

摘 要

球面试样是摩擦学试验中接触状态最易控制的一种试样,但加工比较复杂,常常不得不用规格有限的球试样(如轴承的钢球)代替,给摩擦学试验研究带来不便,是摩擦学试验研究中长期没有很好解决的技术问题;另外,基于球形微凸体的粗糙表面模型是摩擦学研究中最为常用的表面接触模型,但由于球试样加工的困难,目前关于表面接触的研究大多仅仅从统计分布角度进行研究,没有考虑单个球形微凸体上发生的变化(接触、变形、摩擦和磨损)对摩擦过程的贡献,使摩擦表面接触模型研究的发展受到限制。

本文从研制适合加工多种材料球面销试样的高精度球面磨削设备入手,探讨“摆旋法”(工件绕定轴摆动并绕自身轴线旋转)磨削高精度球面的关键技术,开发球面销磨削设备,研究球面销试样的制备工艺,制备符合摩擦学试验研究要求的各种材料的球面销试样;针对人工关节的表面微结构设计一类问题,试验研究超高分子量聚乙烯(UHMWPE)球面销试样的尺寸、接触应力与摩擦学性能之间的关系,探讨球形微凸体的摩擦接触机理。为摩擦学试验研究提供装备条件,为球形微凸体粗糙表面模型提供试验依据,为摩擦表面微结构设计提供理论依据。

本文的主要研究成果和创新体现在以下方面:

1. 提出了“摆旋法”磨削高精度球面的新方法,确认了球面形成的两个必要条件,推导了控制球面轮廓误差的基本公式。

2. 研制出摩擦学球面销试样磨削设备,可以加工各种材料的球面,加工球面尺寸误差为: $\leq 10\sim 20\mu\text{m}$,加工球面的表面粗糙度为: $\text{Ra}0.09\sim 0.25\mu\text{m}$,获得中国实用新型专利(专利号: 200320116160.X)。

3. 研制了利用圆柱孔端面测量球冠半径的新型量具和测量方法。

4. 试验研究了 UHMWPE 球体与钢盘摩擦的接触变形与摩擦的规律,并尝试从理论上进行了分析,得到一些结论:

(1) 当弹塑性变形同时存在时,球体与平面接触,其压痕面积 S_d ,与载荷 W 以及曲率半径 R 的关系: $\hat{S}_d = 0.181R^{0.535}W^{0.463}$

(2) UHMWPE 球体与钢盘进行干摩擦试验时,摩擦系数随载荷和平均接触应力的增大而减小,随球体半径的增加而增加。当接触面上的平均接触应力大于材料的屈服极限时,摩擦系数为常数。

(3) 根据试验结果获得的摩擦系数 f 与平均接触应力 p_d 的关系公式:

$f = 17.445 p_d^{-2.1607} + 0.14$ 与由经典摩擦二项式公式推导出的公式: $f = \alpha \cdot p_r^{-1} + \beta$ (其中: α —与表面分子特性有关的参数, β —与表面机械特性有关的参数) 具有相同的形式, 这证明了试验结果和结论的正确性, 也从 UHMWPE 球形接触的角度充实了摩擦二项式理论。

关键词: 摩擦学; 微凸体; 球面; 销试样; 磨削设备; 摩擦系数; 接触应力

Abstract

The spherical sample can be easily controlled in contacting state during tribological testing in laboratory, but it is difficult to make. So, there is not enough variety of spheres to chose and only few kinds of spheres are used in tribological testing for a long time. This problem exists for many years and is not solved so far. In addition, the research before on contacting surfaces neglects the contribution of changes in size, deformation, friction and wear of single micro-spherical model, which restricts the research on tribological contacting model.

In this paper the key technology of "sway and revolving method" --a new method used to grind high-quality sphere-- is studied. Besides, the grinding equipment for the pin with a spherical head is developed and the technique of making the pin with a spherical head is discussed. Many kinds of pin-samples of different materials with different radiuses are made by the equipment, and the relations between the radiuses of the sphere, the load, the contacting stress, and the friction coefficient are investigated and the contacting mechanism of tribological micro-spherical model is researched with the pin-samples of spherical head.

Main innovations and results are described as below.

I. A new working method for pin with a spherical head-- "sway and revolving method" to grind high-quality sphere-- is development, and two important conditions which are necessary to form sphere are found.

II. A new kind of equipment to make the pin with a spherical head is built and patented in China (patent No: 200320116160.X). Many kinds of materials can be made into pins of which $R_a=90\sim 250\text{nm}$ by the equipment.

III. A new measuring tool is made that can be used in measuring radius of a spherical head.

IV. The relationship between radius of the sphere, contacting stress, and friction coefficient is investigated and the contacting mechanism of tribological micro-spherical model is studied. Some conclusions are obtained:

(1) If a sphere contacts with a plane, there is a fitted formula of contacting area S_d with radius of the sphere R and load W shown as below when elastic deformation and plastic deformation exist at the same time:

$$\hat{S}_d = 0.181R^{0.535}W^{0.463}$$

(2) When the pin with a spherical head made of UHMWPE contacts and slides on the disk made of steel, the friction coefficient increases as the radius of the sphere or the contacting stress goes up, and the friction coefficient decreases as the load goes down. When the contacting stress is more than the σ_c of the material, the friction coefficient tends to become a constant.

(3) The relation of the friction coefficient f and the average contacting stress p_d is shown below

$$f = 17.445p_d^{-2.1607} + 0.14$$

which looks like another formula which derives from classic "tribological two items

formula":

$$f = \alpha \cdot p_r^{-1} + \beta$$

f -- friction coefficient;

p_r --real contacting stress;

α --a parameter relates to the property of molecules of the surface;

β -- a parameter relates to the property of mechanisms of the surface).

The identity of the two formulas shows that the testing results and conclusions are right and the result is a contribution to "tribological two items formula"

Key words: tribology; micro-convex body; sphere; pin sample; grinding equipment; friction coefficient; contacting stress

第一章 绪论

2004年12月27日《科技日报》报道^[1]，我国每年因摩擦损耗造成的损失在1000亿元人民币以上。世界能源的1/3消耗于摩擦^[2]，60%以上的机械失效于磨损。减少摩擦、降低磨损、节约能源与资源，已经成为我国急需解决的重大基础科学问题之一。

摩擦学是针对摩擦磨损问题，通过润滑、结构设计、材料选择、表面改性等技术手段来减少相对运动表面能量和材料损耗的学术和科学，与生产和经济、与我国的科技进步有着密切的联系。摩擦学已经成为机械、材料等学科中日益重要的研究领域，它所涉及的问题是交叉学科的应用基础性科学问题。摩擦学研究必须依靠相关的摩擦学试验，摩擦学测试技术是摩擦学研究重要的和基本的组成部分，离开科学的测试，摩擦学将成为无水之舟。

摩擦学基础理论和试验研究中涉及最广泛的是摩擦表面间的接触问题，本文针对摩擦学接触理论研究中的相关理论和试验技术问题，从研制摩擦学试验用球面销试样加工设备入手，制备不同材料和不同尺寸的球面销试样，并通过接触和摩擦试验，基于球形表面粗糙峰模型探讨摩擦表面接触理论。主要目的是为试验研究提供制样方法，并对表面接触理论进行探索研究。本章对摩擦接触理论涉及的有关问题和摩擦学试验用球面销试样制备技术的相关问题进行讨论。

1.1 固体的表面性质和接触

摩擦学研究相互运动表面间发生的作用和变化，因此，了解和研究摩擦表面形态和接触状况是分析摩擦磨损问题的基础^[3]。

1.1.1 表面形貌表征

任何摩擦表面都是由许多不同形状的微凸峰和凹谷组成，表面几何特征采用形貌参数来描述。

表面形貌通常用一维形貌参数来表示，常用的一维表面形貌参数是表面粗糙度，最常用的参数是轮廓算术平均偏差或称中心线平均值 R_a 。如图1.1(a)所示，选择轮廓的平均高度线即中心线为X轴，使轮廓曲线在X轴上下两侧的面积相等， R_a 是轮廓上各点高度在测量长度范围内的算术平均值^{[4][5]}，即

$$R_v = \frac{\int_L |z(x)| dx}{L} \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i| \quad (1-1)$$

公式中, $z(x)$ 为各点轮廓高度, L 为测量长度, n 为测量点数, z_i 为各测量点的轮廓高度。

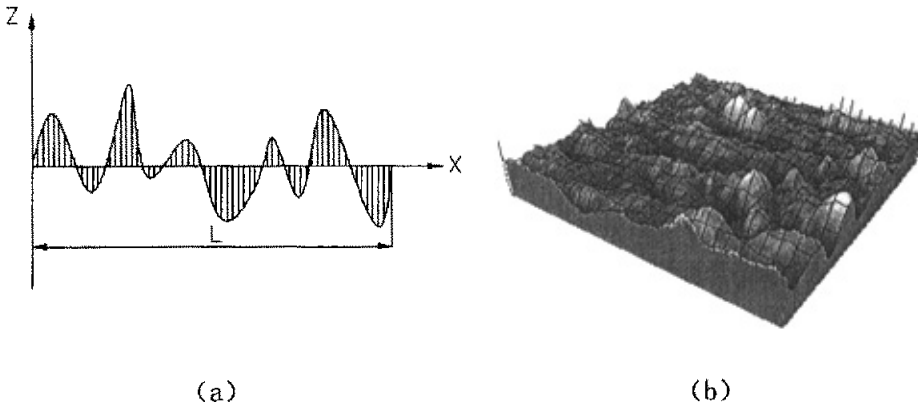


图 1.1 表面形貌

随着计算机辅助测试技术水平的提高,越来越多研究中应用二维形貌参数来表征表面形貌,如图 1.1 (b)。最典型的参数是平均粗糙高度 S_a , 其定义为:

$$S_a = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} |z(x_k, y_l) - \mu|$$

其中, M ——X 方向曲线族的数目

N ——Y 方向曲线族的数目

$z(x_k, y_l)$ 为 X 方向第 k 条曲线与 Y 方向第 l 条曲线交点的坐标

其中 μ 是平均高度 (相当于一维粗糙度的中线):

$$\mu = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} z(x_k, y_l)$$

其中, M 、 N 及 $z(x_k, y_l)$ 的含义同上。

二维形貌参数表征表面形貌能够反映整个被测量表面的粗糙峰特征,与实际表面接触情况更加一致,因此更加准确、更有实用价值,越来越多的研究者采用这一类方法^[6]。

表面粗糙度通常采用比较法、光切法、干涉法、触针法等方法测量^{[7][8]},有时也采用非接触式激光轮廓仪测量^[9]。

1.1.2 表面接触

(一) Hertz 理论

Hertz 理论是经典弹性理论中关于接触问题的理论。固体表面的接触通常发生在微凸体上,为了便于研究,常常把微凸体抽象为球体。当假定接触变形为弹性变形时,在摩擦表面接触问题的研究中,引入赫兹公式,对接触进行初步研究。图 1.2 是两个球体相接触的情况。设 R_1 、 R_2 分别为两个球的半径, E_1 、 E_2 为其弹性模量, ν_1 、 ν_2 为其泊松系数, W 为其相互作用力,则这两个球的接触圆半径 a 为

$$a = \sqrt[3]{\frac{3WR_1R_2}{4(R_1+R_2)} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)} \quad (1-2)$$

接触圆中心处的接触应力最大,其值 σ_{\max} 为^[10]

$$\sigma_{\max} = \sqrt[3]{\frac{6F(R_1+R_2)^2}{\pi^3 R_1^2 R_2^2 \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^2}} \quad (1-3)$$

令 R 为综合曲率半径, E 为综合弹性模量,则^[11]

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2};$$

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{2} \left[\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right] \quad (1-4)$$

则式 (1-2)、式 (1-3) 变为

$$a = \left[\frac{3R}{2E} \right]^{\frac{1}{3}} \times W^{\frac{1}{3}} \quad (1-5)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{3}{2\pi} \sqrt[3]{W \left(\frac{2E}{3R} \right)^2} \quad (1-6)$$

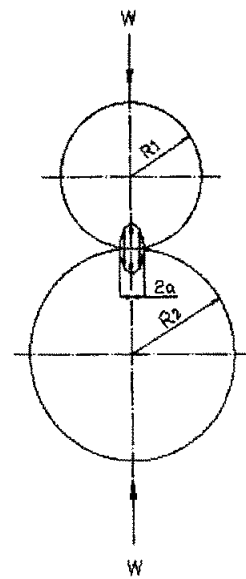


图 1.2 球体接触

Hertz 接触圆面积 S 可由下式计算

$$S = \pi a^2 = \pi \left(\frac{3}{2E} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot W^{\frac{2}{3}} = C_1 R^{\frac{2}{3}} \cdot W^{\frac{2}{3}} \quad (1-7)$$

其中

$$C_1 = \pi \left(\frac{3}{2E} \right)^{2/3}$$

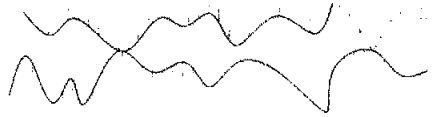
公式(1-7)即为球面与平面接触的高斯公式^[12]。

Hertz 理论在摩擦学中应用甚广，但 Hertz 在推导上述公式时作了以下假定^[13]：

(1) 材料为完全弹性体；(2) 球体表面是理想光滑的；(3) 接触物体没有相对滚动；(4) 接触物体不传递切向力。实际物体表面不可能是理想光滑的，而且，当摩擦表面一部分微凸体处于弹性变形状态时，常常有另一部分微凸体已经进入塑性状态；另外，摩擦过程还常常传递切向力，所以 Hertz 理论与摩擦表面的实际接触状况存在差别。

(二) 接触模型

当两个固体表面接触时，由于表面粗糙，使实际接触只发生在表观面积的极小部分上(图 1.3)，实际接触面积的大小和分布对于摩擦磨损起着决定性的影响。



表面凸峰的形状是复杂的，但可以将凸峰的形状理想化，以便进行研究。常见的理想化的微凸体模型有三种^[14]：球形，圆柱形(棒状)，及圆锥形，见图 1.4。

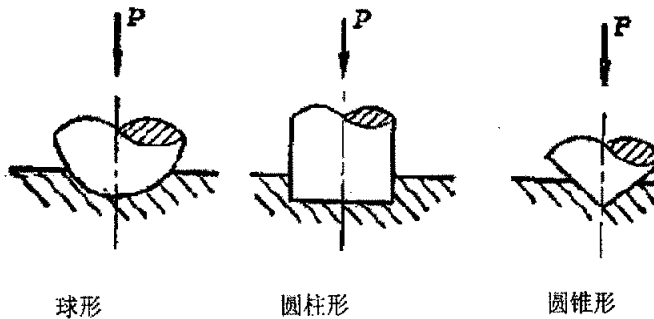


图 1.4 凸峰模型

球形微凸体模型比较容易用数学方法来分析，其压力分布可用 Hertz 公式来处理。球形模型也有其缺点，在试验过程中，球体的接触压力随时间明显变化^[15]。圆柱形和圆锥形的模型的压力分布呈现不定值范围，前者在边缘上，后者在中间，因此，计算接触区的弹性变形是困难的。

圆柱形模型受载荷后，其实际接触面积保持常数，这种现象和实验结果是相矛盾的。使用这些模型进行分析是有困难的，因为和实际情况不一致。表现在：第一，实际

凸峰每个大小不一样,采用这类模型后,如用尺寸及大小一样的方法来处理,和实际情况不同。第二,模型的原始形状和实际凸峰变钝后的形状是不同的,原来的数学描述不再适用了。第三,两个不规则的表面相接触后,情况更为复杂。

尽管如此,微凸体模型在摩擦学研究中仍然具有重要地位。尤其是球形微凸体模型更为研究者广泛使用。

温诗铸指出,两个弹性体的接触可以转换为具有当量曲率半径 R 和当量弹性模量 E 的弹性球体与刚性光滑表面的接触。基于这一原理,复杂的粗糙表面的接触可以简化为球体和平面的接触^[16]。

通常在讨论球体微凸峰和平面接触的模型时分下述三种情况^[17]:

(I) 单峰接触

所谓单峰接触即单个球体微凸峰与一光滑的平面相接触,

很多摩擦学文献涉及单峰接触模型,但这些文献一般利用单峰接触模型计算弹性接触面积和应力(见图 1.5),很少涉及摩擦系数,对于摩擦系数与接触面积与接触应力之间的联系不作进一步分析。

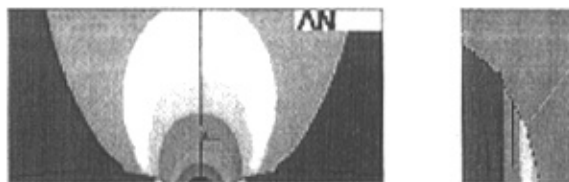


图 1.5 单峰接触应力云图

(II) 理想粗糙表面的接触

理想粗糙表面的接触,即一系列曲率半径相同和高度相同的球体微凸峰与一光滑的平面接触。

(III) 实际粗糙表面的接触

实际粗糙表面的接触是半径尺寸和高度按概率密度函数分布的一系列球体微凸峰与平面的接触,见图 1.6。

关于接触问题,人们已经作了大量研究,取得了分形方法、数值解法等不同的研究成果^{[18][19]}和结论^{[20][21]}。但以往的研究,往往孤立地研究接触问题,把接触问题与摩擦过程特别是摩擦系数相联系的试验研究不多^[22]。另外,目前关于接触模型的研究大多数是建立在统计学规律的基础上的^[23],没有探讨每一个球形微凸体对摩擦过程的贡献。这主要是受试验条件的限制。

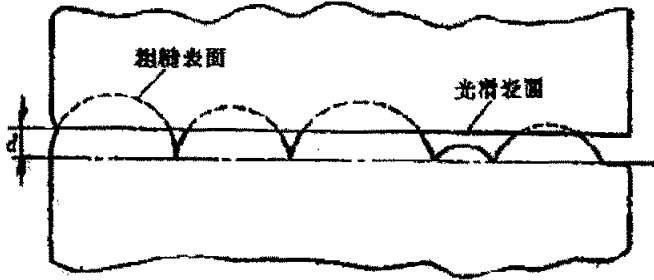


图 1.6 光滑表面与粗糙表面接触模型

本文尝试把球形微凸体孤立出来，试验研究球面销与平面的接触，把表面接触和摩擦过程进行综合性的研究。这种分析方法的优点是把复杂的粗糙表面的问题简单化，缺点是没有考虑到粗糙峰之间横向的约束作用。但是，在摩擦学试验中通过销试样的夹具对球面销产生一定的约束，在一定程度上是对横向约束的补偿。

1.2 摩擦理论

1.2.1 机械理论

十八世纪以前，研究摩擦的许多学者把摩擦的起因说成是由于表面上的凹凸不平。当两个固体表面发生接触时，由于表面凹凸不平处的互相啮合，而产生了障碍两固体物体运动的阻力^[24]。

贝利沙尝试将摩擦面的凹凸形做成模型来证实这种摩擦学说。他将为数众多的半球粘成模型当作摩擦面，从几何计算得出这种凹凸面合起来的摩擦系数为三分之一。

实践证明，机械理论只适用于粗糙表面，即降低表面粗糙度可以降低摩擦系数的表面。当表面光洁度达到使表面分子吸引力有效发生作用时（如超精加工表面），摩擦系数反而加大，这个理论就不适用。

1.2.2 分子理论

分子理论认为：摩擦力的主要原因在于摩擦表面间所持有的分子力^{[25][26]}。

托姆林森应用分子间存在吸力和斥力的假说来解释摩擦原因。他认为：分子间的吸力和斥力是分子间距离的函数。当一个物体沿另一个物体滑动时，由于表面存在粗糙度，某些接触点的分子间的距离很小，它们之间产生分子斥力，而另一些接触点的分子间的距离较大，它们之间产生分子吸力。由力的平衡条件可得，外法向压力加上所有吸引力

应该等于所有斥力之和。捷里亚金利用分子理论,将分子力和外力的几何和当作摩擦表面相互作用的力,得出

$$F = f(N + A_r p_{分}) \quad (1-8)$$

式中: F ——摩擦力;

N ——法向压力;

f ——摩擦系数;

A_r ——实际接触面积;

$p_{分}$ ——单位实际接触面积上的分子力

1.2.3 分子—机械理论与摩擦二项式公式

分子机械理论认为,摩擦是一个混合过程,它既要克服分子间的相互作用力,又要克服机械变形的阻力。发生在接触处的总的阻力就是我们测得的摩擦力。

当两个表面接触时,接触仅仅发生在微凸体处,其实际接触面积只占总的名义面积的很小一部分,并且随着表面的压力增大而增大。在载荷作用下,表面膜容易破坏,金属基体会直接接触。由于接触的不连续性,在很大的单位压力下,会同时出现表面微凸体相互压入和啮合,以及相接触的表面存在分子吸引力。当两表面相对滑动时,所产生的切向阻力的总和——摩擦力为^{[27][28]}:

$$F = F_{分} + F_{机} \quad (1-9)$$

公式中: F ——总的摩擦力

$F_{分}$ ——摩擦力的分子作用组成部分

$F_{机}$ ——摩擦力的机械作用组成部分

机械作用与分子作用的比例与表面光洁度、材料种类、载荷大小有关。光洁度高时,分子作用比例大,光洁度低时,则机械作用大,对于金属,分子作用大,而对于橡胶,则分子作用小。

式(1-9)又可写成

$$F = F_{分} + F_{机} = \tau_{分} A_{分} + \tau_{机} A_{机} \quad (1-10)$$

式中 $\tau_{分}$ ——单位分子作用力

$A_{分}$ ——分子作用实际接触面积

τ_{bl} ——单位机械作用力

A_{bl} ——机械作用实际接触面积

通过进一步推导, 得到:

$$F = \alpha A_r + \beta W \quad (1-11)$$

式中: α ——与表面分子特性有关的参数;

β ——与表面机械特性有关的参数;

W ——载荷

A_r ——实际接触面积

F ——摩擦力

式(1-11)就是表示摩擦力的二项式公式。

目前不少摩擦学文献由理论推导得出摩擦力的二项式公式, 关于二项式的试验研究介绍不多, 本文利用二项式阐述试验结果, 并验证和丰富摩擦力二项式公式的内容, 为探讨摩擦机理作有益的尝试。

1.3 摩擦磨损试验与球面销

摩擦磨损试验的类型有三种^[29]: 试样试验、台架试验、使用试验。试样试验是把所需的摩擦件制成尺寸较小的试样, 在相应的试样试验机上进行。这类试验费用低, 周期短, 故经常采用。摩擦学试验所采用的试样有多种形式, 如 MM-100 滚子式磨损试验机的上下试样均为圆柱形滚子; MQ-12 四球式摩擦试验机的试样为钢球; MG-200 旋转圆盘/销式高温摩擦磨损试验机的试样分别为销和盘^[30]。

