

密级：内部

K2112.00 溢流型球磨机结构设计
K2112.00 Overflow Ball Mill Structure
Design

学 院：机械工程学院

专 业 班 级：机械设计制造及其自动化 1102 班

学 号：110101231

学 生 姓 名：彭慧杰

指 导 教 师：王赫莹（副教授）

2015年 6 月

摘 要

在选矿作业中，球磨机的磨矿作业是选矿厂整个工艺流程中承前启后的关键性一步，在选矿工艺流程的建设中所占的成本比例很大，因而对球磨机的钻研是十分必要的，我们需要优化球磨机的机械结构，提高其研磨效率，减少成本。

本课题主要是对 K2112.00 溢流型球磨机进行结构设计，根据 K2112.00 溢流型球磨机的技术要求，合理地确定设计方案，并对其机械结构进行设计，包括进料部、传动部、筒体等，绘制球磨机的装配图，主要部分的部件图以及零件图。本课题主要是对球磨机的轴承部，传动部和筒体部进行优化设计。了解了球磨机的工作原理和载荷分布的情况，就可简化轴承部的结构，而使用通用件，可以降低球磨机的成本，满足企业的需求。筒体部的优化：改进筒体材料、合理布置筒体衬板、合理选择衬板材料和类型、优化进出料装置等，筒体部的改进可减少进料端与出料端矿浆的泄露，提高球磨机的运行效率，延长使用寿命，降低能耗。通过查阅资料可知，所设计的溢流型球磨机的直径 $D=2100\text{mm}$ ，长度 $L=3600\text{mm}$ ，经过计算可得到球磨机的转速、功率、装球量等自身参数，进而对其传动部进行设计，选择合适的电动机、减速器、相对应的联轴器等，且合理地设计球磨机的齿轮传动结构，并进行校核。可以降低成本，减少能耗，提高经济效益。

关键词：球磨机；结构优化；回转部；传动部

Abstract

In beneficiation operations, ball mill grinding operation is a critical step in the entire process in the past and the concentrator, the cost ratio in the beneficiation process of building a large share, so the research is necessary to mill, we need optimization of the mechanical structure of the mill, which increases the grinding efficiency and reduce costs.

This topic is mainly on K2112.00 overflow ball mill for structural design, according to the technical requirements K2112.00 overflow ball mill, and reasonably determine the design and the design of its mechanical structure includes a feed unit, drive unit, cylinder, etc., performed mill assembly drawing, part of the main components and parts Drawings. This topic is mainly on the bearing portion, drive unit and the cylinder section mill to optimize the design. Understanding of the situation of the working principle of the ball mill and load distribution to simplify the structure of the bearing portion, and the use of common parts, can reduce the cost of the mill, to meet the needs of enterprises. Optimization of the barrel portion: Improved cylinder material, rational arrangement of the cylinder liner, a reasonable choice of liner material and the type of optimization out equipment, etc. can be reduced to improve the barrel of the feed end and the discharge end of the slurry leak, improve operating efficiency of the mill, increase the service life, improve efficiency and reduce energy consumption. Through access to information we can see, the design of overflow ball mill diameter is 2100mm, length is 3600mm, can be calculated through speed, power, amount of ball mill parameters such as their own, and then the design of its drive unit, Select the proper motor, reducer, the corresponding couplings and rational design structure ball mill gear, and checked. Can reduce energy consumption, increase economic efficiency.

Keywords: mill; structural optimization; rotary department; transmission division

目录

摘 要	I
Abstract.....	II
第 1 章 绪论	1
1.1 课题研究的目的是和意义	1
1.2 课题的国内外发展现状及发展趋势	1
1.3 课题研究内容及目标	3
第 2 章 球磨机结构分析	5
2.1 球磨机结构概述	5
2.1.1 工作原理.....	5
2.1.2 溢流型球磨机的优缺点及工作特点.....	6
2.2 磨机的分类、比较及分析	6
2.2.1 磨机的分类、比较.....	6
2.2.2 球磨机类型分析.....	9
2.3 球磨机的结构组成	9
第 3 章 球磨机总体参数的设计	11
3.1 球磨机的自身参数	11
3.1.1 转速.....	11
3.1.2 装球量.....	12
3.1.3 钢球尺寸.....	13
3.1.4 球磨机的功率.....	13
3.1.5 电动机的选择.....	14
3.2 球磨机回转部分的设计	14
3.2.1 筒体部的设计	14
3.2.2 进料和出料装置的设计	18
3.3 轴承部的设计	23
3.4 传动部的设计	24
3.4.1 传动形式.....	24

3.4.2 齿轮结构的设计.....	24
3.4.3 减速器的选择与校核.....	29
3.4.4 联轴器的选择与校核.....	29
3.4.5 轴承的选择与校核.....	30
3.4.6 键的选择与校核.....	31
第4章 结论.....	32
参 考 文 献.....	33
致 谢.....	35

第 1 章 绪论

1.1 课题研究的目的是和意义

球磨机是一种历史悠久的磨矿设备，1876 年，德国发明首台球磨机。在 1905 年，最早是美国人用它来研磨矿石。球磨机广泛应用于水泥、硅酸盐制品、新型建筑材料、耐火材料、化肥、黑色与有色金属选矿以及玻璃陶瓷等生产行业，对各种矿石和其它可磨性物料进行干式或湿式粉磨^[1]。

虽然球磨机的缺点不少，但将它从磨矿设备中淘汰出去几乎是不可能的。球磨机在工厂中的建设投资和生产费用中占的比例很大，而且正值建设资源节约型社会的关键时间，降低建设投资和生产费用是各国矿山工业面临的一个最为严峻的问题。在未来，球磨机仍然有很大的发展空间，相当长的时间内都会是十分重要的。因此，对球磨机的研究设计是十分有必要和有意义的。

1.2 课题的国内外发展现状及发展趋势

国内从 20 世纪 80 年代中期开始，球磨机的发展基本是处在停滞不前的状态，逐渐拉大了与世界先进水平的距离，但随着改革开放，国内球磨机行业近些年正在不断地兴起^[2]。各国的经济状况不同，研究方法也不同，所以球磨机的发展水平各不相同。随着社会的不断发展，工业的进步，能源开始日渐紧缺，能源的价格也在不断攀升，节约能耗已经成为世界各国的共同发展目标。国内外的粉碎设备和技术正不断地进步发展，其发展的特点是大型化、结构优化、技术性能优化。发展目标是提高生产能力、减小产品粒度和节能降耗^[3]。

目前，世界上规格最大的湿式球磨机是南非 Anglo Platinum 铂矿订购的两台 $\Phi 7.92\text{m} \times 12.2\text{m}$ 球磨机，装机容量 17500kW/台，已于 2007 年投入使用。世界最大规格的干式球磨机是克虏伯公司生产的 $\Phi 6.2\text{m} \times 25.5\text{m}$ 球磨机，安装功率 11200kW，于 1994 年投入使用^[4-5]。

我国的磨矿设备是在解放后发展起来的。最初是仿制，到 1958 年才开始进入自行设计制造阶段，经过了 50 年的发展^[6]。以下是我国球磨机发展需要面临的重要问题：

（1）生产效率低：现今，我国的球磨机大部分还处于人工手动控制的情况下，会造成球磨机内的物料变化大，磨矿效率降低。物料的均匀度因此很难保证。

（2）生产成本低：研磨过程中，球磨机本身会受到冲击，筒体内的衬板会受到冲击破坏，消耗的矿物量也是很多的。

（3）体型大：球磨机的总重量可在几百吨以上，所占的成本比例是很大的。

（4）噪声高：研磨介质和筒体壁以及物料之间相互撞击而产生的机械性噪声就是球磨机噪声^[7-9]。噪声可以高达 110dB，对人体危害大。球磨机类型不同，控制球磨机噪声的方法也会不同。

70 年代末，我国开始研制节能型球磨机，到目前为止已经有了多种规格。大中型球磨机采用国外的先进技术，如静动压轴承能够忽略滑动轴承的故障，气动离合器可以完成主电机无负荷启动，缩短了启动时间，降低了电流对电网的冲击，使启动平稳，实现无冲击啮合^[10]。中小型的球磨机可以在结构上有较大的改进。如选用滑动轴承来替代滚动轴承，极大地减少滑动轴承轴瓦更换的次数，减少球磨机停机的天数，从而极大地提高球磨机的经济利用率^[11]。介绍几种具有高效节能特点的球磨机：

（1）静动压轴承球磨机

静动压润滑的过程：球磨机启动时，采纳高压系统润滑的方法，用高压油顶起球磨机的回转部，在球磨机启动运转后，再采用低压系统进行润滑。若球磨机启动和运转时，均使用的是高压系统润滑则称为静压润滑。静动压或静压润滑可有效避免球磨机空心轴与轴瓦之间的摩擦，减少摩擦损失，延长主轴承的使用寿命^[12]。

电机轴与小齿轮传动轴之间是用气动离合器联接，可进行电机与球磨机的分段启动，改善启动条件，降低了启动的电流和功率，同时在超负荷情况下起到保险的作用。使用节能衬板，能够有效地延长衬板的使用寿命，增加其工作效率。齿轮喷雾装置会定时定量地把润滑脂喷射到大齿轮的工作表面，可以改善齿轮的润滑状况，减少球磨机运行时的能耗，并增加齿轮的使用寿命。

