M23C6，本试验材料设计的碳含量为 2.40%~2.60%，铬含量为 25.0%~26.0%。

钼：钼是强碳化物形成元素，溶入奥氏体的钼可以提高材料的淬透性，同时钼可以抑制珠光体的形成。钼可以有效的提高材料高温耐磨性，当钼含量达到 3%时，材料具有最佳的高温耐磨性。因此，常用的高铬铸铁中往往含有钼。根据上述分析控制其含量为 0.1%~0.3%。

锰：锰是稳定奥氏体的元素，少量的锰可以扩大奥氏体相区，降低 Ms 点，导致残余奥氏体增多。过量的锰可以开启奥氏体相区，但过量的锰会降低材料的耐磨性。此外，锰可以改善钼在碳化物和基体中含量的分配比，所以，锰钼联合使用，可以有效的提高淬透性。这里控制其含量为 0.5%~1.0%。

硅：硅与氧的亲和力大于锰、铬、钒等，因此常将硅作为脱氧剂，从而减少氧对其他元素的氧化损害。但硅会降低材料的淬透性，因此一般将硅的含量控制在 0.8%以下。根据上述分析控制其含量为 0.2%~0.6%。

钒：钒能细化共晶组织，同时能有效提高高铬铸铁的抗砂子冲蚀磨损能力。本试验控制其含量为 0.1%~0.5%。

铜、镍：铜、镍主要可以溶入奥氏体，但铜在奥氏体中的溶解度有限，这两种元素常作为提高淬透性的辅助元素。铜、镍元素也是属于扩大奥氏体相区的元素，材料的 Ms 点降低，导致残余奥氏体的量增多，因此一般不能加太多。根据上述分析控制其含量为 0.1%~0.4%。

磷、硫：磷、硫是由原料中带入的有害杂质，易产生偏析与晶界脆性。故控制其含量不大于 0.035%。

综上所述，设计成分 w(%)：2.4~2.6 C、25~26 Cr、0.2~0.6 Si、0.5~1.0 Mn、0.1~0.4 Ni、0.1~0.4 Cu、0.1~0.3 Mo、0.1~0.5 V，其余为 Fe 及其他杂质元素。

1.2　Cr26 高铬铸铁试棒的铸造

根据化学成分设计原则与分析，在钢铁研究总院涿州基地，通过 20 kg 真空感应炉冶炼了 ϕ80 mm×600 mm 的 Cr26 型高铬铸铁铸棒，通过直读光谱分析仪对铸棒成分测定如表 1。铸棒铸态组织如图 1，其铸态组织为奥氏体+马氏体+$(Fe,Cr)_7C_3$ 共晶碳化物+少量二次碳化物。这里出现部分马氏体主要是因为富铬碳化物周边基体中 C 和 Cr 的含量过低，提高该区域基体的 Ms 点，在冷却的过程中形成马氏体。

表1 Cr26型高铬铸铁成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of high chromium cast iron

C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	V	S	P
2.67	0.36	0.67	25.4	0.24	0.14	0.088	0.12	0.029	0.031

2　试验方法

2.1　热处理试验方案

因本试验材料、工艺参数以及因素水平较多，为了快速准确找出最优热处理工艺，这里同样采用正交法进行试验研究，从而更高效率、更快速、更经济的获得最佳热处理工艺。Cr26 型高铬铸铁设计 3 个影响因素：淬火温度、淬火保温时间、回火温度。每个影响因素设 3 个工艺水平，正交实验设计选用 L9

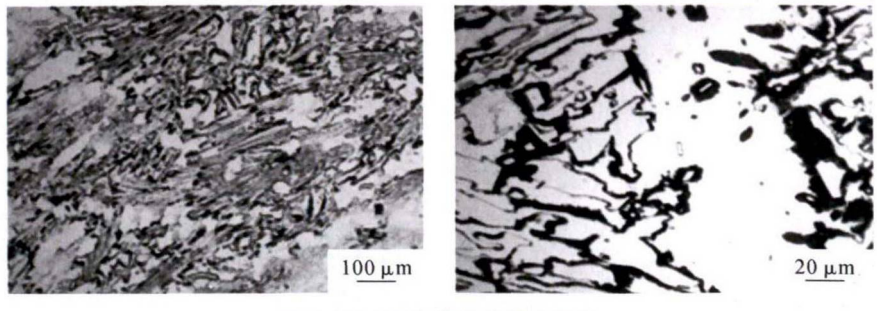


图 1 Cr26 型高铬铸铁铸态组织
Fig.1 As-cast microstructure of Cr26 high chromium cast iron

(3^3)正交表。Cr26 型高铬铸铁试验做九组,然后通过极差分析和画趋势图,对多个指标(硬度、韧性)进行分析,确定最合适的工艺参数。表 2 为 Cr26 型高铬铸铁试验因子,表 3 为 Cr26 型高铬铸铁的正交试验设计方案。其中淬火冷却方式采用油冷。

