

综合评述

“双碳”目标下球磨机节能降耗技术研究进展

杨俊彦, 孙浩杰, 谷建国, 张圣东, 游世辉

枣庄学院 机电工程学院, 山东 枣庄 277160

中图分类号: TD921¹.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)01-0169-10
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.01.017

摘要 球磨机广泛应用于冶金矿山行业, 磨矿作业的动力消耗与金属消耗较大, 如何有效降低能耗与金属消耗是一项重要研究内容。主要从磨机自身结构改进、精确化装补球技术、耐磨材料制备技术三个方面进行综述。磨机自身结构改进主要包括以下措施: 球磨机大型化、将边缘传动改为中心传动、将滑动轴承改为滚动轴承、改善研磨介质与衬板种类与形状。精确化装补球技术在我国矿山中应用广泛, 均不同程度地降低了球磨机的电耗与球耗。耐磨材料制备技术主要围绕锰钢材料、铸铁材料、合金钢材料、双金属复合材料、磁性材料、橡胶材料的设计与制备进行了阐述, 主要通过微合金化设计、热处理制度改进达到细化晶粒、转变组织的目的, 提高材料的耐磨性, 从而降低磨损率。

关键词 球磨机; 节能降耗; 磨矿介质; 精确化装补球; 耐磨材料

引言

矿产资源是国民经济建设最基本的原材料, 世界上90%以上的能源、80%以上的工业原料和70%以上的生产资料均来自于矿产资源^[1]。目前中国的矿产资源以贫细杂为主, 选矿工艺是矿产资源回收最有效、成本最低的手段, 而磨矿作业又是选矿过程中不可缺少的工序, 其磨矿质量往往决定着选矿指标的优劣^[2]。球磨机是磨矿工艺中应用最广泛的设备, 它可将矿物磨成细小的颗粒, 研磨的目的是把有用的矿物与脉石解离出来, 从而为后续分选作业提供合格给矿。然而, 磨矿作业的动力消耗和金属消耗很大, 通常电耗为6~30 kW·h/t, 约占选矿厂电耗的30%~75%, 更有甚者达到85%, 磨机的磨矿介质和衬板消耗达到0.4~3 kg/t^[3], 如何实现球磨机磨矿过程节能降耗, 成为了各大矿业集团与科研工作者研究的热点。根据国家《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》中“做好碳达峰、碳中和工作”的目标要求, 到2025年, 绿色低碳循环发展的经济体系初步形成, 重点行业能源利用效率大幅提升, 单位国内生产总值能耗比2020年下降13.5%。因此, 矿业行业必须主动对接绿色发展和“双碳”行动要求, 紧扣行业

发展现状和特点, 通过绿色转型推动高质量发展, 从粗放浪费到集约高效, 构建能耗低、排放少的高质量发展新模式, 推动矿业行业健康发展。

在“双碳”目标背景下, 矿业行业面临新机遇和新挑战, 自然资源管理部门还专门制定了《绿色矿山建设评价指标》, 将绿色发展理念贯穿于矿业开发全过程。在磨矿过程中, 通过改进磨机装配球工艺、更换耐磨衬板与磨矿介质, 可有效降低能耗与钢耗, 提高选别指标。因此, 磨机的节能降耗研究具有重要意义, 本文主要从磨机自身结构改进、精确化装补球技术、耐磨材料制备技术三个方面进行综述。

1 磨机自身结构改造

1.1 磨机结构

以选矿厂最常见的 $\Phi 2.7\text{ m}\times\Phi 3.6\text{ m}$ 格子型球磨机为例, 球磨机是由电机通过联轴器连接减速器, 最终带动筒体转动, 在此过程中电能转化为机械能效率一般为90%左右^[2], 而由上述机械能经传动系统转换为磨矿介质的机械能效率一般为85%左右^[4], 经过两次能量损失后, 转换为磨矿介质的机械能大约损耗了20%~25%, 最终, 磨矿介质机械能转换为有用功与破

收稿日期: 2022-05-27

基金项目: 枣庄学院博士科研启动基金项目(BS1020717); 枣庄学院高层次人才团队建设经费项目(5010207); 枣庄市科技发展计划项目(2020GX11)

作者简介: 杨俊彦(1986—), 男, 山东青岛人, 博士, 讲师, 主要从事矿物综合利用研究, E-mail: yang8865139@163.com。

通信作者: 游世辉(1962—), 男, 江西萍乡人, 博士, 教授, 主要从事力学与矿物综合利用研究, E-mail: 101434@uzz.edu.cn。

碎损失功。如表 1 磨矿机的能量平衡表中可见,磨矿介质与衬板之间的摩擦产生的热量占据了破碎损失功的大部分,磨矿过程中能量用于产生新面积的很少,大部分都通过热量损失,现场球磨排料矿浆温度升高也证实了这一点。因此,磨机节能降耗的途径可

以从以下三点入手:(1)进行磨机传动系统结构改进,减少传动过程能量损失,但潜力不大;(2)提高磨矿介质机械能转换效率,潜力巨大,主要措施以精确化装补技术为代表;(3)提高衬板或磨矿介质的耐磨性,从而减少介质损耗,提高衬板的使用寿命,降低生产成本。

表 1 磨矿机的能量平衡^[4]

Table 1 Energy balance of mill^[4]

能量分配	管磨机/%	三锥磨机 破碎矿石/%	旋转磨机 石灰石粉碎/%	三锥磨机 硫酸钙矿石/%	实验室 小振动磨/%	工业水泥/%
轴承与齿轮的摩擦	12.3	-	-	-	56~29	8.2~14.9
筒体放射的热	6.4	21.0	8.0	20.0	8~20	8.7~22.2
粉碎产品带走的热	47.6	26.0	18.0	37.0	18~34	42.7~71.6
空气带走的热	31.0	19.0	14.0	29.0	-	11.2~16.3
水蒸气带走的热	-	38.0	56.0	-	-	-
介质摩擦生热、振动、发声	3.0	-	-	-	-	-
理想的粉碎效率	0.6	-	-	-	-	0.14~0.22

1.2 球磨机自身结构改造

近年来,为了降低能耗,球磨机自身结构改造方面的研究热点主要集中在以下几个方面:

第一,提高球磨机的规格,使球磨机大型化,以提高磨机生产率,从而降低电耗。以 $\Phi 7.32 \text{ m} \times 9.60 \text{ m}$ 球磨机为例,装机功率达 10 000 kW,相当于 8 台 $\Phi 3.6 \text{ m} \times 6.0 \text{ m}$ 球磨机的功率^[5]。 $\Phi 6.7 \text{ m}$ 以上的大型球磨机与小规格磨机相比,单位矿量电耗可降低 22.7%,球耗降低 14%,耐磨材料单耗降低 33%^[6]。2007 之前,大型球磨机设计制造技术主要掌握在丹麦 FFE Minerals 公司、澳大利亚奥托昆普(现称奥图泰)公司、芬兰美卓公司、德国 Krupp 公司和日本的川崎重工等公司手中。苏联西部贝辰加镍公司安装了两台为 $\Phi 6.5 \text{ m} \times 9.65 \text{ m}$ 的球磨机,为当时世界上最大球磨机,每吨矿石研磨总费用降低了 30%^[7]。2008 年,我国中信重工研发成功 $7.93 \text{ m} \times 13.6 \text{ m}$ 溢流型球磨机^[8],装机功率 17 000 kW,采用两个低速同步电动机+气动离合器+小齿轮轴组共同驱动大齿轮,从而带动磨机筒体旋转的驱动方式,是当时国际规格最大、设备配置最高球磨机设备^[8],此设备也应用在紫金矿业集团股份有限公司紫金山金铜矿,这些改进措施大大降低了磨机的能耗。