关于摩擦学接触机理的研究主要是通过实验室试样完成的, 而针对球形微凸体表面接触模型的研究又主要利用面接触或点接触滑动摩擦试验机来完成。

销盘试验机是最广泛使用的摩擦学试验机之一。如前文所述, 为了便于研究, 常常将表面粗糙峰抽象为球形微凸体, 它便于计算接触面积, 能较客观的反映出摩擦各向同性, 有利于从力学角度来考虑接触的相互作用问题。另外, 车轮与路轨、滚动轴承、齿轮轮齿接触^[31]、人工关节^{[32][33][34]}等等都是由圆弧组成的接触副。当把微凸体看作为微小的球体时, 平直的物体接触问题就转化为一些列大小不等的球体的接触问题。不难理解, 球状试样^{[35][36]}或端部为球面的圆柱销试样(以下简称球面销)对摩擦学实验研究

τ_{bl} ——单位机械作用力

A_{bl} ——机械作用实际接触面积

通过进一步推导, 得到:

$$F = \alpha A_r + \beta W \quad (1-11)$$

式中: α ——与表面分子特性有关的参数;

β ——与表面机械特性有关的参数;

W ——载荷

A_r ——实际接触面积

F ——摩擦力

式(1-11)就是表示摩擦力的二项式公式。

目前不少摩擦学文献由理论推导得出摩擦力的二项式公式, 关于二项式的试验研究介绍不多, 本文利用二项式阐述试验结果, 并验证和丰富摩擦力二项式公式的内容, 为探讨摩擦机理作有益的尝试。

1.3 摩擦磨损试验与球面销

摩擦磨损试验的类型有三种^[29]: 试样试验、台架试验、使用试验。试样试验是把所需的摩擦件制成尺寸较小的试样, 在相应的试样试验机上进行。这类试验费用低, 周期短, 故经常采用。摩擦学试验所采用的试样有多种形式, 如 MM-100 滚子式磨损试验机的上下试样均为圆柱形滚子; MQ-12 四球式摩擦试验机的试样为钢球; MG-200 旋转圆盘/销式高温摩擦磨损试验机的试样分别为销和盘^[30]。

关于摩擦学接触机理的研究主要是通过实验室试样完成的, 而针对球形微凸体表面接触模型的研究又主要利用面接触或点接触滑动摩擦试验机来完成。

销盘试验机是最广泛使用的摩擦学试验机之一。如前文所述, 为了便于研究, 常常将表面粗糙峰抽象为球形微凸体, 它便于计算接触面积, 能较客观的反映出摩擦各向同性, 有利于从力学角度来考虑接触的相互作用问题。另外, 车轮与路轨、滚动轴承、齿轮轮齿接触^[31]、人工关节^{[32][33][34]}等等都是由圆弧组成的接触副。当把微凸体看作为微小的球体时, 平直的物体接触问题就转化为一些列大小不等的球体的接触问题。不难理解, 球状试样^{[35][36]}或端部为球面的圆柱销试样(以下简称球面销)对摩擦学实验研究解, 球状试样^{[35][36]}或端部为球面的圆柱销试样(以下简称球面销)对摩擦学实验研究

具有特殊的作用^{[37] [38]}。在摩擦学试验中球试样已经被广泛应用。国外有试验材料商专门提供各种各样材料和尺寸规格的球试样^[39]。国内外也经常采用滚动轴承标准零件 GCr15 钢球和陶瓷球进行摩擦学试验。

但是，在摩擦学试验研究使用球试样时常常存在一些问题。首先球试样的加工比较复杂，必须是批量加工，因此，成本高。其次，并非所有材料都能象轴承钢一样加工成球体，比如研究中要涉及到的聚合物材料。另外，球试样在试验中的装夹也比较麻烦。与球体试样相比，球面销既满足了用球面进行试验的要求，又易于装夹定位，而且装夹后不易松动，可以更方便地开展试验。销的加工相对容易，理论上大多数材料都可以加工成不同尺寸的球面来满足摩擦试验的不同要求。所以，寻求方便、经济、可靠的球面销加工手段对于摩擦学研究非常重要。

1.4 球面的常见加工方法

1.4.1 球面的车削加工

车削球面^{[40] [41]}，一般有以下三种方法：双手控制法、成型刀法、使用专用工具。

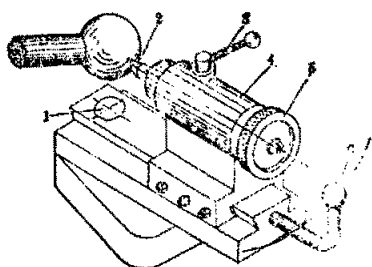
数量较少时或单件球面零件，可以采用双手控制法进行车削。就是用双手同时摇动中、小拖板，通过双手的合成运动，车出所要求的球面。双手控制车削球面的优点是：不需要其它特殊工具就能加工出球面。缺点是：加工的零件精度不高，操作者必须具有熟练的技巧，而且生产效率低。

数量较多的球形零件一般采用成型刀车削，采用这种方法加工球面时，精度主要靠刀具保证。使用成型刀时，因为刀刃接触面积大，容易引起振动^[42]，因此，机床要有足够的刚性，应采用较小的进给量和切削速度，以减轻振动。

图 1.7 所示是手动车圆弧的专用工具^[43]。使用时，安装在车床上。刀架 4 可绕中心销轴 1 转动。车刀 2 用螺钉固定在刀架的套筒中。刀架 4 可在燕尾槽中前后移动，以调整刀尖到圆弧中心的距离。当车刀微量调节时可旋转手轮 5，调整后，用手柄 3 锁紧刀架套筒。刀架的转动可用手柄 6 缓慢推拉，车刀刀尖就绕回转中心 1 作圆弧运动。如果在工具的下部装上蜗杆蜗轮副，刀尖就可以获得比较均匀的进给量。

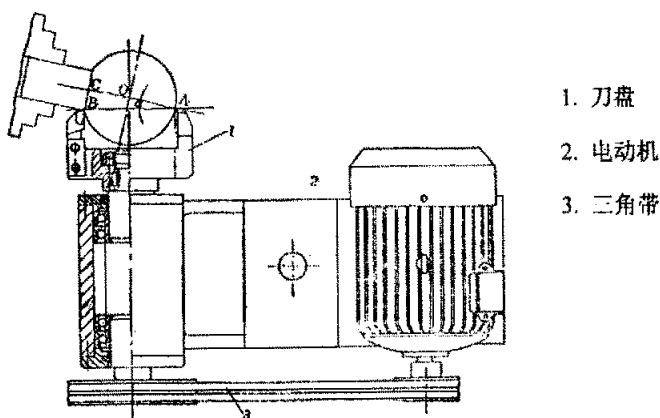
图 1.8 是旋风车削法加工带柄圆球的方法^[44]。

一般情况下，车削出的球面精度低，表面粗糙度大，也不易于加工小尺寸的球面。因此，不适合作为摩擦学球面销试样的加工方法。



1. 中心销轴
2. 车刀
3. 锁紧手柄
4. 刀架
5. 旋转手轮
6. 手柄

图 1.7 手动车圆弧工具



1. 刀盘
2. 电动机
3. 三角带

图 1.8 旋风切削法加工带柄圆球

1.4.2 球面的磨削加工

磨削方法加工球面，既可在特殊专用设备上磨削，也可在一般磨床上磨削，如平面磨床、外圆磨床以及工具磨床等。

成型磨削方法分为两类^[45]：第一，成型砂轮磨削法，这种方法是将砂轮修整成与工件型面完全吻合的反型面，然后再以此砂轮磨削工件，获得所需的形状。第二，非成型砂轮磨削法，采用非成型砂轮，将工件按照一定的条件装夹在专用装备上，在加工过程中，固定或不断改变其位置，得到所需要的型面。

成型砂轮磨削法的关键是要在砂轮上修整出圆弧，修整出圆弧后，用此砂轮来磨削工件上的圆弧面。图 1.9 是一种在砂轮上修整圆弧的工具^[46]，修整圆弧工具主要有支架、转盘、和滑座等组成。

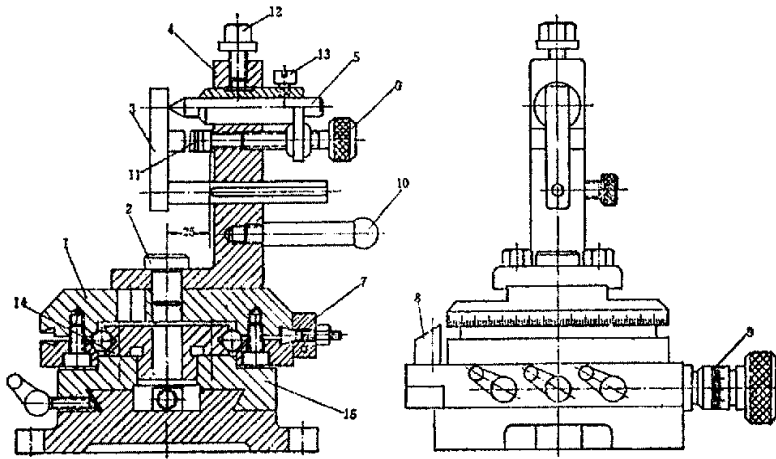


图 1.9 修整砂轮圆弧工具

1. 转盘 2. 定位销 3. 定位板 4. 支架 5. 金刚钻 6. 12. 13. 螺钉 7. 撞块
8. 固定块 9. 手轮 10. 手柄 11. 块规 14. 轴承座 15. 滑座

用成型砂轮磨削球面，加工方法操作方便，生产率高，但是，砂轮磨损后修整很麻烦，且采用这种方法磨削，容易引起振动，对设备的刚度要求较高。当球面销半径不同时，要在砂轮上修整出不同半径的圆弧，工作量大，浪费大，因此，这种方法往往用于加工数量较少或者精度要求不高的零件，显然是不适合加工摩擦学试验用球面销的。

在目前技术中，还常常采用范成法加工球面^[47]。范成法属于非成型砂轮轨迹磨削法，是由英国学者泰勒于 1920 年提出，在六十年代在我国广泛使用。它是一种高速铣磨方法，这种方法利用砂轮和工件的中心线斜交并回转的方法来磨削球面，并可在普通磨床或其它设备上进行。

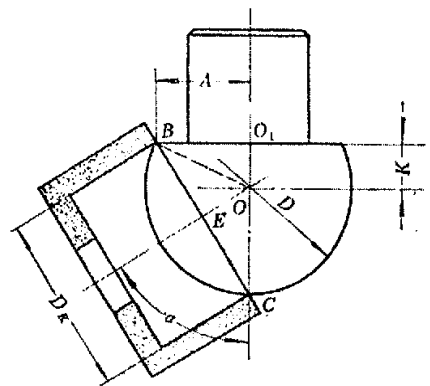


图 1.10 磨球面的原理

1. 工件 2. 砂轮

如图 1.10 所示，把砂轮 2 安装得与工件 1 轴线相交成 α 角^[48]，砂轮与工件同时绕各自的轴线旋转，磨轮高速旋转，工件低速旋转，当工件绕垂直轴线旋转时，它上面每一点的运动轨迹就是一个水平的圆周。而这些圆周都通过倾斜的砂轮内孔，由于砂轮绕轴线作高速旋转，对球面产生磨削作用。当砂轮沿轴线向工件进给时，就能磨出一个合乎要求的球面来。

要磨出所要求的球面，砂轮的旋转轴线和工件轴线一定要相交成一个角度，而且，

砂轮的直径 D_K 要等于工件圆截面中的弦长 BC (见图 1.10)。砂轮安装的斜角和砂轮的直径都直接与工件球面大小有关, 所以在加工时, 要根据工件的尺寸来计算。

不难通过计算得到砂轮直径 D_K 为

$$D_K = \sqrt{D\left(\frac{D}{2} + K\right)} \quad (1-12)$$

式中的 K 值, 当工件球面大于半圆时为正值, 小于半圆时为负值, 等于半圆时为零。

安装倾斜角度:

$$\sin \alpha = \frac{D_K}{D} \quad (1-13)$$

按照式 (1-12)、(1-13) 求出的 D_K 、 α 常常不是整数, 通常只能取近似值。范成法往往还存在较大的安装误差, 且砂轮用于磨削的直角棱边非常容易磨损, 会造成产品质量不稳, 所以这种方法一般只能用于加工精度要求不高的球面。这种方法一般适合机械制造单位通过改造现有设备来实现, 不适合摩擦学研究单位采用。

对范成法还有一些改进的方法^{[49][50]}。哈尔滨工业大学的麦山, 哈尔滨第二工具厂刘允环等人将图 1.10 中的砂轮改为薄壁空心铜管, 在普通电火花数控线切割机床上, 通过电火花磨削的方法加工出航天产品凸球面。加工时工件和铜管分别接脉冲电源的正负极。这种方法的优点是可以很容易地加工很硬的材料如淬火钢、硬质合金, 但这种方法不能加工塑料等绝缘材料, 因此, 也不适合摩擦学研究采用。

1.5 球(圆)的测量

1.5.1 球体直径(半径)的测量

当球体部分大于半球时, 球的直径是容易测量的, 根据加工要求的不同, 分别可采用游标卡、千分尺等量具检测^[51]。球面销的端部为半球或球冠, 多数情况下为球冠, 其直径(半径)不容易测量。很多制造单位采用圆弧样板检测球冠半径。这种方法测量精度低, 其测量误差较大。

目前, 有介绍非整圆柱体半径测量方法的技术和专利^{[52][53]}, 而介绍球冠半径测量方法的文献资料并不多见。

对于直径特别大的圆柱体工件, 测量也是有困难的, 工程上采用“弓高弦长法”、

“滚子法”等间接方法测量^[54]，其中“弓高弦长法”对于探索球冠半径的测量方法具有一定的启发意义。但还不是解决球冠测量问题的具体方案。

《机器制造》1992年第11期刊登的“非整圆圆弧半径的简易快速测量装置”一文介绍了非整圆圆弧半径的测量装置，该文对于寻求球冠半径的测量方案也有借鉴作用，但该方法即使用于测量非整圆圆弧也存在较大误差。

武汉工业学院王晓光介绍过球冠半径的测量方案，但该方案耐用度差，测量误差大^[55]。

1.5.2 圆度的测量方法

现在机械制造业测量圆度的方法有：

- (1) 直径法，测量不同方向的直径，对于具有棱的零件不能适用；
- (2) 光隙法，根据球的半径制造精密的样板，用样板对照球，检查球形的正确与否。这种方法的检测精度低^[56]；
- (3) 圆周界限量规，用塞尺和环规测量，主要是保证尺寸公差，对圆度误差有一定的限制作用，但不能测量出圆度误差；
- (4) 在顶尖上旋转法，测量精度受到顶尖和顶尖孔精度的影响；
- (5) V形块法，零件放在V形块内，零件相对于测量头转动测量；
- (6) 圆度仪法^[57]，使用高精度回转轴和测量头，相对运动形成一个理想圆，与工件外形比较，测量出圆度误差。

尽管有较多的圆度测量方法，但介绍测量球面轮廓误差的文献资料并不多。

1.6 研制球面销加工设备的意义

由上文可知，用仿形法、范成法等现有常规车削、磨削技术加工球面销代价大、精度低、规格少，利用数控方法加工球面销价格昂贵、不方便。因此，在摩擦学试验中，常常选用制造滚动轴承用的球体来代替摩擦学试验用球面试样。这种代替的缺点是显而易见的，轴承用球的材料和硬度比较单一，其材料一般限于GCr15钢，硬度为HRC60~64^[58]，几乎没有其它选择可能性。而摩擦学研究对摩擦副的材料、表面粗糙度、球面半径、硬度以及表面化学性质都有非常严格的要求，需要提供具有不同材质和表面状态并能进行表面处理的不同尺寸的球体或端部为球面的圆柱销试样。为此，本课题将研制球面销球面磨削设备作为自己的首要任务，以在圆柱毛坯上加工出各种不同的球面，制

备金属、塑料等多种材料的球面销试样用于摩擦学理论及实验研究作为自己的最终目标。

1.7 本文的主要研究内容

(1) 为用球形微凸体接触模型进行摩擦机理研究, 探讨摆旋法磨削摩擦学试验用球面销试样高精度球面的关键技术, 包括: 成形原理、形成标准球面的必要条件, 分析球面轮廓误差形成的原因及形成过程, 估算误差值、推导误差控制公式, 计算磨削轨迹方程。

(2) 从摩擦学球面销的特点和实际应用需要出发, 研制可以加工不同半径、不同材料的摆旋法球面销磨削设备, 寻求合理的设备布局和进给、摆动方案, 研究砂轮与工件的安装、固定方法, 设计砂轮修整装置, 阐述设备的安装工艺。

(3) 为考察所研制的球面销磨削设备的实用性, 完善制备工艺, 应用该设备, 采用不同的砂轮对不同的材料进行制备试验, 探索尺寸精度和表面品质的控制和检测方法。

(4) 制备各种尺寸的 UHMWPE 球面销, 研究不同负荷下压痕面积 S_d , 建立压痕面积 S_d 与载荷 W 及球体半径 R 之间的关系式。

(5) 在摩擦学试验的基础上探讨球体半径、载荷大小对摩擦系数的影响, 研究平均接触应力与摩擦系数的内在联系, 通过绘制摩擦系数与平均接触应力的关系图, 揭示存在于摩擦现象中的规律, 并从理论上进行分析探讨。

第二章 摆旋法磨削球面的原理和设计要素

为进行球形微凸体接触摩擦机理的试验研究,计划采用离散的方法,从评价单个球体上发生的变化对摩擦过程的贡献入手,来探讨接触、变形和摩擦的影响规律。因此,必须有实用、精确的球面加工方法来制备用于摩擦学试验研究所要求的各种球面。在总结分析原有球面加工方法的基础上,本章提出用摆旋法磨削球面的新加工方案,分析摆旋法磨削球面的过程,探讨形成标准球面的必要条件,研究摆旋法磨削球面的加工误差和控制方案,为球面销磨削设备的研制确定设计要素。

2.1 磨削成形原理与成型过程

摆旋法磨削成型原理如图 2.1 所示。砂轮 1 绕自身轴线高速旋转,工件 2 在绕自身轴线作低速旋转的同时,还绕圆心 O 点左右慢速摆动。砂轮端平面对工件端部产生磨削作用,使工件端部成为球面。O 点沿垂直于砂轮端平面方向移向砂轮,所磨削出的球面半径逐渐减小,最后获得符合要求的端部为球面的工件 2 即球面销试样。

在图 2.1 中, O 点代表工件摆动时所绕摆动中心轴的中心线,图中砂轮、工件、和摆动中心轴应符合下述位置关系:(1)工件自身轴线也通过 O 点并与摆动中心轴的轴线垂直相交,(2)工件轴线摆动所形成的平面(以下简称工件轴线摆动平面)是水平的,并与砂轮磨削平面垂直相交。

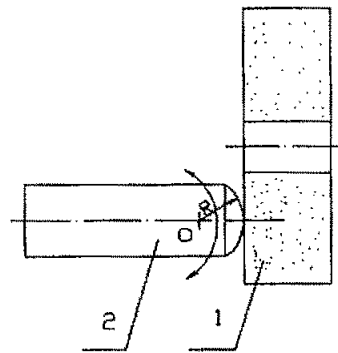


图 2.1 摆旋法磨削成型原理

如图 2.2 (a) 所示,在阐述球面的成型过程时,以矩形 ABCDEF 代表工件的通过轴线的假想横截面。其中, BE 为矩形的对称轴,代表工件的中心线。由摆动中心 O 点向砂轮作垂线,交砂轮于 M 点,如图 2.2 (b) 所示

(1) 当工件在水平面内顺时针摆动时,设 A 点首先接触砂轮面。如图 2.2 (b)。

(2) 继续顺时针摆动工件,矩形与砂轮平面 GH 的交线为线段 K_1K_2 ,如图 2.3 (a) 所示,则 $\triangle AK_1K_2$ 部分被磨去了,注意到工件同时在作绕自身轴线的旋转运动,由旋转运动的对称性可知, $\triangle CK_3K_4$ 也被磨去了。事实上,可以推断出,此时工件的端部为一圆台形状。。

(3) 随着工件的继续摆动, 圆台的侧母线夹角渐渐变大, 同时侧母线向 B 点靠近。

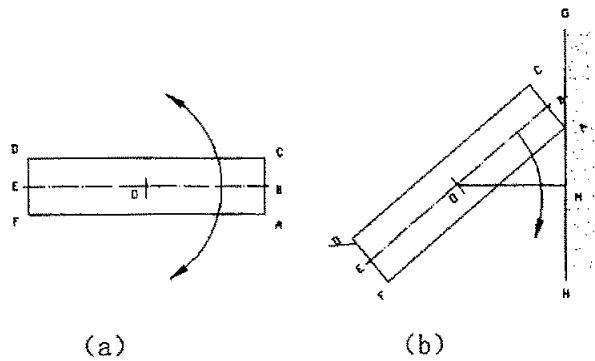


图 2.2 成型过程 (I)

(4) 当 B 点与砂轮接触时, 工件端部成为圆锥, 如图 2.3 (b) 所示。设锥角为 2θ , 设 O 点到砂轮的 GH 面的垂直距离为 $OM = l_1$, 设 $OB = l_2$, 则

$$\sin \theta = \frac{OM}{OB} = \frac{l_1}{l_2}$$

所以故锥角 2θ 为

$$2\theta = 2 \arcsin \frac{l_1}{l_2} \quad (2-1)$$

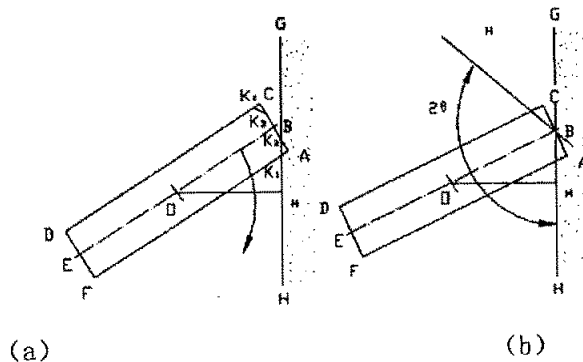


图 2.3 成型过程 (II)

(5) 继续摆动工件, 如图 2.4 (a) 所示, 当假想截面 ABCDEF 的 B 点运动到砂轮平面 GH 右侧时, 设截面与 GH 的交线为 K_5K_6 , 则 $\triangle AK_5K_6$ 已被磨去, 由工件绕自身轴线旋转运动的对称性可知, 工件右端仍被磨成圆锥, N 为锥顶点, NK_6, NK_7 为圆锥的两条侧母线。此时的锥角比图 2.3 状态下的锥角大, 并随工件摆动, 继续增大。

(6) 上述摆动过程中, 侧母线 AF 一直尚未通过 M 点, 随着工件的继续摆动, 侧母线逐步靠近 M 点, 最后通过 M 点, 如图 2.4 (b) 所示。仅仅当侧母线 AF 通过垂足