表 2 Cr26 型高铬铸铁(HCCI)因子组合
Tab.2 Cr26 high-chromium cast iron (HCCI) factor combination

水平	A 淬火温度 /℃	B 淬火保温时间 /h	C 回火温度 /℃
1	950	1.5	300
2	1 000	2.0	400
3	1 050	3.0	450

表 3 Cr26 型高铬铸铁(HCCI)正交试验设计方案
Tab.3 Cr26 high chromium cast iron (HCCI) orthogonal test design

编号	A/℃	B/h	C/℃
1	1 950	11.5	1 300
2	1 950	22.0	2 400
3	1 950	33.0	3 450
4	21 000	11.5	2 400
5	21 000	22.0	3 450
6	21 000	33.0	1 300
7	31 050	11.5	3 450
8	31 050	22.0	1 300
9	31 050	33.0	2 400

2.2 组织性能检测

在铸棒边部用线切割截取尺寸为 12 mm×12 mm ×57 mm 的无缺口试样进行热处理(每组试验 3 个试样),之后切取 10 mm×10 mm×55 mm 的无缺口试样在型号为 XJU-5.5 摆锤式冲击试验机上进行冲击试验,求取平均值。样品的硬度测定在 HRS-150 型数显洛氏硬度计上按 BG23O-83《金属洛氏硬度试验方法》完成,每组实验测 5 个点求平均值。使用 AxioScope.A1 智能型金相显微镜观察试验材料的金相组织。采用蔡司扫描电镜对试样的磨损形貌进行观察。根据球磨机衬板的服役工况,采用 T/CFA 010604-3-2016 钢铁材料冲击磨料磨损试验方法,在 MLD-10 型动载冲击磨料磨损试验机上进行耐磨性试验,磨损时间为 1 h。

3 试验结果及分析

3.1 正交试验结果

表 4 是不同热处理工艺下的力学性能,通过各力学性能值计算 3 个水平下的平均试验指标及极差,如表 5 所。通过极差分析研究试验因素对硬度和冲击韧度的影响程度,并获得最优工艺水平。对比分析可知,各因素对各性能指标的影响程度排序为:硬度,A>B>C;冲击韧度,A>B>C。综合来看,影响硬度和冲击韧度主要因素是淬火温度,其次为淬火保温时间,而回火温度对试验钢的力学性能影响最小。由表 5 可知,在只考虑硬度的情况下,最优组合为 A3B3C1;在只考虑韧性的情况下,最优组合为 A1B1C2。这里两方案不同,为了获得综合性能最佳的热处理试验方案,平衡 3 个因素对硬度和冲击韧度的影响,将硬度和韧性随因素水平变化情况用直观图表示出来,如图 2。

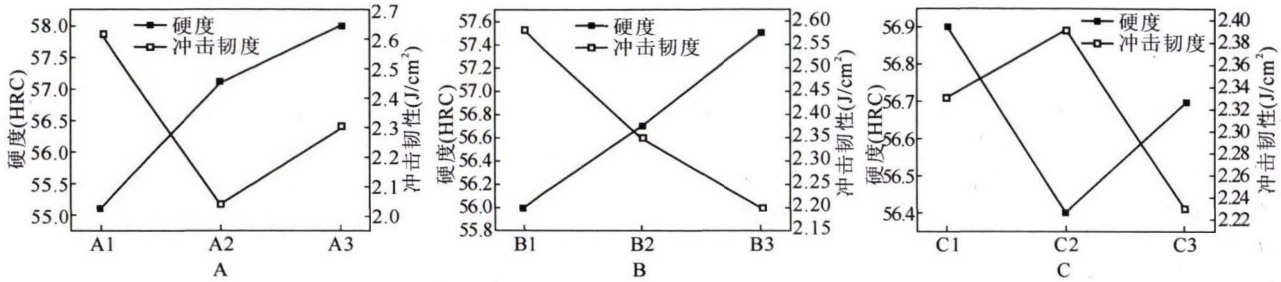
表 4 不同工艺下的力学性能
Tab.4 Mechanical properties under different processes

编号	A/℃	B/h	C/℃	考察指标	
				硬度(HRC)	韧性 /(J/cm²)
第 1 组	1 950	11.5	1 300	53.76	2.80
第 2 组	1 950	22.0	2 400	55.18	2.75
第 3 组	1 950	33.0	3 450	56.40	2.30
第 4 组	21 000	11.5	2 400	56.44	2.43
第 5 组	21 000	22.0	3 450	56.34	1.90
第 6 组	21 000	33.0	1 300	58.40	1.80
第 7 组	31 050	11.5	3 450	57.85	2.50
第 8 组	31 050	22.0	1 300	58.46	2.40
第 9 组	31 050	33.0	2 400	57.54	2.00

表5 正交试验极差分析
Tab.5 Range analysis of orthogonal test

编号	HRC	α_k	HRC	α_k	HRC	α_k
K_1	165.34	7.85	168.05	7.73	170.62	7.00
K_2	171.18	6.13	169.98	7.05	169.16	7.18
K_3	173.85	6.90	172.34	6.60	170.19	6.70
$k_1=K_1/3$	55.1	2.62	56	2.58	56.9	2.33
$k_2=K_2/3$	57.1	2.04	56.7	2.35	56.4	2.39
$k_3=K_3/3$	58	2.30	57.5	2.20	56.7	2.23
极值	8.51	1.72	4.29	1.13	1.46	0.48
最优水平	A_3	A_1	B_3	B_1	C_1	C_2

根据极差分析可知淬火温度对硬度和韧性的影响最大,如图 2(a),随着淬火温度的升高,硬度呈上升趋势,而韧性先下降后上升,当淬火温度为 A2时,韧性最低,因此这里最佳淬火温度选择 A3(1 050 ℃)。对硬度和韧性影响其次的是淬火保温时间,随着淬火保温时间的升高,硬度呈上升趋势,而韧性呈下降趋势,本试验是为了获得硬度≥58 HRC 的耐磨铸铁,所以这里可以选择牺牲韧性来满足硬度的要求,因此这里最佳淬火保温时间选择 B3(3 h)。回火温度对试验材料的力学性能影响最小,随着回火保温时间的上升,硬度先下降后上升,而韧性先略微上升后下降;硬度和韧性在 C2 时分别达到最小和最大,考虑到成本和经济问题,这里选择最优回火温度为 C1(300 ℃)。根据上述分析获得最优的热处理工艺为 A3B3C1,即 1 050 ℃×3 h+300 ℃×2 h。最终热处理获得的力学性能为:硬度 58 HRC,冲击韧度 3 J/cm²,



(a)淬火温度　　(b)淬火保温时间　　(c)回火温度

图 2 热处理参数对力学性能的影响

Fig.2 Effect of heat treatment parameters on mechanical properties

显微组织为回火马氏体+$(Fe,Cr)_7C_3$ 共晶碳化物+二次碳化物+残余奥氏体，如图 3。同时根据表 4 看出，此热处理工艺获得的性能是最优的。

3.2 试验材料的耐磨性

图 4 是 Cr26 型高铬铸铁不同冲击功下的耐磨性(磨损失重 T 的倒数，T^{-1} 单位 g^{-1})，磨损时间为 1 h。表 6 是摩擦磨损试样磨损失重。可以看出，在冲击功为 1 J 的情况下，试样的磨损率为 0.001 3 g/min，

表6 摩擦磨损试样磨损失重

Tab.6 Friction and abrasion test piece wear weight loss

冲击功 /J	1	2
硬度(HRC)	57	53
初始质量 /g	22.073 6	22.102 9
磨损量 /g	0.078 5	0.418 3

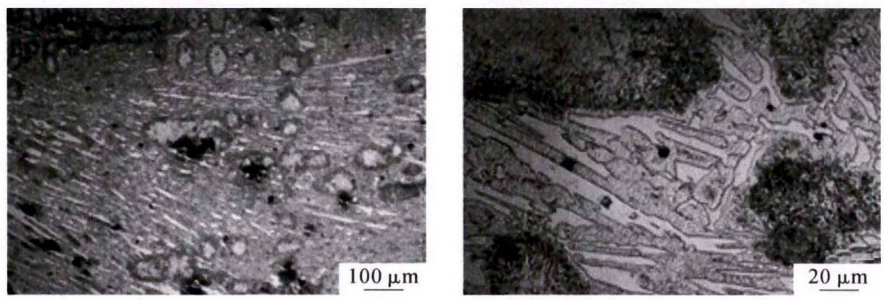


图 3 最佳热处理工艺显微组织

Fig.3 Microstructure of the optimum heat treatment process

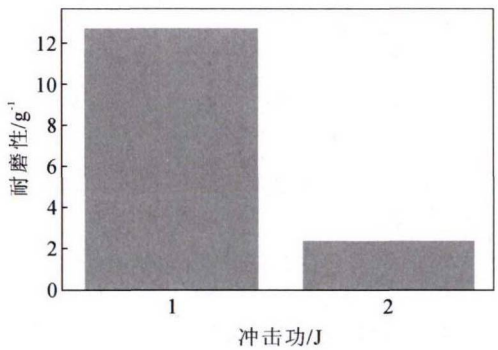
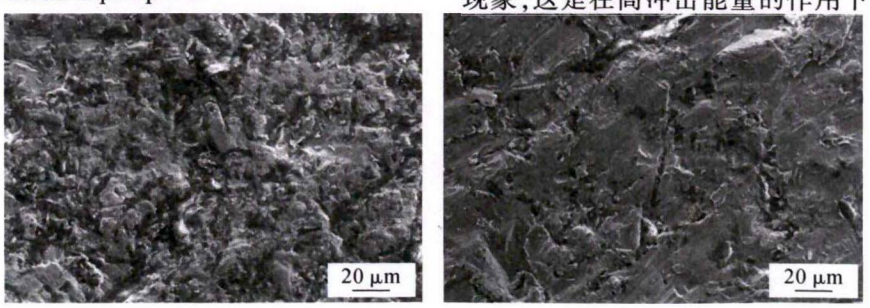


图 4 Cr26 型高铬铸铁不同冲击功下的耐磨性

Fig.4 Wear resistance of Cr26 high chrome cast iron under different impact power

耐磨性为 12.739 g^{-1}。冲击功为 2 J 时，试样的磨损率为 0.007 0 g/min，耐磨性为 2.391 g^{-1}。冲击功为 1 J 的耐磨性是冲击功为 2 J 耐磨性的 5.3 倍，该材料在低冲击功下具有很高的耐磨性。图 5 是 Cr26 型高铬铸铁不同冲击功下的磨面形貌。图 5(a)中冲击功为 1 J 时，磨面较平整，沟槽较少，同时碳化物未发生断裂，组织保存完整，表现为低应力磨粒磨损，耐磨性较好。当冲击功为 2 J 时(图 5b 所示)，在马氏体上的出现大量较浅的沟槽和犁沟，同时有研磨体嵌入，表现为犁皱型磨粒磨损。同时部分碳化物出现断裂现象，这是在高冲击能量的作用下，共晶碳化物受到



(a)冲击功为1 J　　(b)冲击功为2 J

图 5 Cr26 型高铬铸铁不同冲击功下的磨面形貌

Fig.5 Surface Morphology of Cr26 high Chromium cast iron under different impact power

较大的切应力，使其发生破碎断裂，因此造成表面材料流失严重。

文献[15]中提到磨机衬板单位面积所受冲击功小于 1.7 J/cm^2，而本试验铸铁在冲击功为 1 J 时表现出优异的耐磨性且不发生断裂，因此完全可以用作水泥球磨机衬板材料。但该衬板材料在运输、装卸及安装过程中须避免受到大的冲击。

4 结论

(1)通过正交试验获得 Cr26 型高铬铸铁最佳热处理制度为 1 050 ℃×3 h 油冷 +300 ℃×2 h 空冷，显微组织为回火马氏体+$(Fe,Cr)_7C_3$ 共晶碳化物+二次碳化物+残余奥氏体，硬度 58 HRC，冲击韧度 3 J/cm^2。

(2)在最佳热处理状态下，该试验材料具有优异的耐磨性，为 12.739 g^{-1}，可用作水泥球磨机衬板材料。但在由于其冲击韧度较低，因此在运输、装卸及安装过程中须避免受到大的冲击。

参考文献：

[1] 迟宇，易欣. 揭秘耐磨记首届中国矿业耐磨材料技术发展及应用论坛[J]. 矿业装备, 2012(11):66-68.

[2] 宋仁伯，冯一帆，彭世广，等. 高锰钢衬板的研究及应用[J]. 材料导报, 2015, 29(19):74-78.

[3] Steenken B, Rezende J L L, Senk D. Hot ductility behaviour of high manganese steels with varying aluminium contents [J]. Metal Science Journal, 2016, 33(5):567-573.

[4] Jun W U, Foundry J C. Improvement of High Manganese Steel Liner EPC Process[J]. Foundry Equipment & Technology, 2017.

[5] 李固成. 高铬合金铸铁衬板在水泥工业中的应用 [J]. 中国铸造装备与技术, 2008(6):9-15.

[6] 李固成. 高铬合金铸铁衬板的制造与应用 [J]. 水泥技术, 2010 (2):41-43.

[7] 陈思杰. 一种高铬合金耐磨铸铁衬板的热处理 [J]. 热加工工艺, 2011,40(10):184-186.

[8] 郭克星，夏鹏举. 高铬铸铁耐磨性的研究进展与展望[J]. 铸造技术, 2018, 39(9):2138-2141.

[9] 郭亚非，李洁，庞庆海，等. 立式磨机用高铬铸铁螺旋衬板热处理工艺研究[J]. 大型铸锻件, 2019, 187(1):37-40, 48.

[10] Li T Z, Li L, Lu H, et al. Effect of trace Ni on the resistance of high-Cr cast iron to slurry erosion [J]. Wear, 2019, 426-427: 605-611.

[11] Efremenko V G, Chabak Y G, Shimizu K, et al. Structure refinement of high-Cr cast iron by plasma surface melting and post-heat treatment[J]. Materials & Design, 2017, 126:278-290.

[12] 子澍. 展望高铬铸铁的发展[J]. 铸造技术, 2008, 29(10):14-17.

[13] Chen L, Zhao Y, Qin X. Some aspects of high manganese twinning-induced plasticity(TWIP)steel, a review[J]. Acta Metallurgica Sinica: English Letters, 2013, 26(1):1.

[14] Saeed-Akbari A, Mosecker L, Schwedt A, et al. Characterization and prediction of flow behavior in high-manganese twinning induced plasticity steels:Part I.Mechanism maps and work-hardening behavior [J]. Metallurgical and Materials TransactionsA, 2012, 43 (5):1688.

[15] 唐斌. 球磨机衬板受研磨体的冲击功计算 [J]. 中国机械, 2013 (2):108-109.

2020 年《铸造技术》杂志征订启事

《铸造技术》杂志，月刊，1979 年创刊，中国铸造协会会刊，国内外公开发行，国内邮发代号：52-64，国外发行号：M855，中国标准刊号：ISSN1000-8365/CN61-1134/TG.

报道范围：报道国内外铸造领域的先进科技成果、应用技术、生产管理经验及信息和铸造设备，覆盖铸铁、铸钢和有色合金等铸造领域，包括砂型铸造、熔模铸造、金属型铸造、消失模铸造和压铸等特种铸造技术。

主要栏目：试验研究、工艺技术、生产技术、特种铸造、装备技术、实用成型技术、材料改性、材料开发、材料保护及表面工程、材料失效分析、应力控制与理化测试技术、今日铸造等。

发行对象：国内外铸造企业，科研院所，高等学校，铸造原辅材料厂商，设备、仪器厂商，铸件采购商等。

广告范围：刊登铸造原辅材料、铸造设备、熔炼设备、热处理设备、环保设备、检测仪器以及铸件生产、科研成果转让、企业形象宣传等相关广告。

订阅方式：请从当地邮局订阅，也可以直接从铸造技术杂志社订阅。全年 12 期，每期定价 25 元，平寄全年 300 元(含邮费)，挂号全年 336 元，快递全年 420 元。

欢迎订阅、欢迎投稿、欢迎刊登广告

地址：西安市金花南路 5 号西安理工大学 608 信箱　**邮编：**710048

联系人：李巧凤　029-83222071

电话/传真：029-82312140　**网址：**www.zhuzaojishu.net　**E-mail：**zzjs@263.net.cn

银行汇款：户　名：陕西铸造技术杂志社有限责任公司

账　号：3700 0235 0920 0091 309

开户行：中国工商银行西安市互助路支行