第二,将滑动轴承改为滚动轴承。孙羽生^[9]在 MQG210/300 型球磨机上用 4G30039/800H 型滚动轴承代替滑动轴承,可使电机功率减少、能耗降低,大量的研究结果^[10-13]表明滚动轴承的更换可以降低电机功率 13%~20%,电耗降低 8% 以上。目前,这项技术也广泛应用在各大矿山的球磨机上^[14-15]。

第三,衬板形状改进。球磨机大部分衬板为波浪状,具有耐磨防护与提升钢球的作用,有研究表明效果较好的是使物料及钢球产生抛落运动的衬板,采用

$\Phi 0.9 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 球磨机进行试验,试验参数如下:球磨机转速为临界转速的 60%,矿浆固体含量 64%,钢球大小为 25.4 mm、38.1 mm、50.8 mm(质量比为 15 : 45 : 40),采用角螺旋衬板的电耗要优于果穗状衬板与波纹形衬板,电耗下降 15%^[16]。还有研究表明:在铜山矿 $\Phi 3.2 \text{ m} \times 3.1 \text{ m}$ 球磨机中以转速为 18 r/min 的条件下进行试验,采用等厚衬板较波形衬板增产、节能、降耗。然而,也有研究认为物料直径较小时,应该先用波形衬板,此时磨机效率最大;物料直径较大时,应选用低能量碰撞相对较少的矩形或梯形衬板^[17]。

除此之外,还有不少技术运用于降低球磨机电耗,采用中心传动取代边缘传动后^[18-22],有效降低了电耗;提高筒体转速率、改善研磨介质种类与形状,也是最简单有效的措施。三山岛金矿 8 000 t/d 选矿厂 MQY5.5 m $\times$ 8.5 m 大型球磨机经转速率优化后,磨机电耗降低 17.24%^[23]。Lameck 等人^[24]分析了功率消耗对介质形状和操作参数(转速和填充率)的敏感性,当充填率分别为 15% 和 25% 时,功率消耗对介质形状都是敏感的。当磨机的速度约为临界速度的 72% 时,在圆柱体和球形介质存在的情况下,相同充填率条件下的耗电量是相似的,然而,超过这个速度后,以圆柱体为介质的磨机耗电量减少,而以球状为介质的磨机耗电量增加,以圆柱体为介质的磨机的功率在较低的转速下达到最大。另一方面,以圆柱体为介质的磨机在大于 90% 的转速率下达到最大功率,这与球磨机的数据相反。这可能是由于提升器/介质的比例较高导致的,从而需要更多的力量来举起仍然锁在提升器之间的球^[25]。F.Shi^[26]试验结果表明,在相同功率下,以圆柱体为介质的磨机产出的产品表面积较球形介质略微偏大,这也说明在一定条件下,以圆柱体为磨矿介质可以降低

电耗与钢耗。在我国,采用钢锭替代钢球有了较为广泛的应用^[27-28],分别在铁矿^[29-30]、金矿^[31]、磷矿^[32]等矿山球磨机中应用,均不同程度起到了节能降耗的作用。陶瓷球是一种密度低的研磨介质,其密度仅为钢球的一半,应用在卧式球磨机中效果差,然而,将其应用在立式磨机中,可以通过提高转速从而提高磨机效率,最近一项研究表明,应用后可降低能耗 38.5%,降低磨机介质损耗 60%^[33]。同样地,在我国纳米陶瓷球的理论与应用研究较多,大量的研究结果^[34-41]均表明,陶瓷球作为立式磨机的研磨介质可有效降低电耗和损耗,提高磨矿产品的粒度均匀性。但是,随着科技的进步,仍然有大量的技术手段受到技术水平或成本的限制,虽然能够有效节能降耗,但仍然推广缓慢。例如,磁性衬板在我国的铁矿中有广泛的应用^[42-47],虽能够起到节能降耗的作用,但因为价格高、适应范围窄等,推广应用缓慢。

总之,磨机的大型化是解决球磨机能耗高的有效手段,中心传动、滑动轴承、磨矿介质衬板形状改进等方面的技术已经在球磨机中应用广泛,均起到了不同程度的节能降耗效果。但与大型球磨机配套的机械传动技术、摩擦与润滑、磨矿介质与衬板的耐磨材料研究相对滞后,需要加强此方面的基础研究,找到节能降耗的理论支撑。

2 精确化装补球技术

精确化装补球技术提高了磨矿介质机械能转换效率,是球磨机节能降耗的有效手段,该技术是我国著名磨矿专家段希祥教授提出的,广泛应用于各类矿山,虽然只是一个半经验公式为主导的技术,但均不同程度地降低了球磨机的电耗与球耗,是一个经过实践证明了的节能降耗技术。

2.1 理论研究进展

磨机自 19 世纪末进入矿业以来,在生产实践中已有百余年的历史,积累了大量经验。然而,磨矿理论研究一直滞后于生产实践,即使是研究最深入的钢球抛落运动状态,其理论结果与生产实际仍存在较大偏差,很难直接计算出实际生产方案。有关装补球的问题,几乎都是通过试验来解决的,试验方法费时费力,且条件与工业应用相差巨大。

目前,球磨机的装球和补球方式主要有简易填球法和精确化装补球法。我们知道,多球直径混合磨矿效果优于单球磨矿效果,一种解释是,大矿块应该用大球破碎,而细粒矿石应该用小球破碎。磨矿给料中矿石颗粒大小不一,应采用不同直径的球磨机进行磨矿。另一种解释是,小球填装在较大球隙的中间,强化了矿物单体的解离和研磨,提高了研磨效果。然而,由于填装球的添加是规律的、连续的,即使只添加一

种大球,磨损也会使依次添加的球形成自然的大小比例。因此,无论是在初始球中加入大球还是各种混合球,经过一段时间后,初装球所占比例自然会因磨损而消失。因此,磨机中的球荷载是通过添加钢球来形成的,装球方式有多种,而补球方式只需一种简单的装球方式,即只加一个大球。以上就是简易填球法的装补球过程,该方法计算简单,可直接使用半经验公式计算初始球的大小和类型,简化了生产管理。但该方法针对性较差,导致钢球直径过大,研磨效率低,材料消耗大,在践行绿色发展理念的今天是不可取的。

在 20 世纪 40 年代,苏联对球磨机的装球方法进行了系统的研究,开发了一种合理平衡装球方法,针对性比较强。这一方法在我国教材《破碎与研磨》一书中得到了系统的介绍,主要技术要点如下^[4]: (1) 对磨机的新给矿和返砂进行筛析,根据返砂比推算出待研磨物料的粒度组成,按照粒度对待研磨物料进行分组,计算出每组物料所需钢球的尺寸。最后,根据钢球尺寸配比大致相当于计算所依据的各组矿粒百分率的原则进行配球。也就是说,所确定的球径比与被研磨材料的粒度特性相适应。(2) 进行实验室磨矿试验,确定 K.A.拉苏莫夫球径公式 $D=id^n$ 中的参数 i 及 n ,得到针对该矿石性质的球径公式。(3) 以磨矿效果良好条件下的球荷载级组成当作补球计算的依据,力求补球以后达到好的球荷组成情况。20 世纪 50 年代初,合理平衡装球法的应用推广率先从我国东北地区起步,普遍提高了磨机生产率 10% 左右,取得了显著成效,直到上世纪六、七十年代,一些选矿厂还在对合理平衡装球法进行工业性试验,但由于工艺复杂、测试工作量大、周期长、效果差,此技术逐渐退出了历史舞台。