M 时, 才开始形成球面。

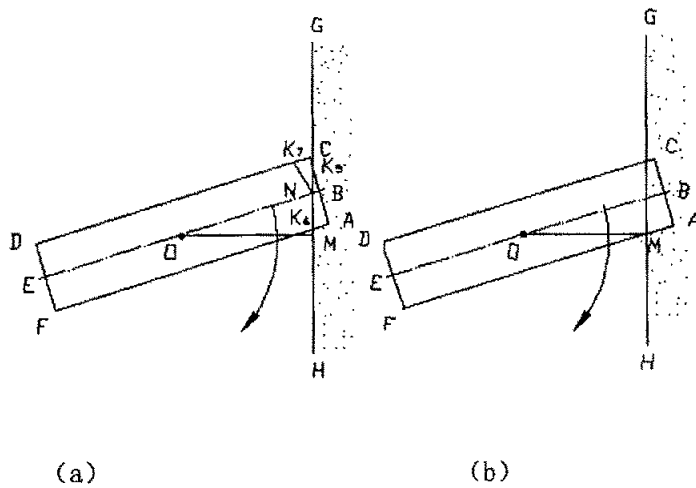


图 2.4 成型过程 (III)

(7) 如图 2.5 所示, 设工件轴线 EB 与砂轮平面 GH 相交于 P 点, 此时工件的侧母线 AF 已离开 M 点。以 OM 为半径作圆, 设 AF 与该圆相交于 Q 点, CD 与该圆交于 Q₁ 点, M₁ 是 M 点关于 BE 的对称点, 则在横截面上由 Q 到 M 的轮廓线应为圆弧, 由 Q₁ 到 M₁ 的轮廓线也应为圆弧, 其中圆弧 Q₁M₁ 与圆弧 QM 关于 BE 对称, $OQ = OM = OM_1 = OQ_1$, 亦即因工件绕 BE 轴旋转, 弧段 MQ 也绕 OB 旋转, 并因此形成球面的一部分。而此时剖面上, 从 M 点到 P 点仍为线段, MP 同样绕 BE 旋转, 但形成锥面, 锥顶为 P。因此可以看出, 此时工件的右端面由圆锥面和圆环面两部分组成。

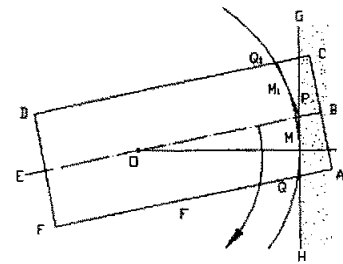


图 2.5 成型过程 (IV)

(8) 继续摆动工件, 上述圆环面增加, 圆锥面减少, 当工件轴线 BE 与砂轮面 GH 垂直时, 工件右端面全部成为球面。球的半径为摆动中心 O 到砂轮 GH 的垂直距离。

2.2 球面加工误差分析

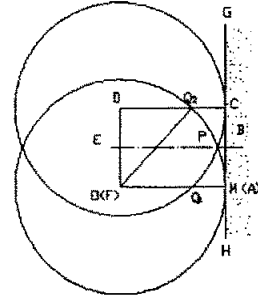
在图 2.1 中, 砂轮、工件和摆动中心轴符合下述位置关系: 第一, 工件自身轴线也通过 O 点并与摆动中心轴的轴线垂直相交; 第二, 工件轴线摆动平面是水平的, 并与砂轮磨削平面垂直相交。如果上述两个条件得不到满足, 将得不到准确的球面。为便于

理解，下面首先分析非标准球面的成型过程，然后计算球面加工的两类主要的误差。

2.2.1 工件轴线与摆动中心轴轴线异面垂直时所产生的误差

如果工件的轴线与摆动中心轴轴线，虽垂直但不相交，即互为异面直线，将得不到准确的球面，或者说存在球面轮廓误差。为便于叙述，将这种加工误差称为第一类误差。

图 2.6 所示是这种误差位置关系的一个例子。圆柱形工件 ABCDEF 可绕 O 点摆动(设 O 点与 F 点重合，M 点与 A 点重合)，同时还可绕轴线 BE 转动，显然，图中工件轴线偏离了摆动中心轴的轴线，两者是异面直线。以 O 为圆心，OM 为半径作圆 (M 为从 O 点到砂轮磨削面 GH 的垂足)。



当磨削开始时 A 点与 M 点是重合的。工件右端磨削后，轨迹是：AQ₁ 之间的部分被磨去了，因而圆弧 PA 不是截面的实际轮廓线，以 D 为圆心，DC 为半径作圆，圆也交 BE 于 P 点，与 FA 交于 Q₁ 点，实际上，圆弧 PQ₂ 和圆弧 PQ₁ 是工件加工后的截面轮廓线，Q₂P、Q₁P 关于 BE 对称。以 F 为圆心的圆在 P 点的切线为 l_1 ，以 D 为圆心的圆在 P 点的切线为 l_2 ，显然， l_1 、 l_2 不重合，所以两圆弧在交点 P 处是不光滑的，有尖点。曾在试制初期中出现过加工面有尖顶现象。

为什么线段 AQ₁ 之间的部分会被磨去呢？这与工件绕自身轴线回转有关。不难理解，从圆弧 MQ₂ 到 C 点的部分是被磨去的，而 AF 线与 CD 线是可以交换位置的，由于工件自身旋转，A 与 C 点位置可以互换，所以 A 点附近的点必定被磨去。

下面讨论工件轴线与摆动轴轴线异面的更为一般的情况。

(1) 由图 2.4 可知，在磨削的开始阶段，即 FA 与 GH 的交点在 GM 以内时，工件横截面 ABCDEF 与砂轮的磨削面 GH 的交线为直线，由于工件回转运动的对称性，工件右端为圆台或圆锥，当 AF 经过 M 点时，开始形成球面。

(2) AF 与 GH 的交点落在 MH 范围内时 (图 2.7 (a))，由于砂轮的磨削，截面内产生实际圆弧段 MQ，由于工件绕 BE 旋转，还会有另一关于 BE 对称的圆弧段 M₁Q₁，工件右端面的边缘处已形成回转曲面。但此时工件右端面的中心部分仍为锥面，锥面的侧母线为 PM 和 PM₁，这里的情况与图 2.5 很相似，但这里 BE (或其延长线) 不通过 O

点，而图 2.5 中 BE 通过 O 点。另外的区别在下一段可以看出。

(3) 设工件已摆动到图 2.7 (b) 的位置，此时，工件轴线 BE 垂直于砂轮磨削面。作 $OS_1 \parallel BE$ ，以 BE 为对称轴作 TS_2 ，显然，当 OS_1 通过 M 点时，工件横截面上将形成圆弧 MQ_2 ， M_1Q_3 ，和直线段 MM_1 。工件右端面由曲面和平面组成。这里应注意：圆弧 M_1Q_3 的圆心在 T 点，其上各点到 E 点的距离不等， MQ_2 上各点到 E 点的距离也不等。由于圆弧 M_1Q_3 ， MQ_2 是对称分布，但没有共同圆心，因而工件右端面边缘处的回转曲面（回转轴为 BE）不是球体的一部分。

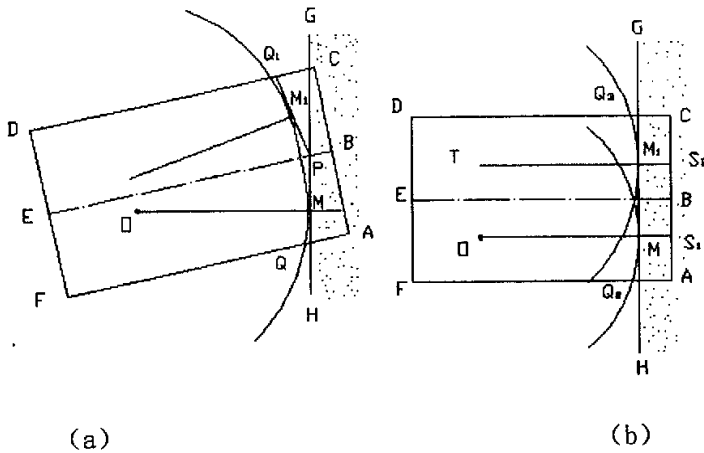


图 2.7 误差分析 (II)

(4) 继续顺时针摆动工件，GH 与横截面的交线将如图 2.8 所示，GH 右侧部分被磨去，此时工件右端面由锥面和尚未被磨到的回转曲面所组成。锥面的顶点为 GH 与 BE 的交点 P。圆锥两侧母线为 PQ_3 ， PQ_4 ，回转曲面的侧母线为 Q_3Q_5 ， Q_2Q_4 。值得注意的是：由上述分析过程可知，在新工件刚开始磨削时，工件轴线与砂轮面的夹角 $\angle EPG$ 为钝角（设 EB 与 GH 交点为 P），而此时夹角 $\angle EPG$ 为锐角

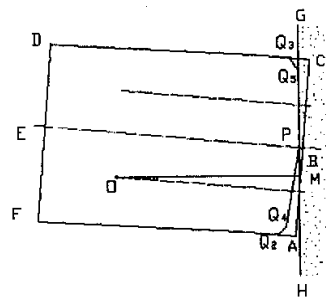


图 2.8 误差分析 (III)

角，在夹角为锐角时，工件与砂轮的接触点在轴线 BE 的一侧（对照图 2.8，记为左侧），而在夹角为钝角时，接触点在 BE 的另一侧（记为右侧）。接触点在左侧时，接触点处

工件线速度指向读者, 接触点在 BE 右侧时, 接触点处工件线速度背离读者, 这将影响到工件表面纹理方向。工件圆锥面是在 BE 与 GH 成锐角时形成的, 工件端面上与 Q_2Q_4 相对应的回转曲面是在 BE 与 GH 成钝角时形成的, 故圆锥面与此回转曲面的纹理是相反的(参见图 2.11)。

(5) 继续摆动工件, 当 BE 经过 M 点时, 工件右端面从中心部位开始形成新的回转曲面, 而当 CD 侧母线通过 M 点时, 工件右端的加工面完全形成, 如图 2.9(a) 所示, 其实体形状如图 2.9 (b), 加工面存在尖顶现象。

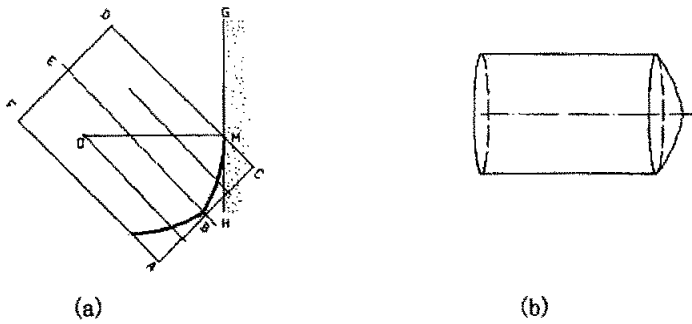


图 2.9 存在第一类加工误差的工件

图 2.10 为显微镜所拍摄的存在第一类加工误差的超高分子量聚乙烯 (UHMWPE) 工件端面照片。

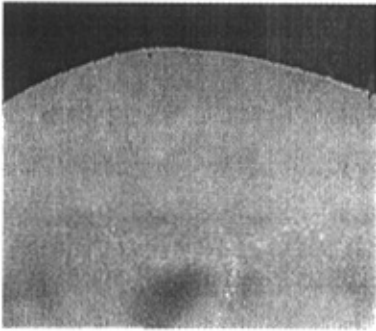


图 2.10 存在第一类加工误差的工件端面照片

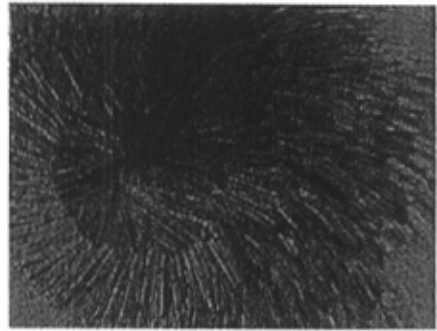


图 2.11 圆锥面与回转曲面纹理相反

2.2.2 工件轴线与摆动中心轴轴线异面垂直的球面轮廓误差估算

当工件轴线与摆动中心轴轴线异面垂直时将得不到准确的球面, 可用图 2.12 中粗

实线表示加工后的工件——球面销水平横截面轮廓。工件轴线 BE 偏离摆动中心轴轴线 O_1 点的距离为 e ，从 O_1 点到砂轮的垂直距离等于球冠的公称半径 R （即 OM 等于球冠半径），工件圆柱部分的直径为 d ，结合图 2.12 估算球面轮廓误差。

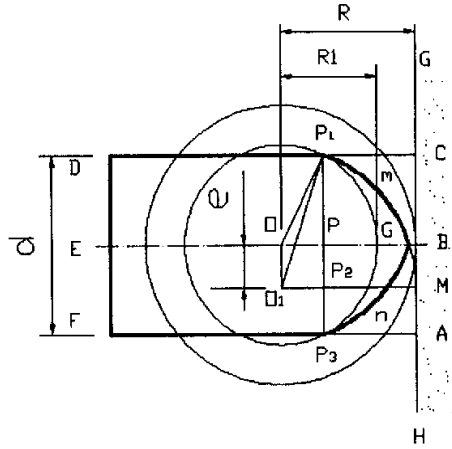


图 2.12 第一类误差估算图

由图 2.12 看出，球面实际轮廓误差 Δ_1 应小于图 2.12 两圆的半径之差，图中大圆半径与 O_1M 等长，其值为球冠公称半径 R ，图中小圆半径 R_1 与 OP_1 等长，其值可由下式计算

$$\begin{aligned} R_1 &= OP_1 = \sqrt{OP^2 + P_1P^2} = \sqrt{O_1P_2^2 + P_1P^2} \\ &= \sqrt{R^2 - (d/2 + e)^2 + (d/2)^2} \\ &= \sqrt{R^2 - de - e^2} \end{aligned} \quad (2-2)$$

所以

$$\Delta_1 \leq R - R_1 = R - \sqrt{R^2 - de - e^2} \quad (2-3)$$

在已知球面轮廓公差 Δ 时，应使

$$R - \sqrt{R^2 - de - e^2} \leq \Delta$$

由 (5) 式解得

$$e \leq \frac{\sqrt{d^2 + 8R\Delta - 4\Delta^2} - d}{2} \quad (2-4)$$

依据 (4) 式，在已知球面公差 Δ 时可以通过限制工件轴线偏离摆动中心的数值来保证球面轮廓误差在公差范围以内。

2.2.3 工件轴线摆动平面与砂轮磨削平面不垂直时所产生的误差

如果工件轴线及其摆动平面与砂轮磨削平面不垂直,例如,砂轮磨削面垂直于水平面,工件轴线摆动平面与水平面有一夹角 ϕ ,如图 2.13 所示,也得不到标准的球面。

将这种球面轮廓误差称为第二类误差。误差原因分析如下。

将工件的运动分解为摆动和转动两个过程。

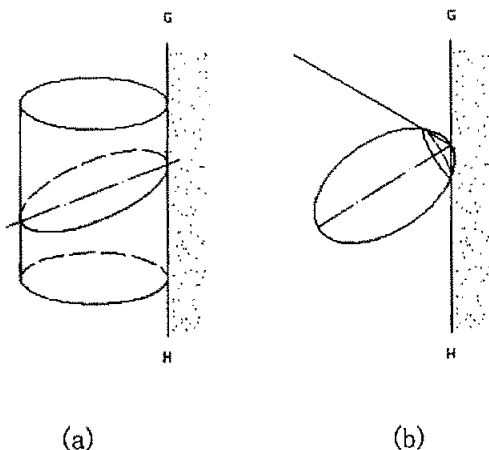


图 2.13 误差分析 (IV)

(1) 设工件不绕自身轴线转动,仅作摆动,则工件右端面受砂轮作用,应成为竖直圆柱面的一部分。由于工件轴线摆动所形成的平面与水平面不平行,根据画法几何的知识,此摆动平面与竖直圆柱面的交线为椭圆,如图 2.13 (a) 所示。

(2) 使工件轴线在水平面内的投影与砂轮平面垂直,在此位置上,使工件绕自身轴线转动。上述椭圆交线也回转,椭圆绕工件轴线回转得到椭球面,如图 2.13 (b) 所示,但工件右端面并不完全是椭球面,这是因为上述椭圆在回转过程中,长轴右端点处受到砂轮的限制。椭圆与砂轮 GH 的交线为一直线,故加工面右端点处有一小圆锥面。图 2.14 是加工后工件的形状示意图。

在一般情况下, ϕ 角很小,小圆锥面不明显,为了弄清楚实际轮廓形状,避免得出错误的结论,特意将 ϕ 加大到 8 度,这时在所加工的工件端面上出现了预料之中的比较明显的小圆锥面。

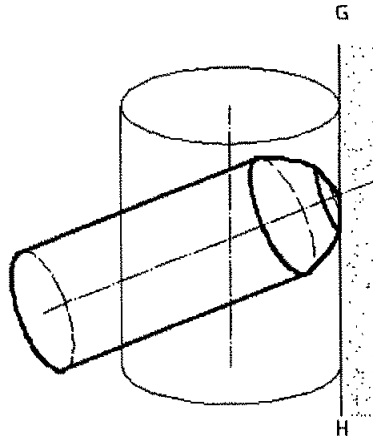


图 2.14 误差分析 (V)

2.2.4 工件轴线摆动平面与砂轮磨削面不垂直时球面轮廓误差估算

当摆动中心到砂轮端面的距离为球冠的公称半径 R 时, 球面轮廓误差应满足下式

$$\Delta_2 \leq \frac{R}{\cos \phi} - R \quad (2-5)$$

当已知球面轮廓公差 Δ 时, 应使

$$\frac{R}{\cos \phi} - R \leq \Delta \quad (2-6)$$

解上式得

$$\phi \leq \arccos \frac{R}{R + \Delta} \quad (2-7)$$

依据上式, 在已知球面轮廓公差 Δ 时, 可以通过限制工件轴线的倾角来控制球面的误差。

2.2.5 球面轮廓综合误差的估算与控制

当同时存在上述两类误差时, 应有下式成立

$$\Delta_1 + \Delta_2 \leq \left| R - \sqrt{R^2 - de - e^2} \right| + \left| \frac{R}{\cos \phi} - R \right| = \frac{R}{\cos \phi} - \sqrt{R^2 - de - e^2} \quad (2-8)$$

记综合误差为 Δ_3 , 则

$$\Delta_3 \leq \frac{R}{\cos \phi} - \sqrt{R^2 - de - e^2}$$

上式可以用于估计加工误差, 当已知球面轮廓公差 Δ 时, 应使下式成立

$$\frac{R}{\cos \phi} - \sqrt{R^2 - de - e^2} \leq \Delta \quad (2-9)$$

利用上式控制倾角 ϕ 和偏心距 e 可避免球面轮廓误差超出公差范围。

如果要求球面误差不超过 Δ_x , 则应有:

$$\Delta_1 + \Delta_2 \leq r / \cos \Phi - \sqrt{r^2 - de - e^2} \leq \Delta_x \quad (2-10)$$

如果 e 已知, 解上述不等式可求得 Φ 的取值范围:

$$-\arccos \frac{r}{\Delta_x + \sqrt{r^2 - de - e^2}} \leq \Phi \leq \arccos \frac{r}{\Delta_x + \sqrt{r^2 - de - e^2}} \quad (2-11)$$

如果 Φ 已知, 可求得 e 的取值范围:

$$|e| \leq \frac{-d + \sqrt{d^2 - 4[(r/\cos \Phi - \Delta_x)^2 - r^2]}}{2} \quad (2-12)$$

利用公式 (2-11)、(2-12), 可通过限定 Φ 、 e 的取值, 从而将球面误差控制在 Δ_x 范围内。

例 设偏心距 $e=0.03$, 球面销圆柱部分直径 $d=8$, 球面部分半径 $r=20$, 轴线倾角 $\Phi=1^\circ$ 。要求估算球面误差 Δ

$$\text{解: } \Delta_1 = r / \cos \Phi - r = \frac{20}{\cos 2^\circ} - 20 = 0.003$$

$$\Delta_2 = r - \sqrt{r^2 - de - e^2} = 20 - \sqrt{20^2 - 8 \times 0.03 - 0.03^2} = 0.006$$

$$\Delta \leq |\Delta_1| + |\Delta_2| = 0.003 + 0.006 = 0.009$$

2.3 磨削轨迹分析

以球体的中心为坐标系的原点 O , 建立图 2.15 所示球面坐标系。假设工件母线首先与砂轮接触。接触点为 A 。A 点则为所加工的球面的起始点。A 点应为球面销圆柱面与球面交线上的一点。设球面销圆柱部分的直径为 d , 球面的半径为 R 。下面计算 A 点的坐标。

$$\rho_A = R \quad (2-13)$$

$$\varphi_A = \pi/2 \quad (2-14)$$

$$\theta_A = \angle AOW$$

$$\cos \theta_A = \cos \angle AOW = \frac{d/2}{R} = \frac{d}{2R}$$

$$\theta_A = \arccos \frac{d}{2R} \quad (2-15)$$

为了便于分析球面上的磨削轨迹, 根据相对运动的原理, 假定工件不动, 则砂轮沿球面运动。磨削开始时, 砂轮与球面销的磨削接触点在图 6 中的 A 点, t 时间后, 接触点运动到了 B 点, 根据运动合成理论, 可以认为, 接触点先由 A 点运动运动到 C 点, 再由 C 点运动到 B 点。下面计算 B 点的球坐标。

$$\rho_B = R \quad (2-16)$$

$$\theta_c = \angle COW = \theta_A + \omega_1 t \quad (2-17)$$

其中 ω_1 —— 工件水平摆动角速度

$$OF = R \sin \theta_c = R \sin(\theta_A + \omega_1 t)$$

$$TF = \sqrt{R^2 - OF^2} = \sqrt{R^2 - R^2 \sin^2(\theta_A + \omega_1 t)} = R \cos(\theta_A + \omega_1 t)$$

$$BF = TF = R \cos(\theta_A + \omega_1 t)$$

$$BE = BF \sin(\omega_2 t) = R \cos(\theta_A + \omega_1 t) \sin(\omega_2 t)$$

其中 ω_2 —— 工件绕自身轴线角速度

$$\cos \varphi_B = \sin \angle BOE = \frac{BE}{R} = \frac{r \cos(\theta_A + \omega_1 t) \sin(\omega_2 t)}{R} = \cos(\theta_A + \omega_1 t) \sin(\omega_2 t)$$

$$\varphi_B = \arccos(\cos(\theta_A + \omega_1 t) \sin(\omega_2 t)) \quad (2-18)$$

$$\begin{aligned} EF^2 &= BF^2 - BE^2 = R^2 \cos^2(\theta_A + \omega_1 t) - R^2 \cos^2(\theta_A + \omega_1 t) \sin^2(\omega_2 t) \\ &= R^2 \cos^2(\theta_A + \omega_1 t) \cos^2(\omega_2 t) \end{aligned}$$

$$EF = R \cos(\theta_A + \omega_1 t) \cos(\omega_2 t)$$

$$\tan \angle EOF = \frac{EF}{OF} = \frac{R \cos(\theta_A + \omega_1 t) \cos(\omega_2 t)}{R \sin(\theta_A + \omega_1 t)} = \cot(\theta_A + \omega_1 t) \cos(\omega_2 t)$$

$$\angle EOF = \arctan(\cot(\theta_A + \omega_1 t) \cos(\omega_2 t))$$

$$\theta_B = \frac{\pi}{2} - \angle EOF = \frac{\pi}{2} - \arctan(\cot(\theta_A + \omega_1 t) \cos(\omega_2 t)) \quad (2-19)$$

