DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.02.002

大型半自磨机衬板的选材与制备

李占长[1],黄　雨[1],付向上[1],吕振林[2,3],麻日来[1],邓世萍[1]

(1. 江西铜业集团 德兴铸造有限公司，江西 德兴 334224; 2. 西安理工大学 材料科学与工程学院，陕西 西安 710048; 3. 高端轴承摩擦学技术与应用国家地方联合工程实验室,河南科技大学,河南 洛阳 471000)

摘　要:在介绍国内外大型半自磨机筒体衬板材质的基础上,研制了 ϕ10.37 m×5.19 m 半自磨机衬板,并通过衬板尺寸和形状的改变,从而使该半自磨机筒体衬板的使用寿命达到了 4 个半月,满足了大型半自磨机筒体衬板的使用要求。同时,介绍了该半自磨机采用橡胶衬板的情况。

关键词:半自磨机;衬板;选材

中图分类号: TG135　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)02-143-04

Material Selection of Large Semi-autogenous Grinding Mill Liners

LI Zhanchang[1], HUANG Yu[1], FU Xiangshang[1], LYU Zhenlin[2,3], MA Rilai[1], DENG Shiping[1]

(1. De Xing Foundry Co. Ltd., Jiangxi Copper Group, Dexing 334224, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Project National United Engineering Laboratory for Advanced Bearing Tribology, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, China)

Abstract: The domestic and foreign large-scale semi-autogenous grinding machine based on cylinder liner material qualitative was introduced, a 10.37 m 5.19 m and a semi-autogenous grinding mill lining board was prepared, and the size and shape of the liner were changed. The results show that the service life of the semi-autogenous grinding cylinder liner reaches 4 and a half months, which meets the requirements of the large semi-autogenous grinding cylinder liner.

Key words: semi-autogenous grinding (SAG); liner; materials selection

目前国内装备的各种半自磨机近百台[1]。半自磨机和球磨机中的易磨损件除了钢球外,就是各类衬板。衬板起着保护磨机筒体免受矿石冲击、磨损和增加筒体强度的作用。随着磨机尺寸的增大,相应的衬板尺寸和件重也在增大，如 ϕ10.37 m× 5.19 m 半自磨机中的整套衬板总重达 440 t,筒体衬板单件最大件重达 2 t,长度超过 2 m。此外,随着磨机尺寸的增大，磨机中作为研磨体的钢球尺寸也在增大，尤其是半自磨机，其钢球尺寸通常大于 ϕ100 mm,最大达到 ϕ200 mm。磨机和钢球尺寸的增大，造成钢球跌落冲击矿石和衬板的能量增大，表 1 为不同尺寸的钢球在不同尺寸磨机中的冲击能量[2]。因此要求这类大型磨机的衬板,尤其是筒体衬板必须具有较好的抗冲击能力,以抵抗钢球和矿石的冲击而不碎裂，同时还应具有抵抗矿石磨损的能力。作为磨机衬板,其磨损除了受材质本身的组织和性能影响外,还受衬板的形状和尺寸、物料的填充率、矿石的粒度和硬度等因素的影响。

1　衬板的材质

为了满足大型磨机衬板的使用要求，作为大型磨机衬板的材质主要有高锰钢、高合金白口铸铁、高碳铬钼钢、中碳铬钼钢等，材质的基体组织有奥氏体、马氏体、贝氏体和珠光体等。

(1)高锰钢　高锰钢是传统的耐磨材料和磨机衬板的常用材料，因其具有显著的加工硬化效果而广泛应用于各种磨损工况场合。江铜集团德兴铜矿直径 ϕ6 m 以下的球磨机衬板均为高锰钢材质，在直径 ϕ3.2 m 球磨机中使用时使用寿命为 6 个月，在直径 ϕ5.5 m 球磨机中使用时使用寿命可达 12 个月。高锰钢衬板之所以出现大型球磨机的使用寿命高的原因在于：大型球磨机的转速慢及磨球和矿石的冲击力大,高锰钢的加工硬化效果显著,以及矿石与衬板间的相对速度小。然而,高锰钢也存在致命的弱点,就是在冲击较大的场合,因其屈服强度低(国家标准中没有标注出高锰钢的屈服强度),很容易发