目前,精确化的装补球技术^[48]是经过试验证实的有效提高球磨机产量及节能降耗的方法,主要技术要点如下: (1) 对特定矿石进行筛选和分析,确定其粒度组成特性并进行分级; (2) 分析特定矿石的抗破碎力,利用球径半理论和半经验公式计算出破碎各级矿石所需的准确球径。(3) 根据待研磨物料的粒度级特点,运用破碎统计力学原理指导钢球配比,使破碎概率最大化,或根据研磨产品中存在的问题,采用大小级配球以强化某些粒级的破碎,完成初装球的精准配比; (4) 一次性完成装补球计算。采用与物料粒度特性相适应的、科学的初装球配比作为补球计算的依据,简化了补球计算,减少了补球类型。该方法既保留了合理平衡装补球法针对性强的优点,又避免了球径不准确的缺点,将简单补球法与合理平衡装补法相结合。该方法计算球径较准确,但是补球计算较为粗放,便于在生产中推广应用。因此,此方法的特点是是大精确而小粗放,效果显著且便于推广应用。因此,精确化装补球法从我国的实际情况出发,吸取了以往装补

球的经验和教训,具有优异的磨矿和选别效果,是一种值得推广应用的装补球方法,球径半理论具体公式(1)如下^[48]:

$$D_b = K_c \cdot \frac{0.5224}{\psi^2 - \psi^6} \cdot \sqrt[3]{\frac{\sigma_{H_i}}{10 \cdot \rho_e \cdot D_0}} \cdot d \quad (1)$$

D_b -特定磨矿条件下给矿粒度为所需的精确球径, cm;

σ_{H_i} -单轴抗压强度, kg/cm²;

d -给矿 95% 过筛时的筛孔长度, cm;

ψ -磨机转速率;

ρ_e -钢球在液体中的有效密度, g/cm³;

D_0 -球荷中间缩聚层直径, m;

K_c -综合修正系数;

2.2 应用研究进展

《球磨机钢球尺寸的理论计算研究》^[48]、《球径半理论公式的修正研究》^[49]这两篇文章详细推导出了精

确化装球的半理论公式,专利《两段磨矿的精确化装补球方法》^[50]、《球磨机精确化装补球与能耗前移结合的增产节能方法》^[51]中也详细阐述了此方法的使用环境。精确化装补球技术工业应用前后对比初验数据见表 2。精确化装补球技术先在金平镍矿应用^[52],在装球总量不变时球径精确后绝对电耗下降 2.73%,如果考虑功率不变时生产率的提高,单位矿量电耗下降 11.75%。之后此技术又分别在大红山铜矿^[53]、云南某铁矿^[54]、狮子山铜矿^[55-56]进行应用,均取得了良好的节能降耗效果,大红山铜矿选厂球磨机钢球消耗和磨矿能耗显著下降,其中球耗下降了 16.67%,电耗下降了 18.44%。近些年以来,此技术又应用在金矿^[57-59]、铜矿^[60-61]的磨机上,同样取得了良好的效果。至此,通过理论与实践证实了此技术可有效的提高磨机的生产效率,降低磨机的电耗与球耗,是目前国内应用最广泛的精确化装补球技术。

表 2 精确化装补球技术工业应用前后对比初验数据

Table 2 Comparison of preliminary data before and after industrial application of accurate ball make-up technology

应用矿山	应用前后	磨机型号	台时处理量/(t·h ⁻¹)	磨矿细度 (-0.074 mm 占比) /%	球耗/(kg·t ⁻¹)	电耗/(kW·h·t ⁻¹)
金平镍矿	应用前	Φ1.5 m×3.0 m	5.11	57.28	0.521	/
	应用后		5.35	68.67	0.419	/
	提高或降低		0.24	11.39	0.102	11.75%
大红山铜矿	应用前	Φ3.6 m×4.5 m	53.24	64.82	0.72	26.09
	应用后		63.08	70.84	0.60	21.28
	提高或降低		9.84	6.02	0.12	4.81%
狮子山铜矿	应用前	Φ3.2 m×3.1 m	38.54	76.41	/	/
	应用后		45.21	84.92	/	/
	提高或降低		6.67	8.51	11.16%	2.91%
金翅岭金矿	应用前	Φ3.2 m×4.0 m	63.00	44.35	1.22	12.17
	应用后		68.00	51.51	0.96	10.96
	提高或降低		5.00	7.16	0.26	1.21%
银山铜矿	应用前	Φ4.8 m×7.0 m	/	65.00	0.52	7.85
	应用后		/	68.00	0.50	7.30
	提高或降低		/	3.00	0.02	0.55%

最近几年,精确化装补球技术也出现了新的发展,魏明安等^[62]提出一种选矿厂球磨机初装球的等面积装补球方法,此方法是一种过程简单、装补球效果明显、降低成本提高经济效益的装补球方法,创新之处在于按照初装球级配规格及表面积相等原则计算初装球比例,也可大大提高磨矿效率,从而降低电耗与球耗。纳米陶瓷球替代钢球也有利于球磨机的节能降耗,江西理工大学吴彩斌教授团队在纳米陶瓷球^[34,63-64]精确化装补球技术应用方面做了大量工作,通过对立式磨机应用陶瓷球替代钢球技术,有效降低能耗 38.5%,降低磨机介质损耗 60%^[33]。

总之,精确化装补球技术公式虽然是一个半经验公式,但在我国各大矿山球磨机应用广泛,可有效实现球磨机的节能降耗。但这个公式是基于罗金的粉碎假说推导的,假设矿粒为球形,然而,实际排矿颗粒多为不规则形状,并且没有考虑到钢球对矿粒的磨剥作用,这就导致了现场应用的适应性的问题。在细磨生产中,虽然也有大量的钢锻圆柱体或六棱柱介质的研究,但仍然很难达到预期目标,这可能是因为细磨作业需要更强的磨剥能力导致的。在精确化补球技术方面,以传统的磨损模糊计算—作图法计算—转移概率计算为发展路径,逐步实现了精确化补球技术在

我国矿山中的应用。

3 耐磨材料制备技术现状与进展

在球磨机工业生产中,磨矿介质与衬板是最主要消耗件,消耗方式为磨损。据统计磨损消耗了 30% 的一次性能源,每年因磨损造成的经济损失高达 40 亿元^[65]。球磨机内有冲击、磨损、腐蚀等工况条件,介质(多为磨球)在磨机内与物料发生冲击、磨剥作用,导致磨球及衬板破碎或开裂。磨球材质种类繁多,按制备工艺可分为铸造、锻造、轧制球^[66];按金相组织分类可分为马氏体球、珠光体球、奥氏体球、贝氏体球、贝/马氏体球、奥/贝氏体球等;按照化学成分可划分为铁球和钢球两大类,其中钢球主要是合金钢球和碳钢球,铁球主要为普通铸铁球、合金化铸球及多元素低合金铸球。目前应用最广泛的为铸铁球,根据铬的含量不同,分为高、中、低铬球。高铬球耐磨性强,但因为含有莱氏体,易发生破碎;低铬球韧性低,在使用过程中易发生脆性断裂,应用较少。轧制球以热轧圆钢为原材料,经轧制后再热处理,其硬度高、耐磨性好,抗冲击性能优良。锻造球组织致密、避免了冶金缺陷,为大型磨机介质的首选。