目前，我国自己设计制造的并在选矿厂应用的最大规模的静动压轴承是衡阳有色冶金机械总厂生产的 $\Phi 3.6 \times 6.0\text{m}$ 溢流型球磨机，1994年安装于陕西金堆钼业公司百花岭选矿厂^[13]。

（2）QSZ 型中心传动球磨机

采用的传动方式是中心传动方式，电机、减速机、传动系统和筒体均在同一轴线上。球磨机的中空轴轴颈与主轴承间是滚动摩擦，摩擦阻力小，筒体是由双列调心圆柱滚子轴承支承。液力偶合器传动是一种柔性传动，工作腔内的液力传递决定转速，可吸收和隔离振动，并缓和冲击，使球磨机的速度缓慢上升，启动平稳。而双级行星齿轮减速器的传动比大，传动效率高，设备的重量减轻，制造成本降低。配套电机的功率也随之下降，比同规格普通型球磨机相比，电机功率减少了 10.7%~40.5%。1991年，兰州有色冶金设计研究院为甘肃陇南福利选矿厂设计了规模为 10t/d，国内第一台 $\Phi 1500 \times 3000$ 的 QSZ 型中心传动球磨机。经检测得，QSZ 型中心传动球磨机的各项技术性能均优于同规格普通型球磨机，单位矿石电耗降低 32.51%，节能效果显著^[13]。

（3）圆锥型节能球磨机

圆锥型节能球磨机是在筒体的出料端增加一段圆锥筒体，既使球磨机有效容积变大，又使筒体内部的磨矿介质分布变得更加正确，以便得到更细的产品。大齿轮安装在直筒和圆锥筒体的连接部，使筒体的扭曲应力减少，齿轮的模数及直径也会随之变小，球磨机的重量可减少大概 30%，降低投资的成本。主轴承为双列向心球面滚子轴承，球磨机的主轴与轴承间为滚动摩擦，摩擦阻力变小，能耗减少。和相对应的普通球磨机相比，有效容积增大了 13.6%~42.2%。

1.3 课题研究内容及目标

对 K2112.00 溢流型球磨机进行结构的优化设计，了解其工作原理，并对其特性进行分析整理，计算选择合理球磨机的参数，如转速、装球量等，提高工作效率。进行球磨机回转部分的设计，并选择合适的传动形式，选择合适的电动机、减速器、相对应的联轴器等，且合理地设计球磨机的传动结构，并进行主要零件的校核，可以提高传动效率，降低成本，减少能耗。

根据 K2112.00 溢流型球磨机的技术要求，确定合理的设计方案，并对其机械结构进行设计，包括给料部、端盖及中空轴、筒体等。进行球磨机的总装

配图，各主要部分的部分图以及主要零件的零件图的绘制，并对其主要零件进行校核计算。

第 2 章 球磨机结构分析

2.1 球磨机结构概述

2.1.1 工作原理

球磨机运转时，研磨介质在衬板与最外层介质之间的摩擦力和离心力的作用下，贴在筒体内壁的衬板上，并随着筒体一同回转，被带到适当的高度后，介质在自身的重力的作用下，会呈抛物线降落，将筒体底部的物料击碎，如图 2-1 所示。研磨介质回升、降落的动作是循环往复的。此外，在球磨机运转的过程中，研磨体还会发生滑动和滚动，使矿石受压力和磨削作用而被磨细。物料由进料端不断进入，使进料端与出料端之间存在料面差，能强迫物料的进行流动，研磨体着落时冲击物料，也会产生轴向的推力，使物料流动，此外球磨机内流动的气流也促使物料流动。因而尽管球磨机的筒体是水平的，但物料却能够从进料端流向出料端，实现作业^[14~15]。

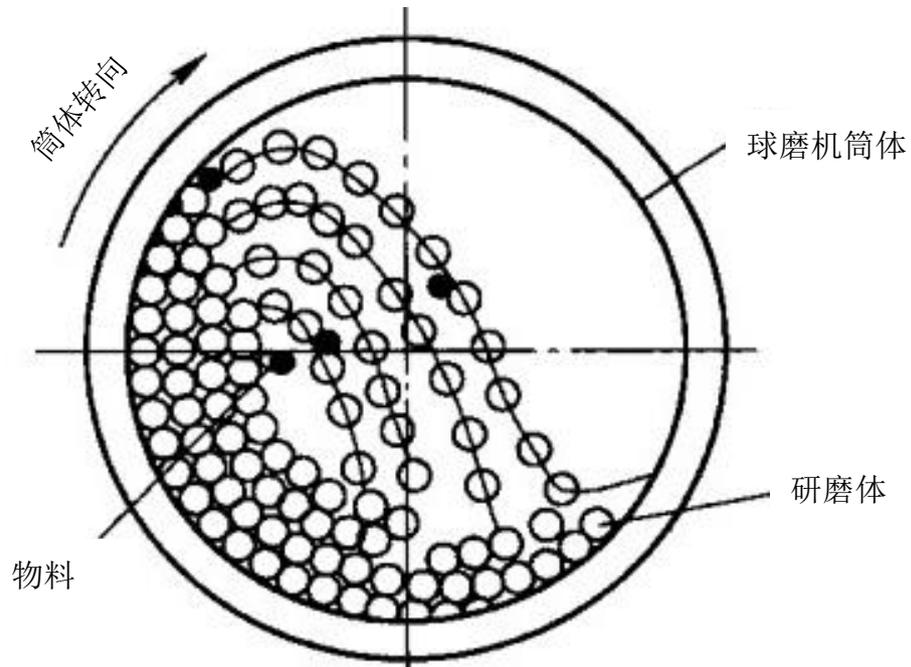


图 2-1 球磨机工作原理图

2.1.2 溢流型球磨机的优缺点及工作特点

溢流型球磨机靠矿浆自身高过中空轴径衬套的下边沿而自流溢出，主要由筒体、端盖、衬板、中空轴径、传动装置等组成。其结构较简单，便于检修和管理，与规格一样的格子型球磨机比较，检修量少，运行稳定，工作可靠，价格经济。而且溢流型球磨机更适用于细磨。其缺点是矿浆在球磨机内停留时间较长，生产能力较低，排矿的粒度不均匀，易过粉碎。

中空轴是铸钢件，内衬可拆换，大齿圈采用铸件滚齿加工，筒体内的衬板耐磨性很好。

2.2 磨机的分类、比较及分析

2.2.1 磨机的分类、比较

磨机的类型很多，分类方式：装载的研磨介质、进出料措施、支承与传动形式等。具体分类如下：

（1）按研磨介质差异分类

球磨机：研磨介质为钢球或铸铁球，这种磨机是应用最为广泛。它的给矿粒度最大为 65mm，其产品粒度，在开路时，在 0.589~0.045mm 之间，闭路时，粒度可小至 0.037mm。可研磨各种硬度的矿石，其破碎比为 20:1 至 200:1，普遍用于各工业部门来粉磨各种物料^[16]。

棒磨机：研磨介质一般为直径 50~100mm 的钢棒。多用于粗磨，给矿粒度大多小于 20~25mm，产品粒度一般小于 4.7mm，但最小不少于 0.4mm。其破碎比在 15:1 到 20:1 之间。优点是能够选择性磨碎，使产品粒度更加的均匀，杜绝发生过粉碎，提高工作效率，减少能耗。缺点：产品粒度范围较窄，由于进料的影响，钢棒在筒体中常处于倾斜的状态，有时会使棒两端的运动不一致，发生干扰，工作效率就会减少。此外，加入钢棒时必需停止运行，这样磨机工作效率就降低，工人的劳动强度就会增加^[17]。

砾磨机：研磨介质为砾石、卵石，衬板为花岗岩、瓷料等，用于彩色水泥、陶瓷工业。它的最大给矿粒度为 10~22mm，排矿粒度在 0.075mm 时处理能力高。优点：减少钢耗，生产费用低。在稀有金属选矿厂、化学工业、玻璃以及

硅酸盐工业利用砾磨机能够避免铁的感染。缺点：与同规格的球磨机比较解决技能低^[18]。而与解决技能相同的球磨机比较，其尺寸大，重量也大。

自磨机：研磨介质为矿物自身。

（2）按筒体形状分类

短筒磨机：其筒体长度 L 小于直径 D ，即 $L \leq 2D$ ，如图 2-2（a），（b），（c）所示。通常为单仓结构，一般用于粗磨作业或一级磨作业，作业效率较高，过粉碎现象少，使用广泛。

长筒磨机：其筒体长度 $L=3D$ 为中长筒磨机，如图 2-2（e）所示。当 L/D 比值增加至 4~6，则称为管磨机，筒体内被分隔为几个仓，则称为仓式管磨机，如图 2-2（f）所示，在水泥厂应用最为普遍。

圆锥型磨机：筒体长度 $L=(0.325\sim 1)D$ ，如图 2-2（c）所示，筒体仍为圆柱形，两侧端盖为圆锥形，能够避免过粉碎，适用于产品粒度管理很严的场所。由于介质的填充率低，工作效率较低，因而只在为数不多的工业部门中使用^[19]。

