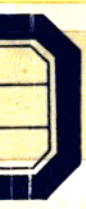


粉磨介质与磨机衬板

王宏勋 康继尧 著译

中国选矿科技情报网
中国选矿科技情报网粉碎工程网

1990年5月



公 告

为了促进粉碎工程学术交流及发展,中国选矿科技情报网粉碎工程网将组织全国粉碎工程界知名专家、学者、有关工程技术人员撰写、编辑、出版《粉碎工程丛书》。初步计划出版20分册,每分册约20万字。选题初步商定为:

- | | |
|---------------------------|---------------------|
| 1. 粉碎工程概论 | 10. 粉磨介质、衬板 |
| 2. 粉碎工程试验与测试技术 | 11. 超细粉碎及其机械设备(上,下) |
| 3. 粉碎学原理 | 12. 筛分与分级机械 |
| 4. 粉碎数学模型 | 13. 粉体物料贮存、输送 |
| 5. 圆锥破碎机 | 14. 粉碎回路及工厂设计 |
| 6. 颚式破碎机 | 15. 粉碎机械耐磨材料 |
| 7. 冲击作用破碎机 | 16. 粉碎节能技术 |
| 8. 辊压式破碎机 | 17. 国内外粉碎工程实践 |
| 9. 筒形磨机(上,下)(棒磨机、球磨机、自磨机) | 18. 粉碎工程实用手册 |

这套丛书计划于1993年底完成出版工作。丛书编委会期望这套丛书对我国社会主义现代化建设有所贡献。

希望全国从事粉碎工程工作的各级领导、企业家、专家、学者和广大工作者给予大力支持。

《粉碎工程丛书》编委会

1990、4、

粉碎工程丛书编委会

顾问:张卯钧 任德树 孙传尧 赵涌泉

主任:王宏勋

(以下按姓氏笔划排列)

副主任:孙成林 杨 伦 陈炳辰 徐秉权 康继尧 熊志超

委员:孔祥楷 朱章跃 戎吉华 李学友 吴一善 吴明珠 闻邦椿

秘书长:孙成林(兼)

秘书:丁培洪 李生光

目 录

粉磨介质.....	王宏勋 (1)
粉碎介质尺寸的选择.....	王宏勋 康继尧 (19)
Bond球磨机闭路可磨度试验和功指数 计算.....	王宏勋 (23)
Bond棒磨机闭路可磨度试验和功指数 计算.....	王宏勋 (35)
金属磨损指数的测定.....	王宏勋 (42)
工业用球磨机研究.....	(52)
关于球磨机粉碎.....	(56)
管磨机的粉磨介质配比.....	(59)
粉碎介质和衬板的磨损.....	(61)
管磨机介质补给理论.....	(62)
粉磨介质和衬板的研究.....	(65)
水泥及石灰工业用管磨机粉磨介质构成.....	(69)
球磨机粉碎硬质材料的粉碎速度论.....	(69)
粉碎力学公式的动力学物理意义.....	(74)
球磨机中的粉磨介质的最佳直径及其配比的研究.....	(74)
粉磨介质的最佳尺寸及其配比.....	(80)
球磨机用钢球大小的选择.....	(83)
管磨机粉磨介质的配比标准.....	(86)
磨机充填钢球尺寸构成之快速选择方法.....	(87)
开路粉碎的发展.....	(88)
粉磨介质大小与水泥强度.....	(90)
球磨机中球构成的定量方法.....	(94)
提高球磨机的效率.....	(95)
伴随衬板磨损, 磨机产量下降.....	(101)
分级衬板和粉磨介质的分级 机理.....	(102)
管磨机粗碎室用新波形 衬板.....	(105)
波形衬板用于磨机粗碎室的 经验.....	(107)
圆锥形衬板的分级 机理.....	(109)
磨机内介质滑移及角度测 定法.....	(112)
装有螺旋衬板的水泥磨之粉碎 实验.....	(119)
水泥磨的分级 衬板.....	(120)
磨机内壁粉磨介质角度位置的实验 研究.....	(125)
衬板形状对筒形磨机粉磨介质滑移影响的实验 研究.....	(130)
球的磨损与磨机内球的平衡 负荷.....	(131)
球的磨损与磨机的操作 管理.....	(140)

粉磨介质

王宏勋

一、引言

磨碎作业是选矿厂和水泥厂生产过程中消耗能量最多的一个作业，同时也是消耗钢材最多的一个作业。

对于磨碎作业的钢耗而言，粉磨介质的消耗所占比重是相当高的，约占90~95%以上。消耗于介质的费用约占磨碎费用的50%。众所周知，介质质量好坏，消耗量多少，介质尺寸大小和形状对磨碎作业的效率、生产能力、生产费用以及产品质量都有很大影响。

据冶金部科技司、钢铁司和规划院，中国有色金属总公司北京矿冶研究总院进行的全国性调查资料统计，我国冶金(钢铁和有色金属)矿山、建材、电力、化工等工业部门每年消耗磨球达60~80万吨，其中重点黑色金属矿山为18~20万吨，重点有色金属矿山10~12万吨；大、中型水泥厂10~12万吨；火力发电厂煤粉加工为5~6万吨；化工矿山和化肥厂4~5万吨；地方中小矿山和地方水泥厂约为10~15万吨。(见表1~2)。

表1 我国对部门磨球消耗统计

部 门	磨球耗量(万吨)	单耗(千克/吨)	比 例 (%)
铁选矿厂(重点)	18~20	1.88	27.69~25.00
有色金属选矿厂(重点)	10~12	1.50	15.39~15.00
大、中型水泥厂	10~12	1.34	15.39~15.00
火电厂磨煤粉(主要)	5~6	0.30	7.69~ 7.50
化工磷肥等(重点)	4~5	0.80	6.15~ 6.25
地方中小各类矿山及水泥厂	10~15	/	15.39~18.75
其它	3~10	1.20	12.30~12.50
全国总量	65~80	1.46	100.00

粉磨介质(钢、铁磨球)的消耗是在冲击、研磨与疲劳等机械磨损和电化学腐蚀等作用下的综合结果。粉磨介质的磨损率主要取决于介质本身的显微结构、材料密度、磨碎作业工况条件，以及化学腐蚀等因素。其显微结构受材料本身的化学成份、热处理以及制造加工条件的影响而不同。

我国绝大多数选矿厂使用的钢制介质无论是材质、规格还是加工工艺、热处理条件都是相当混乱的。我国绝大多数钢球厂也是既无“国际”可循，又无“厂标”可守，来什么料就生产什么球。用来做钢球的钢材绝大部分是边角废次钢料和低质铸铁。而在加工工艺上又缺少相应的钢球热处理规范。钢球质量与国外厂家产品相比，有着很大差距。特别是由于我国近年来生产钢(铁)球的单位(特别是社队企业、知青家属工厂)日趋增长，重复建设很多，而生产管理水平和工艺设施不尽完善。坯料和产品没有标准，产品成本高、消耗大、质量差，致使我国球磨机磨矿效率低，钢耗高。与国外相比差距甚大，美国铁选矿厂平均磨球

表 2

我国重点铁矿选矿厂1980年磨机用球单耗

编 号	选厂名称	处理矿石	磨球规格 (mm)	材质和加工 方 法	一次磨矿单耗 kg/t	二次磨矿单耗 kg/t	合计
1	大石河选石厂	磁 铁 矿			1.12	1.39	2.51
2	水厂选矿厂	同 上			2.10	0.51	2.61
3	大 弧 山 选 矿 厂	同 上	一段 $\phi 127$ $\phi 100$ 二段 $\phi 50$	废 钢 锻 铸 (轧) 铁	1.45	1.11	2.62
4	弓 长 岭 磁 选 厂	同 上	一段 $\phi 127$ 二段 $\phi 80$	废 钢 轧 制 废 钢 轧 制	1.02	0.68	1.70
5	弓 长 岭 重 选 厂	假 象 赤 铁 矿	一段 $\phi 127$ 二段 $\phi 60$	废 钢 轧 制	1.10	0.85	1.95
6	鞍 钢 烧 结 总 厂	焙 烧 磁 铁 矿			0.85	0.94	1.79
7	齐大山焙 烧 选 磁	同 上	一段 $\phi 125$ 二段 $\phi 50$	废 钢 轧 制	0.84	1.51	2.35
8	齐 大 山 浮 选 厂	假 象 赤 铁 矿	一段 $\phi 125$ 二段 $\phi 50$	同 上	1.05	1.20	2.25
9	东鞍山 浮 选 厂	赤 铁 矿	一段 $\phi 110$ 二段 $\phi 50$	废 钢 锻 制 铸 铁	2.43	1.69	4.17
10	南 芬 选 矿 厂	磁 铁 矿	一段 $\phi 120$ 二段 $\phi 50$	50, 70 钢 轧 制 铸 铁	0.55	0.75	1.30
11	歪 头 山 选 矿 厂	磁 铁 矿			/	1.25	1.25
12	南 山 铁 选 矿 厂	同 上			0.74	0.29	1.03
13	包 钢 选 矿 厂	赤 磁 混 合 矿	棒 $\phi 100 \times 4300$ $\phi 75, \phi 30$	废 钢 轧 制	1.24		
14	大 冶 铁 矿 选 厂	含 铜 磁 铁 矿			1.25	0.34	1.59
15	酒 钢 选 矿 厂	焙 烧 磁 铁 矿			0.40	0.75	1.16
16	攀 钢 选 矿 厂	磁 铁 磁 铁 矿	$\phi 150$	B2F B3F钢锻制	1.66	/	1.66
17	邯 郸	磁 铁 矿	一段 $\phi 127$ 二段 $\phi 60$	50~70 钢 锻 造	0.70	/	0.70
全国重点选厂平均					1.25	0.90	2.15

单耗为0.8~0.9公斤/吨原矿，加拿大选矿厂平均磨球单耗为0.895公斤/吨原矿。表3均加拿大第二段溢流型球磨机铸铁球与锻钢球单耗统计数据。苏联选矿厂也广泛使用碳素钢锻球，其中单耗为0.5~1.0公斤/吨原矿。

表 3 加拿大铸铁球与钢球单耗对比（第二段溢流型球磨机）

选厂编号	磨机尺寸(m) DXL	矿石种类	球径(mm)	功指数Wi	铸铁合金类型	磨球耗量(kg/t)	
						锻钢球	铸铁球
1	4.1×6.7	铜 钼 矿	φ65	17~21	P. W. I.	0.45	0.71
2	4.1×8.5	铜 矿	φ65	17~21	M. D. I	0.45	0.44
3	/	镍 铜 矿	φ40	/	M. D. I	0.71	0.77
4	/	铁 矿	φ40	/	M. W. I	0.34	0.29
5	2.1×3.0	铜 矿	φ50	/	M. W. I	2.25	2.40
					M. D. I	0.42	0.38

如果，我国也采用优质磨球作粉磨介质，每年磨球消耗量可降低30~50%，年节约钢铁20~40多万吨，折合人民币1.5~3.0亿元。如考虑磨球的全部加工过程的能量消耗（吨磨球载能值为1.695吨标准煤），每年可节省标准煤34~68万吨左右。折合节省电能13.6~27.2亿度。

由此可见，研究提高磨球质量、改变磨球生产与供应状况，提高磨矿效率，降低磨球消耗已成为我国当前矿山企业和水泥企业急待解决的问题之一。

二、国内外磨球质量比较

冶金部调查表明，我国数以百计的小型铸球厂和锻球厂生产的磨球总产量占全国磨球总产量的75%以上。如此大量的铸铁球和利用废次钢材锻造的钢球是造成我国磨球质量差的主要原因。

机轧钢球虽然生产工艺较先进，但我国不少轧球厂既无“国际”可循又无“厂标”可守，钢坯材质也没有标准，基本上是供什么料轧什么球，而且坯料大部分又是低碳钢或废次钢材和杂钢切头等劣质材料，钢球硬度很低（HRC在30以下），淬透性不好（仅2~3毫米或根本不能进行淬火处理），对于高碳钢和低合金钢种，又没有相应的热处理工艺规范和完善的热处理设备，钢球往往淬裂。同时，生产技术管理和科研工作也跟不上去，这些都影响了轧制磨球水平的提高。

表 4 国内外磨球消耗情况比较表 (kg/t)

国 别	企 业	矿石处理量(亿吨)	磨球耗量(万吨)	磨球单耗(公斤/吨矿)	备 注
中 国	冶金矿山	1.45	24.3	1.82	1980年全国重点企业调查报告
	黑色矿山	—	—	2.15	
	有色矿山	—	—	1.50	
美 国	冶金矿山	3.53	29.4	0.80	北京钢研院1973年对美国，加拿大10个矿山的调查
加 拿 大	冶金矿山	2.94	10.0	0.90	
苏 联	黑色矿山	—	—	0.93	鞍山黑色院1980年调查

国外磨球一般均采用轧、锻和铸造工艺生产,料坯基本是含有铬(Cr)、锰(Mn)、钼(Mo)等合金元素的优质钢材。并配备有完善的磨球热处理工艺,磨球硬度均在50HRC以上。西德、加拿大等国甚至生产数量可观的高Cr铸球。硬度达60~64HRC。

表 5 国外不同材质磨球单耗对比

国 家	选 矿 厂	矿石类型	磨球材质	单耗(kg/t原矿)
美 国		磁 铁 矿	1090#,1095#合金钢	0.4
苏 联		磁 铁 矿	锻合金钢	0.64
	索科涅夫斯克—萨	钛磁铁矿	热轧合金钢	0.6
	尔拜克采选公司选矿厂			0.61
	马格尼托戈斯克	磁 铁 矿	热轧合金钢	0.637
		钛磁铁矿	合金钢高碳钢	
	阿巴左尔斯克	磁 铁 矿	高 炭 钢	1.03
加 拿 大		磁 铁 矿	锻合金钢	0.36
		钛 铁 矿	锻高碳钢	0.439

三、球磨失效分析

磨球在磨机中工况比较复杂,与磨料相互作用方式有三种:①冲击,磨球由高处抛落,砸在矿石物料上或与其它磨球和衬板撞击;②滚动,磨球在磨机中滚动,碾碎物料;③滑动,有些磨球被周围物料或球紧固在一起不能滚动,只能相对衬板滑动,在碾碎物料同时也容易对衬板及球本身造成损伤。

磨球在磨机中的磨损,除了磨球本身质量影响外,磨机的结构参数,工艺参数和物料性质等都有影响,模拟试验非常困难;这就给磨球磨损及失效分析带来极大的困难。因此,在实践中通常只能以正在运行的磨机中进行试验和研究。国外多采用放射性同位素法活化处理磨球,测定其失重,研究磨损规律。也有的采用钻孔计号法研究磨球磨损规律。

在选矿、水泥等生产过程中,球磨机中磨球常见的失效形式有三种,即碎裂、失圆及磨损。前两种形是不应该存在的,但又不可避免。这两种失效结果,一方面降低了研磨效率,另一方面又增加了磨球的磨损的速率。所以在矿山磨机和水泥磨机都要定期清理,排出破裂和失圆严重的磨球。

如果球的硬度不均匀,材质不均匀,冲击韧性不好,以及其它缺欠,都会导致磨球破裂和失圆。

四、钢制研磨介质材质的选择

1. 概况

目前世界各国使用的粉磨介质,大约有80%是用碳素钢和低合金钢锻造的,铸造介质不到20%,只有3%左右是采用硬镍合金铸铁和高铬铸铁制造,近20年来,国外对耐磨合金钢及铸铁介质的研究和应用取得了比较显著的进展。由于对低合金钢的深入研究,出现了更经济的低Cr和低Ni合金铸铁、耐冲击白口铸铁等新型耐磨材料,降低了金属制粉磨介质的成

本，提高了经济效益。

美国、加拿大多采用高碳钢及合金钢锻球、硬镍合金及高铬铸铁球，苏联也多采用碳素钢锻球；西德水泥工业60年代以来采用马氏体高铬铸铁球逐步取代锻造低合金钢球，平均消耗量从1公斤/吨料降低到0.55公斤/吨料。

表 6 美国与加拿大磨球种类及其比例

磨 球 种 类	美 国	加 拿 大
碳素钢与合金钢锻球	77%	81%
碳素钢与合金钢铸球	20%	/
硬镍合金与高铬铸铁球	3%	19%

加拿大对各种不同形状、不同材质的铸造介质进行了广泛研究并与锻钢球做了对比试验，认为马氏体白口铸铁粉磨矿介质有显著的耐磨性，而且价格便宜，它与高铬铸铁球和锻钢球相比，每吨矿石的磨矿费用分别减少了18%和24%。

表 7 加拿大铸铁介质的化学成份

介质种类	硬 度		C	Si	Mn	Ni	Cr	Mg	S	P
	HV	HB								
珠光体白口铸(P. W. I)	450	425	2.8~3.7	0.3~0.7	0.3~0.7	/	/	/	0.15	0.3
马氏体白口铸铁(M. W. I)	720	670	2.9~3.5	0.4~0.6	0.2~0.6	2.5~2.8	1.2~1.5	/	/	/
马氏体球墨铸铁(M. D. I)	600~700	565~670	3.2~3.8	1.5~2.3	0.1~1.2	/	/	0.02~0.04	/	/
锻 钢 球	/	650	0.80	0.26	0.60	/	/	/	/	/

我国多使用低碳钢轧球、锻球和铸铁球。正如前述，粉磨介质用钢及铸铁的牌号，质量均无标准和要求，其化学成分不固定，所以单耗量比国外高0.5~1.0倍。

2. 材质的选择

用作粉磨介质的碳素钢牌号很多，可根据使用条件和要求的不同。选择不同含碳量的钢制造。一般说来，磨矿用钢球的含碳量为0.5~1.1%。而钢棒由于其加工和工作条件的要求的不同，为了防止钢棒的折断，故含碳量可以低些，通常采用含碳0.6~0.9%的钢。

低合金的合金元素添加量均不应超过2~3%，如锰(Mn)、铬(Cr)、镍(Ni)、钼(Mo)、钨(W)、铜(Cu)和钒(V)等。添加低合金元素的目的是在碳素钢的基础上分散合金碳化物颗粒以改善碳素钢性能，提高其耐磨性、耐冲击性和加工淬硬性。

作为钢制粉磨介质，锰的含量通常为0.2~1.6%。锰可提高奥氏体稳定性，有助于阻止珠光体的形成。

铬与碳形成坚硬的 Cr_3C ，它具有良好的稳定性。同时由于C不易析出而提高了奥氏体的稳定性。 Cr_3C 颗粒均匀分布在Fe—C基地，而使材料的硬度和耐磨性能有很大的提高。

钼和铜用于抑制珠光体的形成，并分别增加材料的断裂强度和屈服强度。并增加淬透性。

硅能降低碳在奥氏体中的溶解度，并增加形成珠光体的趋向，故不能多加，尽管硅能增加钢水的流动性，影响石墨析出。

镍可使奥氏体稳定在低于珠光体形成的温度，但镍有石墨化作用，它的存在须用碳化物稳定的元素如铬来抵消。

硅的含量通常为0.6~0.9%，铜为1%左右，钼为0.5%左右。

铸铁球合金元素含量，一般说来没有严格限制，可视需要添加。如中锰白口铸铁含Mn量为5~7%；高铬铸铁含铬量高达14~16%。

我国用作粉磨介质的钢及铸铁还可加入微量稀土元素以改善其性能；有时加入少量钒、

表 8 目前我国可供选制造钢棒材质

材 质 品 种	硬 度 (HB)	直径为100mm的棒的耗量(公斤/吨)
热 处 理 合 金 钢	476	0.39
热轧AL.Si 52100合金钢	382	0.46
热轧AL.Si 1095合金钢(含1.2%Mn)	282	0.55
热轧AL.Si 1095合金钢(含0.4%Mn)	260	0.63

表 9 目前我国制造磨球可选用的材料

序号	材 质 品 种	主 要 成 份	硬度HPG	适 用 场 合
1	热轧高碳低合金钢(热处理)	C=0.9~1.05%;少量合金元素	60	金属矿,湿磨大小球
2	中碳低碳钢(热处理)	C=0.5~0.6%;Mn=0.4~0.6%	55~65	同 上
3	中锰白口铁	C=3~3.6%;Mn=5~7% Mg=0.01~0.03%;Re=0.02~0.05%	44~50	金属矿湿磨小小球
4	中锰钒钛稀土白口铸铁	C=3~3.4%;Mn=5.5~6.5%;Re≤ 0.03%;Mg=0.02%;V=0.35%;Ti=0.1%	55~58	金属矿,湿磨大小球
5	高碳低碳钢,热处理	C=0.8%;Mn=0.6~0.8%	60~65	金属矿及其它物料
6	高铬铸铁	Cr=14~16%Mo=2.5~3%	60~65	水泥,电厂等干磨

表 10 国外磨球主要材质

国别	材料名称	主 要 成 分 (%)					
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
美 国 和 加 拿 大	AISI 1095	0.9~1.05	0.2~0.33	0.3~0.5			
	AISI 1020	0.18~0.23	0.1~0.2	0.3~0.6			
	AISI 52100	0.95~1.10	0.2~0.35	0.25~0.45	1.30~1.60		
	高 碳 钢	0.62~1.0	0.26~0.45	0.3~0.7	0.28~0.9		
	合 金 钢	0.62	0.62	0.11	4.75	0.11	(0.29)
	高 铬 铸 铁	2.8~3.2	0.3~0.8	0.6~0.9	14~16		0.35
	珠光体白口铁	2.76	0.3	0.75			
日 本	马氏体白口铁	3.23	0.62	0.64	1.89	4.26	
	锻 钢 球	0.04~0.83	≤0.4	0.4~1.4			
	轧 制 钢 球						
	轧 制 钢 段	0.3~1.1	0.15~0.35	≤0.85	0.8~1.60		
	铸 铁 球	2.5~3.8	0.20~1.40	≤0.70	≤1.20		
	铸 铁 短 段	2.9~3.8	0.20~1.40	≤0.70	1.2~2.7		

硼等元素使晶粒细化, 增加淬透性, 以提高其耐磨性能。

总之, 为满足磨球工作条件要求, 选择材质时应注意以下几点:

(1) 磨球应具有高的耐磨性, 包括对抗切削磨损、变形磨损和疲劳磨损的耐磨性。对切削磨损要求高的硬度, 对变形磨损和疲劳磨损要求高的应变疲劳、接触疲劳和冲击疲劳寿命。

(2) 良好的韧性, 保证在反复冲击下有高的抗冲击能力, 不发生破碎避免磨球的快速失效。

(3) 高的淬透性, 保证大尺寸磨球可以淬透, 整个断面获得均匀的高硬度, 磨损过程中保持稳定的耐磨性。

(4) 好的冶金质量, 特别对铸造的球, 减少铸造缺陷、夹杂、夹渣, 保证冶金质量, 对提高抗冲击能力和抗疲劳能力, 改善耐磨性, 是非常关键的。

此外, 由于磨球制造工艺不同, 磨球质量性能也不一样。因此铸、锻、斜轧磨球的适用条件也不尽相同。用户应根据自己的工艺要求, 磨机工况条件, 在确定磨球选材的同时, 也定磨球的制造工艺方法。

五、我国粉磨介质生产、使用现状和进展

1. 概 述

据调查, 我国磨球生产工艺主要有铸造铁球、锻造钢球和轧制钢球等。

普通铸造铁球生产工艺陈旧落后, 生产效率很低, 单位消耗大、质量差。铁球在磨机中很容易被破碎而开裂。每磨一吨矿石消耗都在2公斤以上。如辽宁省宽甸, 滴达水套, 岫岩铜矿, 黑龙江松江铜矿等单位使用铸铁球, 单耗高达4.81~7.44公斤/吨矿。磨矿效果很差。

近年, 许多厂家推出了低合金耐磨铸球, 由于其化学成分、冶炼铸造工艺、热处理等方面做了很大改进, 耐磨性能有了很大提高。在粉磨介质生产中占有很大比重, 年约有15~20多万吨。

我国目前建有数以百计的小锻球厂, 这些小厂规模很小, 一般年产量只有几百吨, 设备简陋, 技术力量薄弱, 而且, 坯料大多采用低碳轧制钢坯的料头料尾等废次钢材。因此, 钢球内部折叠、夹渣很多, 外形尺寸不准, 又不可能进行热处理淬火, 钢球硬度很低。锻造生产效率低, 劳动加度大、噪音污染严重, 消耗高、质量差, 难以形成大规模专业化生产。但由于锻造钢球在合理、科学的工艺条件下, 上述缺欠可以克服, 所以选用优质耐磨低合金钢材, 精心锻造, 钢球的内部质量和外观质量都可以比铸球和轧球好。其重要优点是在锻造过程中, 料坯的不断翻转, 使钢的纤维呈包络状, 故不易碎裂。所以对尺寸大的磨球, 应尽量采用锻造工艺。特别是由于磨机规格的增大, 必须使用锻球。

用斜轧方法生产热轧钢球的工艺, 采用优质热轧圆钢为坯料。具有生产效率高(每分钟可轧钢球十几个至几百个)。对于中、小尺寸的磨球, 如工艺操作要求严格, 一般说来磨球的外形和内部机械性能好。生产中材料损耗低、噪音小、机械化程度高、宜于进行大规模连续生产等一系列显著优点。因此, 近十年来热轧钢球生产在我国得到了较快的发展。

目前, 我国已建成投产的十一家轧球厂拥有十三台钢球轧机, 总设备能力为每年40万吨

多,规格为 $\phi 40\sim 125\text{mm}$ 。

由于许多原因的影响,目前我国轧制的中 $\phi 80\sim 125\text{mm}$ 钢球,质量不尽满意,破碎率较高,破裂的大部分球是由中心处对开呈半球形。笔者认为这是由于斜轧工艺引起的必然结果。斜轧时,钢球纤维呈环状,特别是大球,由于轧制比较低,这种现象更为严重,致使钢球破裂呈半球状。有待进一步改善。

综上所述可见,我国粉磨用磨球生产应铸、锻、轧三种工艺可同时发展,对于 $\phi 40\sim \phi 125\text{mm}$ 磨球应以锻为主,以铸为辅; $\phi 30\sim \phi 40\text{mm}$ 磨球,以斜轧和铸为主,以锻为辅; $<\phi 30\text{mm}$ 磨球以铸和锻均主。

2. 我国粉磨介质主要生产厂家概况

(1) 马鞍山耐磨材料铸锻公司所属钢球厂,该公司钢球厂是中国有色金属总公司专供厂,主要产品为中碳钢锻造球,年生产量为20000吨,主要供有色金属矿山使用。

此外该厂还生产低合金耐磨球铸锻和合金衬板,低合金球用于有色金属矿山单耗为600~800克/吨。

该厂研制的低合金钢衬板在 $\times\times$ 钨矿进行了工业试验,取得了较好效果,正准备进行鉴定和推广。

目前该厂低合金耐磨球年产量为2000吨,耐磨衬板500吨。为了满足市场需要,已完成扩建。扩建后生产能力为10000吨低合金耐磨球和耐磨衬板,已于1990年初投入生产。

为了进一步提高产品质量,该厂已和北京矿冶研究总院合作,拟建立磨球和耐磨材料试验研究所和磨球检测中心。共同开发大直径球磨机用铸造成锻造耐磨球。

该厂有较好的试验和测试仪器,并有机械维修车间,自行设计和加工生产用模具和专用设备。

(2) 宁国耐磨材料总厂,宁国耐磨材料总厂是安徽省建材局定点生产耐磨材料专业厂之一。产品有高铬合金铸球,低铬合金铸球,高铬合金铸段,低铬合金铸段和磨机衬板。年生产规模为15000吨(89年)。

该厂产品中,以低铬合金铸球和低铬合金铸段销量最大。其特点是采用合理的化学成分匹配,较为先进的成型工艺,其产品经热处理后,晶粒较细,性能稳定。

低铬合金铸球金相组织是马氏体和 $(\text{CrFe})_7\text{C}_3$ 碳化物为主,冲击韧性为0.4~0.8;硬度约为58~62HRC;规格为 $\phi 30\sim \phi 120\text{mm}$ 。

低铬合金铸段金相组织以索氏体和针状碳化物为主,冲击韧性约为0.6~1.0,硬度为50~54HRC。

该厂有若干个分厂,所以各分厂间质量有一定的差别,以一分厂和二分厂质量为最好。

该厂计划到1989年产量达到20000吨低铬合金铸球

该厂自1986年以来先后在江山、万年、柳州等水泥厂,上海梅山冶金公司选厂,德兴铜矿,金堆城钨矿,金厂峪金矿等40余家进行了工业试验,耗球近万吨。试验结果表明,球的质量达到了设计的技术要求,用于水泥磨机单耗为66~200g/t水泥;用于德兴铜矿和梅山铁矿单耗为500~700g/t矿石;用于大姚铜矿,与普通钢球相比单耗由2.351kg/t矿石降低至0.893kg/t矿石;铜陵狮子山单耗为0.656kg/t矿石;金厂峪金矿单耗由2.4kg/t矿石(中锰球)降至0.837kg/t矿石;金堆城钨矿单耗由普钢球的2.29kg/t矿降至0.788kg/t矿。

北京矿冶研究总院、云南牟定铜矿和宁国厂共同于1988年1~5月进行了大规模工业试

验,磨机规格为 $\phi 2700 \times 3600$,两段磨矿,给矿粒度为 -20mm ,产品细度为 $85\% - 200$ 目,矿石中 SiO_2 含量为 70% 以上,试验结果单产球耗为 2.016kg/t 矿石,比普通合金球降低 1.184kg/t 矿石,创造了单定球耗历史最好水平。为进一步降低单耗值,拟再次进行工业试验。此外,该厂还生产各种等规格磨段。有部分产品销国外。

(3) 辛集市赵马磨球厂,辛集市赵马磨球厂是河北省重点磨球生产厂,主要产品有低合金铸球和低合金铸段。

该厂在沈阳铸造研究所等单位大力支持和帮助下,以废钢铁为主要原料,添加适量多种合金元素,采用冲天炉熔炼,砂型铸造工艺,生产了一种新型低合金铸球,球表面光洁,无飞边,无毛刺,无粘砂,无裂纹;表面硬度 $\text{HRC} > 45$;冲击韧性 ≥ 0.5 。磨球在水泥厂,矿山,发电厂进行了工业试验。结果表明,比普通锻钢球相比,耐磨性能提高 $3 \sim 4$ 倍。该厂产品用于金属矿山,该厂产品被评为河北省优质产品,并获得农业部科技进步三等奖,并取得产品质量认定证书和定为部优质产品。

该厂生产球磨工艺合理,生产成本较中频电炉法低,性能稳定。产品销往全国各地,并远销国外。为满足日益增长的市场需要,该厂正在组织扩大生产和广泛开发各种耐磨材料制品,争取1990年达到年产万吨级大型磨球厂。

该厂为了不断改善和提高磨球质量和开发耐磨材料制品,已经设立了耐磨材料研究所。

(4) MM—1锻钢球,北京矿冶研究总院王宏勋和北京物资学院陈若旺共同研制的MM—1锻钢球,经过在水泥行业试验表明,比 45° 钢锻球使用寿命高 $1.5 \sim 2$ 倍。由于客观原因,未能在金属矿山试验。

(5) 中高碳空冷锰硼贝氏体钢球,北京通县某厂与清华大学合作生产了中高碳空冷锰硼贝氏体钢锻球。

中高碳乙冷锰硼贝氏体钢是采用锰、硼作为主要合金元素。冶炼、锻轧工艺简单,热加工后空冷,可获得贝氏体/马氏体复相组织,可免除淬火工序。空冷后的硬度为 $\text{HRC} \geq 50$ 。可见,这等钢非常适于制作磨球。

该厂生产的锻钢球,经性能检测,质量良好,不易破裂,耐磨,适用于多等形式磨机。

(6) 慈溪耐磨材料厂:国家建材总局合肥水泥院与慈溪联营,建立了慈溪耐磨材料厂,已于1988年12月15日开工投产。

该厂是合肥水泥院按正规设计规范要求而设计的,厂房比较整齐。设计的装备及检测手段较齐全。

该厂主要生产低合金铸球,设计生产量为5000吨,1990年达到10000吨。试生产产品经检验性能良好。

(7) 山西万荣县荣耀钢球经售部属钢球厂:该厂主要是利用军工下脚专用料锻造各种钢球。

钢材质量较为稳定,用户反映使用效果较好。

其普球化学成份为: $\text{C} = 0.74 \sim 1.20\%$, $\text{Si} = 0.30\%$, $\text{Mn} = 0.30 \sim 0.50\%$, $\text{S} \leq 0.04\%$, $\text{P} \leq 0.03\%$ 。磨球经热处理后硬度比较均匀约为 $\text{HRC} = 45 \sim 51$ 。

低合金钢锻球化学成份为: $\text{C} = 0.50 \sim 0.55\%$, $\text{Si} = 0.20 \sim 0.30\%$, $\text{Mn} = 0.50 \sim 0.70\%$, $\text{Cr} = 0.15 \sim 0.20\%$, $\text{S} \leq 0.30\%$, $\text{P} \leq 0.03\%$ 。磨球热处理后表面硬度约为 $\text{HRC} \approx 50$ 。

由于二个球厂均采用军工下脚料,生产成本较低,故其销售价格较低。

其生产工艺如下:

下料——加热——锻造——质量检查——入库。

下料: 为避免产生折叠、凹陷、夹渣和脱碳, 严禁用氧气切割, 尽量采用冷切(锯下)料。下料长度根据钢坯规格计算求得。

加热: 坯料加热时, 既要防止加热温度过低和速度过快而造成锻压困难和裂纹, 又要避免加热时间过长和温度过高而造成过烧、脱碳和氧化。因此, 要求装料适中, 加热时间以1.5小时为宜。其始锻和终锻温度列于表11。

表 11 始锻、终锻温度表

始 锻 (压) 温 度		终 锻 (压) 温 度	
°C	观 色	°C	观 色
1150	暗—亮黄色	800—850	亮桃红色

锻(压): 为使钢球具有较好的致密度, 要求锻(压)次数不小于表12的规定。锻(压)过程中应随时清除模内的氧化皮。

热处理: 为使钢球具有一定的硬度和韧性, 要求利用锻(压)后的余热进行淬火, 余热温度为800—850°C, 水温为30—55°C。时间为1分钟。水温过高或时间过短达不到硬度要求, 水温过低时间过长容易产生裂纹。淬火后进行堆放空冷。

表 12 锻(压)次数表

锻(压)设备名称	一吨空气锤	750公斤空气锤	560公斤空气锤	250公斤空气锤	80吨以上压力机
锻(压)次数	>45	>50	>55	>70	<25

质量要求:

- (1) 绝对不允许有表面裂纹现象;
- (2) 表面不允许有严重折叠和过烧, 合格率大于94%。
- (3) 表面不允许存在局部结疤、麻点、凹陷和夹渣, 其缺陷深度不得大于直径允许偏差, 合格率大于90%。
- (4) 不圆度不得大于3毫米, 合格率大于94%。
- (5) 尺寸合格率大于86%。
- (6) 热处理后的表面硬度不小于HRC45。

目前, 该厂生产能力为年3000吨锻球。

(8) 靖江县八圩矿机厂: 靖江县八圩矿机厂生产了一种铸—锻钢球。磨球表面质量和内部质量都较好, 是一种经济性较好的磨球, 价格较合理, 适用于中小型磨机。

此外, 该厂还生产低铬合金铸球, 用于水泥厂单耗为100~150克/吨; 用于金属矿山单耗为500~1000克/吨; 用于磨煤为70~100克/吨。

(9) 云南录丰钢铁厂磨球分厂: 该厂利用录丰铸铁天然成份铸造耐磨球, 其性能基本达到低铬合金铸铸造质量水平, 录丰生铁含有多种合金元素。其中铬、钼、锰、铜、钒、钛, 稀土等都达到低合金钢要求, 是发展耐磨球的一种优质原料。

(10) 高碳低铬、钨耐磨钢球: 南昌钢厂研究所于1986年研制成功高碳低铬、钨钢耐磨锻球, 并在德兴铜矿进行了工业试验。其化学组成如表13所示。机械性能列于表13。

表 13

高碳低铬、钨锻球化学成分

№	C	Mn	Si	P	S	Cr	W	V	其 余
1	0.900	0.940	0.545	0.030	0.013	0.720	—	—	Fe
2	0.795	0.935	0.620	0.017	0.020	0.640	0.780	—	Fe

表 14

高碳低铬、钨锻球机械性能

№	硬度 HRC	冲击韧性	金属磨矿指数
1	34~62.5	1.51	0.1549
2	40~64.5	0.98	0.1516

1984年6月8日~1984年7月26日,于德兴铜矿选厂5*球磨机进行了工业试验。球磨机规格为 $\phi 3200 \times 3100$,共处理55038吨矿石,测得钨钢球单产球耗为0.717kg/t矿。而同期平行对比系统磨机,使用普通钢球,单耗量为1.317kg/t矿。铬钢球单耗为0.763kg/t矿,同期试验普通钢球单耗值为1.555kg/t矿。

(11) 轧制钢球:

目前,我国大型轧球厂有三个,邯钢轧球分厂,鞍钢轧球分厂和包钢轧球分厂。

邯钢钢铁总厂钢球分厂是我国最早建成的专业化轧球厂之一,拥有两套苏联进口钢球轧机和相应的辅助设备,每年可生产 $\phi 40-125\text{mm}$ 十六种规格钢球十五万吨。与国内其它厂比较,邯钢轧球厂装备水平较好,机械化程度较高。该厂产品的化学成分与国外产品质量比较列于表15。

表 15

邯钢优质钢球与国外产品质量比较表

国别	化 学 成 分 (%)						钢球硬度	淬硬层深度
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Cu	HRC	mm
中国 邯钢	0.65 0.80	~1.80	~0.40	—	—	~0.30	45~61	10—12
美国 ×厂	0.84	0.5	0.18	~0.4	0.50	—	55~60	8—10
日本 ×厂	0.47 0.50	—	—	—	—	—	51~57	—
澳大利 亚	0.85 0.95	0.5 0.8	0.1 0.5	0.5 0.1	—	—	62.5~64	—

从1980年起,邯钢与北京钢铁学院合作研究了 $\phi 40-80\text{mm}$ 钢球淬火工艺。已用于生产。

《提高钢球质量》科研的全部研究、试制和磨矿试验工作已完成。邯钢形成了年产10万吨以上 $\phi 40-125\text{mm}$ 优质淬火钢球的生产能力。

该厂对钢球质量要求为:

①外观:无尾巴、环沟、裂纹。②球心:无中空,疏松最大为1~2级。③硬度:球表面49.3~60.3HRC,球心34~42.7HRC。④硬度梯度:淬硬层10~12mm,过渡层硬度衰减较缓。⑤金相组织:表层:回火马氏体,细晶粒7~8级。过渡层:马氏体+屈氏体(或少量

贝氏体)。心部：细珠光体，晶粒度4~5级。⑥低倍组织：球体金属纤维完整，组织致密，无裂纹。

邯钢厂生产的 $\phi 40-125$ mm优质钢球质量已接近国外同类先进水平。该厂进行了一系列工艺和技术改革：

①生产工艺流程：坯料——加热——轧制——预冷——淬火——回火——检验——分选——入库。

②制球坯料：一级品热轧圆钢，长度3~4米，质量符合国家标准(GB702—72、YB17—63)。

③钢坯化学成份：(%) C 0.65—0.80%；Mn 0.81—0.94%；S 0.02—0.4%；P 0.01—0.029%；S 0.016—0.020%。表16、17为该厂生产热轧钢球技术标准和性能。

表 16 钢球直径及允许偏差

公称直径 (mm)	实际直径 (mm)	直径允许偏差 (mm)	不圆度小于 (mm)
40	41.5	± 2	2
50	52		
55	57		
90	62		
65	68	+3 -2	3
70	73		
75	78		
80	83		
85	88		
90	93.5		
95	98.5		
100	103.5	± 3	4
110	114		
120	124		
130	135		

实际上由于钢材供应不足，以及牌号较杂，故锻球质量波动较大。

(12) 首钢低合金钢淬火钢球：首钢矿山公司于1983年介绍了低合金钢锻造球。该球采用余热处理，提高了钢球表面硬度，提高了耐磨性能。该公司所属选矿厂采用 $\phi 127$ 毫米低合金钢锻球，1981年钢球单耗由1.22公斤/吨原矿下降到0.78公斤/吨原矿，年节约开支近百万元。该公司选20MnV轧材作为钢球坯料，化学成分列于表18。

表 17

钢球用钢化学成分

牌 号	化 学 成 分 %				
	碳≤	硅≤	锰≤	磷≤	硫≤
Q 1	0.38				
Q 2	0.39~0.50	0.40	1.80	0.060	0.055
Q 3	0.51~0.80				

表 18

20MV化学成分

元素含量	0.17~0.24	0.20~0.40	1.30~1.60	0.07~0.12
元 素	C	Si	Mn	V

钢球锻后温度一般为870°C，锻后入水（在水中停留120~150秒）。取出后，利用自身热量回火。

1982年4月1日在迁安大石河选矿厂一系列一次球磨机（ $\phi 2700 \times 3600$ 格子型球磨机）进行了工业试验。矿石硬度系数 $f=8 \sim 12$ ，给矿粒度为-18毫米占90%，磨矿产品细度-200目占85~90%。台时处理能力为42.945吨/时，与未经热处理钢球对比。单耗由1.22公斤/吨原矿下降到0.84公斤/吨矿。磨矿效率由1.28吨/小时米³提高到1.48吨/小时米³。1982年12月至1983年7月，大石河和水厂两个选矿厂采用余热处理低合金钢锻球。两厂钢球平均单耗一直稳定在0.67~0.80公斤/吨原矿的水平上。

(13) 稀土中锰铸铁球：铸铁球中的“稀土中锰铸铁球”是近几年出现的质量较好的耐磨球。沈阳铸造研究所，株洲化工厂和大冶有色金属等单位研制出这种球的耐磨性能较好，其寿命有时可接近于中碳钢锻球。

稀土中锰球墨铸铁是承受中等冲击负荷下的良质耐磨材料。它可在一定范围内代替锻钢、合金钢、高铸钢和合金铸铁，是一种独特的耐磨材料。稀土中锰球墨铸铁的是硬度高（HRC=43~62），耐磨性能好。但由于砂眼、气孔、夹杂等铸造缺陷较多；加上磷、硫含量多，机械性能较差，易造成破碎率高（最高可达30~70%）、磨矿效率下降较多（较好的情况下下降2.5~5%。差者下降10~15%）。其优点是成本低，易于制造。表19为稀土中锰铸铁球的化学成分。

1979年我国大孤山选厂采用 $\phi 60$ 毫米中锰稀土镁合金钢与普通热轧钢在二段 $\phi 2.7 \times 2.1$ 米球磨机中进行过对比试验，结果表明稀土镁合金球具有较高的硬度、耐磨、单耗低、磨矿效率高、不影响产品质量等优点。现场试验结果与磨球的化学成份列入表20、表21。

(14) 高铬铸铁球：西安交通大学和建材系统合作于1981年研制成功了高铬铸铁球。根据在许多水泥厂的试验结果表明其寿命（使用期限）是原来碳钢球的11倍。唐山水泥机械厂

表 19

稀土中锰铸铁球化学成分

No 1	Si %	Mn %	C %	S %	P %	HRC	Re %	冲击值 kg·m/cm ²
1	4.52	6.23	3.22	0.014	0.110	49	0.023	0.7
2	3.99	5.40	3.85	0.014	0.096	49	0.053	0.2
3	2.10	7.88	0.40	0.052	0.118	53	0.057	1.2

表 20

大孤山选厂两种磨球介质的试验对比

磨球种类	球径(mm)	硬度 (HRC)	抗压强度 (Kg/mm)	球耗系数	球耗量 (公斤/每吨矿石)	球价格 (元/吨)	每吨矿石耗球费 (元)	-200目含量 (%)
锰合金球	φ60	46.5	245	55	0.58	700	0.41	81.7
普通钢球	φ50	23	36	100	0.88	620	0.55	75.2

表 21

大孤山选厂两种磨球介质的化学成分

成份%	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mg	S	P	Re
中锰合金球	3.6	3.27	5.52	0.018	/	0.0095	0.010	0.101	0.0145
普通钢球	0.45~0.5	0.11~0.37	0.5~0.55	<0.25	<0.25	/	<0.04	<0.04	/

从国外引进了高铬铸球生产线。

高铬铸球淬火态组织为条块状(Cr,Fe)₇C₃型共晶碳化物+弥散状二次碳化物+隐针状马氏体。

硬度：铸态为HRC35~40；淬火态为HRC64~67。在500°C以下工作时不降低其硬度。冲击值为7.4~7.9牛顿/毫米²。抗弯强度783~1050牛顿/毫米²。挠度（支距300毫米）：2.40~3.04毫米。

高铬铸铁的价格比中碳锻钢球贵（高铬铸铁为7000元/吨，中碳锻钢球1700元/吨）。但考虑到其寿命平均比高锰钢高10倍（对建材部门）。因此采用高铬铸铁球代替中碳锻钢球是经济的。但其对金属矿石的耐磨性能尚没有试验数据，是否经济尚有待通过试验判定。

生产高铬球质量较好的厂家有贵州G02厂，湖南五三厂。

(15) φ150毫米中、高碳钢球：攀枝花矿山公司于1981年2月开始研究改善磨球质量问题。

攀钢选厂φ3.6×4.0米格子型球磨机，长期以来使用φ150毫米锻钢球，单耗高达1.8公斤吨原矿。球磨机给矿粒度为25毫米，产品粒度为-200目占40%，与国内外同类型厂对比钢耗消耗过高，影响了选厂经济效益。为了降低钢球单耗，采用中、高碳钢球代替长期使用的低碳钢球。中、高碳钢球化学最分如下：C 0.5~0.8%；Si 0.11~0.40%；Mn 0.3~1.8%；S<0.05%；P<0.06%。

磨矿工业性试验

对钢球质量经过磨矿生产进行了检验。试验从1981年11月开始至82年3月结束。共运转了10078个台时，处理矿量99万吨。其试验结果表明，钢球单耗可下降至1.0公斤/吨原矿。

对试验结果作如下分析：

①钢球单耗曲线随试验时间的增加而下降，到第四个月新球自然配比已经形成，曲线开始稳定在一定的水平上。

②试验开始后有一段时间台时处理量稍有下降，其原因有三：

碎球影响：新球开始试制时淬火时间为2分钟，磨机内碎球量增加到5~7%。后来将淬火时间改为1分钟，碎球量减少到2%以下，磨矿效率开始回升。

球量影响：试验开始后虽然钢球补加量逐渐减少，但球荷尚明显普遍增加，经几次调整