球磨机生产的稳定性、使用寿命与磨损有密切关系,因此,提高耐磨材料性能可有效降低球磨机的电耗,增长磨球与衬板的使用时长,降低生产成本。磨球与衬板材料的技术研究路线类同,主要从合金化、热处理制度等方面提高材料的硬度、耐磨性。因此,下面以球磨机衬板为例,综述耐磨材料的制备现状与进展。从材质角度分类,球磨机衬板材料可分为金属材料与非金属材料,目前主要有锰钢材料、铸铁材料、合金钢材料、复合材料、磁性材料等衬板类型。

3.1 金属材料衬板

3.1.1 锰钢材料

锰钢材料主要包括中锰钢、高锰钢、超高锰钢。高锰钢指钢中锰含量大于 10% 的合金钢,奥氏体组织高锰钢在 1882 年被 R.A.Hadfield 首次发现以来,大量应用在冶金矿山的耐磨材料领域,主要用于较高的抗冲击磨损的应用场景,如圆锥破碎机、矿山设备、挖掘机斗齿、球磨衬板等磨损件。在主导载荷为动态载荷的条件下,通过加工硬化,可使表面硬度从 200 HB 显著提高到 500 HB。大多数研究人员用奥氏体相依赖于锰碳比的堆垛层错能来解释这种性质的变化^[67]。尽管高锰钢具有较高的加工硬化速率,但其耐磨性仍然相当低,特别是在磨料颗粒的作用方式从直接穿透转变为微切割的情况下,在磨矿环境中因化学侵蚀环境的存在而变得复杂,则会导致严重的磨损率。为了解决这些问题,采用在钢中加入 Cr、Mo、Ti、V 等元

素的溶出强化和析出强化方法,提高传统 Hadfield 钢的屈服强度^[68],高锰耐磨钢的合金化可以提高耐磨性,一些过渡金属(Ti、Nb、V、Mo 与碳,形成热力学稳定的 MC 型碳化物^[69],可以显著降低磨损。但是,这种类型的合金通过增加液相表面张力和黏度,进而导致了在凝固期间形成裂纹,所以必须严格控制过渡金属的添加量。为了提高高锰钢的耐磨性,通过 V、Ti 单元素合金化方案与 V-Ti、V-Ti-RE 多元合金化方案对高锰钢进行合金化处理,可使衬板磨损率降低 2.8%~61.1%,采用只添加钒或钛的单元素合金化方案时,提升效果更显著,采用单独添加含量为 0.0073 % 的 Ti 元素时,高锰钢耐磨性能最好^[70]。有研究表明锰含量越高耐磨性越好。将锰含量由 17.2% 提高到 20.9%,再添加微量的 W、V 元素能够进一步提高超高锰钢的屈服和抗拉强度,提高耐磨性能^[71]。还有研究表明高锰钢经水韧处理后其耐磨性增加,这是由于奥氏体组织和第二相的出现导致的^[72]。

中锰钢具有优良的冲击韧性和冲击耐磨性。在中、低冲击载荷下,中锰钢的加工硬化能力和耐磨性分别提高 60%~120% (700 HV) 和 50%~140%^[73]。在以往的研究中,对中锰耐磨钢的合金化、热处理、加工硬化和摩擦磨损性能进行了研究^[74-75]。结果表明:中锰钢在中、低冲击载荷下具有形变诱发马氏体相变的自强化效应,它们表现出比马氏体钢和贝氏体钢更好的抗冲击磨损性能^[76]。加入稀有金属 Mo 和 V 后微合金化的中锰钢磨损质量损失比马氏体钢降低了约 30%,这是由于表面形成 1mm 厚的硬化层导致的,耐磨强化机制依赖于冲击能,当冲击能量较低时,强化机制由马氏体相变、位错和层错复合强化控制,在高速冲击下,强化机制由马氏体相变、形变孪晶和位错控制。还有研究表明临界退火得到适量的残余奥氏体,具有良好的稳定性,相变诱导塑性 (TRIP) 使其具有较高的强度和较好的塑性^[74]。

3.1.2 铸铁材料

耐磨铸铁材料是一种高硬度、高耐磨性能的铸铁,合金中碳主要以碳化物形式存在,主要分为白口铸铁、镍硬铸铁和高铬铸铁等,其中高铬铸铁在耐磨铸铁中占据主导地位。高铬铸铁的含碳量为 2.2%~3.6%,含铬量为 11%~30% 的合金白口铸铁,采用淬火加低温回火工艺进行热处理,主要由 M7C3 型碳化物弥散在马氏体及残余奥氏体中,具有超优的抗磨损性能,硬度 HRC 一般大于 55,同等条件下耐磨性是高锰钢的 2~6 倍^[77],但由于在热处理中容易发生变形,并且 M7C3 型碳化物使晶体容易发生裂纹,所以应用在无冲击或低冲击的载荷工况,适宜应用在小型细磨球磨机、粉磨机。为了提高高铬铸铁材料的耐磨性,同样采用添加 Cu、Ti、V、B^[78-82] 等微量合金元素达到细化晶粒的

目的,并采用合理的热处理工艺进行强化。

3.1.3 其他金属材料

除上述两种材料外,合金钢材料、双金属复合材料、磁性材料也应用在耐磨衬板领域。合金钢材料主要分为低合金钢材料和中合金钢材料,低合金耐磨铸钢是指合金的质量分数在 5% 以下,中合金耐磨铸钢是指合金的质量分数在 10% 以下。同样地,加入稀土及稀有金属元素可以达到细化晶粒、提高耐磨性的目的,也正是由加入的合金元素种类多,最近的研究热点为多元低中合金耐磨铸钢的制备与设计,根据组织的不同,主要是研究马氏体耐磨铸钢、贝马复相马氏体耐磨铸钢两大类。这两类材料的硬度最高可达到 HRC57 以上,西北工业大学早在 1995 年就研制成功了新型准贝氏体钢,冲击韧度、耐磨性均得到提高^[83],而这种组织由贝氏体铁素体和分布其上的残余奥氏体膜组成^[84];而 Mn-B 系^[85]空冷贝氏体中含有贝马复相马氏体组织,具有良好的耐磨性。

双金属复合材料硬度高、韧性低,是将两种金属通过铸造工艺结合在一起,可有效降低衬板磨损率,应用在大冲击载荷的工况条件下,主要通过双液复合铸造法、液固复合铸造法、镶嵌铸造法工艺制备得到。虽然双金属复合材料技术比较成熟,但在冶金矿山领域实际应用案例仍不多,可能是因为生产成本较高。磁性材料主要以金属磁性材料为主,悍马牌金属磁性衬板在我国本钢歪头山铁矿第一次应用后,节约电耗 7.14%,降低球耗 10.37%,且提高了球磨处理量 5.60%^[86]。

3.2 非金属耐磨材料

非金属耐磨材料主要是指橡胶材料,橡胶材料与金属材料相比主要优点有,(1)质量轻、维修方便;(2)耐磨性好、抗腐蚀性强;(3)噪音低、使用寿命一般为金属锰钢衬板的 2~5 倍。橡胶衬板总质量仅为锰钢衬板的 18.5%,橡胶衬板在硫化铜镍矿磨矿上的应用后^[87],导致球磨机功率下降 14 kW,年节电 90 720 kW·h,节电效果显著,原高锰钢衬板的平均使用寿命为 18 个月,橡胶衬板的平均使用寿命可达 60 个月,降耗效果显著。但是,橡胶材料的耐冲击力弱,所以适应于矿石硬度高、入料粒度小于 3 mm 的条件下使用,一般应用于细磨工段。

3.3 小结

综上所述,金属材料衬板材料耐磨性优,在一段二段球磨机、自磨机中均有广泛应用,尤其以高、中锰钢应用最多;双金属复合材料的性能虽然更优,但由于成本原因,现实应用较少;磁性材料主要应用在铁矿磨矿中,最近几年也逐步应用在有色矿山磨机中;非金属材料衬板耐腐蚀性强,主要应用在细磨