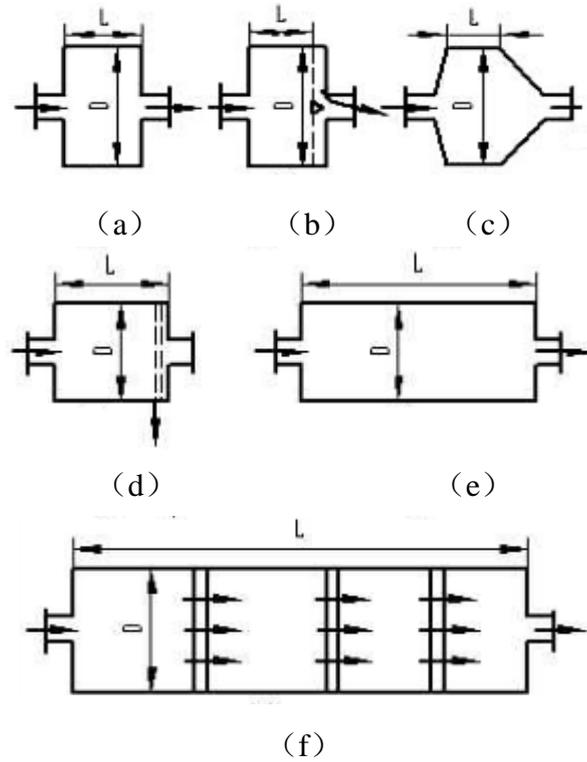


图 2-2 磨机按筒体形状和卸料方式分类

- (a) 溢流型球磨机（短筒型）；(b) 格子型球磨机（短筒型）；
 (c) 圆锥形球磨机（短筒型）；(d) 周边排料球磨机；
 (e) 长筒型球磨机（溢流型）；(f) 多仓管磨机

(3) 按卸料方式分类

溢流式磨机：如图 2-2 (a)、(c) 所示，这种磨机靠泥浆自流排矿，物料面只有高于卸料口才能溢流而出，装球量多，构造简略，但操作不方便。

格子式磨机：卸料端有格子板，可有助于卸料，过粉碎现象少。但结构复杂，检修频繁，作业率低。如图 2-2 (b) 所示。

周边卸料：在筒体周边卸料，生产率低，在金属选矿厂几乎已看不到。

(4) 按传动方式分类

中心传动：磨机卸料端的空心轴与减速器直接衔接，传动轴与机身的中心线在一条线上，如图 2-3 (a) 所示^[20]。

边缘传动：电动机的能源经过减速器带动筒体边沿的大齿圈，驱动磨机运转，如图 2-3（b）所示。

摩擦传动：属于边缘传动，但它经由筒体上的皮带与主动轴上的拖轮之间的摩擦而运行，如图 2-3（c）所示。

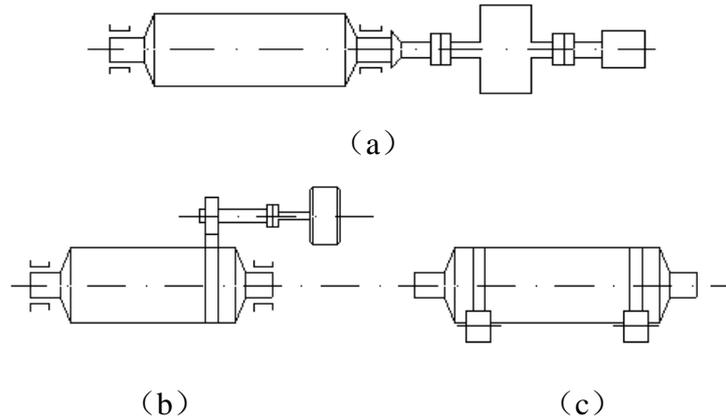


图 2-3 磨机按传动方式分类

(a) 中心传动；(b) 边缘传动；(c) 摩擦传动

2.2.2 球磨机类型分析

通过以上的分析比较和查阅资料可知，所设计的 K2112.00 溢流型球磨机的直径为 $\phi 2100\text{mm}$ ，长度为 3600mm，为短筒型溢流型球磨机。广泛用于第二段细磨或要求产品较细的场合，其进料粒度 $\leq 25\text{mm}$ ，出料粒度在 0.074~0.4 之间。

此球磨机为边缘传动、边缘卸料，采用调心滚子轴承支承，此方案结构紧凑、传动可靠。

2.3 球磨机的结构组成

所设计的球磨机为 2136 溢流型球磨机，如图 2-4 所示，其基本组成：给料部 1、进料部 3、轴承部 2、筒体部 4、出料部 6、传动部（大小齿轮 5、联轴器 7、9、减速器 8、电动机 10）。

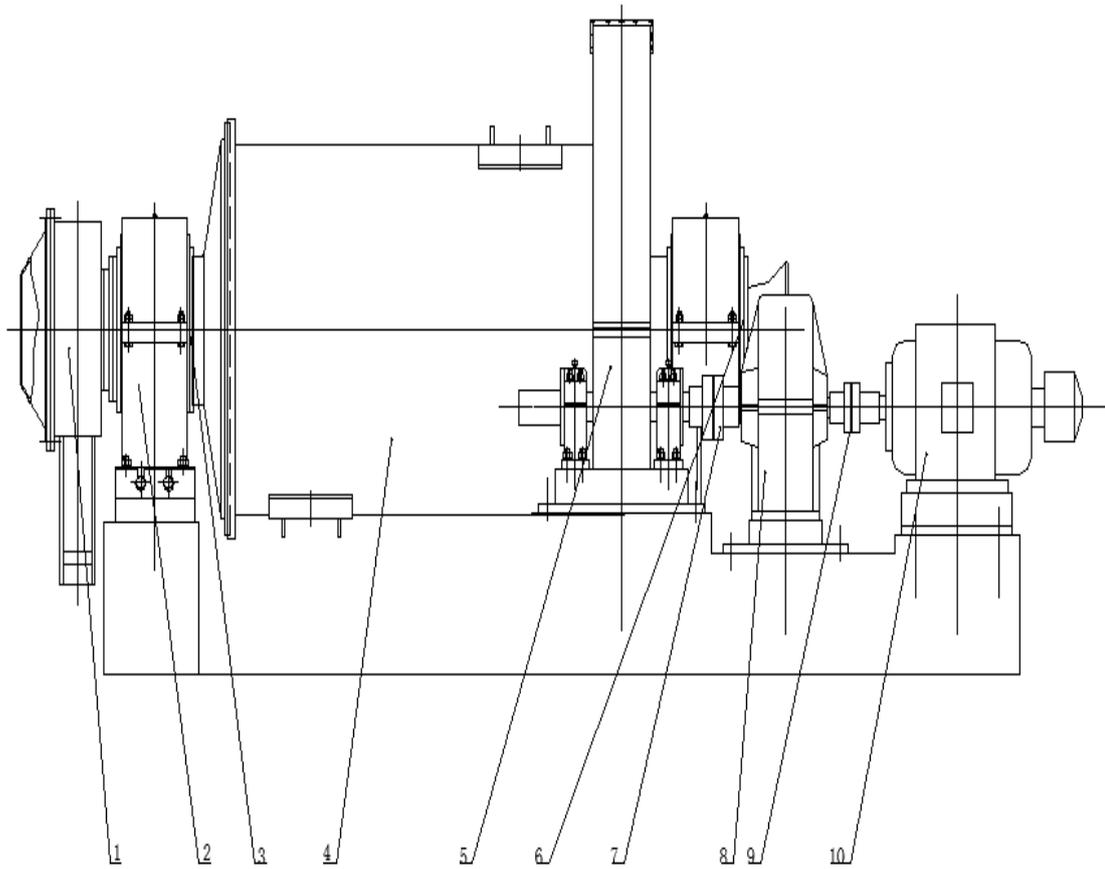


图 2-4 球磨机主要组成部分

第3章 球磨机总体参数的设计

3.1 球磨机的自身参数

3.1.1 转速

球磨机的转速大小直接决定着其内部磨矿介质的运动状态和磨矿作业的效果。球磨机工作时，研磨介质会在离心力和摩擦力的作用下贴在筒体的内壁上，提升到一定的高度后，由于重力的作用自由落下将物料击碎，并且研磨介质在球磨机内壁的滑动与滚动，使物料发生静强度或者疲劳积累破碎^[21~25]。

当筒体的转速不同时，研磨介质的运动会呈现三种状况，如图 3-1 所示。当球磨机转速超过一定限度时，研磨介质就会贴在筒壁与机体一起回转，此时是球磨机的临界转速，不发生冲击研磨作用，磨削强度也在一个理想的状况，但对工业球磨机来说，接近临界的转速能够降低操作的速度。当筒体的转速过低时，不能够将研磨介质带到一定的高度，研磨介质下落的动能小，没有足够的冲击力去击碎物料，降低了球磨机的生产能力。要提高球磨机的工作效率，就得正确地确定转速的大小。依据球磨机构造以及研磨介质的磨矿效率来确定其工作转速。临界转速^[26]：

$$n_0 = 42.4/\sqrt{D} \quad (3-1)$$

式中：D——球磨机筒体的有效直径，D=2.1mm。

计算得 $n_0 = 29.36 \text{ r/min}$ 。

确定球磨机的工作转速^[26]：

$$n_1 = 76\% \sim 88\% \times n_0 \quad (3-2)$$

计算得到 $n_1 = 22.22 \sim 25.75 \text{ r/min}$ ，工作转速取 23.98 r/min 。

为了使球磨机效率高，从生产观念看来，在任何状况下，球磨机均不应以低于计算出的理论转速来工作^[27]。

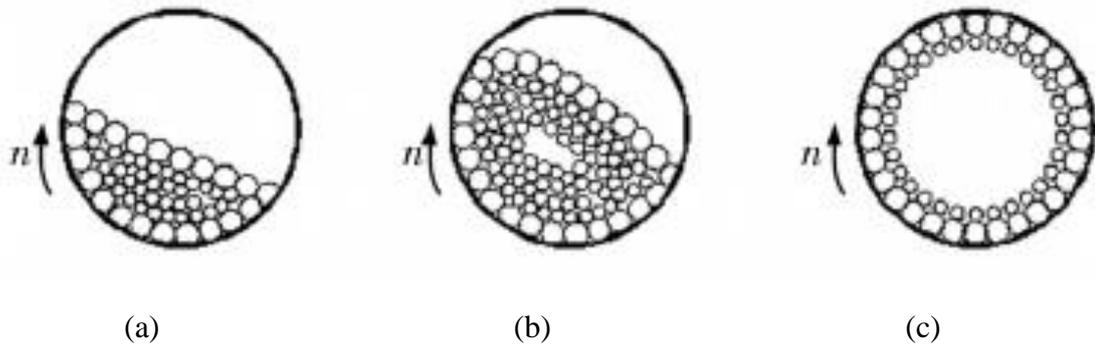


图 3-1 筒体转速对研磨介质运动的影响
(a) 低转速；(b) 适宜转速；(c) 高转速

3.1.2 装球量

磨矿过程中所使用的研磨介质形状可分为球形、棒形、短圆柱形、短截头锥形及其他形状^[28]。形状不同，导致作用原理不同。研磨介质的运动和接触方式对磨矿起决定性作用。球介质应用最为广泛，尺寸可大可小，粗磨细磨皆可。球磨机的装球量对磨矿效率有影响，装球量少，研磨效率就低；装球量过多，内部球运动时就会产生干涉，球的正常循环运动会被破坏，研磨效率也会下降。合理的装球量可按下述关系来确定。

溢流型球磨机的填充系数： $\varphi = 35\% \sim 40\%$ ，可取 $\varphi = 36\%$ 。

已知球磨机的填充系数后，可计算装球量：

$$G_{\text{球}} = \varphi r v \quad (3-3)$$

式中： r ——球的比重， $r = 4.3 \sim 4.6 \text{ t/m}^3$ ，计算时取 $r = 4.5 \text{ t/m}^3$ ；

v ——球磨机的工作容积。

其中 $v = \pi D^2 L / 4$

则计算得 $v = 12.5 \text{ m}^3$

从而得 $G_{\text{球}} = 19.39 \text{ t}$ 。

磨机中物料的重量一般为装球量的 0.14 倍，则粉末体总重量：

$$G = G_{\text{球}} + 0.14G_{\text{球}} \quad (3-4)$$

即 $G = 19.39 + 0.14 \times 19.39 = 22.1\text{t}$ 。

3.1.3 钢球尺寸

$$d_{\text{球}} = 28\sqrt[3]{d} \quad (3-5)$$

式中：d——进料粒度， $d = 25\text{mm}$ 。

则计算得 $d_{\text{球}} = 82\text{mm}$ 。

3.1.4 球磨机的功率

球磨机的功率与转速是成正比的关系，转速高，研磨介质上升就越高，所需的功率也就越大，增加了设备的成本。但当转速超过一定限度，即达到了临界转速时，介质落差反而减小，其所需的功率就会下降，影响产量。球磨机的功率按经验公式：

$$N_0 = 0.736CG\sqrt{D} \quad (3-6)$$

式中：C——研磨介质系数，如表 3-1 所示，取 $C=8.85$ 。

表 3-1 研磨介质系数 C

研磨介质系数	0.2	0.3	0.4
大钢球	11	9.9	8.5
小钢球	10.6	9.5	8.2

计算得： $N_0 = 192\text{kW}$ 。

3.1.5 电动机的选择

查资料得：中心传动球磨机的机械效率： $\eta = 0.92 \sim 0.94$ ；边缘传动球磨机的机械效率： $\eta = 0.86 \sim 0.90$ 。

电动机的功率：

$$N = N_0 / \eta \quad (3-7)$$

故选用 JR137-8 型电动机。

电动机的参数：

额定功率：210kW，额定电压：380V，额定转速：735r/min。

3.2 球磨机回转部分的设计

3.2.1 筒体部的设计

筒体是球磨机的重要组成部分，由筒体和筒体法兰及人孔、衬板等组成。

（1）筒体的材料

筒体运转时，不但受到研磨体的静载荷，还有研磨体的冲击，并且筒体是回转的，所以筒体受到的是交变应力，需要具有足够的强度和刚度。要求材料强度良好，塑性好，有较好的机械性能，以便保证筒体安全回转。溢流型球磨机筒体的材料普遍为结构钢 Q235A，许用应力 $\delta_b = 420\text{Mpa}$ ，此材料的强度、塑性和可焊性都可满足要求^[29]。

（2）筒体法兰

一般用 Q235A 钢制成，然后焊在筒体上，和带有中空轴的两端盖配合，为了确保两个中空轴的同轴度，需把法兰制成带止口型，在互成 120°的螺栓孔的地方上加工出三个铰制孔以供定位用。

球磨机筒体法兰的螺栓孔直径 d 的经验公式：

$$d = (2.5 \sim 1.3) \sqrt{N} \quad (3-8)$$

式中：N——球磨机电动机的功率（kW）。

2.5~1.3 为系数，球磨机的电动机功率越大，值越小；反之，值越大。

则 $d = (36.2 \sim 18.8) \text{mm}$ ，可取 30mm。

（3）人孔

更换衬板以及停机时清除研磨介质和物料，都需要打开人孔^[30]。常用的形有带圆角的矩形和椭圆形。其形状对筒体强度的影响是很大的，两种形状都可以使应力集中降低，减少对筒体强度的削弱。而换衬板时，带圆角的矩形比椭圆形愈加便利。因而选用球磨机筒体人孔为带圆角的矩形，两人孔在筒体两侧互成 180°，且接近两端盖。

（4）衬板的选择

衬板是球磨机中的主要易磨损零件，消耗量也极大，更是球磨机中更换频繁的备件，更换的周期也很短^[31~32]。球磨机运转时，衬板是用来防止筒体遭到钢球和物料的冲击和磨损，衬板受到钢球和物料的反复冲击和磨损、矿浆的腐蚀等，会造成衬板表面材料的不断迁移^[33~35]。近年来，广泛应用的衬板：金属衬板、磁性衬板、橡胶衬板。

① 金属衬板

目前，使用的大部分衬板的材料为高锰钢，具有良好的韧性和强度，还可以在大载荷的冲击作用下加工硬化^[36~37]，加工硬化后，其表面硬度可由 HV200 上升至 HV600 左右，适用于有剧烈冲击载荷的状况。但在中小型球磨机中，衬板遭到的冲击作用小，不能使高锰钢足够全部加工硬化，所以表面硬度低，致使衬板的磨损较快，寿命低。

② 磁性衬板

磁性衬板由合金钢、永久材料以及弹性胶层组成，结构简单，制造容易，是一种新型耐磨衬板，普遍用于大中型的磨矿作业。和传统的金属衬板相比，优点：使用寿命增加、重量减轻、装置更加便利等，而且省球、节电、噪声小、降低了工人的劳动强度。磁性衬板虽然性价比高，使用经济，但存在很多不足。当钢球直径大，给矿粒度大时，对衬板的冲击力大，但由于磁性衬板的抗冲击性能差，导致衬板退磁较快，所以钢球直径不能大于 100mm。使用磁性衬板处理磁铁矿时，处理矿量会相对降低。

③ 橡胶衬板

在 20 世纪 50 年代末，瑞典司克嘉公司和波立登矿业公司合作，对不同性质的橡胶进行耐磨性试验，开始对橡胶衬板进行研究。橡胶衬板随着研制的深化，其品质日益进步，在国外被广泛应用，瑞典金属选矿厂已有 85%~90% 的球磨机使用橡胶衬板^[38]。橡胶衬板与传统高锰钢衬板比较，具有高耐磨、耐腐蚀、高弹性、抗冲击等长处。

橡胶衬板是一种高弹性的材料，不会产生电化学腐蚀，是通过结构上采用弹性紧固件的配合使用的，能缓解钢球和物料对衬板的冲击损害，所以其耐磨性能好，寿命长。橡胶衬板的重量轻，会使球磨机的重量减轻，球磨机的能耗降低，使用橡胶衬板的球磨机每台比使用高猛衬板的年节电约 10%~15%，能够使球磨机的工作效率增加。因为橡胶衬板是高内耗的弹性体，对在钢球和物料冲击作用下产生的能量又很大的吸收作用，在碰撞中，钢球和物料的恢复系数比金属衬板低得多^[39]，会使钢球对物料的冲击效果减弱，从而降低磨矿效率。在粗磨中，钢球对物料的冲击破碎是研磨的主要形式，因而橡胶衬板并不适用于一段的粗磨。

综上所述，适合选用橡胶衬板，该衬板和传统的金属衬板比较，有显著的优越性。

衬板的构造应该是有利于安装和更换的，最为普遍的如图 3-2 所示。

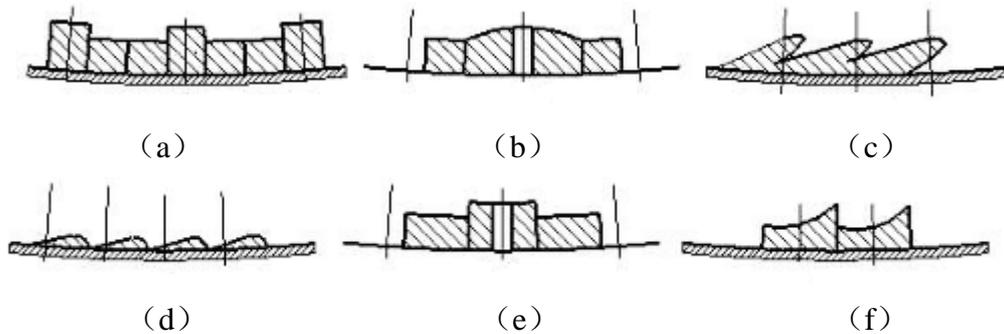


图 3-2 衬板的结构

- (a) 条形组合衬板； (b) 波形衬板； (c) 舵形衬板；
 (d) 楔形衬板； (e) 平凸形衬板； (f) 齿形衬板

波形衬板：它的波峰能够阻止介质的向下滑动，但波举的凹起是逐步的，所以介质会有一些滑动。它不仅能减少介质向下滑动，还可以避免部分介质提升过高而产生过大的冲击，用于细磨的效果好^[40]。

其它几种衬板与波形衬板比较，更能减少介质向下滑动。

所设计球磨机选用条形组合衬板，加工便利，更有利于安装和更换。

端面衬板普遍使用的是扇形衬板。

(5) 衬板是铺设以及固定

铺设衬板时，换向缝隙要彼此交错，如图 3-3 所示。为避免研磨体和物料对筒体内壁进行冲刷，球磨机衬板分为整块和半块，并在衬板和筒体之间配有衬垫。

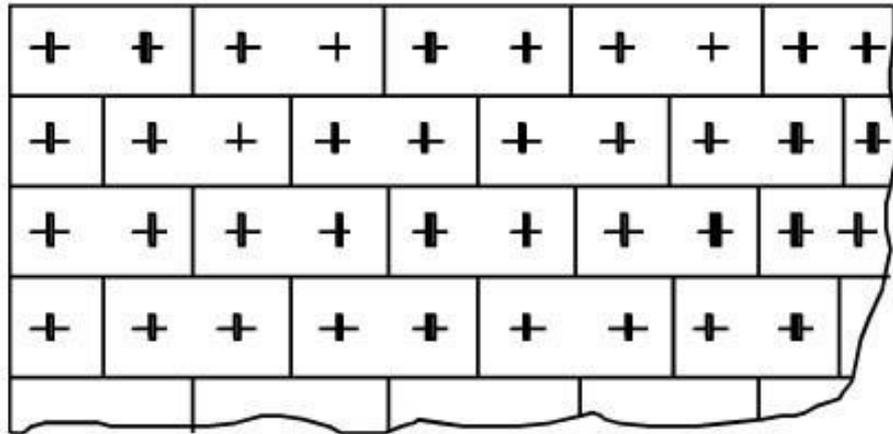


图 3-3 衬板的铺设

橡胶衬板的固定形式：螺栓连接、镶砌。螺栓连接具有抗冲击、耐振动的优点。其缺点在筒体上钻孔，会减弱筒体强度，有可能漏料。而镶砌要求筒体要有足够的刚度，内表面光滑、圆整，衬板的尺寸公差在 1mm 内，安装需要较高的精度，但不会发生漏料的现象。

所设计球磨机衬板的固定采用镶砌的形式。

(6) 筒体尺寸的设计

铸钢制造的法兰盘焊接在筒体的两端，带圆角的矩形人孔在筒体两侧互成 180°，且接近两端盖，如图 3-4 所示。

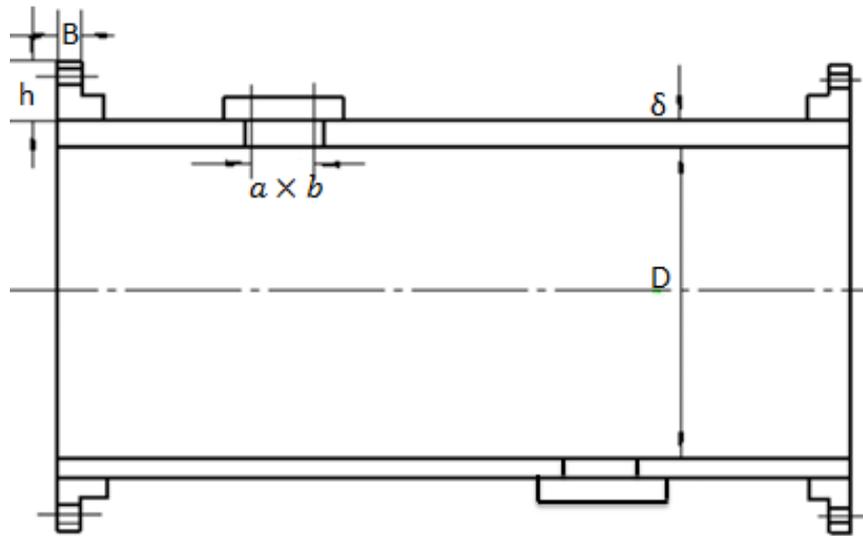


图 3-4 筒体的结构图

所设计的球磨机是短筒型的球磨机，其筒体结构尺寸如表 3-2 所示。

表 3-2 筒体结构尺寸

符号	δ	B	h	$a \times b$
短筒球磨机	$0.01D$	$(2 \sim 2.5) \delta$	$(4 \sim 4.5)d$	300×500
管磨机	$0.01D + (3 \sim 5)$	$(2 \sim 2.5) \delta$	$(4 \sim 4.5)d$	300×500

由表 3-2 可计算得： $\delta = 21\text{mm}$

$B = (42 \sim 52.5)\text{mm}$ ，取 50mm

$h = (120 \sim 135)\text{mm}$ ，取 130mm

$a \times b = 300\text{mm} \times 500\text{mm}$

其中 $a \times b$ 为矩形或椭圆型人字孔。

3.2.2 进料和出料装置的设计

进料装置的组成：带中空轴径的端盖、给矿器、进料管和扇形衬板。给矿器可用螺栓固定在进料管的法兰盘上，而进料管是由法兰与端盖的中空轴端面固定衔接的。在端盖的内壁铺有扇形衬板，衬板与内壁的接触处铺有胶合板。

出料装置的组成：带中空轴径的端盖、排料管和扇形衬板。其安装的关系与进料装置基本保持一致。

球磨机的中空轴在进出料端盖上，两个轴承安放在进出料的端盖上。在进出料端和进出料口的联结面处设计一个密封槽，装密封圈是为了防止矿浆从端面溢出，影响轴承的使用寿命。

（1）给矿器的选择

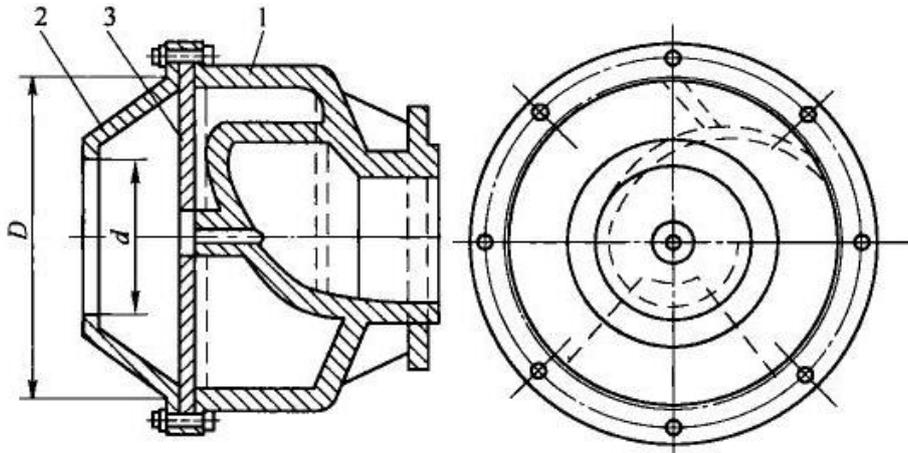
球磨机的给料是通过给矿器，根据磨机物料的不同可以分为三种（如图 3-4 所示）：鼓型、勺型以及联合给矿器。

①鼓型给矿器：两个端口是鼓型体，里面是螺旋形的孔道，给矿器随着磨机回转时，矿石会沿着孔道进入磨机。只用在出料装置高于磨机水平轴线的情况下，且适用于只有原矿而没有返矿或开路的磨矿中。

②勺型给矿器：能将矿浆从低于磨机水平轴线的部位舀起，然后送入磨机，勺头因频繁与返砂中的粗粒摩擦，磨损较快，所以勺头处用螺栓固定耐磨性较好的耐磨勺头，可以及时地换。一般用于没有原矿只有分级机组成的闭路二段磨矿。

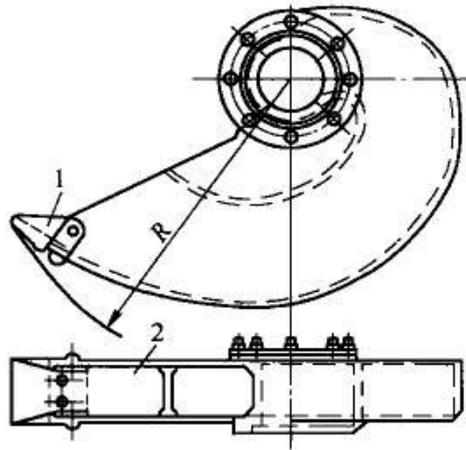
③联合给矿器：是以上两种给矿器的结合，适用于既有原矿，又有分级机返矿的磨机。其最大优点就是大块的物料能够不经勺型的勺子给料槽而送入磨机中。

经过比较再结合实际情况，最好使用联合给矿器给矿，既能解决细筛，又可同时解决分级机返砂。



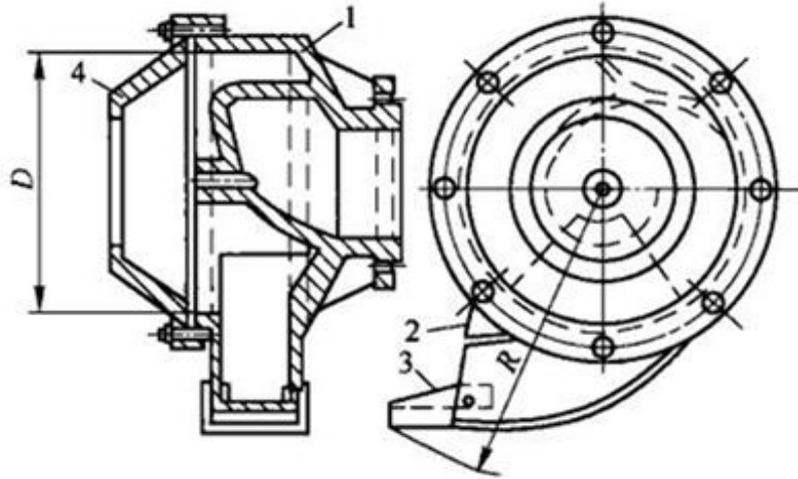
(a) 鼓型给矿器

1-给矿的筒体；2-盖子；3-带扇形孔的隔板



(b) 勺型给矿器

1-勺头；2-勺体



(c) 联合给矿器

1-筒体；2-勺子；3-勺头；4-盖子

图 3-5 三种给矿器

(2) 端盖

端盖的结构对球磨机的使用寿命和整体性能来说影响很大。考虑到主轴承的配置和轴径的抗弯能力，端盖是呈圆锥形的，大中型球磨机的端盖的材料普遍使用铸钢，小型球磨机使用球墨铸铁。只要把端盖和轴径铸成一体，就可确保端盖轴线和筒体轴线的同心度。有时因为冶炼和浇注设备技能的缺乏，也能够分开铸造，加工后再紧固在一起。

(3) 中空轴

中空轴的材料为 ZG230-450，其性能如表 3-3 所示。

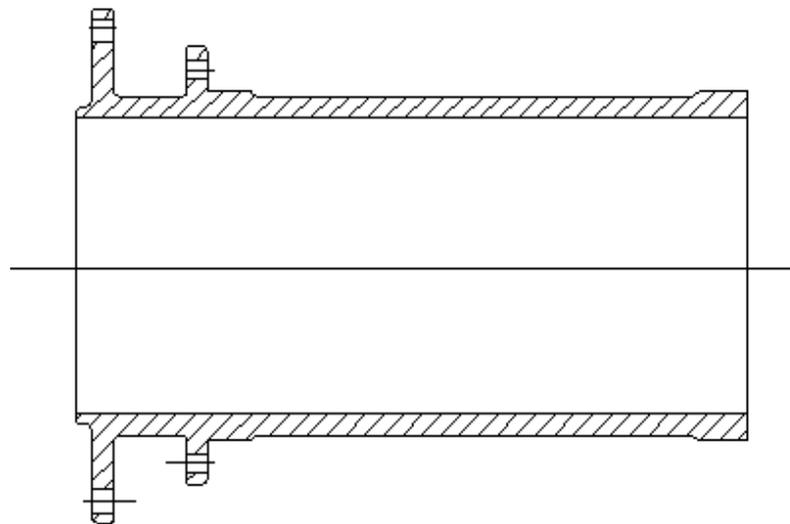
(4) 进、排料管的选择

进料管普遍有如图 3-5 (a)、(b) 所示的两种方式。(b) 种可促进给矿，但是其螺旋的旋向需要与球磨机的筒体的回转方向一样，制作难，其优越性在湿式球磨机上不明显。(a) 种在第二段球磨机上的使用较好，制造也容易。所以选 (a) 种进料管。

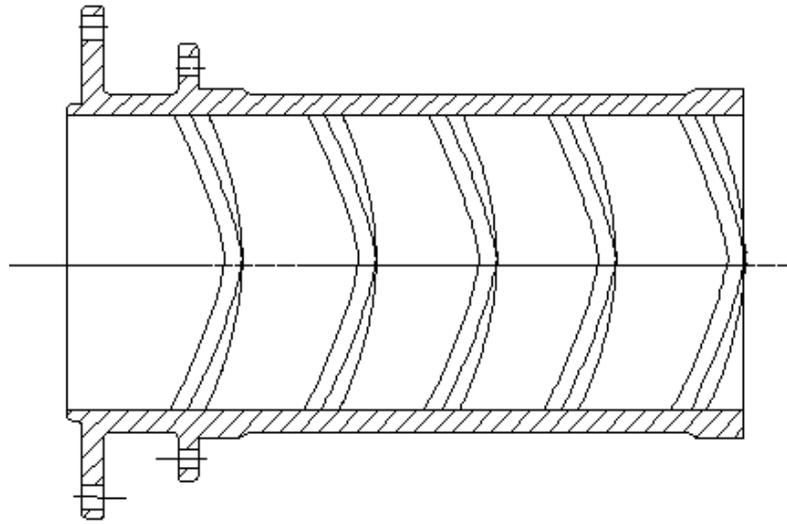
溢流型球磨机的排料管的普遍方式如图 3-6 所示。在中空轴径的内表面装与球磨机转向相反的螺旋叶片，可以将矿浆中的钢球和粗矿返入球磨机。

表 3-3 中空轴材料

牌号	抗拉强度 δ_b (Mpa)	屈服强度 δ_s (Mpa)	伸长率 $\delta\%$	正火回火 硬度 HBS	应用 举 例
ZG230-450	450	230	22	≥ 131	制造平坦 的零件, 如 机座, 机 盖, 箱体等 焊接性能 良好



(a) 无螺旋叶片



(b) 有螺旋叶片
图 3-6 进料管

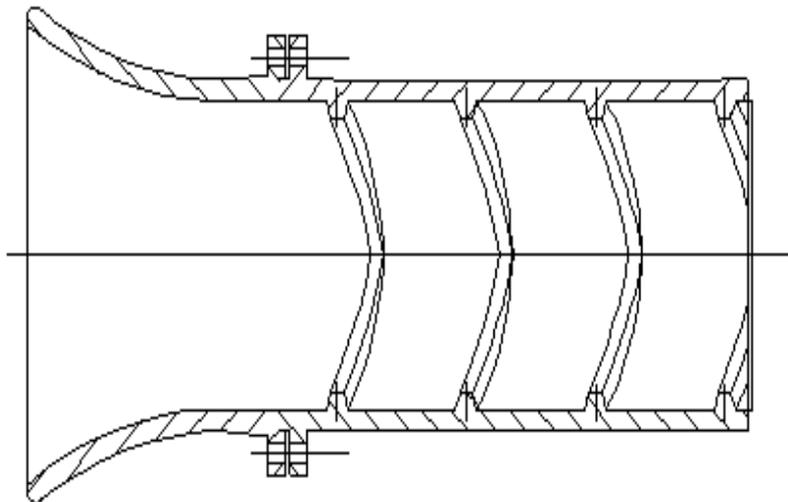


图 3-7 出料管

3.3 轴承部的设计

轴承部的组成：主轴承、轴瓦、轴承座以及润滑系统。球磨机的主轴承是支承回转部分总重量的重要部分，需要承受低速重载冲击载荷，故选用调心滚

子轴承，其两列的滚子，主要可承受径向载荷，同时也可承受任一方向的轴向载荷，并且调心性能好，可补偿同轴度的误差。

润滑对主轴承来说是至关重要的，润滑效果不好可导致磨机的损坏。可采用两种润滑方式：

（1）在中空轴和轴瓦间使用高压油泵加入高压油润滑，在中空轴和轴瓦间产生一层油膜，产生润滑的效果。

（2）在轴承上面加低压油，进行淋油润滑。

3.4 传动部的设计

3.4.1 传动形式

采用边缘传动的形式，电动机驱动减速器，再由小齿轮带动筒体边沿的大齿圈，驱使球磨机运转，如图 3-7 所示。

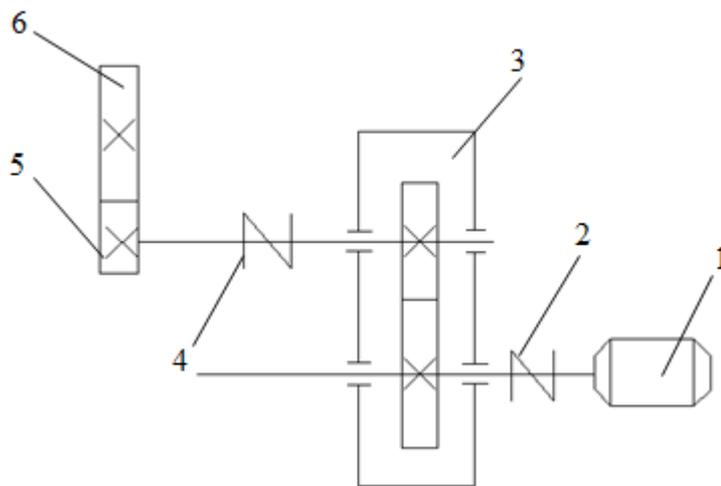


图 3-8 传动部结构示意图

1-电动机；2-联轴器；3-减速器；4-联轴器；5-小齿轮；6-大齿圈

3.4.2 齿轮结构的设计

（1）选定齿轮类型、精度等级、材料及齿数

按图 3-7 所示的传动形式，选择直齿圆柱齿轮。球磨机的工作速度不高，所以选 8 级的精度(GB/10095-88)。小齿轮材料选 40Cr，调质处理，HB=220~250；大齿圈材料选 ZG45，调质处理，HB=173~200。球磨机的运转速度低，开式重载的齿轮传动，磨损较重，所以较大的齿轮模数会延长其使用寿命，选择模数为 32。

(2) 初步确定主要参数

齿形角：

$$\alpha = 20^{\circ} \quad (3-9)$$

齿顶高系数：

$$h_a^* = 1 \quad (3-10)$$

顶隙系数：

$$c^* = 0.25 \quad (3-11)$$

初步选定： $d_2 = 3500\text{mm}$

由 $d_2 = mz_2$ 得 $z_2 = 109.375$ 取 $z_2 = 109$

初步选定 $i = 7.68$ ，则有 $z_1 = 14.19$ 取 $z_1 = 14$

由 $a = m(z_1 + z_2)/2 = 1968\text{mm}$

得 $z_1 + z_2 = 2a/m = 123$

因为 $i = z_2/z_1$ ，所以 $z_1 + z_2 = z_1(1 + i)$ ，可得 $z_1 = (z_1 + z_2)/(1 + i) = 14.17$ ，

取 $z_1 = 14$ ， $z_2 = 123 - 14 = 109$

$z_2/z_1 = 109/14 = 7.78$ ，误差为 1.3%，可用。

分度圆直径：

$$d_1 = mz_1 = 32 \times 14 = 488\text{mm} \quad (3-12)$$

$$d_2 = mz_2 = 32 \times 109 = 3488\text{mm} \quad (3-13)$$

齿顶高：

$$h_{a1} = h_{a2} = h_a^* m = 32\text{mm} \quad (3-14)$$

齿根高:

$$h_{f1} = h_{f2} = (h_a^* + c^*)m = 40\text{mm} \quad (3-15)$$

齿全高:

$$h_1 + h_2 = (2h_a^* + c^*)m = 72\text{mm} \quad (3-16)$$

齿顶圆直径:

$$d_{a1} = (z_1 + 2h_a^*)m = 512\text{mm} \quad (3-17)$$

$$d_{a2} = (z_2 + 2h_a^*)m = 3552\text{mm} \quad (3-18)$$

齿根圆直径:

$$d_{f1} = (z_1 - 2h_a^* - 2c^*)m = 368\text{mm} \quad (3-19)$$

$$d_{f2} = (z_2 - 2h_a^* - 2c^*)m = 3408\text{mm} \quad (3-20)$$

基圆直径:

$$d_{b1} = d_1 \cos \alpha = 420.98\text{mm} \quad (3-21)$$

$$d_{b2} = d_2 \cos \alpha = 3277.65\text{mm} \quad (3-22)$$

齿距:

$$p = \pi m = 100.53\text{mm} \quad (3-23)$$

齿厚:

$$s = \pi m / 2 = 50.27 \quad (3-24)$$

顶隙:

$$c = c^* m = 8 \quad (3-25)$$

小齿轮轴径的计算:

查《机械设计》表 15-3, 得 $[\tau_T]=35\sim 55\text{Mpa}$, $A_0 = 112\sim 97$

$$d \geq A_0 \sqrt[3]{p/n} \quad (3-26)$$

代入数据得 $d \geq (80.3\sim 92.76)\text{mm}$,

故选用 $d = 160\text{mm}$ 。

(3) 齿轮的强度校核

① 确定许用应力

查《机械设计》图 10-21, 得 $\sigma_{Hlim1} = \sigma_{Hlim2} = 1500\text{Mpa}$ 。

查《机械设计》图 10-20, 得 $\sigma_{FE1} = \sigma_{FE2} = 460\text{Mpa}$ 。

查《齿轮设计与实用数据速查》表 2-49, 得 $S_{Hmin} = 1.1$, $S_{Fmin} = 1.5$ 。

设选定的球磨机每天工作 24h, 要求使用寿命为 5 年, 则

$$N_1 = 60n_1jLh \quad (3-27)$$

代入数据得 $N_1 = 3.97 \times 10^8$

$$N_2 = N_1 / i = 5.1 \times 10^7 \quad (3-28)$$

代入数据得 $N_2 = 5.1 \times 10^7$

查《机械设计》图 10-19, 取接触疲劳寿命系数 $K_{HN1} = K_{HN2} = 1$ 。

接触疲劳许用应力:

$$[\sigma_H]_1 = [\sigma_H]_2 = K_{HN1} \sigma_{Hlim1} / S_{Hmin} = 1500 / 1.1 = 1363.63\text{Mpa}$$

$$[\sigma_F]_1 = [\sigma_F]_2 = K_{HN1} \sigma_{FE1} / S_{Fmin} = 306.67\text{Mpa}$$

②验算齿面接触疲劳强度

计算工作转矩：

$$T_1 = 9550000 P/n \quad (3-29)$$

代入数据得 $T_1 = 10062971.43N \cdot mm$

0.922 为电动机到齿轮的传动效率。

确定载荷系数 K：

$$K = K_A K_V K_\alpha K_\beta \quad (3-30)$$

式中： K_A ——使用系数，查《机械设计》表 10-2 取 $K_A = 1.5$ ；

K_V ——动载系数，查《机械设计》图 10-8 取 $K_V = 1.1$ ；

K_α ——齿间载荷分配系数，查《机械设计》表 10-3 取 $K_\alpha = 1.2$ ；

K_β ——齿向载荷分布系数，查《机械设计》表 10-4 取 $K_\beta = 1.15$ 。

则 $K = 2.277$

查《机械设计》表 10-6 得材料的弹性影响系数 $Z_E = 188.9Mpa^{\frac{1}{2}}$ 。

标准直齿轮时 $\alpha = 20^\circ$ ， $Z_H = 2.5$

$$\sigma_H = Z_E Z_H \sqrt{2KT_1 d_1 (u + 1) / bd_1^3 u} \quad (3-31)$$

式中： b ——齿宽，取 $b=300$ ；

u ——传动比， $u=7.78$ 。

代入数据得 $\sigma_H = 437.67 \leq [\sigma_H]$

所以齿面接触疲劳强度满足要求。

④ 验算齿根弯曲疲劳强度

查《机械设计》表 10-5 得 $Y_{Fa1} = 3.09$ ， $Y_{Fa2} = 2.1728$

$$Y_{Sa1} = 1.527, Y_{Sa2} = 1.79721$$

$$Y_{Fa1} Y_{Sa1} = 4.718434$$

$$Y_{Fa2} Y_{Sa2} = 3.9043$$

$$\sigma_F = 2KTd_1 Y_{Fa1} Y_{Sa1} / bm^3 z_1^2 = 33.67 \text{Mpa} \leq [\sigma_F] \quad (3-32)$$

所以齿根弯曲疲劳强度满足要求。

3.4.3 减速器的选择与校核

$$\text{总传动比 } i_{\text{总}} = 735/23.9 = 30.65$$

$$\text{所以 } i_{\text{减}} = 30.65/7.78 = 4$$

故选择型号为 ZD60 的减速器。

主要参数：中心距 $a=600\text{mm}$ ，中心高 $H_0=650.10\text{mm}$ ，传动比 $i=4$ 。

厂家供应减速器的额定功率为 288~906kW，所选电动机的功率为 210kW。所以该减速器满足使用要求。

3.4.4 联轴器的选择与校核

由以上选择可知：电动机输出轴 $D=100\text{mm}$

小齿轮轴 $D=160\text{mm}$

减速器高速轴 $D=120\text{mm}$

减速器低速轴 $D=170\text{mm}$

(1) 电机和减速器之间的联轴器

$$T = 9550 p/n = 2728.57 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (3-33)$$

$$T_{ca} = K_A T = 6275.7 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (3-34)$$

查《联轴器设计选用手册》表 5-64，可选用 LB11 轮胎式联轴器。

主要参数：许用公称转矩：5000 N·m

许用转速：1600r/min

轴孔直径： $D_{\min}=80\text{mm}$ ， $D_{\max}=125\text{mm}$ 。

(2) 减速器和小齿轮轴之间的联轴器

$$T = 9550 p/n = 10480.99 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_{ca} = K_A T = 2.3 \times 10480.99 = 24106 \text{ N} \cdot \text{m}$$

查《联轴器设计选用手册》表 5-64，可选用 LB13 轮胎式联轴器。

主要参数：许用公称转矩：20000 N·m

轴孔直径： $D_{\min} = 130\text{mm}$ ， $D_{\max} = 200\text{mm}$ 。

3.4.5 轴承的选择与校核

查《现代机械设计手册》，选用圆柱滚子轴承 N1032。

其中 $D=240\text{mm}$ ， $d=160\text{mm}$ ， $C_r = 212\text{KN}$ ， $C_{or} = 302\text{KN}$ 。

选择脂润滑，极限转速：1800r/min，估计使用寿命：50000h。

轴承的校核：

查《机械设计》表 13-6，得 $f_p = 1.8$ 。

对齿轮进行受力分析，圆周力：

$$F_t = 2T_1/d_1 \quad (3-35)$$

式中： T_1 ——小齿轮传递的转矩，N·m；

d_1 ——小齿轮的分度圆直径，mm。

代入数据得 $F_t = 44923.98 \text{ N}$

则轴承的径向载荷：

$$F_r = F_t \tan \alpha \quad (3-36)$$

式中： α ——啮合角，标准齿轮， $\alpha = 20^\circ$ 。

代入数据得 $F_r = 16350.99 \text{ N}$

对于 N、NA 类轴承来说，只能承受较大的纯径向载荷，则当量动载荷：

$$P = f_p F_r \quad (3-37)$$

代入数据得 $P = 29431.78\text{N}$

轴承寿命：

$$L_h = 10^6 / 60n(C/p)^{10/3} \quad (3-38)$$

式中： n ——轴承的转速， $n = 735/4 = 183.75 \text{r/min}$ ；

C ——基本额定动载荷；

p ——当量动载荷。

代入数据得 $L_h = 65466.5 \text{h} \geq 50000 \text{h}$

所以选择轴承满足要求。

3.4.6 键的选择与校核

键的材料为 45 钢，选用普通平键 A 型，由《机械设计》表 6-2 得， $[\sigma_p] = (120 \sim 150) \text{Mpa}$ 。

键的选择：电动机与联轴器：28×16×140mm

减速器的高速轴与联轴器：32×18×150mm

减速器的低速轴与联轴器：45×25×150mm

小齿轮轴与联轴器：40×22×160mm

小齿轮轴与齿轮：45×25×240mm

对于使用常见的材料与按标准选取尺寸的普通平键连接（静连接）来说，主要的失效形式：工作面被压溃。假设载荷在平键的工作面上是均匀分布的，则普通平键连接的强度校核公式：

$$\sigma_p = 4T_1/dhl \quad (3-39)$$

式中： T_1 ——传递的转矩， $\text{N} \cdot \text{m}$ ；

d ——轴的直径， mm ；

h ——平键的高度， mm ；

l ——平键的工作长度， mm 。

代入数据得 $\sigma_p = 38 \text{Mpa} \leq [\sigma_p]$

所以强度满足要求，可用。

同理可校核其它平键，校核结果为平键的强度满足要求。

第4章 结论

随着对球磨机的基本知识的学习，广泛应用的了解，发现了一些问题，并确定合理的设计方案，对其机械结构进行优化设计。整个球磨机的设计侧重于回转部分和传动部分，在选择设计重要零部件时，也特别注意了其强度的校核。

（1）对球磨机的磨矿工作原理进行阐述，揭示球磨机的转速和填充率的关系，正确地选择装球量、钢球尺寸等参数，可有效提高球磨机的工作效率。

（2）对球磨机回转部分进行优化设计，如改进筒体材料、合理布置筒体衬板、合理选择衬板材料和类型等，增加了其使用寿命，提高工作效率，降低能耗，提高经济效益。

（3）对于传动部的设计，首先确定其传动形式，采用边缘传动，电动机驱动减速器，再由小齿轮带动在筒体边沿的大齿圈，球磨机筒体随之回转。对其中的齿轮传动结构进行设计，选择合理的零部件并校核，如电动机、联轴器等。对齿轮的加工精度要求低，可降低球磨机成本。

参 考 文 献

- [1] 李启衡. 碎矿与磨矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1980.
- [2] 陈利平. 浅谈球磨机的发展趋势及其构件的改进[J]. 机电信息, 2012, (33): 45~47.
- [3] 吴建明. 粉碎设备大型化的现状和发展特点[J]. 矿山设备, 2012, (12): 40~45.
- [4] Kelth. Large Mill[J]. *Metallic Ore Dressing Abroad*, 1991, (11): 4~19.
- [5] Adorijan. L. A. Mining Annual Review[J]. *Mining Journal*, 1982, (10): 11~15.
- [6] 鲁培兴. 浅谈球磨机在金川选矿厂的应用现状和发展趋势[J]. 矿山机械, 2012, 40(4): 1~4.
- [7] Norman E. Dowling. *Mechanical Behavior of Materials*[M]. 2nd edn, Prentice Hall Intl, 1999.
- [8] R. Kegg. Sensor History – Machine Tool Applications Table, Proceedings of Workshop on Tool Condition Monitoring[J]. *CIRP*, Paris, 1994, (3): 51~54.
- [9] G. Byrne, D. A. Downfield, I. Inasaki, W. Konig and R. Teti. Tool condition monitoring (TCM) – the status of research and industrial application[J]. *CIRP Annals*, 1995, 44(2): 21~25.
- [10] 徐兵. 简析球磨机的结构特征[J]. 有色矿冶, 2009, 25(2): 72~74.
- [11] 于奇, 王学彬. 滚动轴承在球磨机中的应用[J]. 科技创新与应用, 2012, (5): 68.
- [12] 刘涛. 几种新技术在球磨机上的应用[J]. 矿山机械, 2007, 35(10): 71~73.
- [13] 王海瑞. 高效节能球磨机的特点及应用[J]. 新疆有色金属, 1998, (1): 21~24.
- [14] 邵霞, 雷兆敏. 提高球磨机工作效率的有效途径[J]. 甘肃冶金, 2008, 30(5): 79~80.
- [15] 薛风先, 胡仁喜, 康士延等. *ANSYS12. 0 机械与结构有限元分析从入门到精通*. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [16] 方必钧. 球磨机及棒磨机发展近况[J]. 有色矿冶, 1987, (3): 9~16.
- [17] 屈彬, 刘波. 助磨剂在陶瓷粉体机械粉碎过程中的助磨作用[J]. 中国陶瓷, 2002, 38(2): 53~55.
- [18] 蒋文俊, 潘龙. 浅谈陶瓷连续锥形球磨机[J]. 江苏陶瓷, 2001, 34(1): 16~17.
- [19] 戴丽玲, 赵金萍. 球磨机发展应用概述及轴承选用分析[J]. 企业技术开发, 2011, 30(7): 30~32.

- [20] 陈剑锋, 肖飞凤. 球磨机的发展方向综述[J]. 中国矿业, 2006, 15(8): 94~97
- [21] 田宝国. TM900×1800 型橡胶托辊式摩擦传动球磨机的研制及应用[J]. 黄金, 1998, (7): 29~32.
- [22] 唐新民. 格子型球磨机筒体衬板改形[J]. 有色金属, 2000, (5): 23~26.
- [23] 刘志亮. 磁性衬板在黄金选矿厂的应用[J]. 黄金, 1997, (2): 14~18.
- [24] 史丽猛. 球磨机及其在矿山的应用[A]. 王运敏. 中国采选技术十年回顾与展望[C]. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 670~675.
- [25] SHIPWAY P. HUTCHINGS I. M. Attrition of brittle spheres by fracture under compression and impact loading[J]. Powder Tech, 1993, (76): 23~30.
- [26] 段希祥, 曹亦俊. 球磨机介质工作理论与实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.
- [27] 段希祥. 碎矿与磨矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
- [28] 阿尔申捷耶夫 B A 等. 矿物原料破碎和磨矿工艺发展的现状和前景[J]. 国外金属矿选矿, 2007, (11): 112~115.
- [29] 张会提. $\Phi 3.2m \times 7m$ 溢流型球磨机筒体的设计分析与改进[J]. 矿山机械, 2010, 38(6): 83~85.
- [30] 刘龙兵, 于海涛. 球磨机人孔盖拆除机构[J]. 矿山机械, 2010, 38(13): 119~120.
- [31] 李卫. 耐磨钢铁的市场与生产[J]. 铸造, 2004, 53(12): 2004. 7~12.
- [32] 王宏勋. 国内外磨球生产给应用概况[J]. 国外金属矿山, 1998: 78~83.
- [33] 江海燕. 磨机衬板失效分析及其选材[J]. 水泥装备, 2002, (2): 32~34.
- [34] 杨光春. 球磨机衬板材料的研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2000, (1): 25~28.
- [35] 李茂林. 湿式球磨机用低碳高合金钢新材料衬板的研制[J]. 水泥科技, 2003, (1): 11~17.
- [36] 材料耐磨抗腐蚀及其表面技术丛书编委会. 材料耐磨抗腐蚀及其表面技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [37] 邵荷生, 张清. 金属的磨料磨损与耐磨材料[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [38] 赵昱东. 磨矿机筒体衬板的开发与应用[J]. 有色设备, 2001, (5): 5~8.
- [39] H. Dong. M. H. Moys. Measurement of impact behavior between balls and walls in grinding mills[J]. Minerals Engineering, 2003, (16): 543~550.
- [40] 刘兴国. 橡胶内衬球磨机的特点[J]. 山东陶瓷, 2002, 25(4): 33~34.

致 谢

在写这篇论文的过程中，我参考了许多的资料，感谢它们的作者给予的帮助。当然，首先感谢的是我的导师王赫莹老师，毕业设计的顺利完成离不开老师的细心指导和帮助，提出的很多建议和修改意见使我受益匪浅。在此，对王老师致以由衷的感谢。

最后我要感谢我的家人和朋友，是他们的关心与爱让我不断鞭策自己，积极进取。再次对帮助过我的老师和同学表示由衷的感谢！