收稿日期:2018-09-13

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2018GY-108);高端轴承摩擦学技术与应用国家地方联合工程实验室开放基金项目(201801);暨南大学先进材料开放基金资助(JNIWRM2017020)

作者简介:李占长(1975-),江西余干人,工程师.主要从事铸造生产技术和工艺管理.电话:15879306308,E-mail:3075435342@qq.com

表 1 磨机和钢球直径与单个钢球的冲击能量
Tab.1 Miller and steel ball diameter and impact energy of a single steel ball

磨机直径 /m	钢球直径 /mm	钢球重 /kg	钢球冲击速度 /(m/s)	钢球冲击能量 /J
0.20	25	0.067	1.41	1.36
2.90	76	1.81	5.33	25.8
8.53	127	8.30	9.14	347
11.00	125	7.97	10.39	430

生流变,造成衬板变形量大,衬板拆卸困难,严重时会将螺栓拉断[3,4]。我们在德兴铜矿大山选厂直径 ϕ10.37 m×5.19 m 半自磨机中曾试用过超高锰钢(Mn17Cr2)筒体衬板,使用近一个月后发现,筒体衬板变形严重,螺栓无法拧开,最后只能将螺栓割掉才将衬板卸下。由此表明,高锰钢不适合作为大型半自磨机筒体衬板的材质。

(2)合金白口铸铁　合金白口铸铁的代表性材料为高铬铸铁,Cr 含量通常大于 12%。因其含有孤立杆状高硬度的 M_7C_3 型碳化物,使其表现出较高的硬度和较好的冲击韧度(与白口铸铁相比),成为新一代耐磨材料而广受重视,并且在球磨机衬板上得到了一定的应用。然而,相对来说高铬铸铁的冲击韧度还是偏低的(通常 5~7 J/cm^2),因此高铬铸铁只适合于水泥磨机中的小尺寸衬板和大尺寸衬板的矿用湿式小直径磨机(直径 ϕ2. 5m 以下)[5-7],不适合冲击强度大的大直径磨机,尤其是大型半自磨机。

(3)合金钢　合金钢作为耐磨材料也在实际应用中取得了良好的使用效果,主要原因在于合金钢中的含碳量和合金元素种类及含量可以在较大的范围内变化,配合不同的热处理工艺,可使合金钢的组织和性能在较大范围内调整,获得较好的综合力学性能,满足不同工况条件的使用要求。国内外的研究和实践表明,合金钢适合作为大型自磨机和半自磨机的衬板,如表 2 [4]。由此可见,马氏体 Cr-Mo 合金钢衬板在自磨机中具有较好的使用效果,其次为珠光体 Cr-Mo 合金钢衬板。珠光体 Cr-Mo 合金钢衬板在半自磨机中得到了比较广泛的应用,尽管其耐磨性稍差于马氏体 Cr-Mo 合金钢,但其冲击韧度高于马氏体 Cr-Mo 合金钢,所以适合冲击比较大的大型半自磨机。

(4)橡胶衬板　橡胶是具有良好弹性的聚合物材料,同时具有良好的耐磨损和耐腐蚀性能,自廿世纪六十年代瑞典的 SKEGA 公司成功将橡胶用于球磨机衬板以来,人们广泛开展了橡胶作为磨机衬板的研究和开发工作,并取得了一定的效果[8-10]。橡胶衬板可以降低磨机衬板重和运行的噪音,提高衬板的使用寿命,但因其弹性性质,作为筒体衬板吸收了磨球和物料的冲击能量,降低了物料的破碎程度,从而降低了球磨机的磨矿效率。德兴铜矿大山选厂在 ϕ5.5 m×8.5m 球磨机中整套装机运行过橡胶衬板,生产统计表明,安装了橡胶衬板后,磨机的磨矿效率降低了近 10%[13]。由此表明,橡胶不适合作为磨机筒体衬板的材质。但作为磨机中的其它部位的衬板,如端衬板、进出料口衬板,以及作为 ϕ3.2 m 以下直径的磨机筒体衬板等,橡胶还是有优势的[11]。