领域,包括黄金氰化厂磨机、艾萨磨机等细磨设备中。虽然我国的衬板材料制备技术发展迅猛,能制备出耐磨性优的各种材料,但在基础研究与高端耐磨材料技术方面与发达国家仍有较大差距,需要更多的科研工作者加强基础研究,从根本上解决耐磨性的问题。

4 结论与展望

磨机自身结构、精确化装补球技术、耐磨材料制备技术改进有利于节能降耗。磨机自身结构改进包括球磨机大型化、将边缘传动改为中心传动、将滑动轴承改为滚动轴承、提高筒体转速率、改善研磨介质与衬板种类与形状等措施,虽然很多改进技术已经在国内各大矿山应用,但由于管理不到位,仍然有很大提升空间。精确化装补球技术在我国各大矿山广泛应用,在精确化装补球配比推导过程中,没有考虑钢球对矿粒的磨剥作用,仅在最后推导结束后,考虑到钢球对矿粒的磨剥作用,将计算的球径加大 15%,然而在细磨过程中,钢球对矿粒以磨剥作用为主,直接套用段氏半理论球径公式计算所得球径显然不够精确。耐磨材料制备技术显著提高了磨球与衬板的寿命,降低了生产成本,但因为制备成本高,大部分技术仍然停留在实验室阶段。

因此,球磨机的节能降耗技术仍然有很长的路要走,各大矿机企业应该掌握具有自主知识产权的设备,以关键技术为引领,生产出节能型球磨机。球磨机搭配半自磨、自磨机进行生产也是一种趋势。高校与科研院所也应重视基础研究,推导出更精确的装补球技术数学模型,研发出成本低、耐磨性强、磨损低的材料。

参考文献:

- [1] 陈勇,宋永胜,温建康,等.磨矿介质运动规律研究现状与发展趋势[J].世界有色金属,2020(20):1-4.
CHEN Y, SONG Y S, WEN J K, et al. Research status and development trend of grinding media movement law[J]. World Nonferrous Metals, 2020(20): 1-4.
- [2] 李同清.球磨机矿磨介质动力学行为研究[D].徐州:中国矿业大学,2018.
LI T Q. Study on charge dynamic behaviour of ball mills[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [3] 吴彩斌.破碎统计力学原理及转移概率在装补球制度中的应用研究[D].昆明:昆明理工大学,2002.
WU C B. Application study about crushing statistic mechanics principle and transition probability on load-abtition ball system[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2002.
- [4] 段希祥,曹亦俊.球磨机介质工作理论与实践[M].冶金工业出版社,1999.
DUAN X X, CAO Y J. Theory and practice of ball mill media work[M]. Metallurgical Industry Press, 1999.
- [5] 刘全军,姜美光.碎矿与磨矿技术发展及现状[J].云南冶金,2012,41(5):21-28.
LIU Q J, JIANG M G. Technological development of ore crushing and

- grinding and their current situation[J]. *Yunnan Metallurgy*, 2012, 41(5): 21-28.
- [6] 刘俊,姬建钢,陈松战.磨矿装备技术发展趋势研究[J].*矿山机械*, 2019, 47(2): 1-6.
- LIU J, JI J G, CHEN S Z. Research on development tendency of grinding mill technology[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2019, 47(2): 1-6.
- [7] 月琼.世界最大球磨机在苏联使用[J].*国外金属矿选矿*, 1989(7): 49.
- YU Q. The world's largest ball mill is used in the Soviet Union[J]. *Metallic Ore Dressing Abroad*, 1989(7): 49.
- [8] 王春红,姬建钢,张骁,等.φ7.9 m×13.6 m双驱溢流型球磨机[J].*矿山机械*, 2013, 41(7): 71-76.
- WANG C H, JI J G, ZHANG X, et al. φ7.9 m×13.6 m double-drive overflow ball mill[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2013, 41(7): 71-76.
- [9] 孙羽生.球磨机中滚动轴承替代滑动轴承的应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.
- SUN Y S. Application research of rolling bearing replacing plain bearing in ball mill[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [10] 杨和平,冯刚,李健,等.再论滚动轴承式球磨机节能降耗的可能性[J].*金属材料与冶金工程*, 2013, 41(5): 59-63.
- YANG H P, FENG G, LI J, et al. Talking about probability of saving energy and dropping consumption for roll bearing ball grinding mill[J]. *Metal Materials and Metallurgy Engineering*, 2013, 41(5): 59-63.
- [11] 杨和平,李健,李力,等.滚动轴承式球磨机节能效果探讨[C]//中国采选技术十年回顾与展望.北京, 2012: 762-764.
- YANG H P, LI J, LI L, et al. Discussion on energy saving effect of rolling bearing ball mill[C]//Review and Prospect of China's Mining and Beneficiation Technology in the past decade. Beijing, 2012: 762-764.
- [12] 吕蒙.球磨机“滑动轴承”改造过程及节能效益[J].*中小企业管理与科技(下旬刊)*, 2013(3): 320-321.
- LV M. Transformation process and energy saving benefit of ball mill "sliding bearing"[J]. *Management & Technology of SME*, 2013(3): 320-321.
- [13] 杨和平.球磨机使用滚动轴承代替滑动轴承[J].*水泥*, 2001(7): 8-11.
- YANG H P. Ball mills use rolling bearings instead of plain bearings[J]. *Cement*, 2001(7): 8-11.
- [14] 黄立成.球磨机滑动轴承改滚动轴承应用[J].*科技资讯*, 2013(35): 66,68.
- HUANG L C. Ball mill sliding bearing to rolling bearing application[J]. *Science & Technology Information*, 2013(35): 66,68.
- [15] 马斌,汤成龙,芮凯.滚动轴承球磨机在南京栖霞山铅锌矿的应用[C]//全国金属矿山采矿新技术学术研讨与技术交流会论文集.马鞍山, 2007: 355-356, 376.
- MA B, TANG C L, RUI K. Application of rolling bearing ball m in Nanjing Qixiashan Lead-zinc Mine[C]//Proceedings of the National Symposium on New Mining Technology in Metal Mines. Ma Anshan, 2007: 355-356, 376.
- [16] Л. Н. Синельникова, 王鸿翔.衬板形状对球磨机工作效率的影响[J].*有色矿山*, 1985(10): 55-56,54.
- Л. Н. Синельникова, WANG H X. Effect of liner shape on ball mill efficiency[J]. *China Mine Engineering*, 1985(10): 55-56,54.
- [17] 唐新民,吴照银.球磨机筒体衬板形状的理论探讨[J].*矿山机械*, 2005(1): 20-22,4.
- TANG X M, WU Z Y. Theoretical discussion to shape of shell liner in ball mill[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2005(1): 20-22,4.
- [18] 李兴.中心传动双仓溢流型球磨机改进[J].*有色金属设计*, 2015, 42(1): 34-38.
- LI X. Improvement of center-driven overflow ball mill with double-wall partition[J]. *Nonferrous Metals Design*, 2015, 42(1): 34-38.
- [19] 王裕龙,季光,胡延涛.大型中心传动溢流型球磨机的研究[J].*科技创新与应用*, 2016(29): 114.
- WANG Y L, JI G, HU Y T. Study on large center drive overflow ball mill[J]. *Technology Innovation and Application*, 2016(29): 114.
- [20] 闫玲娣,曹桂月,古创国,等.中心传动干法球磨机安全保护装置的设计[J].*矿山机械*, 2016, 44(5): 46-48.
- YAN L D, CAO G Y, GU C G, et al. Design of safety device for dry ball mill with central drive[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2016, 44(5): 46-48.
- [21] 李洪,黄华礼.中心传动球磨机在铅锌矿小选厂的应用[J].*有色金属设计*, 2018, 45(3): 68-70.
- LI H, HUANG H L. Application of center-driven ball mill in small lead and zinc processing plant[J]. *Nonferrous Metals Design*, 2018, 45(3): 68-70.
- [22] 钱翀. MQY4585中心传动球磨机的设计[J].*有色设备*, 2020, 34(4): 51-56.
- QIAN C. Design of MQY4585 central drive ball mill[J]. *Nonferrous Metallurgical Equipment*, 2020, 34(4): 51-56.
- [23] 谢敏雄,梅治福.黄金矿山大型球磨机综合节能研究及应用[J].*黄金*, 2014, 35(11): 53-57.
- XIE M X, MEI Z F. Study on comprehensive energy saving of large-scale ball mills in gold mines and its application[J]. *Gold*, 2014, 35(11): 53-57.
- [24] N S. LAMECK, K. K. KIANGI, M. H. MOYSEffects of grinding media shapes on load behaviour and mill power in a dry ball mill[J]. *Minerals Engineering*, 2006, 19(13): 1357-1361.
- [25] 李同清,彭玉兴.研磨介质形状对铁矿石磨矿动力学研究[J].*有色金属(选矿部分)*, 2018(1): 84-89,99.
- LI T Q, PENG Y X. Effect of grinding media shape on milling kinetics of iron ore particles[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2018(1): 84-89,99.
- [26] SHI F. Comparison of grinding media—cylpebs versus balls[J]. *Minerals Engineering*, 2004, 17(11): 1259-1268.
- [27] 韩佳宏,代淑娟,张作金,等.钢锻作为磨矿介质的磨矿效果研究[J].*矿山机械*, 2017, 45(3): 38-41.
- HAN J H, DAI S J, ZHANG Z J, et al. Study on grinding effects while steel forging as grinding medium[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2017, 45(3): 38-41.
- [28] 叶景胜,廖宁宁,吴志强,等.钢锻作细磨介质下的磨矿能耗与粒度分布特征[J].*有色金属科学与工程*, 2018, 9(6): 65-71.
- YE J S, LIAO N N, WU Z Q, et al. Grinding energy consumption and particle size distribution characteristics of steel forging under fine grinding medium[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2018, 9(6): 65-71.
- [29] 曹成超,邵海龙,严海军,等.钢锻磨矿介质在七角井铁矿细磨中的应用[J].*现代矿业*, 2020, 36(12): 112-113,115.
- CAO C C, SHAO H L, YAN H J, et al. Application of steel forging grinding medium in qijiaojing iron ore fine grinding industry[J]. *Modern Mining*, 2020, 36(12): 112-113,115.
- [30] 张庆丰,王海霞,张玉婷,等.司家营鞍山铁矿磨矿介质优化研究与实践[J].*现代矿业*, 2019, 35(7): 195-197.
- ZHANG Q F, WANG H X, ZHANG Y T, et al. Research and practice