综合上式，得 B 点的球面坐标

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_B = R \\ \varphi_B = \arccos(\cos(\theta_A + \omega_1 t) \sin(\omega_2 t)) \\ \theta_B = \frac{\pi}{2} - \arctan(\cot(\theta_A + \omega_1 t) \cos(\omega_2 t)) \end{array} \right.$$

由于 B 点随时间 t 变化，此表达式即为磨削轨迹方程。

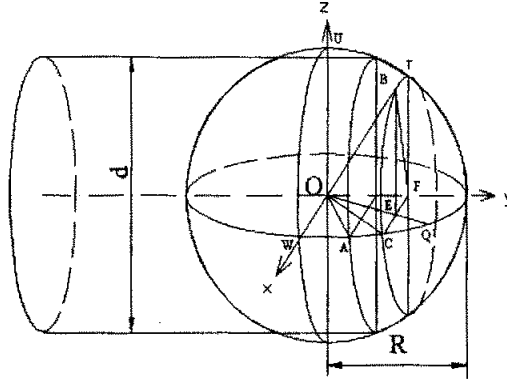


图 2.15 磨削点的球坐标

图 2.16 是扫描电子显微镜拍摄的不锈钢材料的磨削轨迹（放大倍数 300）。



图 2.16 磨削轨迹 SEM 照片

2.4 磨削速度分析

磨削速度对于提高磨削质量、磨削效率具有重要意义。

当砂轮中心与工件中心等高时，砂轮与工件接触点 C 的各绝对运动速度有：

- (1) 工件上 C 点的摆动速度 V_1 ： $V_1 \approx R\omega_1$ ，方向在水平面内并垂直于半径 OC。

(ω_1 : 工件摆动角速度)

(2) 工件上 C 点绕工件轴线旋转的线速度, 方向在竖直面内并垂直于半径 OC。

$$(V_2 = \omega_2 R \cos \theta_c = R \cos(\theta_A + \omega_1 t) \omega_2)$$

ω_2 : 工件绕自身轴线旋转的角速度

(3) 砂轮上 C 点的线速度, 方向在竖直面内并垂直于半径 OC。

$$V_3 = R_1 \times \omega_3$$

ω_3 : 砂轮旋转的角速度

R_1 : 接触点 C 到砂轮中心的距离。

2.5 摆旋法磨削球面的设计要素

根据以上分析, 从摆旋法的成型原理、成型条件和加工误差控制出发, 摆旋法球面销磨削设备的设计要素为:

(1) 工件轴线与摆动中心轴的轴线应垂直相交, 工件轴线摆动平面与砂轮磨削平面应垂直相交, 为了达到上述目的, 要制定合理的零件精度要求, 并采用正确的设备装配工艺。即应使下式成立:

$$\frac{R}{\cos \phi} - \sqrt{R^2 - de - e^2} \leq \Delta$$

其中 R ——球面销球体半径

d ——球面销圆柱部分的直径

e ——球面销轴线与摆动中心轴的垂直距离

ϕ ——球面销轴线摆动平面与砂轮磨削平面夹角的余角

Δ ——球面轮廓公差

(2) 工件可以作离开或移向砂轮的运动, 以保证可以加工出不同半径的球面。

(3) 要有一套灵活的摆动装置, 以保证形成完整的球面。

(4) 要有一套安全方便的砂轮修整装置。

2.6 本章小结

(1) 在分析摆旋法磨削高精度球面成形原理的基础上, 确认了球面形成的两个必要条件: 第一, 工件轴线与摆动中心轴的轴线垂直相交, 第二, 工件轴线摆动平面与砂

轮磨削平面垂直相交。

(2) 研究了球面的成形过程, 以及磨削时工件端面经历的圆台——圆锥——圆锥+球面——球面的变化过程。

(3) 分析了球面轮廓误差形成的原因及形成过程。估算了误差值, 推导了误差控制公式:

I、工件轴线与摆动中心轴轴线异面垂直时的加工误差 Δ_1 为

$$\Delta_1 \leq R - R_1 = R - \sqrt{R^2 - de - e^2},$$

控制误差的公式为

$$e \leq \frac{\sqrt{d^2 + 8R\Delta - 4\Delta^2} - d}{2}$$

II、工件轴线摆动平面与砂轮磨削平面不垂直时所产生的误差 Δ_2 为

$$\Delta_2 \leq \frac{R}{\cos\phi} - R$$

控制误差的公式为

$$\phi \leq \arccos \frac{R}{R + \Delta}$$

III、摆旋法磨削球面的综合误差 Δ_3 为:

$$\Delta_3 \leq \frac{R}{\cos\phi} - \sqrt{R^2 - de - e^2}$$

综合误差的控制公式为

$$\frac{R}{\cos\phi} - \sqrt{R^2 - de - e^2} \leq \Delta$$

利用上式控制倾角 ϕ 和偏心距 e 避免球面轮廓误差超出公差范围。

第三章 球面销磨削设备的研制

摩擦学球面销是一个具有特殊形状的零件,加工球面销的设备必须从球面销的特殊形状和摩擦学研究的特定需要出发进行设计。由第二章可知,摆旋法的加工表面为球面,但可以获得的球面半径的范围及加工表面的精度与设备的总体设计、设备零部件的结构形状、设备制造、装配有很大关系。本文从摩擦学试验需要出发,根据摆旋法磨削球面的原理研制球面销磨削设备。力求使设备安全、可靠、简单实用。

3.1 设备的总体设计^{[59][60]}

设备装配图如图 3.1 所表示,底板 21 支撑了整个设备,支架 6 固联于底板,其上通过螺钉安装横板 4,砂轮电机 40 固联于横板的上方,砂轮 36 安装在电动机轴上。与底板直接相联结的还有拖板 28,拖板底盘通过螺钉固定于底板上,通过操纵拖板手轮,可使拖板具有燕尾导轨^[61]的滑板处于不同位置,滑板上安装有一摆动中心轴,摆动板 30 通过轴承套在摆动中心轴上,因此,摆动板可绕摆动中心轴回转,由于回转的角度一般小于 180 度,所以,所做回转运动也是一种摆动,摆动板上安装有工件电机 42,工件电机通过钻夹头驱动工件转动。由于工件与工件电机联结成一体,所以工件除了绕自身轴线(即工件电机轴线)旋转外,还绕摆动中心轴摆动。摆动中心轴成为工件摆动的中心,摆动中心轴中心到砂轮的距离即为所加工工件球面的半径。

在设计时,注意了零件的相互避让,砂轮最底点高于作为摆动中心的摆动中心轴;摆动中心轴中心与砂轮磨削面的空间最小距离可以为零,最大距离可以达到 100mm。即使砂轮磨损或修整变薄后,摆动中心轴中心与砂轮磨削面的距离还可以保持为零,这是因为,本设备采用了砂轮上置形式,拖板滑板、摆动板及摆动中心轴在砂轮下可以自由前后移动,拖板的一部分甚至可以运动到横板 4 和两个支架 6 所形成的空腔内。

砂轮的旋转、工件的旋转、工件的摆动使工件端面在加工后成为球面,摆动中心轴随拖板的滑板移近或离开砂轮,摆动中心轴和砂轮的空间距离可以在 0 到 100mm 范围内变化,由于工件端面与砂轮是接触的,所以,从理论上说,所加工的球冠半径将在 0 到 100mm 范围内任意变化。为了保证销试样具有一定刚度,摩擦学试验所用销试样的直径一般大于 8mm,所以本设备完全满足加工小曲率半径试样的要求。而最大球冠半径达到 100mm,也能够满足常规摩擦试验的需求。

本设备利用平型砂轮的平面磨削,利用平面磨削的优点是,在不使用变频器的情况

下，可以很容易获得不同的砂轮线速度，便于调整磨削时的工艺参数，进行工艺试验。

设备上设计有砂轮修整装置，用于修整砂轮，可以减轻砂轮高速旋转所引起的振动，也可以通过砂轮的修整，保持砂轮的锐利，提高加工质量。

本设备工件采用钻夹头 19 进行装夹。

设备容易磨损的部位采取磨损补偿措施^{[62][63][64]}。本设备砂轮电机为三相电动机，速度为 2800r/min，为了保证安全，在设备上安装了砂轮防护罩盖。

本设备可直接置于桌面或其它台面使用，设备底板底面上加工有宽槽，有利于提高底板和桌面、工作台台面的接触稳定性。在整个试用过程中，虽然底板未与木质桌面固联，未发现设备因振动、磨削、或装卸工件而产生的任何位置变动。

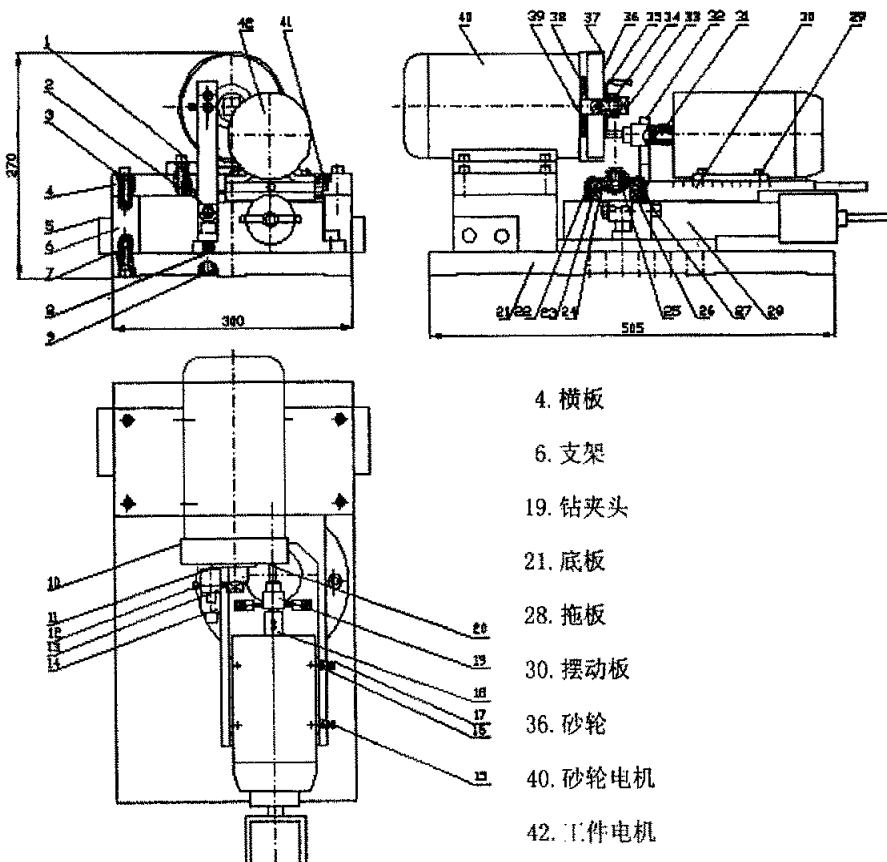


图 3.1 设备装配图

利用该设备可以加工摩擦学试验研究所需要的不同材料，不同半径的球面销试样。设备总体尺寸不大，结构紧凑，功率消耗 1kw 以内。设备照片如图 3.2 所示。

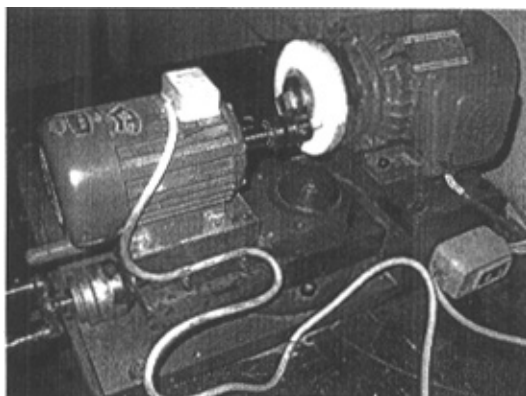


图 3.2 设备照片

3.2 砂轮的安装与固定

如图 3.3 所示,本设备所用砂轮 36 直接安装于电动机 40 的轴上,减少了传动环节,有利于节约成本和减少振动。

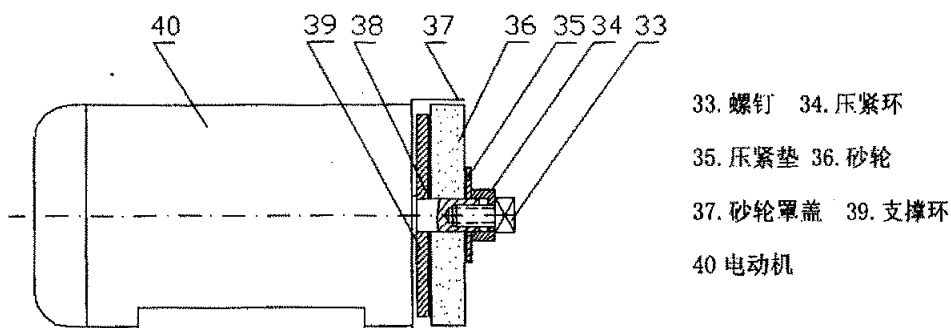


图 3.3 砂轮的安装和固定

砂轮装夹在支撑环 39 和压紧垫 35 之间,在砂轮与压紧垫 35 之间放有非金属软质垫片,防止在夹紧砂轮时将砂轮压坏,在支撑环与砂轮之间也放置了非金属软质垫片,起到保护砂轮的作用。在电动机轴上,沿轴向加工了螺纹孔,螺钉 33 在拧入螺纹孔时,通过压紧环 34、压紧垫 35、及非金属软质垫片将砂轮压紧。电动机正向旋转,螺纹孔的螺纹方向为左旋,因此,在工作过程中,螺钉不会自动松开和脱落,不仅如此,在一定程度上,螺钉 33 的压紧力还会有所加大,为了确保安全使用,充分利用电动机端盖上的螺钉安装了砂轮罩盖 37。

由材料力学可知，脆性材料的抗拉强度很低，所以不适宜承受拉应力，在多数机械加工过程中，利用砂轮的外圆进行磨削，由理论力学分析可知，这种情况下，砂轮主要承受的是压应力。但是，本设备利用平型砂轮 36 的平面进行磨削，很容易在砂轮内部产生拉应力，为了避免在砂轮内出现拉应力，在砂轮的背面安装支撑环 39，支撑环外径接近砂轮的外径，支撑环内孔与电动机轴的配合是过盈配合，而砂轮内孔与电动机轴的配合是间隙配合，因此，在磨削过程中，砂轮沿轴线方向主要承受压应力，充分发挥了脆性材料耐压的特点。由优质钢材制成的支撑环 39 承受了磨削压力所引起的弯矩和拉应力。

3.3 工件的安装与固定

如图 3.3 所示，本设备工件 20 安装在钻夹头 19 上。

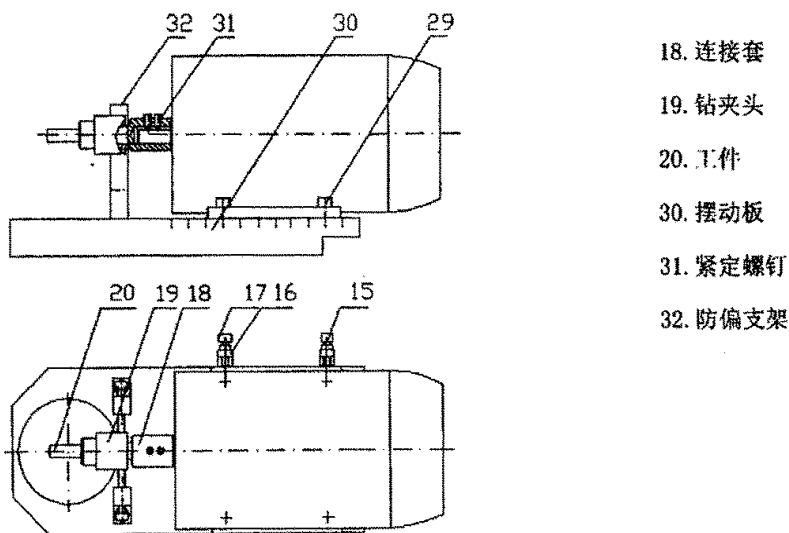


图 3.4 工件的安装和固定

钻夹头 19 中心部位有一锥度孔（莫氏锥孔），连接套 18 一端是圆锥体，另一端中心沿轴向加工有圆柱孔，连接套 18 的圆锥体端插入钻夹头的锥孔，另一端套在驱动工件转动的电动机的轴上，因此，通过连接套将钻夹头和工件电动机连接起来。

通常情况下，在连接套的孔壁应加工键槽，通过键连接将连接套与工件电机轴连接起来，但是，由于工件电机轴的直径较小（11mm），相应地，连接套的孔径也比较小，且连接套的孔为盲孔，在孔壁上加工键槽，比较困难，所以，本设备采用两只紧定螺钉

31 将连接套固定于工件电机轴上。钻夹头的圆锥孔为莫氏锥孔，具有自锁作用，所以在施加一定的压力后，钻夹头将被固定于连接套上。

由于工件电机的直径较小，为了减小在加工过程中的电机轴的弯曲变形量，在钻夹头的两侧各安装了一只防偏支架 32。防偏支架底部固定于摆动板 30 上。调整防偏支架的螺钉，使两只螺钉轻轻接触钻夹头的外圆。工件、钻夹头、连接套、电机轴组成了一根刚性的悬臂梁，在磨削力作用下，会发生弯曲变形，当有了螺钉作为支撑后，其变形量将减小，对于提高加工精度是有利的。

3.4 摆动装置

摆动装置如图 3.5 所示，主要包括摆动中心轴 50、摆动板 30 等零件。

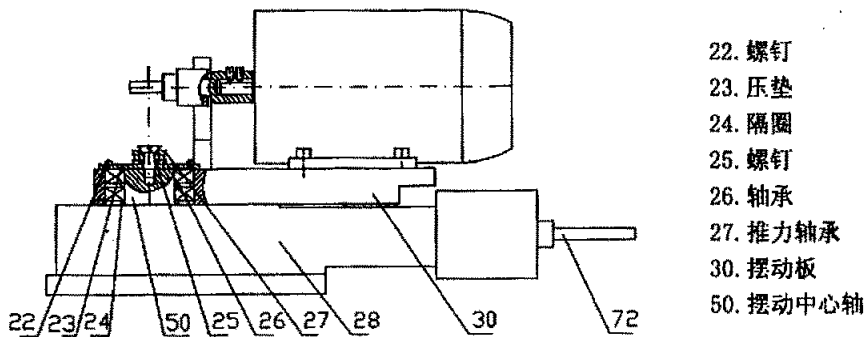


图 3.5 摆动装置

摆动中心轴 50 固定于拖板的滑板上，可随滑板来回移动；摆动板放置于拖板的滑板上，同时，摆动板通过两盘轴承 26 可绕摆动中心轴作转动，由于转动的角度一般小于 180 度，所以实际上是摆动。在切削力作用下，摆动板不会发生沿摆动中心轴轴向的窜动，这是因为螺钉 25 拧入销轴的螺纹孔后，通过推力轴承 27 及压垫 23 压住了摆动板。使用设备的过程中，两只轴承也不会发生轴向的窜动，这是因为，螺钉 22 把两只轴承 26 及其隔圈 24 压在了滑板的上表面。总之，摆动机构可以灵活摆动，又没有轴向间隙，不存在窜动的可能。

压垫 23 除了具有压紧作用外，还可以防止灰尘、磨屑进入向心滚动轴承，产生磨损。为了减轻磨损，在轴承内加入润滑脂。

3.5 砂轮修整装置

砂轮平面修整装置

如图 3.5 所示，修整杆 13 的支座 14 通过两只螺钉 80 固定在拖板的滑板 28 上，螺栓 2 将修整杆联结在修整杆支座上，修整杆可以绕螺栓按图示箭头方向摆动，由于金刚笔 11 被螺钉 12 夹紧在修整杆的上端，所以，当通过螺钉 70 使修整杆摆动时，金刚笔将砂轮的端面修平，修整时也可以通过转动螺钉 71 达到控制摆动速度的目的，实现砂轮的精修。金刚笔向砂轮移动的进给运动，通过转动拖板手轮 72 实现。

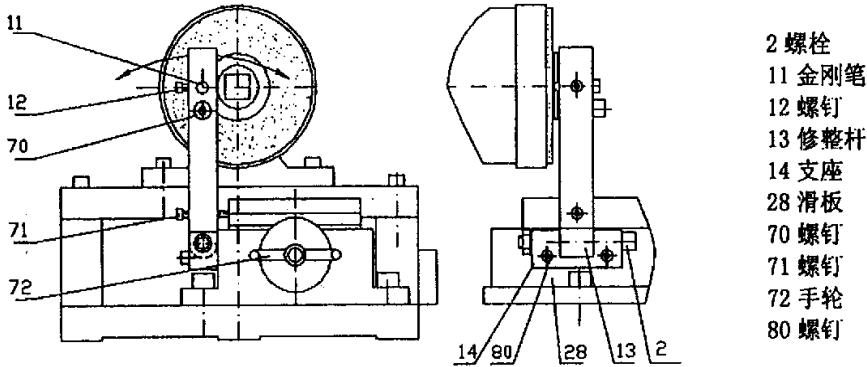


图 3.6 砂轮平面修整装置

砂轮圆周修整装置

如图 3.7 所示，砂轮圆周的修整装置是一个可拆卸装置，它安装在拖板的滑板 28 上，金刚笔 11 被螺钉 81 夹紧在修整套 82 内，修整套的下端是螺纹，修整套通过螺母 83 固定在滑板上。

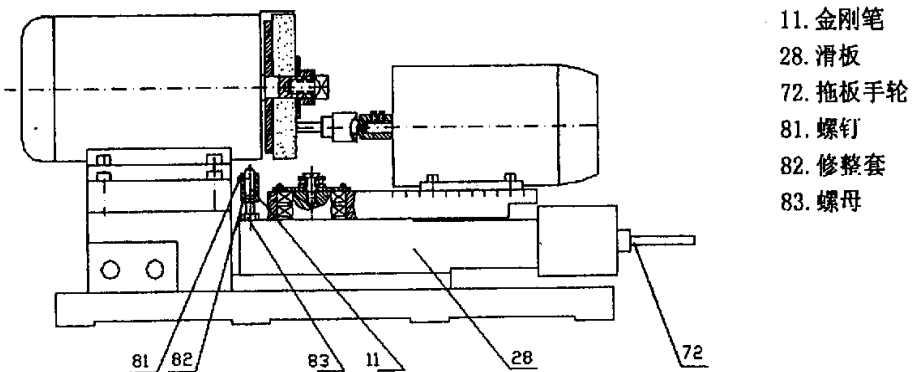


图 3.7 砂轮圆周修整装置

修整前先转动拖板手轮 72, 使滑板右移, 直到可以很方便地将修整装置安装于滑板上, 修整套的高度是可以调整的, 通过螺纹调整修整套的高度, 当金刚笔与砂轮的相对位置合适后, 通过螺母将修整套锁定在该位置。转动手轮使滑板向左移动, 修整砂轮。砂轮修整后使滑板右移, 卸下修整装置。下一次修整时, 应增加修整套高度, 再通过螺母将修整套锁定。

