第3卷 无锡轻工业学院学报 Vol. 3 No. 1
第1期 JOURNAL OF THE WUXI INSTITUTE OF LIGHT INDUSTRY 1984

圆珠笔芯理论的初步探讨

苏 才 良

摘 要

圆珠笔芯虽小，但其原理比自来水笔复杂得多，影响产品质量的因素也很多，需要从理论上对其原理作深入的、系统的研究。本文介绍了圆珠笔芯的构造及其工作原理，提出了提高圆珠笔芯质量的某些途径。

前 言

世界上圆珠笔的生产只不过三十多年的历史，由于它使用方便，价格低廉，适宜于大批量生产，现在已成为一种应用日趋广泛的书写工具。我国解放后，圆珠笔行业迅速发展，油墨问题和笔头腐蚀等问题早已在六十年代得到解决，随着产量的大幅度增加，生产设备也作了不少重大改革，闯出了一条我国独有的圆珠笔生产工艺路线。但由于长期以来对圆珠笔缺少理论研究，特别是物理原理的研究，产品设计以仿造为多，产品质量虽有较大提高，但仍存在着不少问题。为了进一步提高质量，必须从理论与实践的结合上，对其基础原理作系统的、深入的研究，提高行业的技术理论水平。

自1980年以来，笔者有机会参加圆珠笔的理论探讨工作，到过一些生产圆珠笔的工厂调查研究，本文试从理论和实践的结合上提出提高圆珠笔芯质量的途径和方法。

一、圆珠笔芯的构造

圆珠笔由笔芯、笔杆和机械传动等部件组成，笔芯是圆珠笔的主要部件。它由球珠、球座体(又称铜头、笔头)、油管、油墨和浮塞等五部分组成，其结构如图一。

球珠位于笔芯顶端，是由不锈钢或硬质合金制成的园球体，在书写时由于球珠的自由滚动，带出油墨形成字迹。球座体位于笔芯的头部，是由铜或不锈钢等材料制成，用于安装球珠，内部加工成球座、油槽、小油孔和中油孔，构成油墨通道。油管是贮藏油墨的部件，有塑料管和金属管两种。油墨是一种有色粘滞性液体，主要有蓝、红、黑和绿四种颜色，油墨要耐晒性好、不易渗化，又要快干，我国自己研制的“423”油墨就具有这些特性。浮塞是位于油管中油墨末端的油脂状物质，它能跟随油墨下移，防止油墨倒流、氧化和吸潮，通常使用的是锂基脂或钙基脂浮塞，也有泡沫塑料浮塞。油管内径小于2毫米的笔芯可不用浮

本文收到日期 1984 年 1 月 16 日

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

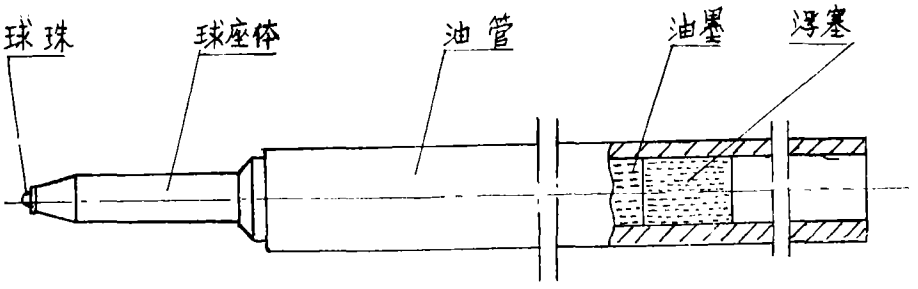

图1　圆珠笔芯的结构

塞，通常也不会倒流出油墨。

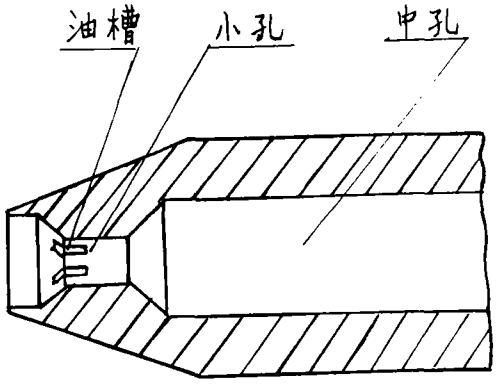

图2

球座体的加工比较复杂，精度要求高。先将金属丝切断加工成球座体毛胚，在其一端钻一个中孔(中油孔)，在另一端以一定角度的钻头钻一个园锥形孔，形成具有一定内锥角的球座，接着用冲头冲击园锥体底部，使之打通与中孔相联，制成小孔(小油孔)，再在球座底部用槽冲模子冲五条油槽，并用一直径比球珠稍大的半球形园冲模冲击底部，使底部呈半球形，最后将球珠放入球座，将座口边向球珠收拢，使球珠能灵活滚动但不能脱落，经此收口工序后便制成球座体(见图2)。

从上面可知，笔芯能写出字迹，靠的是互相关联的两个部分：一是供墨系统部分，包括油管、球座体的中孔和小孔，它要满足书写时油墨的供给，如果供墨不足，就会出现写不出或断线的现象；二是出墨系统部分，包括球座、油槽、球珠，它们的相互配合要保证有一定的出墨量，如果出墨量太少，就写不清楚，如果出墨量过大，则容易冒油及污线。

二、圆珠笔芯中的某些理论问题

1．供墨系统：油墨是粘滞液体，园珠笔芯在书写时油墨流量很小，故流速甚慢，因此它属于粘滞液体的层流流动。

在管中流动的油墨，在同一横截面内各处的流速不同，流速u随离轴线的距离r的增大而减小(为图3)，即在半径方向上存在速率梯度$-\frac{du}{dr}$。根据牛顿粘滞定律，相邻两液层间的内切应力为

$$\tau = -\eta\frac{du}{dr}$$

式中η为油墨的粘滞系数。τ随着γ的增大而增大，管壁处的内切应力最大。

在管内流体流速不变的情况下，半径为R的水平园管内任一半径为r、长为dL的微元园柱体两端面的压强差dp和微元园柱体侧面的内切应力相抗衡，由此立出力平衡方程，并

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

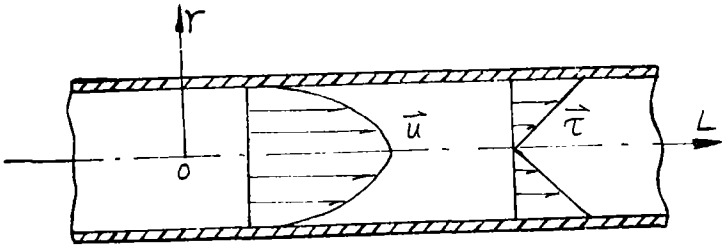

图 3

可以算出

$$\tau = -\frac{dp}{dL} \cdot \frac{r}{2}$$

将以上两式联立解微分方程，应用 r = R 时，u = 0 的边界条件，便得流速

$$u = -\frac{1}{4\eta}\frac{dp}{dL}(R^2 - r^2)$$

单位时间内流过的流体总体积，即流量

$$Q' = \int_0^R u \cdot 2\pi r dr = -\frac{dp}{dL} \cdot \frac{\pi R^4}{8\eta}$$

对于倾斜园管中密度为 ρ 的流体，只要把微元园柱体两端因重力引起的压力差 dρgh 考虑进去，通过类似上面的计算便得流量

$$Q'' = -\frac{d(p+\rho gh)}{dL} \cdot \frac{\pi R^4}{8\eta}$$

将此式应用到由油管、中孔及小孔组成的供墨系统上，考虑到流量的连续性，通过计算，可得到油墨流量的表示式

$$Q = \left\{ \frac{-2S\cos\theta}{R_1} \cdot \frac{R_2^4 R_3^4 L_1 - \rho g h_1 (R_1^4 R_3^4 L_2 + R_1^4 R_2^4 L_3) + \rho g (h_3 + h_2) R_3^4 R_2^4 L_1}{L_1 (R_1^4 R_2^4 L_3 + R_1^4 R_3^4 L_2 + R_2^4 R_3^4 L_1)} + \frac{\rho g h_1}{L_1} \right\} \frac{\pi R_1^4}{8\eta}$$

式中 S 为表面张力，θ 为接触角，L_1、L_2、L_3 和 R_1、R_2、R_3 分别表示油墨在油管、中孔、小孔中的长度和三部分的半径，若倾斜角为 α，则式中 $h_1 = L_1\sin\alpha$，$h_2 = L_2\sin\alpha$，$h_3 = L_3\sin\alpha$，见图 4。

对流量计算公式进行分析可知，笔芯的供墨量与油墨的粘滞系数(随温度变化)、油管半径、中孔半径、小孔半径以及油管中贮油高度等有关，粘滞系数愈小、管径愈粗、贮油高度愈高，则供墨量愈大。设计时可根据部颁出墨标准计算。

2．出墨系统中的机械转动问题：球珠在纸面上滚动，从笔头内带出油墨形成字迹。促使球珠滚动的作用力是若干个力组成的力系(见图 5)：

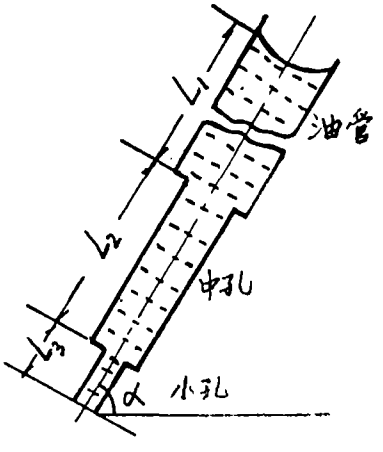

图 4

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

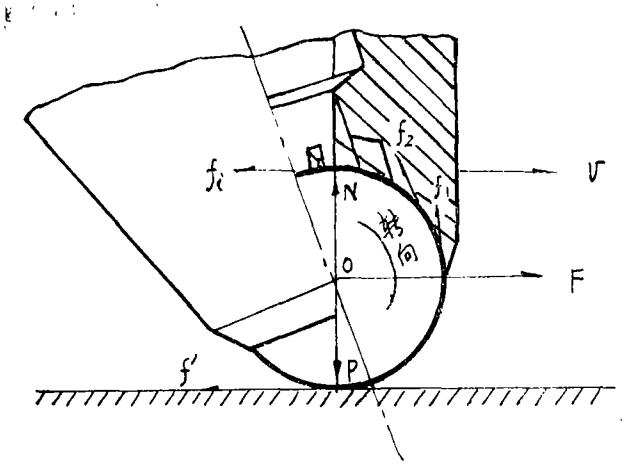

图 5

(1) 手通过笔对球珠施加一个向右下方的力，可分解为向下的压力P(包括重力)和水平方向的推力F。

(2) 桌面和纸对球珠的托力N，它与P等值而反向。

(3) 球珠与球座间的摩擦力，在充满油墨的情况下，这种摩擦力为内摩擦力，内摩擦力为：

$$f = \eta \frac{du}{dr} \cdot \Delta s$$

Δs表示球珠与球座接触面积。这种摩擦力分布在接触面处，沿球珠的切线方向，它们产生的力矩M阻碍球珠滚动，叫阻力矩。

(4) 球珠与纸面间的摩擦力f′，在无滑动的情况下，这种摩擦力为静摩擦力，其最大值叫最大静摩擦力f'_{max}，所以$f' \leqslant f'_{max}$。它产生的力矩$M' = f'R$，是推动球珠滚动的动力矩。

在匀速书写时，合力为零，合力矩也为零，即$M' - M = 0$，$M' = M$，$f' = f$。在加速书写时，$M' - M > 0$，$M' > M$，$f' > f$。综合这两种情况，$f \leqslant f' \leqslant f'_{max}$。因此，在书写时要使球珠作纯粹的滚动，则要求$f \leqslant f'_{max}$，即球珠与球座间的摩擦力不能大于球珠与纸面间的最大摩擦力。如果球纸与纸面都十分光滑，最大静摩擦力f'_{max}很小，或者球珠与球座间的摩擦力f过大，都能使$f > f'_{max}$。在这种情况下，球珠与纸面间将出现相对滑动，出现“打滑”现象而写不出。根据上面的分析，可见要避免打滑，途径有两种：一是增大f'_{max}，为此使用毛面纸张(但纸张对油墨的润湿性要好，否则写不清楚)或球珠表面加工成凹凸不平的无棱角的微孔；二是减小f，为此提高球珠与球座的光洁度，收口要松一点，采用粘滞系数小的油墨，球珠与球座间接触面尽量减小(如采用内锥角较大的球座)，球珠与球座的材料要耐磨，防止因摩损而增大阻力矩。

3．与储墨稳定性相关的流体静力学问题：正常笔芯在倒置时，油墨不会从油管尾部倒流出来。而储墨稳定性差的笔芯却会产生倒流。储墨稳定性与油墨在笔芯内的毛细作用有关。

油墨对管壁是润湿的，在细管里液面(凹弯月面)会升高(见图6)，毛细现象与表面张力及接触角有关。由于表面张力S的作用，液面受到竖直向上的拉力$S \cdot 2\pi r\cos\theta$，产生向上的附加压强为$\frac{S \cdot 2\pi r\cos\theta}{\pi r^2} = \frac{2S\cos\theta}{r}$。它与竖直向下的重力产生的压强平衡，即$\frac{2S\cos\theta}{r} = \rho gh$。所以，由于毛细管作用使液面上升的高度为

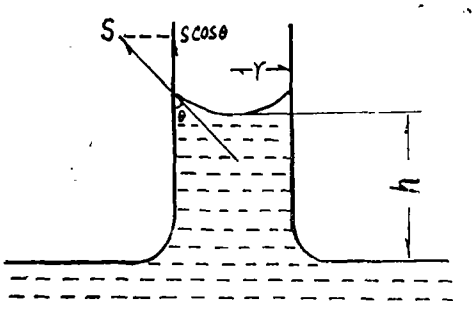

图 6

$$h = \frac{2S\cos\theta}{\rho g r}$$

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对于隙缝内的液面(图7)，若隙缝宽度为d，则由于毛细管作用液面上升的高度为 $h = \frac{2S\cos\theta}{\rho g d}$ ，球珠与球座间存在隙缝引起的毛细现象就属于这一种。

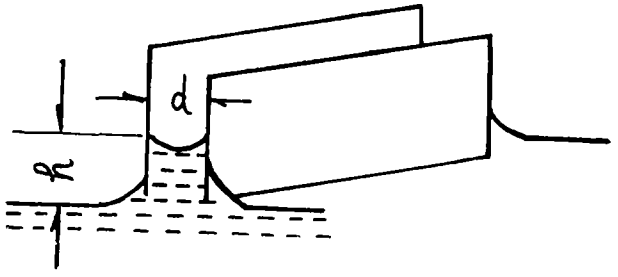

图7

由此可见，液面上升的高度h与液体表面张力S、接触角的余弦cosθ成正比；与管半径r或隙缝宽度d成反比。当笔芯倒放时，如果凹弯月面发生在球珠与球座间隙内，若d足够小，其毛细作用所能维持的油墨高度较大，则属于正常的情况，油墨不致倒流；如果凹弯月面发生在小孔或中孔内，由于孔半径比d大得多，毛细作用大大减小，不足以维持油管中具有一定高度的油墨不往管尾倒流。

圆珠笔芯中的理论问题并不限于上面三方面的内容。如油墨的配方就是一个复杂问题，各国的配方相互保密，油墨的性质也差别很大；又如球座体和球珠的选材也是一个值得研究的课题，如何找出硬度高、耐磨、耐腐蚀而加工又不十分困难的合适材料十分重要。

三、提高圆珠笔芯质量的主要途径

1．改进设计

(1) 缩小圆冲和球珠的直径差，提高球珠与球座的吻合程度。球珠和球座壁间距数值为0.01mm比较合适。

(2) 选择适当的锥度。锥度小，球珠与球座相贴面就大，球珠受阻力矩M就大，出墨量就小，润滑性也差；锥度太大又会引起冒油。锥度以75°至90°为宜。

(3) 适当缩小小油孔孔径，提高球座架承受的压力，可减小球座磨损，防止“窝珠”。小孔直径以0.7mm左右为好，过小又会影响供墨。

(4) 精确计算临界槽径、槽冲角、相贴面、管径等几何尺寸，保证供墨和出墨。设计时，对不同性能的油墨应分别计算，特别要改进红油墨笔芯的设计。

2．合理选材

(1) 选用耐蚀硬质合金作为球珠的材料。我国笔芯球珠大都采用不锈钢，其硬度较低，不耐磨，影响笔的寿命。日本采用碳化钨材料做球珠。

(2) 选用比较耐磨耐蚀的材料作球座体。现在国内一般采用铜或铜合金，它的性能不如不锈钢。不锈钢不仅耐磨性比铜好，而且不易腐蚀，比铜笔头寿命长得多。

(3) 选择好油管材料或选择涂料在油管内壁进行涂膜处理，以降低油管内壁的润湿性，减少油墨倒流。

3．精细加工

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(1) 提高球珠的圆正度，降低球珠与球珠间的相互尺寸公差。国内球珠的圆正度与相互尺寸公差都超过 1 μ，应把它控制在 0.5—1μ 之内。

(2) 球珠与球座要密切配合，光洁度要好，球座口应防止擦碰与跌撞，笔头收口不能太松或太紧。

(3) 灌注油墨后的离心过程中，离心速率和时间要足以排除内部气泡。

(4) 要选择优质硬质合金材料制成的刀具加工笔头，笔头的清洗工作要予以重视，防止磨屑和杂油留在内部。

4. 改善油墨

(1) 油墨的粘度随温度的变化而变化，这种变化愈小愈好。为此，油墨中树脂的用量以少一些为好，因为树脂受温度变化影响较大，容易影响粘度。粘度范围应控制在 15,000—20,000 厘泊。

(2) 油墨中添加防腐剂，防止或抑制油墨对铜或铜合金笔头的腐蚀。或加入抗氧剂和缓冲剂，吸附或吸收周围的氧物质，抑制对铜头的腐蚀。

(3) 油墨中添加长链化合物，提高油墨对球座、球珠的润滑性，使摩擦力下降，阻力矩减小，有利于球珠的自由滚动。

(4) 防止油墨的结晶、沉淀或变质，为此要进一步研究配方，特别是红色油墨易变质的问题须尽快解决。

Some Primary Considerations About The Theoretical Aspects of Ball Pen Cores

Su Cailiang

Abstract

Although small in size, ball pen cores are much more complicated than fountain pens, and there are more factors influencing the performance of products. It is necessary to conduct theoretical studies deeply and systematically. This article presents the structure of ball pen cores and its principle of operation. Some suggestions are given to improve its qualities.

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net