- on grinding medium optimization of Yanshan iron mine in Sijiyang[J]. *Modern Mining*, 2019, 35(7): 195-197.
- [31] 高洋, 刘志斌, 杨德生, 等. 提高黄金选矿厂磨矿效率的半工业试验研究[J]. *矿冶*, 2013, 22(1): 26-29.
- GAO Y, LIU Z B, YANG D S, et al. Semi-industrial experimental study on improving grinding efficiency of gold concentrator [J]. *Mining and Metallurgy*, 2013, 22(1): 26-29.
- [32] 金弢, 李若兰, 郭永杰. 钢锻在磷矿磨矿中的应用研究[J]. *化工矿物与加工*, 2014, 43(10): 18-22,30.
- JIN T, LI R L, GUO Y J. Application of forged steel in phosphate grinding[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2014, 43(10): 18-22,30.
- [33] XIN F, WU C B, LIAO N N, et al. The first attempt of applying ceramic balls in industrial tumbling mill: A case study[J]. *Minerals Engineering*, 2022, 180: 107504.
- [34] 吴志强, 方鑫, 童佳琪, 等. 纳米陶瓷球作细磨介质下的磨矿能耗与粒度分布特征[J]. *有色金属科学与工程*, 2019, 10(5): 91-96.
- WU Z Q, FANG X, TONG J Q, et al. Grinding energy consumption and particle size distribution characteristics of ground products with the nano-ceramic ball as the fine grinding medium[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2019, 10(5): 91-96.
- [35] 丁伟敏. 探讨陶瓷磨体生产工艺的节能降耗措施[J]. *广东建材*, 2020, 36(7): 79-80,24.
- DING W M. The measures of energy saving and consumption reduction in ceramic abrasive production process are discussed[J]. *Guangdong Building Materials*, 2020, 36(7): 79-80,24.
- [36] 姚伟, 白晓卿, 侯四海. 纳米陶瓷球在VTM-300立磨机中的应用试验研究[J]. *中国铝业*, 2020, 44(6): 46-49.
- YAO W, BAI X Q, HOU S H. Experimental study on application of nano ceramic ball in VTM-300 Vertical Mill, 2020, 44(6): 46-49.
- [37] 蔡爱花, 张勇, 程新联, 等. 水泥磨换用陶瓷球的实践[J]. *中国水泥*, 2019(9): 100-101.
- CAI A H, ZHANG Y, CHONG X L, et al. Practice of replacement of ceramic ball by cement mill[J]. *China Cement*, 2019(9): 100-101.
- [38] 韩彬, 莫峰, 贾素娥, 等. 纳米陶瓷球在复杂多金属矿细磨的应用研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2019(4): 40-44.
- HAN B, MO F, JIA S E, et al. Application of nanoceramic ball in fine grinding of complex polymetallic mines[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2019(4): 40-44.
- [39] 景宇, 徐国华. 球磨机陶瓷球与钢球混合替代研究及应用[J]. *铜业工程*, 2021(3): 32-35.
- JING Y, XU G H. Research and application of mixed replacement of ceramic ball and steel ball in ball mill[J]. *Copper Engineering*, 2021(3): 32-35.
- [40] 赖俊全, 向子祥, 李雨晴, 等. 纳米陶瓷球作细磨介质下的磨矿动力学[J]. *有色金属科学与工程*, 2021, 12(3): 100-105.
- LAI J Q, XIANG Z X, LI Y Q, et al. Grinding kinetics study of nano-ceramic spheres as fine grinding medium[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2021, 12(3): 100-105.
- [41] 徐怀浩. 纳米陶瓷球在金翅岭金矿立磨机的应用[J]. *黄金*, 2021, 42(9): 81-84.
- XU H H. Application of nano-ceramic balls in vertical mills of Jinchiling Gold Mine[J]. *Gold*, 2021, 42(9): 81-84.
- [42] 张伟. 梅山铁矿 $\phi 2700 \times 3600$ 球磨机磁性衬板的应用[J]. *安徽工业大学学报(自然科学版)*, 2010, 27(S1): 140-143.
- ZHANG W. Application of magneticieling in grindingmill at Meishan iron mine[J]. *Journal of Anhui University of Technology(Natural Science)*, 2010, 27(S1): 140-143.
- [43] 周宏喜, 杨俊平, 袁树礼, 等. HM型磁性衬板在有色金属矿大型磨机中的应用[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2018(2): 74-77.
- ZHOU H X, YANG J P, YUAN S L, et al. Application of HM magnetic liner in large mill for non-ferrous metal[J]. *Nonferrous Metals(Mineral Processing Section)*, 2018(2): 74-77.
- [44] 徐连鹏, 佐太东, 魏明安, 等. 金属磁性衬板在鑫达金矿的应用[J]. *现代矿业*, 2019, 35(3): 171-172,175.
- XU L P, ZUO T D, WEI M A, et al. Application of metal magnetic liner in xinda gold mine[J]. *Modern Mining*, 2019, 35(3): 171-172,175.
- [45] 王著. 金属矿山球磨机衬板研究和应用进展[J]. *山东工业技术*, 2017(18): 243.
- WANG Z. Research and application progress of ball mill liner in metal mine[J]. *Journal of Shandong Industrial Technology*, 2017(18): 243.
- [46] 王勇. 金属磁性衬板在金山店铁矿的应用实践[J]. *现代矿业*, 2013, 29(9): 149-150,186.
- WANG Y. Application of magnetic metal lining plate in Jinshandian iron mine[J]. *Modern Mining*, 2013, 29(9): 149-150,186.
- [47] 伏彦雄. 磁性衬板在铜冶炼渣选矿磨机中的运用[J]. *现代制造技术与装备*, 2019(10): 113-115.
- FU Y X. Application of magnetic liner in copper smelting slag ball mill[J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2019(10): 113-115.
- [48] 段希祥. 球磨机钢球尺寸的理论计算研究[J]. *中国科学*, 1989(8): 856-863.
- DUAN X X. Theoretical calculation of steel ball size of ball mill[J]. *Scientia Sinica*, 1989(8): 856-863.
- [49] 段希祥. 球径半理论公式的修正研究[J]. *中国科学*, 1997(6): 510-515.
- DUAN X X. Study on the modification of spherical diameter half theory formula[J]. *Scientia Sinica*, 1997(6): 510-515.
- [50] 肖庆飞. 两段磨矿精确化装补球方法的开发及应用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008.
- XIAO Q F. Research on development and application of two-stage grinding precise ball-filling method[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2008.
- [51] 段希祥, 杜云鹤, 杨波, 等. 球磨机精确化装补球与能耗前移结合的增产节能方法: CN101036901A[P]. 2007-9-19.
- DUAN X X, DU Y H, YANG B, et al. Accurate method for improving production and saving energy by combining ball lload and addition in mill and forward leading of energy consumption: CN101036901A[P]. 2007-9-19.
- [52] 潘新潮, 段希祥, 范勇. 精确化装补球制度在金平镍矿磨矿中的应用[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2003(5): 37-40.
- PAN X C, DUAN X X, FAN Y. Application of precise ball make-up system in grinding of Jinping nickel ore[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing)*, 2003(5): 37-40.
- [53] 王春, 马丽珍. 精确化装补球方法在大红山铜矿选矿厂的应用研究[J]. *云南冶金*, 2005(1): 16-20.
- WANG C, MA L Z. Application of precise filling and replenishment of balls for ball millin ore-dressing mill of Dahongsban copper mine[J]. *Yunnan Metallurgy*, 2005(1): 16-20.
- [54] 高利坤, 陈云, 周平. 云南某铁矿磨矿工艺试验研究[J]. *矿冶工程*, 2007(3): 45-48.
- GAO L K, CHEN Y, ZHOU P. Study on the grinding parameters of an iron ore in Yunnan province[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2007(3): 45-48.
- [55] 张仕才. 狮子山铜矿提高选矿处理能力的研究[J]. *采矿技术*, 2008(1): 49-50.
- ZHANG S C. Study on improving mineral processing capacity of