3.6 设备的装配工艺

由第二章可知, 只有当工件轴线与工件摆动所绕的摆动中心轴的轴线垂直相交才能得到准确的球面, 因此, 在安装调试时应保证两轴线的垂直相交。为此, 加工两只校正芯棒 84、85 和两块平板 86、87。

由图 3.5 可见, 摆动装置的摆动中心轴与摆动板内孔之间安装有上、下两只 7000107 轴承 (GB276-64) 轴承 26。为了确保上述两轴线的垂直, 按下述工艺步骤装配摆动装置, 如图 3.8 所示。第一步, 将钻夹头 19 和联结套 18 安装于工件电机 42 上, 将加高板 88 安装于摆动板 30 上。将调整螺钉 17 及调整螺钉座 16 安装到加高板 88 的侧面。如在加工过程中不用加高板, 则将调整螺钉及调整螺钉座直接安装到摆动板 30 的侧面。第二步, 将隔圈 24 及下轴承 26 安装于摆动中心轴 50 外圆与摆动板 30 内孔之间。第三步, 将芯棒 84 安装于上轴承的位置,。在加工芯棒 84 时, 已使芯棒 84 的内孔与外圆与 7000107 轴承的内孔与外圆完全一致。第四步, 将芯棒 85 的小端 (直径为 10mm) 夹紧在钻夹头 19 内, 其大端处于钻夹头之外。在加工芯棒 85 时, 已使芯棒 85 的大端外圆与芯棒 84 的外圆完全一致。第五步, 用两平板 86、87 夹紧芯棒 84 和 85, 如图 3.8 (10) 中右图所示。不难理解, 这时两芯棒 84、85 的的轴线是在同一平面内。由于摆动板 30、加高板 88、拖板 28 及设备底板的上下平面有平行度要求, 工件电机 42 的轴线与工件电机底平面也有平行度要求, 因此, 当设备底平面处于水平位置时, 工件电机的轴线是水平的, 而在制造设备时注意使摆动中心轴 50 的轴线处于竖直位置, 所以, 两芯棒 84、85 的的轴线也是相互垂直的。第六步, 旋转四只调整螺钉 17, 使其顶端刚好接触加高板 88 的侧面 (当不用加高板时, 使调整螺钉顶端刚好接触工件电机的底部侧面), 并通过锁紧螺钉 90 使调整螺钉固定于该位置。第七步, 将工件电机 42 固定于加高板 88 上 (当不用加高板时, 将电机固定于摆动板上)。第八步, 从钻夹头 19 上卸下芯棒 85, 从摆动中心轴 50 上卸下芯棒 84, 将上轴承安装好, 并装配其它零件。

芯棒 84 上加工有横孔, 利用横孔可以方便地将芯棒从摆动中心轴上卸下。在维修

设备时，利用滑板 28 上的预留孔可以将摆动板 30 卸下。

按上述工艺步骤装配摆动装置，可以推知，工件轴线与其摆动轴线是相互垂直的。

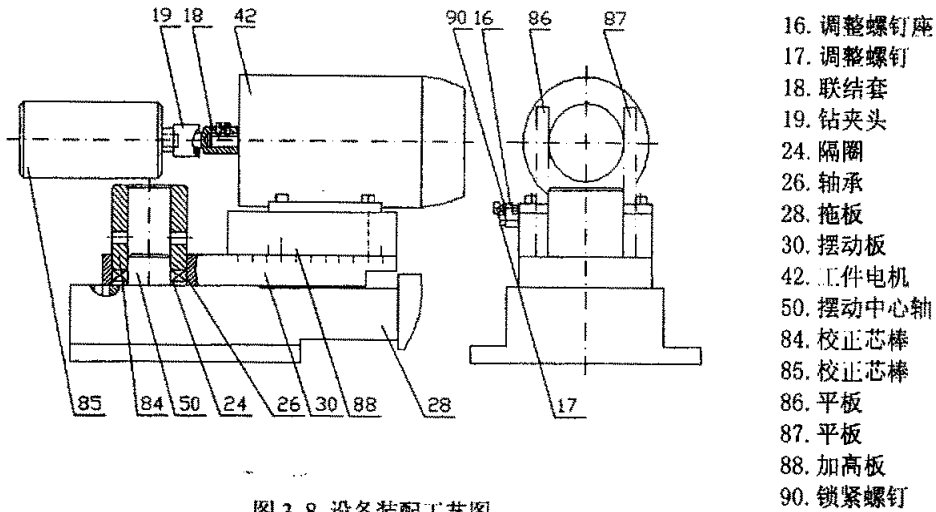


图 3.8 设备装配工艺图

第二章分析表明，应使工件轴线摆动平面与砂轮磨削平面垂直相交。由于设备的底板、拖板、摆动板、加高板等零件上下表面都经过磨削加工，上下表面相互平行，而工件电机的轴线与工件电机的底平面也是平行的，所以当设备底板调整水平后，工件轴线及其摆动平面水平的。同理，砂轮电机轴线即砂轮回转轴线是水平的，所以当砂轮端面修整成平面后，该平面垂直与水平面。因此，工件轴线摆动平面与砂轮磨削平面垂直相交。

3.7 砂轮磨削线速度的调整

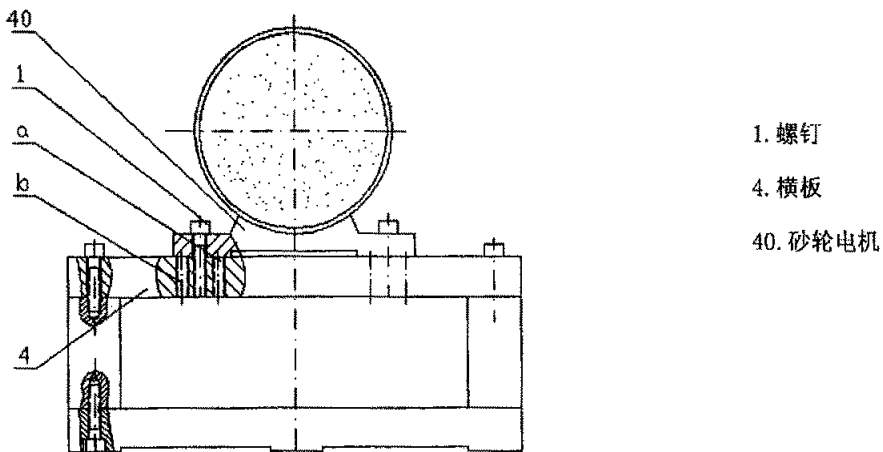


图 3.9 砂轮线速度调整图

砂轮上各点的线速度是不同的,其中心点的线速度为零,而边缘处线速度达到最大,当砂轮在不同点与工件接触时,砂轮磨削工件的线速度是不同的,调整砂轮线速度对于优化加工工艺、提高加工质量是必要的。

图 3.9 显示,在使用本设备时,当砂轮电机 40 被螺钉 1 固定于横板 4 中 a 或 b 位置时,砂轮与工件的接触点位置将发生变化,可以使砂轮磨削线速度变小或变大。

3.8 本章小结

(1) 设计并制造了基于摆旋法磨削球面原理的球面磨削加工设备。设备设计科学、结构合理,可以加工的球面半径在 4~100mm 之间,可以加工摩擦学试验研究所需的钢、铜、合金、塑料等不同材料,多种半径的球面销试样。

(2) 在球面磨削加工设备中设计了特殊的摆动结构,采用两只向心球轴承和一只推力球轴承使摆动装置运转灵活,又不会轴向窜动,满足了高精度加工需要。

(3) 研制了独特的砂轮修整装置。利用拖板的移动、修整杆的摆动、螺纹的转动可以修整砂轮的平面和圆周,为提高加工质量和减小因重量分布不均而引起的振动提供了保证。

(4) 设计了设备的装配方案,利用两只校正芯棒和两块平板严格保证工件轴线与摆动中心轴轴线垂直相交,减少球面轮廓误差。

第四章 摩擦学球面销试样的制备与检测

为进一步考察所研制的球面销磨削设备的实用性,完善制备工艺,应用该设备,采用不同的砂轮对不同的材料进行制备试验,探索尺寸精度和表面质量的控制和检测方法。

4.1 磨削砂轮的选择

由于加工球面销的过程有别于普通磨削加工,磨削不同材料、不同要求的球面销,应选用不同的砂轮。只有正确选择砂轮才能加工出符合要求的球面销。根据试验总结出如下的选择原则。

(一) 砂轮磨料的选择

磨料的选择主要与被磨球面销的材料及其热处理状态有关。表 4.1 为各种可供选择的砂轮磨料类型及其适用范围^[65]。

表 4.1 磨料的特点及其适用范围

磨料名称	代号	特点	适用范围
棕刚玉	GZ	有足够的强度、韧性大,抗弯强度高,价格便宜	磨削碳素钢球面销,特别适于磨未淬硬钢和调质钢及粗磨
白刚玉	GB	比棕刚玉硬而脆,自锐性好,磨削力和磨削热量小,价格比棕刚玉高	磨削淬硬钢,高速钢球面销
铬刚玉	GG	硬度与白刚玉相近而韧性好	磨削合金钢、锰钢等高强度材料球面销及粗糙度要求低的球面销
微晶刚玉	GW	强度高、韧性和自锐性好	磨削不锈钢、轴承钢球面销
黑碳化硅	TH	硬度比白刚玉高,但脆性大	磨削铸铁、黄铜、软青铜、以及橡皮、塑料等非金属球面销
绿碳化硅	TL	硬度与黑碳化硅相近,而脆性更大	磨削硬质合金、玻璃球面销
金刚石	JR JT	硬度最高,磨削性能好,价格昂贵	磨削硬质合金、玻璃球面销

(二) 砂轮粒度的选择

- a. 球面销材料为有色金属和软材料时,应该选择粒度较粗的砂轮以免砂轮过早塞实。
- b. 磨削导热性差的材料时,应选粒度较粗的砂轮
- c. 由于本设备磨削加工时,砂轮和工件接触面积不大,所以,比一般平面磨削时的砂

轮粒度可细一点。

(三) 砂轮硬度的选择

- a. 当球面销为软材料时, 选用较硬的砂轮, 磨削硬材料时, 选用较软的砂轮。对于有色金属等特别软的材料, 由于磨屑容易堵塞砂轮, 所以选较软的砂轮。
- b. 磨削导热性差的材料, 如不锈钢、硬质合金, 因不易散热, 为避免工件表面发生烧伤, 要选用较软的砂轮。

4.2 球面销磨削工艺参数的选择

球面销的加工既要求外形尺寸又要求表面质量, 所以必须选择合适的工艺参数。

a. 砂轮磨削线速度

磨削表面是由大量离加工基准距离相同或相近的磨粒的刻痕所构成。如果单纯从几何的因素考虑, 可以认为, 在单位面积加工面上的刻痕愈多, 光洁度愈好, 或者说, 通过单位面积加工面的磨粒愈多, 光洁度愈高。从这个概念出发, 可以得出下述结论, 砂轮磨削线速度愈高、工件线速度愈低、摆动速度愈慢, 光洁度愈高。试验也证明, 提高砂轮磨削线速度, 有利于提高磨削效率并降低表面粗糙度。

b. 工件旋转速度

从理论上讲, 单位时间里被磨削表面通过的磨粒越多, 也就是被磨削的重复率越高, 因此, 工件的旋转线速度愈低, 表面光洁度越高, 所以在不影响加工效率的条件下, 应采用较低的工件速度。必要时, 可配备变频器以实现工件的调速。

c. 工件摆动速度

根据球面的形成原理和图 4-1 不难理解, 在磨削球面销的过程中, 球冠的半径由大到小而变化, 因此, 每次要磨削去的余量是夹在两圆之间的部分, 其各处厚度是不等的, 在工件轴线处加工余量最小, 离开轴线愈远的部位, 加工余量愈大, 为了比较均匀地切削, 摆动速度应该是变化的, 在磨削接近轴线表面时, 摆动速度应取较大值, 在磨削离开轴线较远的部位时, 摆动速度应取较小值。

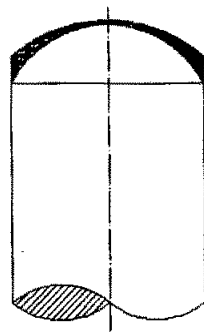


图 4.1 磨削余量分布示意图

4.3 球面半径的控制方案

为保证按应用要求磨削出规定尺寸的球面销，研究制定球面半径控制方案。

操纵拖板上的手轮 72（参见图 3.5、图 4.2），使滑板 28 后移（即作离开砂轮 36 的运动），钻夹头 19 及摆动中心轴 50 也随之后移。再使钻夹头 19 轴线与砂轮相倾斜，这时可以很方便的装卸工件 20。

如图 4.2 (a) 所示，钻夹头端面到摆动中心 O 的距离为定值 15mm（设备参数），设：工件端面的磨削余量为 t ，所要求的球面的半径为 R ，则应使工件端面到钻夹头端面的距离 Y 为

$$Y = 15 + R + t \quad (4-1)$$

用深度尺（97）控制 Y 的值，即调整试样在钻夹头（19）中的位置。

夹紧工件后，使工件轴线垂直于砂轮，并将工件移向砂轮，使工件与砂轮接触，记下此刻度盘上的刻度 Z_1 。刻度盘每转一格，工件向前（或向后）砂轮移动 0.01mm，磨削终止时即磨削完所留加工余量 t 时的刻度 Z_2 ，由下式求出：

$$Z_2 = Z_1 + \frac{t}{0.01} \quad (4-2)$$

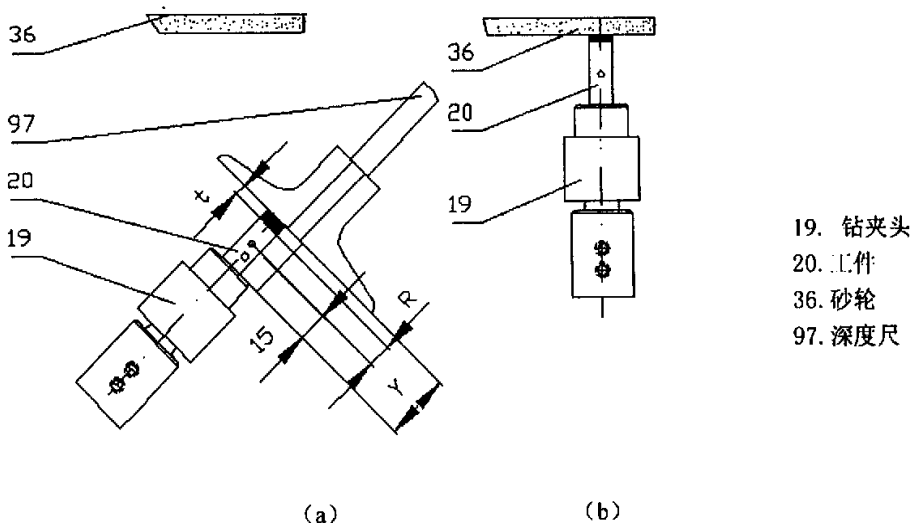


图 4.2 球冠半径的控制

为提高球面尺寸的控制精度，可以在加工过程中对球冠半径进行测量。避免工件毛坯端面如存在不平等缺陷可能产生的误差。

4.4 测量球冠半径的圆柱端面法^[66]

由于摩擦学试验机试样装夹有要求, 销试样直径一般小于 10mm, 因此摩擦学试验用的球面销试样端部球面实际上多数为球冠, 其表面圆弧所对应的圆心角小于 180 度, 用常规测量工具测量球冠半径比较困难。为了满足摩擦试验的需要, 研究并采用了圆柱端面法测量球冠的半径。

图 4.3 是利用圆柱端面测量球冠半径的检具。制造时, 测量座与球冠接触的孔口不倒角。为增加耐磨性测量座可选用 T7A 工具钢制造, 热处理硬度 HRC53-58。

多次改变与球面的接触位置进行测量, 得到多次重复试验结果, 然后进行平均计算, 得到准确的 R 值。

为检验该检具的测量精度, 用该检具检测标准钢球的半径, 结果列于表 4.2。结果表明本文采用的方法具有较小的测量误差, 能满足尺寸控制的要求, 完全可以用于球面加工时的尺寸控制。

表 4.2 自制球冠半径检具测量标准钢球的结果 (单位:mm)

标准球半径	R5.500	R6.350
测量值	R5.495	R6.354
绝对误差	0.005	0.004
相对误差	0.091%	0.063%

为进一步验证该检具的测量精度, 还采用如图 4.4 所示的 Taylor Hobson 轮廓仪测量球冠表面形貌, 某次测量结果如图 4.5 所示。然后根据所获得的表面轮廓图, 用三点定圆法计算出球冠半径, 与本文采用的检具测量结果进行对比。结果见表 4.3。结果进一步表明:

两种测量方法测量结果接近, 由于表面轮廓仪价格高, 测量费用较大, 不适宜用于加工过程中的测量。因此, 自行设计的球冠半径检具具有很大的实用价值。

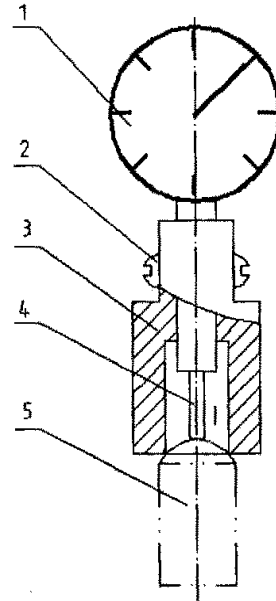


图 4.3 球冠检具

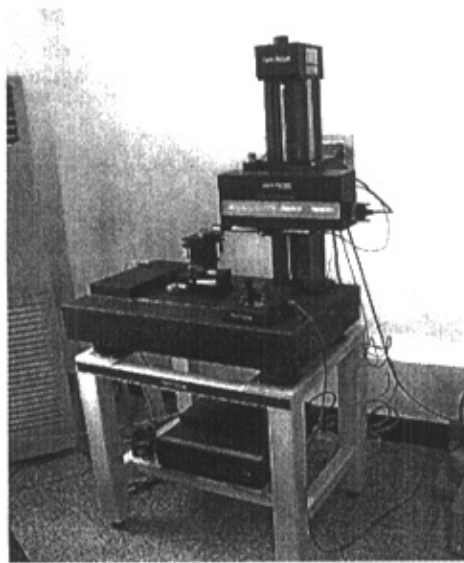
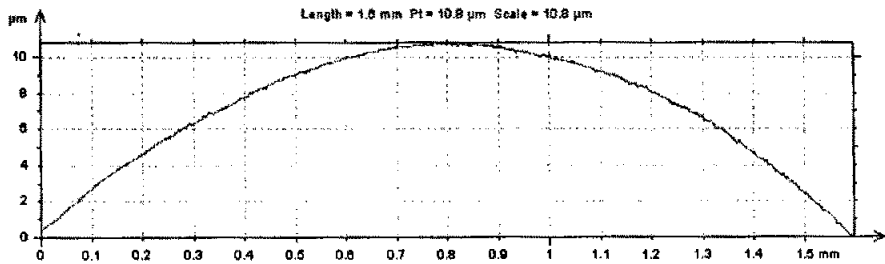
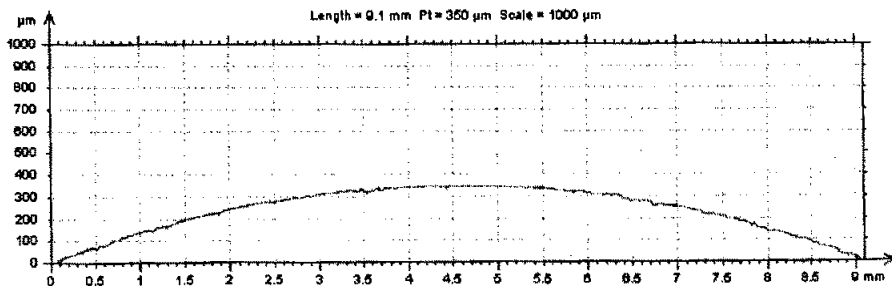


图 4.4 Taylor Hobson



(a)



(b)

图 4.5 球面销的表面轮廓

表 4.3 两种半径测量方法结果对比 (单位: mm)

试样编号	材料	圆柱端面法	Taylor Hobson 轮廓仪
17-1a	硬质合金	R29.98	R29.99
10-7	UHMWPE	R29.73	R29.74

4.5 球面销的质量测定

用扫描电子显微镜对所加工的球面进行观测,并用 SPIP 图像分析软件进行表面形貌分析;用表面轮廓仪对球面进行表面粗糙度测定。表 4.4 列出了本设备加工 6 种材料球面销的尺寸精度和表面质量。

表 4.4 磨削设备加工球面销的质量

编号	材料	砂轮材料	球冠公称半径 (mm)	球冠实测半径 (mm)	表面粗糙度 (R_a) (nm)
1	硬质合金	绿碳化硅	30	30.01	90.6
2	不锈钢	白刚玉	30	30.01	197.8
3	不锈钢	白刚玉	20	20.02	204.6
4	UHMWPE	黑碳化硅	30	30.01	188.7
5	UHMWPE	黑碳化硅	20	20.02	188.2
6	A3 钢	棕刚玉	30	30.01	154.7
7	A3 钢	棕刚玉	20	20.02	168.4
8	45 号钢 (淬火)	白刚玉	30	30.01	169.8
9	45 号钢 (淬火)	白刚玉	20	20.02	187.9
10	黄铜	黑碳化硅	30	30.01	237.1
11	黄铜	黑碳化硅	20	20.02	248.9

图 4.6 为用扫描电子显微镜放大 1000 倍的硬质合金的表面形貌和 SPIP 软件分析被测表面空间三维粗糙度的结果。结果表明,试样表面的粗糙度没有明显的各向异性,尺寸均匀。图 4.7 是用 SPIP 软件对球面不同方向进行表面形貌分析的结果。

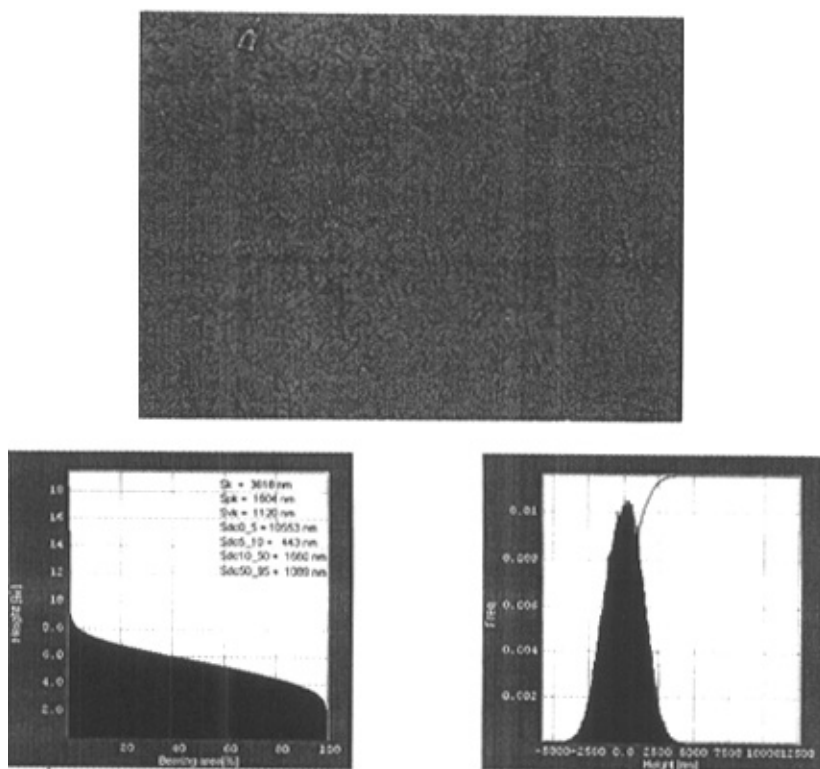


图 4.6 放大 1000 倍的硬质合金球面销表面形貌

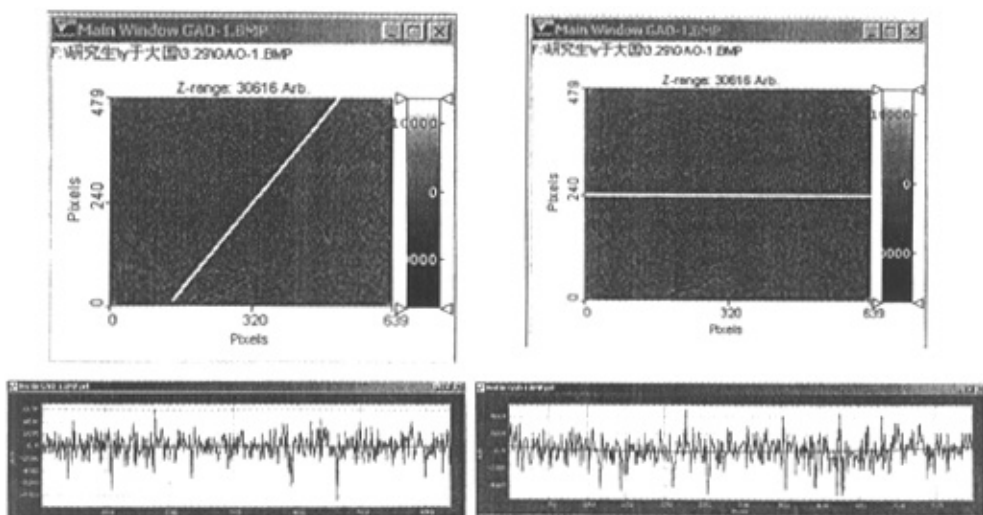


图 4.8 SPIP 软件对球面不同方向进行表面形貌分析的结果

图 4.9 为用扫描电子显微镜放大 150 倍的不锈钢球面销的表面形貌, 由图看出, 表面无裂纹等缺陷, 各处粗糙度比较接近。

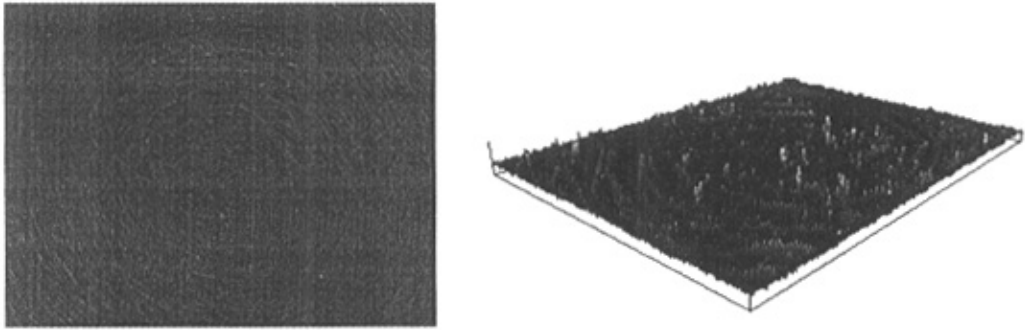


图 4.9 放大 150 倍的不锈钢球面销表面 (左) 和三维表面形貌 (右)

4.6 本章小结

(1) 阐述了磨削不同材料、不同要求球面销时, 砂轮材料、硬度、粒度的选用原则。

(2) 介绍了球面销磨削工艺参数的选择原则。提高砂轮磨削线速度, 有利于提高磨削效率并降低表面粗糙度。在不影响加工效率的条件下, 应采用较低的工件旋转速度。在磨削接近轴线的表面时, 摆动速度应取较大值, 在磨削离开轴线较远的部位时, 摆动速度应取较小值。

(3) 探讨了球面销球体半径的控制方案。装夹工件时, 控制工件磨削端面到钻夹头端面的距离, 磨削过程中, 依据手轮刻度值控制切削量, 即可实现对于球体半径的控制。

(4) 研制了检测球冠半径的简易检具并与用轮廓仪求得的球冠半径进行了对比

(5) 采用 6 种不同材料加工了不同半径的球面销, 经扫描电镜、轮廓仪及所研制的工具检测加工精度较高, 表面质量较好。

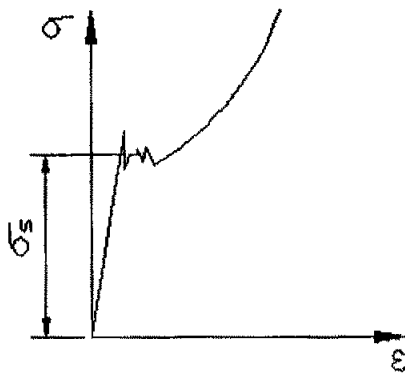
第五章 球面销试样用于摩擦学接触机理研究

摩擦学基础理论和试验研究中涉及最广泛的是摩擦表面间的接触问题,球形微凸峰模型是研究接触理论最为常用的模型^[67],球面销磨削设备及其所制备的多种材料和不同半径的球面销,为广泛而深入地开展摩擦学试验和研究提供了条件^[68]。本章的重点是研究不同尺寸单个球体的接触、变形和摩擦机理,试图将研究结果推广到基于球体微凸体假说的接触摩擦机理。

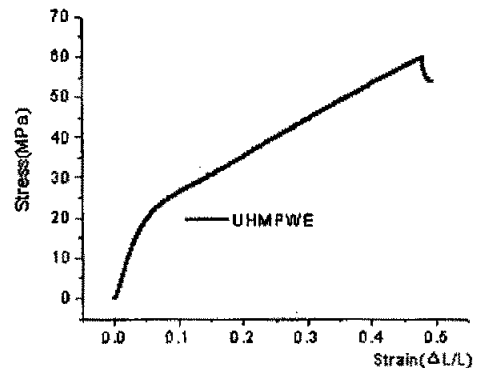
5.1 球体与平面的接触应力分布曲线

接触和接触应力分布是摩擦学表面接触理论研究的一个重要问题。早期的摩擦学文献中,为了简化计算,多数局限于弹性变形条件下的应力分布,其内容以 Hertz 理论为主。显然,这与摩擦过程的真实应力状态有着较大的差别。

材料力学研究表明,当材料的压应力 σ 达到材料的屈服极限 σ_s 时,材料的应力应变曲线 (σ - ε 曲线) 将出现一个转折点 (图 5.1), 当应力大于 σ_s 时,材料发生塑性变形,塑性变形阶段曲线的斜率与弹性变形阶段曲线的斜率有较大的差别。金属材料的弹塑性变化点 (屈服点) 比聚合物明显。



(a) 低碳钢压缩 σ - ε 曲线



(b) UHMWPE 的压缩 σ - ε 曲线

图 5.1 材料压缩应力应变曲线

球体与平面接触时,球面在接触圆范围内承受压应力。由于球体的结构特征,在接触区域内的变形和应力呈现不均匀分布。一些微区处于弹性变形,一些微区处于塑性

变形, 一些区域处于混合变形状态(过渡区)。以往的应力分析都只采用一个不变的弹性模量 E 来计算接触圆上的应力分布规律, 得到的结果是仅仅与球体的几何尺寸相关的椭圆分布。

本文利用武汉材料保护研究所开发的真实接触应力分析软件 SIMCON, 对超高分子量聚乙烯(UHMWPE)球面与光滑平面接触时的应力分布进行计算分析。该软件采用超高分子量聚乙烯材料真实应力-应变曲线(图 5.1 (b))作为应力计算基础, 类似于有限元算法, 考虑 256×256 个微区的弹性或塑性变形, 计算出球体与平面接触时的真实接触应力分布曲面。图 5.2 所示为其中的一条应力分布曲线。

图 5.2 中曲线的顶部为一线段, 顶部线段几乎是水平的, 该线段对应于塑性变形区, 它所对应的部分, 材料已发生屈服, 图 5.2 反映出本试验所用 UHMWPE 材料的屈服极限大约是 18.3 MPa。图 5.2 的其余曲线分别对应于弹性变形区和过渡区。

根据 UHMWPE 球体与平面真实接触应力分布可以推知基于球形微凸体模型的接触的有关规律。

(1) 如图 5.3 所示, 接触圆的中心部位是塑性变形区, 接触圆的边缘部位是弹性变形区, 在塑性变形区与弹性变形区之间的圆环是过渡区。各微区应变不同, 对承受负荷的贡献也不同, 在摩擦过程中也会有不同的作用。在本章 5.5 节将看到, 当接触区域以塑性变形为主时, 摩擦系数趋近于一个常数, 当接触区域以弹性变形为主时, 摩擦系数随接触区域上平均接触应力的增加而减小。

(2) 在弹塑性变形条件下, 真实接触应力分布曲线不再是很多资料所介绍的椭圆, 曲线

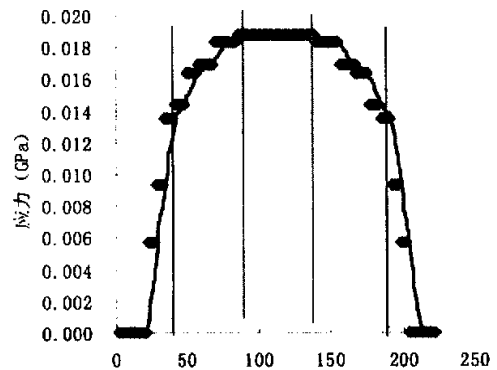


图 5.2 超高分子量聚乙烯压缩应力分布曲线

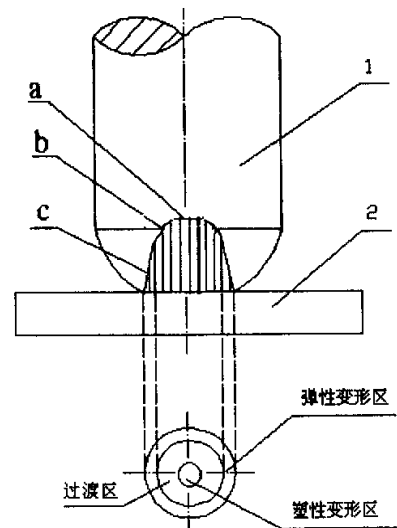


图 5.3 弹、塑性变形接触应力分布

比较复杂。如图 5.3 所示，塑性变形区的接触应力分布曲线是一段水平的线段。弹性变形区的应力曲线如图 5.3 中的曲线 c，其形状和斜率与材料 $\sigma - \varepsilon$ 曲线的变化规律有关。曲线 b 对应于过渡区，其平均斜率随材料的不同，可小于或大于曲线 c 的平均斜率。

(3) 摩擦过程中微观接触表面一般总会有塑性变形存在，因此，接触应力分布规律计算不应该仅采用弹性模量作为材料性能参数，基于单一弹性模量计算得到的接触应力分布结果不能真实反映摩擦面微凸体的表面接触性质，因此，摩擦学接触应力分布规律的研究必须考虑真实应力应变曲线。

5.2 UHMWPE 球面销与钢盘的试验

UHMWPE 材料作为人工关节材料得到日益广泛应用^[69]，也是摩擦学试验研究的热点。销盘试验是研究这种材料摩擦学性能的常用试验方法。本文采用 UHMWPE 材料进行销盘试验，从试验的角度研究其接触规律和摩擦现象。

5.2.1 试验方法及试样

本试验在德国制造的 SST-ST 型销盘试验机上进行，如图 5.4 所示，上试样为盘试样，其材料为 45 号钢，经淬火+低温回火处理。盘试样表面粗糙度为 $R_a0.1$ ，试验前用无水酒精擦净。下试样为销试样。销试样材料为超高分子量聚乙烯，用球面销磨削设备制备不同尺寸的球面。试验前，销试样经过超声波清洗。

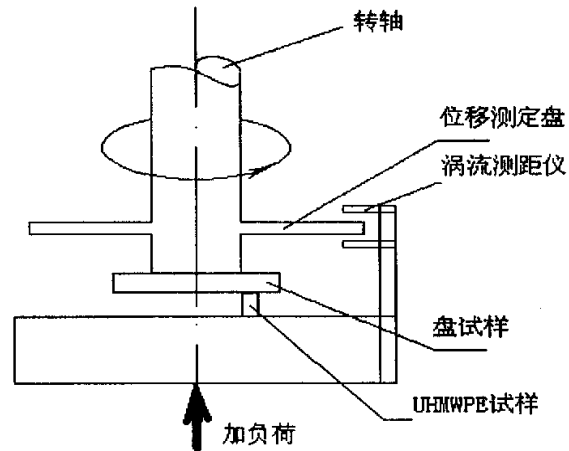


图 5.4 销盘试验示意图

试验中盘试样转动，盘试样转速 100r/min，球面销试样轴线距离盘试样中心的距离为 20mm，相对滑动速度约为 0.2m/s。试验机通过杠杆加载，使球面销和盘试样之间发生相互作用，根据研究要求，施加大小不同的正压力（法向载荷）。试验周期为 5 分钟，摩擦行程为 60m。试验后，在显微镜下测量球面销上的压痕半径 a_d （本文所谓压痕，是法向载荷、摩擦力、短时间轻微磨损共同作用的结果，其基本形状为圆形），并计

算压痕的面积 S_d 。所用显微镜型号为 JLC，目镜 10 倍，物镜 2.5 倍。运用 ImageAnalysis 计算机图像系统采集球面销试样球体及其压痕的图像（见图 5.5），并测量压痕的尺寸作为参考数值。

试验中采用动态扭矩传感器，连续测量摩擦系数随时间变化的曲线，试验数据的动态采集和处理由武汉材料保护研究所开发的“SST-ST 计算机数据处理系统”自动连续进行^[70]。

试验时 UHMWPE 球面销试样分两组，第一组试样的球面半径分别为 R5、R8、R10，对第一组试样所加的载荷分别为 20N、32N、58N。第二组试样的球面半径分别为 R6、R10、R15、R20，对于第二组试样所加的载荷分别为 20N、50N、100N。

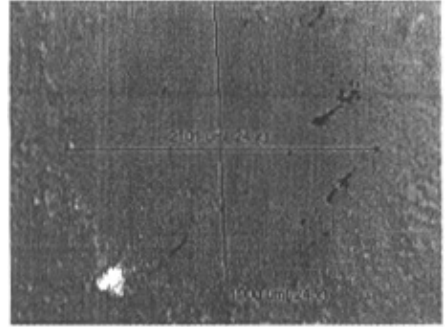


图 5.5 测量压痕尺寸的方法

5.2.2 试验结果

第一组、第二组试样的压痕半径 a_d ，压痕面积 S_d 如表 5.1、表 5.2 所示。

表 5.1 第一组球面销试样 Hertz 半径 a (mm)、压痕半径 a_d (mm)、Hertz 接触圆面积 S (mm²) 压痕面积 S_d (mm²)

W	20			32			58		
R	5	8	10	5	8	10	5	8	10
a	0.592	0.692	0.746	0.692	0.809	0.872	0.844	0.987	1.063
a_d	0.670	0.932	1.093	0.750	0.974	1.203	0.950	1.108	1.365
S	1.100	1.504	1.747	1.504	2.055	2.388	2.237	3.059	3.548
S_d	1.410	2.727	3.751	1.766	2.979	4.544	2.834	3.855	5.851

表 5.2 第二组球面销试样 Hertz 半径 a (mm)、压痕半径 a_d (mm)、Hertz 接触圆面积 S (mm²)、压痕面积 S_d (mm²)

W	20				50				100			
R	6	10	15	20	6	10	15	20	6	10	15	20
a	0.628	0.746	0.853	0.939	0.853	1.012	1.158	1.275	1.098	1.275	1.459	1.606
a_d	0.650	0.850	1.050	1.000	1.000	1.062	1.200	1.525	1.100	1.347	1.600	1.630
S	1.238	1.747	2.285	2.769	2.285	3.216	4.211	5.104	3.788	5.104	6.684	8.099
S_d	1.327	2.269	3.461	3.140	3.140	3.540	4.521	7.302	3.799	5.694	8.038	8.343

在表 5.1、表 5.2 中同时列出了按 Hertz 公式计算得到的 Hertz 接触圆半径 a (简称 Hertz 半径 a) 和 Hertz 接触圆面积 S (简称 Hertz 面积 S)。根据钢的弹性模量 $E_1=200\text{GPa}$, 钢的泊桑比 $\nu_1=0.25$ ^[71] [72], UHMWPE 的弹性模量 $E_2=0.33\text{GPa}$, UHMWPE 的泊桑比 $\nu_2=0.30$ ^[73], 计算得到综合弹性模量为 $E=0.724\text{GPa}$ 。表中计算 Hertz 接触圆面积的公式是:

$$S = \pi a^2 = 0.051R^{2/3}W^{2/3}$$

其中 R 的单位为 mm , W 的单位为 N , S 的单位为 mm^2 。试验得到的摩擦系数曲线见本章图 5.7 至图 5.13。压痕上的平均接触应力 p_d 及其所对应的摩擦系数值见 5.5 节表 5.3。

5.3 球体与平面的接触面积

5.3.1 压痕面积与 Hertz 面积的关系

由表 5.1、表 5.2 看出,

(1) Hertz 半径 a 与 Hertz 面积 S 随球体半径 R 的增加而增加, 随载荷 W 的增加而增加;

(2) 压痕半径 a_d 与压痕面积 S_d 随球体半径 R 的增加而增加, 随载荷 W 的增加而增加;

(3) 就总体而言, 压痕半径 a_d 与 Hertz 半径 a , 压痕面积 S_d 与 Hertz 面积 S 是数值接近, 变化规律基本相同, 但并不完全相等。其原因在于, 本试验测定的“压痕”是滑动摩擦 60m 以后测得的, 存在一定的磨损, 只能是近似的压痕。另外 Hertz 理论假定球体是理想光滑的, 弹性接触, 而且球体不承受切向力即摩擦力, 球体的接触是静态的。所以, 所测得的压痕 S_d 一般略大于 Hertz 面积 S 。但是, 一方面磨损使压痕增大, 另一方面, 实际接触中的弹性变形部分在脱离接触后就消失了, 又使压痕尺寸缩小; 因此, 在本研究的试验条件下, 以“压痕”面积代替 Hertz 接触面积进行近似的理论分析是可行的。

严格地讲, 这里测得的压痕面积 S_d 与摩擦过程中实际接触面积 A_r 还不完全相同, 脱离接触后所测试的压痕或磨斑表面不是一个严格意义上的平面, 还残留着部分弹性回复导致的凸起。因此, 此时的压痕面积 S_d 只能作为真实接触面积 A_r 的参考量来用于理论分析。

5.3.2 压痕面积的数学表征^{[74][75]}

根据实际测得的压痕、载荷、球面尺寸数据,采用数理统计方法,推导压痕面积 S_d 与球体半径 R 及载荷 W 的关系式。

仿照 Hertz 接触圆面积计算公式,构造压痕面积 S_d 对球半径 R 、载荷 W 的回归方程:

$$\tilde{S}_d = c R^{b_1} W^{b_2} \quad (5-1)$$

其中 c 、 b_1 、 b_2 是与试样材料、硬度、弹性模量等有关的常数。以 S_d 表示试验中测得的压痕面积,是一个随机变量, \tilde{S}_d 为由回归方程求出的压痕面积,为一函数值。上式中 \tilde{S}_d 与球半径 R 、载荷 W 是非线性关系,为了求出 c 、 b_1 、 b_2 的值,将上式两边取对数得

$$\ln \tilde{S}_d = \ln c + b_1 \ln R + b_2 \ln W \quad (5-2)$$

令:

$$\tilde{y} = \ln \tilde{S}_d, \quad b_0 = \ln c, \quad x_1 = \ln R, \quad x_2 = \ln W$$

则 (5-2) 式变成

$$\tilde{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 \quad (5-3)$$

亦即

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{y}_1 = b_0 + b_1 x_{11} + b_2 x_{12} \\ \tilde{y}_2 = b_0 + b_1 x_{21} + b_2 x_{22} \\ \dots\dots\dots \\ \tilde{y}_n = b_0 + b_1 x_{n1} + b_2 x_{n2} \end{array} \right. \quad (5-4)$$

式 (5-3)、(5-4) 式具有线形关系,利用最小二乘法,求 b_0 、 b_1 、 b_2 。令

$$y = \ln S_d$$

记

$$Q(b_0, b_1, b_2) = \sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1 x_{i1} - b_2 x_{i2})^2$$

由于 Q 是一个非负二次型,根据多元函数极值的充分条件,知其极小值存在,设当 $b_0 = \hat{b}_0$, $b_1 = \hat{b}_1$, $b_2 = \hat{b}_2$ 时, Q 取得最小值,则 \hat{b}_0 、 \hat{b}_1 、 \hat{b}_2 分别为 b_0 、 b_1 、 b_2 的最小二乘估计值。根据数理统计理论及表一、表二可解出 \hat{b}_0 、 \hat{b}_1 、 \hat{b}_2 。下面具体求解 \hat{b}_0 、 \hat{b}_1 、 \hat{b}_2 。

$$l_{11} = \sum x_{i1}^2 - n\bar{x}_1^2 = 3.868$$

$$l_{12} = \sum x_{i1}x_{i2} - n\bar{x}_1\bar{x}_2 = 0.448$$

$$l_{21} = l_{12}$$

$$l_{22} = \sum x_{i2}^2 - n\bar{x}_2^2 = 7.494$$

$$l_{1y} = \sum x_{i1}y_i - n\bar{x}_1\bar{y} = 2.278$$

$$l_{2y} = \sum x_{i2}y_i - n\bar{x}_2\bar{y} = 3.709$$

$$l_{yy} = \sum y_i^2 - n\bar{y}^2 = 3.973$$

由

$$\begin{cases} l_{11}\hat{b}_1 + l_{12}\hat{b}_2 = l_{1y} \\ l_{21}\hat{b}_1 + l_{22}\hat{b}_2 = l_{2y} \end{cases}$$

解得

$$\hat{b}_1 = \frac{\begin{vmatrix} l_{1y} & l_{12} \\ l_{2y} & l_{22} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} l_{11} & l_{12} \\ l_{21} & l_{22} \end{vmatrix}} = \frac{l_{22}l_{1y} - l_{12}l_{2y}}{l_{11}l_{22} - l_{12}l_{21}} = 0.535$$

$$\hat{b}_2 = \frac{\begin{vmatrix} l_{11} & l_{1y} \\ l_{21} & l_{2y} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} l_{11} & l_{12} \\ l_{21} & l_{22} \end{vmatrix}} = \frac{l_{11}l_{2y} - l_{21}l_{1y}}{l_{11}l_{22} - l_{12}l_{21}} = 0.463$$

$$\hat{b}_0 = \bar{y} - \hat{b}_1\bar{x}_1 - \hat{b}_2\bar{x}_2 = -1.71$$

所以，式(5-3)可以改写成

$$\hat{y} = -1.71 + 0.535x_1 + 0.463x_2 \quad (5-5)$$

即

$$\ln \hat{S}_j = -1.71 + 0.535 \ln R + 0.463 \ln W$$

$$\ln \hat{S}_j = \ln e^{-1.71} + \ln R^{0.535} + \ln W^{0.463}$$

所以

$$\hat{S}_d = 0.181R^{0.535}W^{0.463} \quad (5-6)$$

下面用数理统计中的 F 检验法对回归方程 (5-5) 线性回归效果的显著性进行检验 (取 $\alpha = 0.05$):

$$F_{1-\alpha}(m, n-m-1) = F_{1-0.05}(2, 21) = 3.47$$

又通过计算得到

$$S_T = l_{yy} = \sum y_i^2 - n\bar{y}^2 = 3.973$$

$$S_R = \hat{b}_1 l_{1y} + \hat{b}_2 l_{2y} = 2.936$$

$$S_e = S_T - S_R = 1.037$$

$$F = \frac{S_R/2}{S_e/(21-2-1)} = 25.3 > 3.47$$

所以, 从数学的角度讲, 回归方程 (5-5) 线性回归效果显著。由公式 (5-5) 容易推导出公式 (5-6), 因此, 在数学上, 非线性回归方程 (5-6) 有意义。

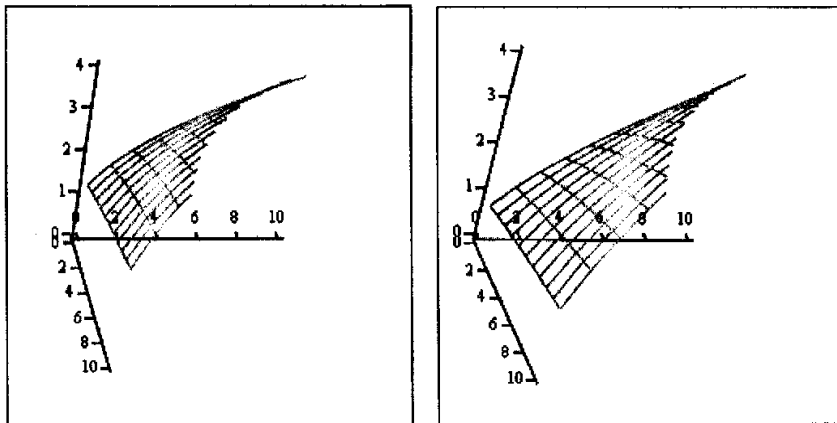
将关系式

$$\hat{S}_d = 0.181R^{0.535}W^{0.463}$$

与 Hertz 接触圆面积公式

$$S = \pi a^2 = 0.051R^{2/3}W^{2/3}$$

两公式的图像绘于图 5.6。现比较两公式的差别: Hertz 接触圆面积公式中, 球体半径



(a) 拟合面积公式图像

(b) Hertz 面积公式图像

图 5.6 拟合面积公式与 Hertz 面积公式的图象

R 、载荷 W 的影响指数均为 $2/3$ ，而在拟合公式中，球体半径 R 和载荷 W 对于面积的影响指数变小了，这可能因为，压痕面积不仅受到 R 、 W 的影响，还受到摩擦力、轻微磨损的影响，不仅受到弹性变形的影响，还受到塑性变形的影响。但是，两公式的形式是一致的，拟合面积公式的图象（图 5.6 (a)）与 Hertz 面积公式的图象（图 5.6 (b)）也是相似的，拟合公式在数学理论上是成立的，而且更具有实际意义。所以，在一定场合下，可以用拟合公式来进行摩擦学方面的讨论和研究。

5.4 球体与平面滑动接触的摩擦系数变化规律

5.4.1 载荷对摩擦系数的影响

图 5.7 是球体半径为 6mm，载荷分别为 20N、50N、100N 时的摩擦系数曲线，可以看出，对于半径为 6mm 的 UHMWPE 球体，在载荷为 20N 时摩擦系数最大，在载荷为 100N 时摩擦系数最小，载荷为 50N 时摩擦系数介于前面两者之间，摩擦系数随载荷的增加而减少，即：

$$R = 6, f_{(W20,R6)} > f_{(W50,R6)} > f_{(W100,R6)}$$

同时：

$$f_{(W20,R6)} - f_{(W100,R6)} = 0.09$$

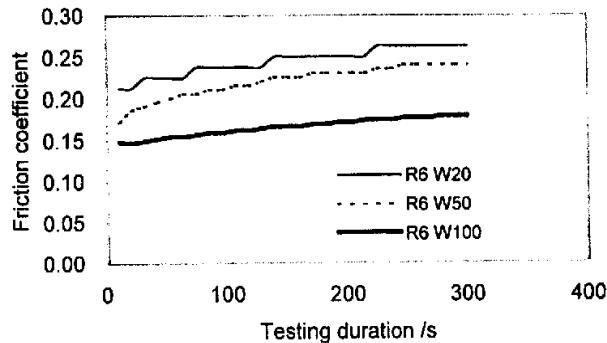


图 5.7 R6、W20、W50、W100 的摩擦系数曲线

图 5.8 是半径为 10mm 的 UHMWPE 球体与钢盘的摩擦系数曲线，载荷分别为 20N、50N、100N，该图同样显示，摩擦系数随载荷的增加而减少。即：

$$R = 10, f_{(W20,R10)} > f_{(W50,R10)} > f_{(W100,R10)}$$

同时：

$$f_{(W20,R10)} - f_{(W100,R10)} = 0.18$$

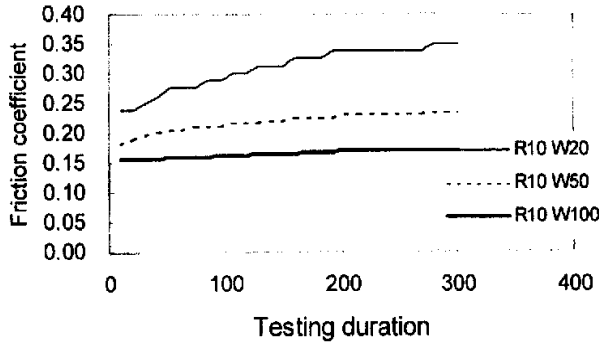


图 5.8 R10、W20、W50、W100 的摩擦系数曲线

图 5.9 是半径为 15mm，载荷为 20N、50N、100N 条件下的摩擦系数曲线，可以看出，摩擦系数随载荷增大而减小，即：

$$R = 15, f_{(W20,R15)} > f_{(W50,R15)} > f_{(W100,R15)}$$

同时

$$f_{(W20,R15)} - f_{(W100,R15)} = 0.17$$

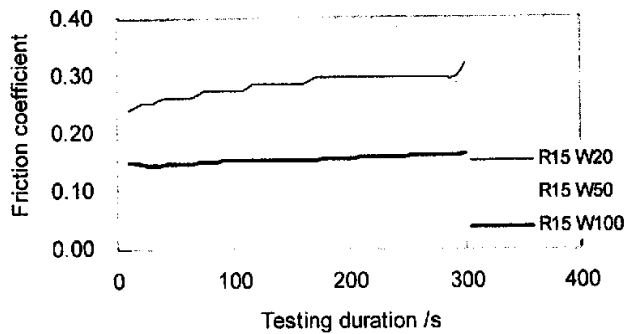


图 5.9 R15、W20、W50、W100 的摩擦系数曲线

图 5.10 中球体半径为 20mm，载荷分别为 20N，100N。。由图仍然可以看出摩擦系数随载荷的增大而减小。即：

$$R = 20, f_{(W20,R20)} > f_{(W100,R20)}$$

同时:

$$f_{(W20,R20)} - f_{(W100,R20)} = 0.25$$

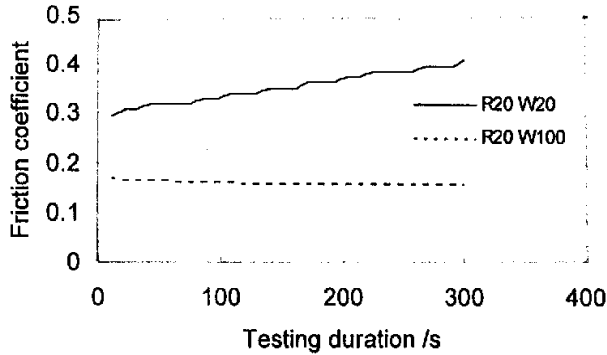


图 5.10 R20、W20、W100 的摩擦系数曲线

图 5.7、图 5.8、图 5.9、图 5.10 具有共同的现象或规律:

I. 对于 UHMWPE 球体, 在半径相同时, 随试验载荷增大, 对应的摩擦系数减小。即:

如果 $R_1 = R_2 = R_3$, $W_1 \leq W_2 \leq W_3$

$$\text{则 } f_{(W_1)} \geq f_{(W_2)} \geq f_{(W_3)} \quad (5-7)$$

II. 由以上四组 5min 滑动摩擦试验结束前的摩擦系数差值

$$\begin{cases} f_{(W20,R6)} - f_{(W100,R6)} = 0.09 \\ f_{(W20,R10)} - f_{(W100,R10)} = 0.18 \\ f_{(W20,R15)} - f_{(W100,R15)} = 0.17 \\ f_{(W20,R20)} - f_{(W100,R20)} = 0.25 \end{cases}$$

可以得出下述结论: 几种半径的 UHMWPE 球体, 在不同载荷下进行摩擦试验, 载荷变化时小球体对应的摩擦系数差值小, 大球体对应的摩擦系数差值大, 即:

设 UHMWPE 球面销球体半径 $R_1 \leq R_2 \leq R_3$, 销盘试验载荷 $W_1 \leq W_2$, 半径为 R_1 的球体, 在载荷 W_1 、 W_2 所对应的摩擦系数分别为 $f_{(W_1,R_1)}$, $f_{(W_2,R_1)}$; 半径为 R_2 的球体, 在载荷 W_1 、 W_2 所对应的摩擦系数分别为 $f_{(W_1,R_2)}$, $f_{(W_2,R_2)}$; 半径为 R_3 的球体, 在载荷 W_1 、 W_2

所对应的摩擦系数分别为 $f_{(W_1, R_1)}$, $f_{(W_2, R_2)}$; 那么, 多数情况下有下式成立

$$f_{(W_1, R_1)} - f_{(W_2, R_1)} \leq f_{(W_1, R_2)} - f_{(W_2, R_2)} \leq f_{(W_1, R_1)} - f_{(W_2, R_1)} \quad (5-8)$$

不等式表明: 球体半径较大时, 其摩擦系数对于载荷的变化比较敏感, 反之则不太敏感。

5.4.2 球半径对摩擦系数的影响

图 5.11 中, 所加载荷为 20N, UHMWPE 球面销的半径分别为 R6、R10、R20, 由图看出, 在 20N 的条件下 (轻载荷), 摩擦系数随球体半径的增加而明显增加。即:

$$W = 20, \quad f_{(W 20, R6)} < f_{(W 20, R10)} < f_{(W 20, R20)}$$

同时:

$$f_{(W 20, R20)} - f_{(W 20, R6)} = 0.15$$

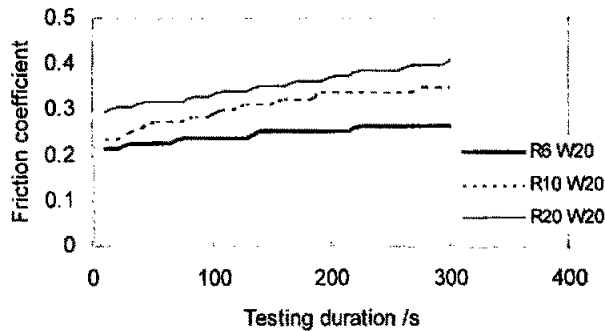


图 5.11 R6、R10、R20、W20 的摩擦系数曲线

图 5.12 中载荷为 50N, 球体半径分别为 6mm、10mm、15mm, 由图看出, 在较大载荷情况下 (50N), 对应于半径 R15 的球体有最大的摩擦系数, 而球体半径为 R6、R10 时, 摩擦系数则相差不大。即:

$$W = 50, \quad f_{(W 50, R6)} \leq f_{(W 50, R10)} < f_{(W 50, R15)}$$

同时:

$$f_{(W 50, R15)} - f_{(W 50, R6)} = 0.05$$

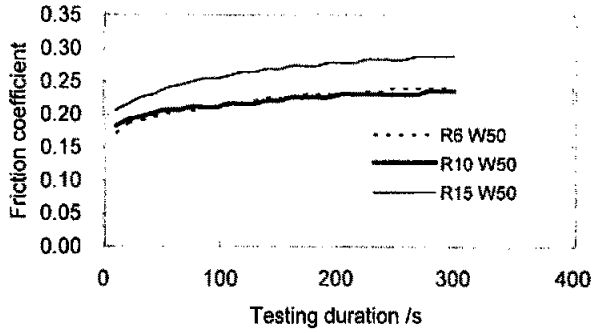


图 5.12 R6、R10、R15、W50 摩擦系数曲线

图 5.13 中载荷为重载荷 100N，球体半径分别为 6mm、10mm、15mm、20mm。由图看出进一步增大载荷到 100N 时，各种半径球体的摩擦系数非常接近，四条摩擦系数曲线差别较小，即：

$$W = 100, \quad f_{(W100,R6)} \approx f_{(W100,R10)} \approx f_{(W100,R15)} \approx f_{(W100,R20)} \approx k$$

也就是：

$$f_{(W100,R20)} - f_{(W100,R6)} \approx 0$$

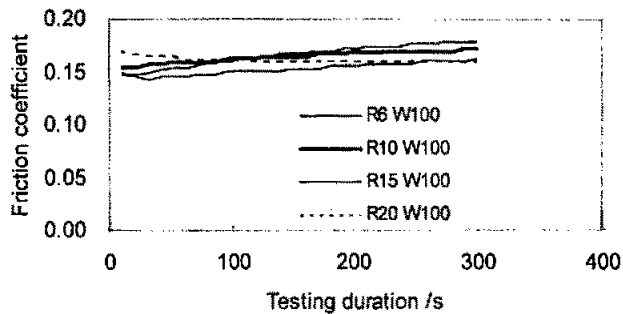


图 5.13 R6、R10、R15、R20、W1000 摩擦系数曲线

综合图 5.11、图 5.12、图 5.13，可以得到下述结论：

I、在载荷相对较小的情况下，UHMWPE 球面销摩擦系数随球体半径的增加而增加，亦即摩擦系数随接触面积的增加而增加，即总体上有下式成立

如果 $W_1 = W_2 = W_3$ ， $R_1 \leq R_2 \leq R_3$ ，则

$$f_{(R_1)} \leq f_{(R_2)} \leq f_{(R_3)} \quad (5-9)$$

II、在载荷相对较大时，摩擦系数随球体半径增加而增加的规律不明显，实际上在一定条件下，重载荷使摩擦系数因球体半径引起的摩擦系数差别变得很小。即在一定条件下：

如果 $W \in heavy$ ， $W_1 = W_2 = W_3$ ， $R_1 \leq R_2 \leq R_3$ ，则

$$f_{(R_1)} \approx f_{(R_2)} \approx f_{(R_3)} \approx k \quad (5-10)$$

III、由以上三组 5min 滑动摩擦试验结束前的摩擦系数差值：

$$\begin{cases} f_{(W20,R20)} - f_{(W20,R6)} = 0.15 \\ f_{(W50,R15)} - f_{(W50,R6)} = 0.05 \\ f_{(W100,R20)} - f_{(W100,R6)} \approx 0 \end{cases}$$

可得出：改变载荷，对半径不同的一组 UHMWPE 球体进行销盘试验，小载荷对应的摩擦系数差值大，大载荷对应的摩擦系数差值小。即：

当试验载荷 $W_1 \leq W_2 \leq W_3$ ，球体半径 $R_1 \leq R_2$ ，时，对于载荷 W_1 ，半径为 R_1 、 R_2 的球体对应的摩擦系数分别为 $f_{(W_1,R_1)}$ ， $f_{(W_1,R_2)}$ ；对于载荷 W_2 ，半径为 R_1 、 R_2 的球体对应的摩擦系数分别为 $f_{(W_2,R_1)}$ ， $f_{(W_2,R_2)}$ ；对于载荷 W_3 ，半径为 R_1 、 R_2 的球体对应的摩擦系数分别为 $f_{(W_3,R_1)}$ ， $f_{(W_3,R_2)}$ ，多数情况下有下式成立

$$f_{(W_1,R_2)} - f_{(W_1,R_1)} \geq f_{(W_2,R_2)} - f_{(W_2,R_1)} \geq f_{(W_3,R_2)} - f_{(W_3,R_1)} \quad (5-11)$$

不等式说明，载荷较小时，其摩擦系数对于球体半径的变化比较敏感，载荷较大时，其摩擦系数对于球体半径的变化不太敏感。

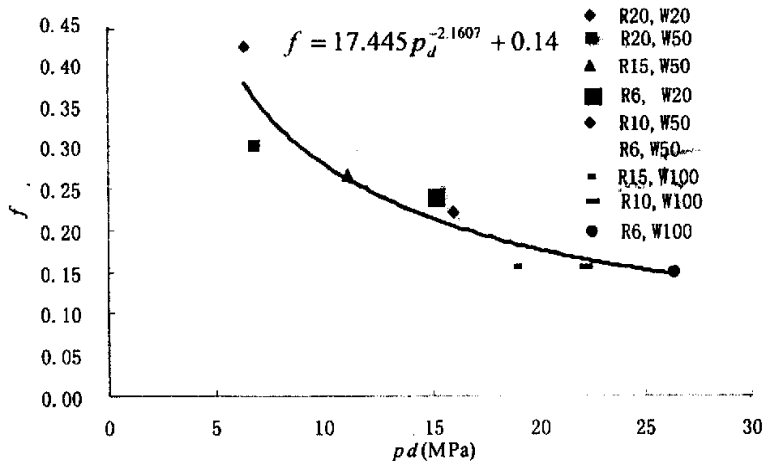
5.5 摩擦系数与平均接触应力的关系

将本试验摩擦系数曲线与相应的平均接触应力综合考虑发现，平均接触应力 p_d 与摩擦系数 f 有一定关系。

列出试验中球体半径 R 、载荷 W 及其所对应的平均接触应力 p_d 、试验结束时摩擦系数 f 的数值如表 5.3 所示（为了图形直观清楚，这里列出部分数据），根据表 5.3 绘出 $f-p_d$ 曲线图（见图 5.14）。

表 5—3 半径、载荷及其对应的平均接触应力和摩擦系数

R(mm)	W(N)	p_d (MPa)	f
20	20	6.369	0.420
20	50	6.847	0.300
15	50	11.060	0.265
6	20	15.072	0.240
10	50	15.924	0.220
6	50	15.924	0.220
15	100	18.843	0.155
10	100	22.144	0.155
6	100	26.322	0.150

图 5.14 $f-p_d$ 曲线图

$f-p_d$ 曲线图表明,在一定试验条件下, UHMWPE 球面销的摩擦系数 f 与平均接触应力 p_d 有指数关系:

$$f = 17.445 p_d^{-2.1607} + 0.14 \quad (5-12)$$

指数关系具体体现为如下的规律:

(1) 当平均接触应力大于材料的屈服极限时,摩擦系数变化不大,摩擦系数趋向于一个常数 ($p_d \rightarrow \infty, f \rightarrow \text{Cont}$)。即

如果 $p_d > \sigma_s$, $p_{d1} > p_{d2} > p_{d3}$, 则

$$f_1 \approx f_2 \approx f_3 \approx k \quad (5-13)$$

上式可以叙述为：接触区以塑性变形为主，摩擦系数表现为常数。

(2) 当平均接触应力小于材料的弹性极限时 ($\sigma_e = 18\text{MPa}$)，摩擦系数随平均接触应力的增加而减小，(参见图 5.14) 即

如果 $p_d < \sigma_e$ ，且 $p_{d1} \geq p_{d2} \geq p_{d3}$ ，则

$$k \leq f_1 \leq f_2 \leq f_3 \quad (5-14)$$

表 5.3 和图 5.14 表明了平均接触应力对于摩擦系数的影响，同时也反映了球体半径 R 、载荷 W 对于摩擦系数的综合影响。

5.6 关于球体摩擦理论的探讨

在分析 UHMWPE 球面销与钢盘摩擦系数的变化规律的基础上，结合经典的摩擦二项式公式，尝试从理论上探讨和解释不同尺寸球体在不同应力条件下的摩擦原理。

将经典的摩擦力的二项式公式

$$F = \alpha A_r + \beta W \quad (5-15)$$

其中 α ——与表面分子特性有关的参数

β ——与表面机械特性有关的参数；

A_r ——真实接触面积

W ——载荷

变形得

$$f = \frac{\alpha A_r}{W} + \beta \quad (5-16)$$

由上式可见，在 α 、 β 一定的情况下，摩擦系数取决于真实接触面积和载荷两方面因素。摩擦系数随载荷的增加而减小，这与建立在本研究试验结果基础上的 5.4.1 节的结论是一致的，即：球体半径相同时，摩擦系数随载荷的增加而减小。公式 (5-16) 还显示摩擦系数随实际接触面积的增大而增大，这与 5.4.2 节的结论——载荷相同时，摩擦系数随球体半径的增加而增加，本质上也是一致的，这是因为试验表明球体与平面的接触面积随球体半径的增加而增加。

对公式 (5-16) 再进行变形，可以得到下面的形式

$$f = \frac{\alpha}{\frac{W}{A_r}} + \beta$$

令 p_r 为接触面上的真实接触应力, 即

$$p_r = \frac{W}{A_r} \quad (5-17)$$

摩擦二项公式变为:

$$f = \frac{\alpha}{p_r} + \beta = \alpha \cdot p_r^{-1} + \beta \quad (5-18)$$

由上式看出, 摩擦系数 f 与真实接触应力 p_r 类似于成反比例关系, 实际接触应力越大, 则摩擦系数越小, 实际接触应力越小, 则摩擦系数越大。将公式 (5-18) 与根据实际试验结果绘出的 $f-p_d$ 曲线图 (图 5.14) 的拟合公式 (5-12) 相比较, 发现变化趋势比较相似。这个结果说明, 用不同尺寸球体试验取得的结果符合摩擦学经典理论, 对聚合物材料而言, 用不同尺寸球体来进行基于球形微凸体接触模型的基础研究, 是可行的。

5.7 对于摩擦表面设计的启示

本文试验结论是建立在对球形模型离散化分析基础上的, 用已知确定尺寸的球面来研究接触和摩擦问题, 其目的在于发现所研究材料的摩擦学性能与几何形貌尺寸、材料性能的交互作用规律, 并试图将其规律推广到基于球体微凸体假说的接触摩擦机理中去, 继而对于摩擦表面设计提供具有一定启示和指导意义的建议。本章的研究结果, 对于 UHMWPE 材料摩擦副的表面结构设计, 有以下启示:

I. 试验和理论分析结果表明, 摩擦系数随球体半径的增加而增加, 因此, 对于用微制造方法制备微尺寸球体与平面接触的场合, 可以通过改变球体半径达到调整摩擦系数的目的。在其他机械加工场合, 也可以在试验的基础上, 尝试通过改变接触表面粗糙峰峰顶曲率半径的方法 (比如: 适度抛光) 来改变摩擦系数。

II. 当以球面与平面接触滑动时, 接触球体半径较大时, 其摩擦系数对于载荷的变化比较敏感, 球体半径较小时, 其摩擦系数对于载荷的变化不太敏感。对于载荷经常变动的应用场合, 应使球体半径取较小值, 达到减小摩擦系数随负荷变化而变化的

目的。

III. 对 UHMWPE 材料而言, 试验载荷较小时, 其摩擦系数对于球体半径的变化比较敏感, 载荷较大时, 其摩擦系数对于球体半径的变化不太敏感。可以推测, 对于仪器仪表等承受轻载的机械, 其零件的表面粗糙峰峰顶曲率半径应尽可能一致, 这样可以避免摩擦系数变化过大, 引起精度的损失。而对于承受重载荷的重型机械零件, 则无需特别强调峰顶曲率半径的一致, 从而减低加工成本。

IV. UHMWPE 材料的摩擦系数与载荷的关系密切。通常情况下, 摩擦系数随载荷的增加而减小; 当接触应力大于材料的屈服极限时, 摩擦系数趋向于一个常数, 摩擦系数比较稳定。在摩擦表面设计时可以利用这一性能, 例如, 在额定负荷下, 使参与接触的区域上的材料发生塑性变形, 保持摩擦系数稳定。

V. 降低摩擦系数的方法很多, 但从本文试验结果看出, 改变材料的弹性模量, 也是值得尝试的。通过合金化、弥散增强等方法, 使材料的弹性模量 E 有所增加, 由公式 (1—2)、(1—3) 看出, 接触圆半径 a 变小, 接触圆上的平均应力 σ_{\max} 增加, 这将引起 p_d 或 p_r 变大, 由图 5.14 可以判断出, 材料的摩擦系数将有变小的可能。

5.8 本章小结

(1) 所研制的球面销磨削设备为基于球体微凸体假说的接触摩擦机理研究提供了有效的工具。这种研究方法的最大优点是把复杂的粗糙表面的问题简单化, 缺点是不能考虑粗糙峰之间横向的约束作用, 虽然在摩擦学试验中通过销试样的夹具对球面销产生一定的约束, 但与实际情况还有较大的差距, 因此其实用意义还比较有限, 理论上还可以继续深入。

(2) 采用武汉材料保护研究所开发的 SIMCON 软件, 基于 UHMWPE 材料真实应力—应变曲线, 考虑弹性和塑性变形, 计算出球面与平面接触时的真实接触应力分布。确认了存在塑性变形时, 接触圆的中心部位是塑性变形区, 接触圆的边缘部位是弹性变形区, 在塑性变形区与弹性变形区之间有一个过渡区。

(3) 通过试验获得了 UHMWPE 球面销与钢盘的压痕面积 S_d 、球体半径 R 、载荷 W 之间的关系式:

$$\hat{S}_d = 0.181R^{0.533}W^{0.463}$$

为球形微凸体摩擦机理研究提供了参考。

(4) 确定了载荷对 UHMWPE 球体相对平面滑动时摩擦系数的影响。

a. 半径相同的 UHMWPE 球体, 大载荷对应的摩擦系数较小, 小载荷对应的摩擦系数较大。即

如果 $R_1 = R_2 = R_3$, $W_1 \leq W_2 \leq W_3$, 则: $f_{(w_1)} \geq f_{(w_2)} \geq f_{(w_3)}$

b. 半径不等的 UHMWPE 球体, 在一组载荷下进行试验, 大球体对应的摩擦系数差值大, 即球体半径较大时, 其摩擦系数对于载荷的变化比较敏感, 小球体对应的摩擦系数差值小, 即球体半径较小时, 其摩擦系数对于载荷的变化不太敏感。

(5) 球体半径对于摩擦系数的影响。

a. 载荷相同时, UHMWPE 球面销摩擦系数随球体半径的增加而增加, 亦即摩擦系数随接触面积的增加而增加, 即总体上有下式成立:

如果 $W_1 = W_2 = W_3$, $R_1 \leq R_2 \leq R_3$, 则 $f_{(r_1)} \leq f_{(r_2)} \leq f_{(r_3)}$

b. 改变载荷, 对半径不同的一组 UHMWPE 球体进行试验, 小载荷对应的摩擦系数差值大, 即载荷较小时, 其摩擦系数对于球体半径的变化比较敏感, 大载荷对应的摩擦系数差值小, 即载荷较大时, 其摩擦系数对于球体半径的变化不太敏感。

(6) 确定了 UHMWPE 平均接触应力对摩擦系数的影响。

当平均接触应力小于材料的弹性极限时, 摩擦系数随平均接触应力的增加而减小; 当平均接触应力大于材料的屈服极限时, 摩擦系数趋向一个常数。平均接触应力与摩擦系数的拟合关系式为

$$f = 17.445 p_d^{-2.1607} + 0.14$$

(7) 通过摩擦二项式理论分析证明了试验结果和结论的正确性, 也从 UHMWPE 球形接触的角度充实了摩擦二项式理论。这说明本文用不同尺寸球体试验取得的结果符合摩擦学经典理论, 对聚合物材料而言, 用不同尺寸球体来进行基于球形微凸体接触模型的基础研究, 是可行的。

(8) 得到一些对于摩擦表面设计具有指导意义的启示。

第六章 全文主要成果、结论及研究展望

6.1 全文成果、结论

本文针对摩擦学接触理论研究中的相关理论和试验技术问题,从研制摩擦学试验用球面销试样加工设备入手,制备不同材料和不同尺寸的球面销试样,并通过接触和摩擦试验,基于球形微凸体表面粗糙峰模型探讨摩擦表面接触理论。全文主要的成果是:研制了球面销磨削设备,并获得中国实用新型专利(专利号:200320116160.X),发现了UHMWPE球面销试样与钢质平面试样接触时接触面积与摩擦系数的变化规律。本文有以下结论。

(1) 研究了摆旋法磨削高精度球面的原理、必要条件和误差:

I、摆旋法原理——砂轮绕自身轴线高速旋转,工件在绕自身轴线作低速旋转的同时还绕定轴慢速摆动,复合磨削运动形成球面。

II、形成球面必须具备两个必要条件:第一,工件轴线与摆动中心轴的轴线垂直相交,第二,工件轴线摆动所形成的平面与砂轮磨削平面垂直相交。

III、工件轴线与摆动中心轴轴线异面垂直时的加工误差为 Δ_1

$$\Delta_1 \leq R - \sqrt{R^2 - de - e^2},$$

工件轴线摆动所形成的平面与砂轮磨削平面不垂直所产生的误差为 Δ_2

$$\Delta_2 \leq \frac{R}{\cos \phi} - R$$

(2) 研制了球面销磨削设备,并获得中国实用新型专利,为摩擦学研究提供了一种有益的装备。该设备可加工的球面半径范围为4~100mm,可加工的材料包括钢、铜、铝、塑料、硬质合金等。所加工的球面销经Taylor Hobson轮廓仪标定,球面半径尺寸误差 $\leq 10\sim 20\mu\text{m}$,表面粗糙度可以达到Ra0.09~0.25 μm ;经扫描电子显微镜检测,表面质量较好。

(3) 研制了圆柱端面测量球冠半径的工具。

(4) 基于单个球体与平面接触,研究了粗糙表面球形微凸体模型的接触、变形和摩擦机理,得到一些结论:

I、大多数条件下,球面与平面接触时,接触圆的中心部位是塑性变形区,接触圆

的边缘部位是弹性变形区，在塑性变形区与弹性变形区之间有一个过渡区。

II、UHMWPE 球体与平面接触的动态压痕面积 S_d ，与载荷 W 以及曲率半径 R 的关系公式是：

$$\hat{S}_d = 0.181R^{0.535}W^{0.463}$$

与 Hertz 接触圆面积公式有相同的形式和相似的计算结果。

III、载荷对 UHMWPE 球相对平面滑动时摩擦系数的影响为：

a. 如果 $R_1 = R_2 = R_3$ ， $W_1 \leq W_2 \leq W_3$ ，则： $f_{(W_1)} \geq f_{(W_2)} \geq f_{(W_3)}$

b. 半径不等的 UHMWPE 球体，在一组载荷下进行试验，大球体对应的摩擦系数差值大，即球体半径较大时，其摩擦系数对于载荷的变化比较敏感，小球体对应的摩擦系数差值小，即球体半径较小时，其摩擦系数对于载荷的变化不太敏感。

IV、球体半径对于摩擦系数的影响为：

a. 如果 $W_1 = W_2 = W_3$ ， $R_1 \leq R_2 \leq R_3$ ，则 $f_{(R_1)} \leq f_{(R_2)} \leq f_{(R_3)}$

b. 改变载荷，对半径不同的一组 UHMWPE 球体进行试验，小载荷对应的摩擦系数差值大，即载荷较小时，其摩擦系数对于球体半径的变化比较敏感，大载荷对应的摩擦系数差值小，即载荷较大时，其摩擦系数对于球体半径的变化不太敏感。

V、UHMWPE 球，平均接触应力对摩擦系数的影响

当平均接触应力小于材料的弹性极限时，摩擦系数随平均接触应力的增加而减小；当平均接触应力大于材料的屈服极限时，摩擦系数趋向一个常数。平均接触应力与摩擦系数的拟合关系式为

$$f = 17.445p_d^{-2.1607} + 0.14$$

上式表明 UHMWPE 球体与钢盘滑动摩擦时，摩擦系数的变化规律与摩擦二项式是一致的，也从一个新的角度验证了摩擦二项式的正确性。

6.2 研究展望

I. 本文的试样为 UHMWPE 材料，本文的有关结论是基于 UHMWPE 塑料试验和分析结果的，尚未进行其他材料的类似研究，因此，结论是否具有普遍意义，还需要进行进一步试验研究。如果利用球面销磨削设备制备大量不同半径、不同材料、不同表面性质的多种球面销试样进行摩擦试验，有可能发现新的规律，新的结论，将促进接触机理和摩擦理论的研究。

II. 本文第二章求出了磨削轨迹方程, 通过改变轨迹方程中的参数, 或改变工件中心线与砂轮中心线的相对高度可以获得不同的磨削轨迹。利用具有不同轨迹的球面销试样, 可以探讨基体纹理方向对于摩擦磨损的影响。

III. 将球面销磨削设备的砂轮换成盘试样, 可以将该设备改造成为卧式双驱动销盘试验机。与常见的销盘试验机相比, 这种销盘试验机的销试样可以转动和摆动, 销试样与盘试样不仅可以垂直, 还可以倾斜成所需角度, 实现多种复合运动, 从而拓展摩擦学实验的内容和形式。

IV. 磨削球面销的过程是一个切削加工的过程, 但从本质上来说, 也是滑动表面的磨损过程, 把磨削球面销的过程当作高速条件下的特定摩擦磨损的过程来进行研究, 有可能有新的发现与突破。

参考文献

- [1] 李大庆. 摩擦学: 被看好的成长股[J]. 科技日报, 2004, 12, 27.
- [2] 练元坚. 对新世纪表面工程研究和学术活动的思考[J]. 中国机械工程学会会讯, 2000, (9)
- [3] Jiunn-Jong Wu. Characterization of fractal surfaces[J]. Wear, 239 (2000) :36~47.
- [4] 赵容. 互换性与测量技术基础[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1995.
- [5] 董竟. 长度测量[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [6] Cheng-Gui Li, Sheng -Dong, Guo -Xiong Zhang. Evaluation of the anisotropy of machined 3D surface topography[J]. wear,237 (2000): 211~216.
- [7] 梁子午. 检验工实用技术手册[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2004. : 666~679.
- [8] F. P. Bowden, D. Tabor. The Friction and Lubrication of Solids[M]. 1974.
- [9] W.Wieland, P.Hanggi, W.Hotz, M.Textor, B.A.Keller, N.D.Spencer. Wavelength-dependent measurement and evaluation of surface topographies:application of a new concept of window roughness and surface transfer function[J]. wear, 237(2000): 231-252.
- [10] 杨桂通. 弹性力学[M]. 北京:高等教育出版社. 1998: 213.
- [11] 余俊, 徐真, 赵冬初, 刘珍莲. 摩擦学[M]. 长沙: 湖南科学技术出版, 1983: 9.
- [12] 戴雄杰. 摩擦学基础[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984: 42.
- [13] 吴家龙, 弹性力学[M]. 上海, 同济大学出版社, 1993.
- [14] F. P. 鲍登, D. 泰伯. 摩擦学入门[M]. 北京:机械工业出版社, 1982.
- [15] 日本润滑学会编. 霍庶辉译. 磨损[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1985: 136.
- [16] 温诗铸. 摩擦学原理[M]. 北京:清华大学出版社, 1990: 365.
- [17] D. F. 摩尔. 摩擦原理与运用[M]. 北京:机械工业出版社, 1982.
- [18] 袁成清. 基于计算机图像分析的摩擦学测试方法及分形技术研究[D]. 武汉: 武汉材料保护研究所, 2001.
- [19] [苏]B. B. 格利布. 孟宪堂, 宋琦译. 数值法解摩擦学技术问题[M]. 北京, 机械工业出版社, 1989.
- [20] K.A.NURI.and.J.HALLING. The Effect of the Size of the Nominal Area on the Contact Behaviour of Surfaces[J].Wear,37(1976): 77~86.
- [21] K.A.NURI. The Effect of Surface Films on The Static Contact of Rough Flat Surfaces[J]. Wear,42(1977): 355-364.
- [22] D.A.Hills, L.J.Fellows. Some observations on contact problems involving fretting in the presence of wear[J].wear, 231(1999):319~324.
- [23] I.A.Plonsky, L.M.keer. Numerical method for solving rough contact problems based on the multi-level multi-summation and conjugate gradient techniques[J]. wear, 231(1999): 206-219.

- [24] F.P 鲍登, D. 泰伯. 固体的摩擦与润滑[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [25] 曾田范宗. 摩擦[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [26] 蔡泽高, 刘以宽, 王承忠, 郑文龙等. 金属磨损与断裂[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1985: 5.
- [27] 赵源. 摩擦、磨损讲义[M]. 武汉: 武汉材料保护研究所, 2005.
- [28] 桂立丰, 吴民达, 赵源. 机械工程材料测试手册(腐蚀与摩擦学卷)[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002: 539.
- [29] 日本润滑学会编, 磨损[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1985.
- [30] 籍国宝等. 摩擦磨损原理[M]. 北京农业机械化学院教材, 1984.
- [31] K.L.Johnson.Contact Mechanics[M].Cambridge University Press.1994.
- [32] MENG Hua, 董光能, 李健. 具有规则表面织构的超高分子量聚乙烯臼表面温度分析[J]. 摩擦学学报, 25, (1), 2005: 45~47.
- [33] Hu.C C, Liao J J, Lung C Y, *et al.* A two—dimensional-finite element model for frictional heating analysis of total hip prosthesis[J].Materials Science and Engineering,2001,C17:11~18.
- [34] Bergmann G. *et al.* Frictional heating of total hip implants. Part 2: finite element study[J]. Journal of Biomechanics, 2001,34: 429~435.
- [35] T.H.Kim, S.S.Kim. Fretting Wear Behavior of Inconel 600 and Zircaloy-4 Contact in air[J]. Proceedings of III International Symposium on Tribo-Fatigue. Changsha, Hunan University Press, China,2000 :51~55.
- [36] Akihiro Tanaka, *et al.* Friction and Wear of Plastic Sliding against Diamond-like Carbon Films[J]. Proceedings of ASIATRIB'98, Tsinghua University Press, 1998: 569~574.
- [37] Terumasa Hisakado, Akio Kanno. Effects of Fullerene C₆₀ on the Friction and Wear Characteristics of Ceramics in Ethanol[J]. Proceedings of ASIATRIB'98. Tsinghua University Press,1998
- [38] T.YAMADA H.KASE. Influence of Temperature on Tribological Characteristics of Films Transferred in Vacuum From Self-lubricating composites[A]. Proceedings of ASIATRIB'98[C]. Beijing:Tsinghua University Press, 1998:203~207.
- [39] www.owis.de.
- [40] Krishnan Narasimhan, S. Prasad Boppana, Deepak G.Bhat. Development of a graded TiCN coating for cemented carbide cutting tools—a design approach[J].Wear ,188(1995):123-129.
- [41] 北京第一通用机床厂编. 机械工人切削手册(第六版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [42] 哈尔滨工业大学、上海工业大学主编. 机械制造工艺学. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.
- [43] 车工工艺学编写组. 车工工艺学第二版[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [44] 铣工工艺学编写组. 铣工工艺学第二版[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [45] 楼竟. 机械制造工艺学[M]. 南京: 南京农业工程学院, 1986.

- [46] 磨工工艺学编写组. 磨工工艺学[M]. 北京:科学技术出版社, 1982.
- [47] 薄宵. 磨工实用技术手册[M]. 南京:江苏科学技术出版社, 2002.
- [48] 磨工手册编写组. 磨工手册[M]. 北京, 机械工业出版社, 1982.
- [49] 麦山等人. 普通电火花线切割机床加工球形件的新方法[J]. 航天工艺, 1994, 2: 6~7.
- [50] 刘允环. 电火花加工精密凹凸球面的新方法[J]. 机械工艺师, 1994, 2:33~36.
- [51] 贺曙新, 张四弟. 金属切削加工[M]. 北京:化学工业出版社, 2004.
- [52] 郑海波, 郑凌云. 电子数显圆弧卡尺[P]. 专利申请号: 01279426.0.
- [53] 郑海波, 郑凌云. 角度半径测量装置[P]. 专利申请号 01277695.5.
- [54] 哈尔滨工业大学编. 长度计量手册[M]. 北京:科学出版社, 1979.
- [55] 王晓光. 球冠及非整圆圆弧半径的简易测量装置[J]. 机械制造, 1994, 9:33~36.
- [56] 周自力. 球面磨削的探讨[J]. 机械制造, 2002, 4: 42~45.
- [57] 袁哲俊, 王先逵. 精密与超精密加工技术[M]. 机械工业出版社, 1999.
- [58] 机床设计手册编写组. 机床设计手册. 北京:机械工业出版社, 1979.
- [59] 于大国等. 球面试样加工设备研制及其在摩擦学研究中的应用[A]. 武汉材料保护研究所. 第二届全国工业摩擦学大会及第七届全国青年摩擦学学术会议论文集[C]. 2004.
- [60] 李健, 高万振, 于大国. 摩擦学试验用球面销球面加工专用设备[P]. 专利号: 200320116160.X
- [61] 符炜. 实用切削加工手册[M]. 长沙:湖南科学技术出版社. 2002.
- [62] A. C. 普罗尼柯夫著. 冯玉柱译. 机床的磨损与耐用度[M]. 北京:中国工业出版社. 1983.
- [63] 金锡志. 机器磨损及其对策[M]. 北京:机械工业出版社, 1996.
- [64] 戴曙. 金属切削机床设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1981.
- [65] 邵振国. 磨工(中级工)[M]. 北京:化学工业出版社, 2005.
- [66] 于大国等. 球冠半径的两种测量方法[J]. 机械工人. 2004, 11:50~51.
- [67] J. 霍林. 摩擦学原理[M]. 北京:机械工业出版社, 1975.
- [68] J.Halling. Principle of tribology[M]. 1964.
- [69] A.A.Edidin. Mechanical behavior, wear surface morphology, and clinical performance of UHMWPE acetabular components after 10 years of implantation[J]. Wear, 250(2001):152~158.
- [70] Jian Li, On computer supported tribological tester[A]. Proc.6th China Tribology Conference[C], Xian, 1997.5.
- [71] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京:高等教育出版社, 1992.
- [72] 土喜屋一. 机械实用手册[M]. 北京:科学出版社, OHM 社, 2002.
- [73] <http://www.goodfellow.com/>.
- [74] 庄楚强, 吴亚森. 应用数理统计基础(第二版)[M]. 广州:华南理工大学出版社, 2002.
- [75] 同济大学数学教研室等. 数学(下册)[M]. 北京:高等教育出版社, 1988.

附 录

攻读硕士期间的主要工作及发表的论文

本人于 2002 年进入机械科学院武汉材料保护研究所,攻读“机械设计理论”专业硕士研究生,主要从事摩擦学试验设备和接触理论研究,完成了球面销磨削设备的研制及球面试样摩擦接触机理研究,参与了国家自然科学基金资助项目(No. 50175041)的部分研究工作,参加了专著《微纳米生物摩擦学》的翻译,该书已于 2004 年 7 月由机械工业出版社出版。

攻读硕士期间发表的论文:

(1) 于大国,李健,秦襄培.球面销试样的摩擦学应用研究[J].材料保护,2004,7(37)

(2) 于大国,李健,秦襄培.球面试样加工设备研制及其在摩擦学研究中的应用.第二届全国工业摩擦学大会会议论文.2004,7.

(3) 于大国等.球冠半径的两种测量方法[J].机械工人,2004,11.

参与专利申请工作:

获得中国实用新型专利《摩擦学试验用球面销球面加工专用设备》(专利号:200320116160.X)

致 谢

三年的学习生活中，导师李健教授给予我多方面的关心和帮助，在此向李老师表示衷心的感谢和崇高的敬意！

我还要特别感谢顾卡丽老师对我的关心，没有顾老师在生活方面对我的关心，我不可能完成研究生阶段各门课程的学习，也不可能写出毕业论文。

在整个学习期间，赵源老师、高万振老师给予我多次帮助和有益的指导，使我受益匪浅。

感谢摩擦学研究室的李仕忠高工、吴伊敏工程师在生活和学习上的大力帮助。同时还要感谢秦襄培博士、高新蕾博士、白秀琴博士、李鹏博士、王灿博士、李本海硕士、郭志光硕士、刘洪涛硕士、刘秧生硕士、肖峰硕士、刘建芳硕士、方建硕士、孙家峰硕士、周燕硕士、彭恩高硕士、王颖硕士、杨俊辉硕士的大力帮助。

感谢人教处张惠珍处长、李秋萍老师、吴丽玲老师、余怀亚老师、郭惠琳老师的关心和帮助。

感谢国家自然科学基金项目（No. 50175041）和国家自然科学基金重点项目（No. 50432020）提供的资助。