2　半自磨机衬板的研制

针对德兴铜矿 ϕ10.37m×5.19 m 半自磨机的衬板,西安理工大学和江西铜业集团(德兴)铸造有限公司合作进行了研制。首先,对国内大型半自磨机衬板的使用情况进行了调研。铜陵冬瓜山铜矿引进美卓公司生产的 ϕ8.53 m 半自磨机筒体衬板采用的是珠光体 Cr-Mo 钢,其主要成分 w (%) 为:0.6~0.8 C、0.3~0.5 Si、0.5~0.8 Mn、1.8~2.5 Cr、0.5~0.8 Mo 和 0.5~0.8 Ni,其金相组织为珠光体,如图 1 所示。力学性能为:硬度 32~36 HRC,冲击韧度 70~80 J/cm^2。该种材质和性能的衬板经过结构、磨球尺寸和操作参数等的调整,使用寿命可达 4 个月[12]。

内蒙古乌努格吐山铜钼矿的 ϕ8.8 m 半自磨机衬板使用的是磨机制造厂家生产的,其筒体衬板也是珠光体 Cr-Mo 钢,使用寿命 3.5 个月。

表 2 自磨机铁合金衬板的相对寿命
Tab.2 Relative life of iron alloy liner used in self-grinding

合金种类	球介质试验	ϕ11.0 m 壳体衬板	ϕ8.2 m 壳体衬板	ϕ9.8 m 壳体衬板	ϕ9.8 m 端部衬板	ϕ14.4 m 端部衬板
奥氏体 12%Mn 钢	0.64	—	—	—	—	—
珠光体 0.8%C Cr—Mo 合金	0.70	—	0.46	0.48	—	0.54
马氏体 0.4%C Cr—Mo 合金	0.77	0.63	0.67		0.73	0.81
马氏体 1.0%C Cr—Mo 合金	0.85	—	—	—	—	0.94
马氏体 2%Cr—4%Ni 铁合金	0.83	0.67	—	—	—	—
马氏体 8%Cr—4%Ni 铁合金	—	0.79	—	—	—	—
铬—钼铸铁	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

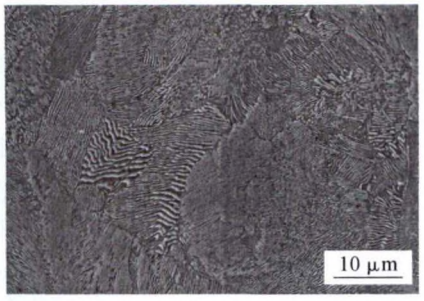

图 1 冬瓜山铜矿 ϕ8.53 m 半自磨机衬板组织
Fig.1 Microstructure of ϕ8.53 m semi-autogenous mill liner in dongguashan copper mine

德兴铜矿 ϕ10.37m×5.19 m 半自磨机生产厂家配置的衬板，材质为高碳 Cr-Mo 钢，硬度HRC30-35，冲击韧度 16~42 J/cm^2，其金相组织如图 2。由于该钢种碳量较高及热处理温度过高或时间过长，显微组织中出现了块状的二次碳化物，以及珠光体组织比较粗大(与图 1 的组织相比)，故其冲击韧度值较低。

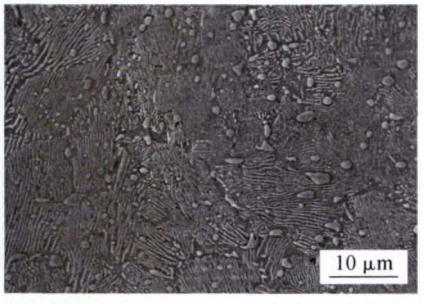

图 2 磨机厂家 ϕ10.37 m 半自磨机衬板组织
Fig.2 Microstructure of ϕ10.37 m semi-autogenous mill liner provided by mill manufacturer

根据上述调研及测试分析，初步确定了试制的 ϕ10.37m×5.19 m 半自磨机衬板的主要成分 w (%) 为：0.6~0.8 C、2.0~3.5 Cr、0.3~0.6 Mo、0.3~0.6 Ni，配以调质处理，力学性能为：硬度 35~40 HRC，冲击韧度 60~90 J/cm^2，金相组织如图 3。除了很少量的沿晶界析出的碳化物外，珠光体非常细小。

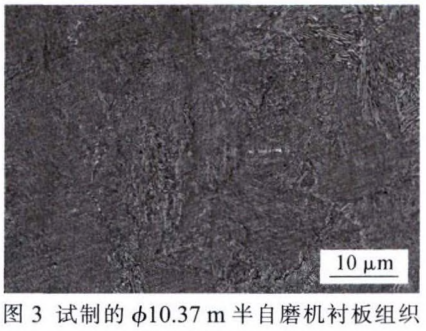

图 3 试制的 ϕ10.37 m 半自磨机衬板组织
Fig.3 Microstructure of ϕ10.37 m semi-autogenous mill trial liner

装机运行表明，磨机生产厂家配套的筒体衬板运行 1 个月后发生断裂(见图 4)，且为横向断裂，表明该衬板的脆性较大(冲击韧度偏低)。试制的衬板运行 20 多天后，也发生了断裂，断裂主要发生在衬板安装孔和薄壁处处(见图 5)。

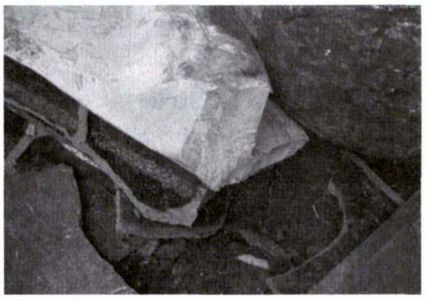

图 4 厂家配套衬板断裂形貌
Fig.4 Fracture morphology of manufacturer supporting liner

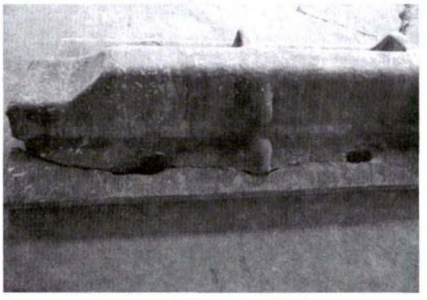

图 5 试制衬板断裂形貌
Fig.5 Fracture morphology of trial liner

ϕ10.37 m 半自磨机筒体衬板初始设计为两圈，每圈 44 块。衬板主要有两种形状，一种是图 5 所示的，安装孔在衬板薄壁处处，共 8 个，衬板长度 2.35 m；另一种是安装孔在提升条上，共 3 个衬板长度 1.96 m，两种衬板均为高提升条设计，提升条高度 215 mm，衬板厚度 90 mm，宽度为 722 mm。由于所设计的衬板尺寸较大且壁厚差异也大，给铸造和热处理带来了很大的困难，尤其是铸造和热处理过程中难以使成分、组织和性能均匀，以及保证安装面的平整度。试制的衬板断口宏观形貌观察可见，断口局部光亮(见图 6)，这是典型的疲劳断裂特征，即裂纹形成后并不是马上扩展断裂，而是在反复受力作用后，裂纹发生反复的张开和闭合，从而造成了裂纹表面受到反复挤压作用，形成了表面光滑的形貌。这也表明了试制的衬板具有较好的韧性。

图 6 试制衬板宏观断口形貌
Fig.6 Macro fractograph of trial liner

针对 ϕ10.37 m 半自磨机筒体衬板经常性出现断裂现象，我们提出了减少衬板尺寸和壁厚差的改

进意见，生产厂家利用离散元 DEM 软件模拟半自磨机的运行状况，并利用模拟结果对筒体衬板进行了改进：由原设计的 44 块 2 圈全高波峰衬板改成 66 块 3 圈(按高-平-高方式)布置衬板(见图 7 和图8)，即一个筒体衬板有较高的提升条，相邻的另一个筒体衬板提升条高度比衬板基体略高(<50 mm)，由此减少单块衬板件重，提高衬板使用率；其次改变了衬板提升条的夹角(切线的面角由原设计的 50°改为 60°，见图 8)[13,14]。因衬板的提升条越高对钢球、物料的提升程度就越高，为此将顶部提升角减小使物料落到接近物料趾部，增加中间区域提升角，使更多的物料被提起，避免提升能量浪费，同时降低了钢球、物料对衬板的冲击作用，间接提高衬板的使用寿命。衬板尺寸改小后，铸造、热处理操作更好控制，有益于提高衬板质量。经过这样的优化后，ϕ10.37 m 半自磨机筒体衬板的使用寿命达到了 4 个半月，满足了半自磨机运行的要求。

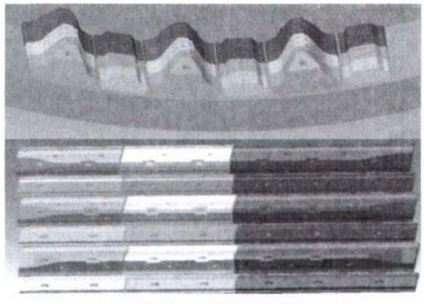

图 7 优化后的衬板装配图
Fig.7 Schematic of liner assembly after optimization

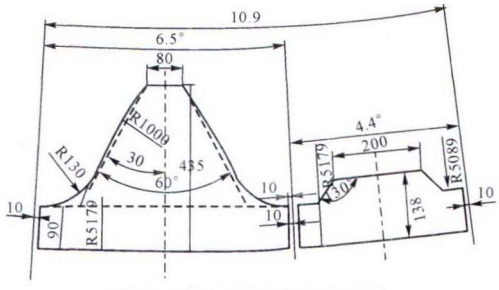

图 8 优化后的衬板截面图
Fig.8 Liner cross section after optimization

此外，参考橡胶衬板在球磨机上的使用情况和结果，针对橡胶衬板的特性，并结合耐磨钢的特性，在 ϕ10.37 m×5.19 m 半自磨机端衬板和进出料口衬板采用了钢-橡胶复合衬板，不仅减轻了衬板的件重，而且解决了端衬板的漏浆难题，并且对半自磨机的生产能力、磨矿效率、产品细度没有明显的影响[13]。由此表明，钢-橡胶复合衬板可以取代合金钢钢衬板作为大型半自磨机的端衬板和进出料口衬板。

3 总结

在综合分析国内外大型半自磨机衬板的材质和性能基础上，结合 ϕ10.37 m×5.19 m 半自磨机衬板的使用情况，对其进行了成分、结构和尺寸的优化，从而使筒体衬板的使用寿命达到了 4 个半月。端衬板和进出料口衬板改用钢—橡胶复合衬板，也取得了较好的使用效果。这些工作为大型半自磨机衬板的开发和应用提供了基础和借鉴。

参考文献：

[1] 及亚娜，刘威. 自磨、半自磨设备工艺发展现状及应用实践[J]. 现代矿业，2015(1): 186-188.
[2] 张清. 磨机衬板用钢及其发展[J]. 水利电力机械，1987(4): 45-51.
[3] 张永谋，罗玉旗. 水泥磨高锰钢衬板变形原因分析 [J]. 水泥工程，2003(3): 55-56.
[4] J. L. 帕克斯，顾琦译. 论自磨机与半自磨机衬板的寿命(二)[J]. 国外金属矿山，1990(12): 73-76.
[5] 李固成，屈青山，韩书臣，等. 高铬铸铁衬板在特大型球磨机上的国产化应用[J]. 中国铸造装备与技术，2008(1): 32-34.
[6] 毛静波，谢志勇，许涛，等. 大型磨机高铬铸铁衬板的研制[J]. 铸造技术，2005，26(10): 986-987.
[7] 付昌会，张进孝. 湿式磨机衬板的研制 [J]. 铸造，2000，49(9): 565-567.
[8] 李庆恒，江敏，刘海燕. 橡胶衬板在某铜镍选矿厂的应用[J]. 世界有色金属，2014(3): 31-33.
[8] 陈海辉，张小平，王阳冬. 磨扩机用耐磨橡肤衬板的发展[J]. 国外金属矿选矿，1999(5): 15-17.
[10] 方志坚，余玮. 橡胶衬板在特大型球磨机中的应用[J]. 冶金矿山设计与建设，2000，32(3): 30-31.
[11] 陈祥. 橡胶衬板在 MQY2100×3600 球磨机上的应用 [J]. 矿山机械，2000(7): 81.
[12] 唐新民. 冬瓜山铜矿半自磨机筒体衬板和钢球的研究 [J]. 化工矿物与加工，2013(10): 20-25.
[13] 刘建平，姬建钢，陈松战，等. 一种半自磨机筒体衬板的优化设计[J]. 矿山机械，2014，42(10): 81-83.
[14] 方志坚. 大山厂半自磨系统的技术创新与改造 [J]. 铜业工程，2014(6): 44-50.

欢迎到当地邮政局(所)订阅 2019 年《铸造技术》杂志
国内邮发代号:52-64　国外发行号:M855　国内定价:18 元/本　海外定价:18 美元/本