- Shizishan copper mine[J]. *Mining Technology*, 2008(1): 49–50.
- [56] 肖庆飞, 李桂海, 石贵明, 等. 精确化装补球法在狮子山铜矿的应用[J]. *金属矿山*, 2007(12): 68–71.
- XIAO Q F, LI G H, SHI G M, et al. Application of accurate ball loading and addition in Shizishan copper mine[J]. *Metal Mine*, 2007(12): 68–71.
- [57] 雷小莉, 李金泉, 徐忠敏, 等. 精确化装补球技术在金翅岭金矿选矿厂的应用[J]. *黄金科学技术*, 2015, 23(6): 87–91.
- LEI X L, LI J Q, XU Z M, et al. Application of the technology of accurate ball loading and addition in concentrating mill of Jinchiling gold mine[J]. *Gold Science and Technology*, 2015, 23(6): 87–91.
- [58] 康怀斌, 肖庆飞, 秦洪训, 等. 精确化装补球方法在大尹格庄金矿中的应用研究[J]. *黄金*, 2015, 36(6): 53–56.
- KANG H B, XIAO Q F, QIN H X, et al. Study on the application of accurate ball loading and addition in Dayingezhuang gold mine[J]. *Gold*, 2015, 36(6): 53–56.
- [59] 徐怀浩, 李进友. 大尹格庄金矿磨矿系统增产降耗的应用实践[J]. *黄金科学技术*, 2017, 25(3): 116–120.
- XU H H, LI J Y. Application practice of increasing production and reducing consumption in grinding system of Dayingezhuang gold mine[J]. *Gold Science and Technology*, 2017, 25(3): 116–120.
- [60] 汪太平, 肖庆飞, 李博, 等. 精确化装补球制度在冬瓜山铜矿的应用研究[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2015, 40(4): 23–27.
- WANG T P, XIAO Q F, LI B, et al. Application research of accurate ball loading and addition in Dongguashan copper mine[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2015, 40(4): 23–27.
- [61] 徐胜旗. 银山选矿厂球磨机精确化装补球方案与实践[J]. *湖南有色金属*, 2021, 37(6): 17–19, 74.
- XU S Q. The plan and practice of ball mill accurate filling in Yinshan concentrator[J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 2021, 37(6): 17–19, 74.
- [62] 魏明安, 武文建, 于蕾. 一种选矿厂球磨机初装球的等面积装补球方法. CN111085308 A[P]. 2020-5-1.
- WEI M A, WU W J, YU L. The utility model relates to an equal area filling method for the initial ball of ball mill in a concentrator: CN111085308 A[P]. 2020-5-1.
- [63] 江领培, 吴彩斌, 雷阿丽, 等. 纳米陶瓷球在某萤石粗精矿再磨中的试验研究[J]. *非金属矿*, 2018, 41(3): 66–68.
- JIANG L P, WU C B, LEI A L, et al. Using of the nano ceramic ball in regrinding of rough concentrate of the Fluorite[J]. *Non-metallic Mines*, 2018, 41(3): 66–68.
- [64] 廖宁宁, 吴彩斌, 吴志强, 等. 纳米陶瓷球对铜硫磨矿和浮选的影响[J]. *有色金属工程*, 2019, 9(1): 70–76.
- LIAO N N, WU C B, WU Z Q, et al. Effect of nano ceramic ball on grinding and flotation in copper sulfur ore[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2019, 9(1): 70–76.
- [65] STALINSKII DV, AS RUDYUK, VK SOLENYI, et al. Improving the quality of steel grinding balls[J]. *Steel in Translation*, 2017, 47(2): 130–136.
- [66] 郎洪明. 磨球的生产和选用现状及发展趋势[J]. *热加工工艺*, 2010, 39(15): 4.
- LANG H M. Development trend of manufacture and selection of milling ball[J]. *Hot Working Technology*, 2010, 39(15): 4.
- [67] MI PASHECHKO, J MONTUSIEWICZ. Evaluation of the wear resistance of eutectic coatings of the Fe–Mn–C–B system alloyed by Si, Ni, and Cr using multi-criteria analysis[J]. *Materials Science*, 2012, 47(6): 813–821.
- [68] TEĆZA G, GŁOWNIA J. Resistance to abrasive wear and volume fraction of carbides in cast high-manganese austenitic steel with composite structure[J]. *Archives of Foundry Engineering*, 2015.
- [69] OLEKSANDR IVANOV, PAVLO PRYSYAZHNYUK, DMYTRO LUTSAK, et al. Improvement of abrasion resistance of production equipment wear parts by hardfacing with flux-cored wires containing boron carbide/metal powder reaction mixtures[J]. *Management Systems in Production Engineering*, 2020.
- [70] 智海旭. 合金化处理对高锰钢衬板耐磨性影响的研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2020.
- ZHI H X. Study on the effect of alloying treatment on wear resistance of high manganese steel liner[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2020.
- [71] 涂斌. 超高锰钢耐磨衬板的制备工艺及组织性能研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2017.
- TU B. Study on preparation technology and microstructure properties of wear resistance lining plate of ultra-high manganese steel [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2017.
- [72] 张腾飞. 球磨机高锰钢衬板的成分与性能优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- ZHANG T F. Optimization and study on composition and performance of high manganese steel liner for ball mill[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [73] GE S R, WANG Q L, WANG J L. The impact wear-resistance enhancement mechanism of medium manganese steel and its applications in mining machines[J]. *Wear*, 2017, 376-377: 1097–1104.
- [74] ZHAO J L, YAN X I, SHI W, et al. Microstructure and mechanical properties of high manganese TRIP steel[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2012, 19(4): 57–62.
- [75] ATUL SAXENA, S. N. PRASAD, S. GOSWAMI, et al. Influence of austempering parameters on the microstructure and tensile properties of a medium carbon –manganese steel[J]. *Materials Science and Engineering:a*, 2006, 431(1): 53–58.
- [76] XU H F, ZHAO J, CAO W Q, et al. Heat treatment effects on the microstructure and mechanical properties of a medium manganese steel (0.2C–5Mn)[J]. *Materials Science and Engineering:a*, 2012, 532: 435–442.
- [77] K. D. TOZETTI, E. ALBERTIN, C. SCANDIAN. Abrasive size and load effects on the wear of a 19.9% chromium and 2.9% carbon cast iron[J]. *Wear*, 2017, 376-377: 46–53.
- [78] 陈永泰, 邓军, 韩朝晖. W-Mn-V抗磨铸铁的合金化原理及磨球制造工艺[J]. *甘肃工业大学学报*, 1998(2): 26–29.
- CHEN Y T, DENG J, HAN C H. Investigation of alloying mechanism of W-Mn-V wear resistant cast iron and manufacturing process of grinding balls[J]. *Journal of Gansu University of Technology*, 1998(2): 26–29.
- [79] 李卫. 高硬度280Cr25Mo2W3耐磨铸铁合金碳化物的研究[J]. *材料热处理学报*, 2008(3): 10–13.
- LI W. Study on carbides of high hardness wear resistant cast iron 280Cr25Mo2W3[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2008(3): 10–13.
- [80] 王三军. 耐磨铸铁的研制及其耐磨性的试验研究[J]. *佳木斯大学学报(自然科学版)*, 2018, 36(1): 83–85.
- WANG S J. The preparation of wear resistant cast iron and its experimental study on the wear resistance[J]. *Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition)*, 2018, 36(1): 83–85.
- [81] 李晓林. 渗氮工艺对耐磨铸铁组织和硬度的影响[J]. *铸造技术*, 2015, 36(12): 2873–2876.
- LI X L. Effect of nitriding process on microstructure and hardness of

- wear resistant cast iron[J]. *Foundry Technology*, 2015, 36(12): 2873-2876.
- [82] 柴增田, 刘春哲. 新型合金化高铬铸铁磨球的研究进展[J]. *铸造技术*, 2017, 38(7): 1544-1546.
- CHAI Z T, LIU C Z. Research progress of alloying high-chromium cast iron grinding ball[J]. *Foundry Technology*, 2017, 38(7): 1544-1546.
- [83] 康沫狂, 贾虎生, 杨延清, 等. 新型系列准贝氏体钢[J]. *金属热处理*, 1995(12): 3-5, 23.
- KANG M K, JIA H S, YANG Y Q, et al. New type meta-bainitic steel series[J]. *Heat Treatment of Metals*, 1995(12): 3-5, 23.
- [84] 杨延清, 陈彦, 康沫狂. 准贝氏体组织及新型系列准贝氏体钢[J]. *特殊钢*, 1999(4): 37-39.
- YANG Y Q, CHEN Y, KANG M K. Microstructure of meta bainite and new meta bainitic steel series[J]. *Special Steel*, 1999(4): 37-39.
- [85] 方鸿生, 冯春, 郑燕康, 等. 新型Mn系空冷贝氏体钢的创制与发展[J]. *热处理*, 2008(3): 2-19.
- FANG H S, F C, ZHENG Y K, et al. Creation and development of novel mn series air cooled bainitic steels[J]. *Heat Treatment*, 2008(3): 2-19.
- [86] 苏兴强, 周鲁生, 段其福. 金属磁性衬板应用进展[J]. *金属矿山*, 2006(3): 14-17.
- SU X Q, ZHOU L S, DUAN Q F. Review of application technology of hanma brand metal magnetic lining[J]. *Metal Mine*, 2006(3): 14-17.
- [87] 刘忠伟, 王勇智, 邱伟, 等. 橡胶衬板在硫化铜镍矿磨矿上的应用[J]. *吉林地质*, 2009, 28(4): 130-132.
- LIU Z W, WANG Y Z, QIU W, et al. Application of rubber liner in grinding Cu-Ni sulfide ore[J]. *Jilin Geology*, 2009, 28(4): 130-132.

Research Progress of Energy Saving and Consumption Reduction Technology of Ball Mills

YANG Junyan, SUN Haojie, GU Jianguo, ZHANG Shengdong, YOU Shihui

College of Mechanical and Electrical Engineering, Zaozhuang University, Zaozhuang 277160, Shandong, China

Abstract: Ball mill is widely used in metallurgical mining industry, grinding operation of power consumption and metal consumption is large, how to effectively reduce energy consumption and metal consumption is an important research content. This paper reviews the improvement of mill structure, the technology of precise ball make-up and the preparation of wear-resistant materials. The improvement of mill structure mainly includes the following measures: the ball mill should be enlarged, the edge drive should be changed to the center drive, the sliding bearing should be changed to the rolling bearing, and the grinding medium and lining plate types and shapes should be improved. Accurate ball make-up technology has been widely used in mines in China, which has reduced the power consumption and ball consumption of ball mills to varying degrees wear-resisting material preparation technology centered manganese steel material, cast iron, alloy steel materials, double metal composite materials, magnetic materials, rubber materials design and preparation, mainly through the design of micro alloying and heat treatment system improvement to achieve the purpose of refine grain, change organization, improve the wear resistance of materials, so as to reduce the wear rate.

Keywords: ball mills; energy saving and consumption reduction; grinding media; accurate ball loading; wear-resistant material

引用格式: 杨俊彦, 孙浩杰, 谷建国, 张圣东, 游世辉. “双碳”目标下球磨机节能降耗技术研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(1): 169-178.

YANG Junyan, SUN Haojie, GU Jianguo, ZHANG Shengdong, YOU Shihui. Research progress of energy saving and consumption reduction technology of ball mills[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2023, 43(1): 169-178.

投稿网址: <http://hcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn