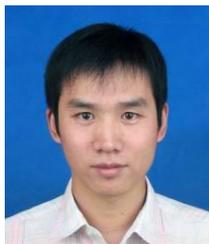


低温球阀球体表面滚压硬化工艺研究

成清校 滕磊军

(北京航天试验技术研究所, 北京 100074)



摘要: 分析了目前球体表面硬化加工技术的发展现状, 针对航天领域内广泛采用的低温球阀, 提出了一种新的球体表面滚压硬化的工艺方法, 并对该工艺所加工的球体表面粗糙度、滚压速度以及滚压力等工艺参数进行了分析计算。

关键词: 低温球阀; 球体; 旋转滚压; 表面硬化

Study on Rolling Strengthening Process for Spherical Surface of Cryogenic Ball Valve

Cheng Qingxiao Teng Leijun

(Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074)

Abstract: The current situation of surface enhancement process for the sphere was analysed in this paper. Aiming at the cryogenic ball valve which was used proverbially in aerospace, it put forward a new rolling process method for the sphere surface. And the process parameters including the sphere surface roughness, rolling speed and rolling pressure were calculated.

Key words: cryogenic ball valve; sphere; rotation rolling; surface enhancement

1 引言

低温球阀主要指适用于低温介质(航天领域一般为 $-253^{\circ}\text{C}\sim-183^{\circ}\text{C}$)的球阀, 其结构紧凑、开闭迅速、密封可靠、维修方便, 在全开和全闭时, 球体和阀座的密封面与介质隔离, 耐腐蚀性强, 而且球阀全开时的流阻仅相当于相同通径管道的延程损失^[1]。这些优点使低温球阀在液体火箭发动机地面、高空模拟试验系统中得到了广泛的应用。

球体是低温球阀的关键零件, 其表面质量直接影响到阀门的密封性能。除提高球体的圆度和表面粗糙度外, 提高球体的表面硬度可以增强球体的耐磨性, 在保证密封性能的同时, 可以提高整个阀门工作的可靠性。

2 球体表面硬化工艺技术现状

目前, 在石油化工、火力发电、煤化工等高温介质领域广泛采用金属硬密封球阀, 其球体表面的硬化工艺主要有表面镀铬、表面堆焊硬质合金、等离子氮化、超音速喷涂等^[2]。其中, 球体表面镀铬工艺, 厚度一般为 $0.07\sim 0.10\text{mm}$, 硬度可达 $60\sim 65\text{HRC}$, 镀层硬度高, 具有较好的耐磨性和耐腐蚀性, 且能长期保持表面光亮, 工艺相对简单, 成本较低。缺点是镀铬层结合力低, 镀层易脱落; 球体表面堆焊硬质合金, 硬度可达 40HRC 以上, 但工艺复杂、效率低、且易使零件产生变形; 等离子氮化工艺, 氮化层厚度约 $0.20\sim 0.40\text{mm}$, 表面硬度可达 $60\sim 65\text{HRC}$, 缺点是该工艺的耐腐蚀性较差, 不能在化工等强腐蚀领域使用; 球体表面超音速喷涂工艺, 喷涂厚度 $0.3\sim 0.4\text{mm}$, 硬度可高达 $70\sim 75\text{HRC}$, 并且具有较高的结合强度。在涉及高粘性、强腐蚀流体、带粉尘及固体颗粒状的混合流体介质中大部分使用该硬化工艺^[2], 使其成为球体表面硬化的主要工艺手段。

作者简介: 成清校(1984-), 工程师, 机械制造及其自动化专业; 研究方向: 低温阀门的设计与制造。

收稿日期: 2014-11-17

而在航天领域，在液体火箭发动机地面、高空模拟试验系统中广泛采用低温球阀，其球体材料一般采用奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti。由于输送介质超低温的特性，球体加工一般采用车削+研磨的工艺制造，其表面并未采用上述硬化工艺进行处理。

针对这种情况，本文将滚压技术应用到球体的表面硬化工艺中，提出了一种针对球面加工的旋转滚压法，以期能提高球体的表面硬度，从而增强球体的耐磨性，提高密封效果和阀门的可靠性。

3 球体表面的旋转滚压工艺

3.1 滚压加工的原理和特点

滚压加工是一种无屑加工，通过一定形式的滚压工具向工件表面施加一定压力。在常温下利用金属的塑性变形，使工件表面的微观不平度辗平从而达到改变表层结构、机械特性、形状和尺寸的目的。因此可同时达到光整加工和表面强化两种目的。由于滚压的结果，零件表面层金属中产生了极大的压缩应力，因而强化了表面层金属，提高了强度极限、屈服极限和疲劳极限，使零件表面产生一层冷硬层，增加了其耐磨性和抗腐蚀性能^[3]。

滚压表面强化技术自 1929 年首次在德国被用于机车轴的表面强化后，目前已在航空航天、汽车机车、精密机械、国防工业、生物医学等领域得到了广泛应用。滚压加工工艺简单，易于掌握，一般不需要昂贵的专用设备，适用性强。滚压不仅以其光整特性可部分取代磨削，而且是一种高效率低成本且能够实现表面强化的绿色制造技术^[4]。

3.2 旋转滚压法

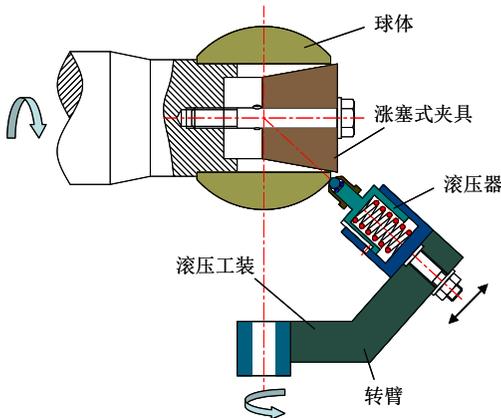


图 1 旋转滚压工艺示意图

本文提出的旋转滚压硬化工艺方法如图 1 所示。待加工球体装在专门设计的涨塞式夹具上，与车床主轴同轴连接，做回转运动。滚压工装主要由转臂和滚压器构成。滚压器轴线为球面法线方向，滚压器位置可根据球体直径大小按图示方向沿转臂移动，以调整位置。滚压力大小可通过滚压器内压力弹簧来调节。在滚压加工过程中，转臂绕与机床主轴正交的轴旋转，配合机床主轴的回转运动，使得滚压器以螺旋轨迹完成对整个球体表面的滚压加工。

3.3 滚压表面粗糙度分析

由于低温球阀对球面的表面质量要求比较高，因此需要对本文提出的球面旋转滚压法加工的表面粗糙度进行分析。对滚压加工来说，影响工件表面粗糙度的因素主要有滚压力、进给量、滚珠直径、滚压速度、滚压次数以及工件材料等等。鉴于本文所述旋转滚压运动的特殊性，这里只分析这种滚压方法的进给量对加工球面粗糙度的影响。

滚压进给量与表面粗糙度 R_z 的关系（如图 2）近似表示为^[3]：

$$R_z = f^2 / 4d \quad (1)$$

式中： f 为进给量； d 为滚珠球半径。从式（1）可以看出，进给量越小，所加工的表面粗糙度值越低。但是，当进给量过小时，滚压硬化作用加强，过度的硬化会导致工件表面产生鳞化和剥落现象，从而降低工件的表面质量。

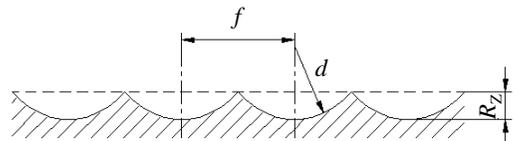


图 2 进给量对表面粗糙度的影响

为了分析，设定主轴转速 ω_1 (r/min)，滚压转速 ω_2 (r/min)，球体直径 D (mm)，滚珠直径 d (mm)。则，球体表面上任意一点完成一个滚压周期的时间为： $t=1/\omega_2$ ，在时间 t 内，球上任意一点 a 绕机床主轴移动的弧长为 S ：

$$S = 2\pi D \cos\theta \cdot \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (2)$$

式中： θ 为该任意点 a 和球心连线与滚压工装回转轴线所在的与主轴垂直的平面之间的夹角，如图 3 所示。对与 DN80 球阀，球体直径 $D=130\text{mm}$ ， $\theta \in [0^\circ, 48^\circ]$ 。

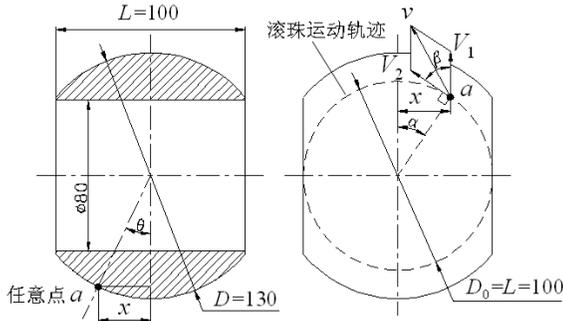


图3 球面任意点位置示意图

由于球体处于回转运动状态下，具有循环性，因此 S 的最大值满足： $S_{\max} < \theta_{\max} D/2$ 时， S 相当于进给量 f ，此时，有：

$$2\pi D \cos \theta \cdot \frac{\omega_1}{\omega_2} < \theta_{\max} \cdot \frac{D}{2}$$

$$\Rightarrow \cos \theta \cdot \frac{\omega_1}{\omega_2} < \frac{\theta_{\max}}{4\pi} = \frac{\pi}{15}$$

当 $\theta=0$ 时， $S=f$ 有最大值，主轴转速和滚压转速满足：

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} < \frac{\pi}{15} \tag{3}$$

所以，旋转滚压满足式 (3) 所示的条件时，球面上任意一点 a 的表面粗糙度可以表示为：

$$R_z = S^2 / 4d = \frac{\pi^2 D^2 \omega_1^2 \cos^2 \theta}{4\omega_2^2 d} \tag{4}$$

由式 (4) 可知，球体表面各处的粗糙度不是均匀的，其值与夹角 θ 有关，当 $\theta=0$ 时，即球体中间处的粗糙度值最大，而球体两端的粗糙度值最小。在实际的滚压加工过程中，可通过多个滚压循环来缩小球体表面粗糙度的不均匀性。由于滚压球面的主要目的是提高其硬度，粗糙度不满足要求时，可在滚压加工后再对球面进行研磨。

另外，在滚压加工过程中应避免滚压痕迹的重复，需要保证球体表面上任意一点所对应的垂直于轴线的截圆周长不被进给量 S 整除。具体为，保证： $2\pi D \cos \theta / S = \omega_2 / \omega_1$ 不为整数，即最好使主轴转速值与滚压转速值互为质数。

3.4 滚压速度分析

现在初步确定主轴转速和滚压转速。已知球体材料为 1Cr18Ni9Ti，要求表面粗糙度 $R_a=0.32\mu\text{m}$ ， $R_z=1.6\sim 0.8\mu\text{m}$ ，根据《金属机械加工工艺人员手册》表 5-43^[5] 查得：滚压速度 $v=50\text{m/min}$ ，进给量

$f=0.12\text{mm/r}$ 。

如图 3 所示，球面上任意点 a 的线速度为 V_1 ，滚珠运动线速度为 V_2 ，则滚压速度 v 与 V_1 和 V_2 满足如下关系：

$$v = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + 2V_1V_2 \cdot \cos \beta} \tag{5}$$

$$= \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + 2V_1V_2 \cdot \sin \alpha}$$

式中： $V_1 = \omega_1 D \cos \theta$ ， $V_2 = \omega_2 D_0$ ；

$$D \sin \theta = D_0 \sin \alpha$$

$$\Rightarrow \sin \alpha = \frac{D}{D_0} \sin \theta = 1.3 \sin \theta$$

代入式 (5) 可以得到：

$$v = D \sqrt{\omega_1^2 \cos^2 \theta + \frac{1}{1.69} \omega_2^2 + \omega_1 \omega_2 \sin 2\theta} \tag{6}$$

简单起见，以 $\theta=0$ 对应球面点处的滚压速度作为研究对象，有：

$$v = D \sqrt{\omega_1^2 + \frac{1}{1.69} \omega_2^2} \tag{7}$$

假如设定主轴转速为 $\omega_1=5\text{r/min}$ ，则由 $v=50\text{m/min}$ 和 $D=130\text{mm}$ 计算出： $\omega_2=79.3\text{r/min}$ 。取整： $\omega_2=79\text{r/min}$ 。

此时的进给量：

$$f = 2\pi D \cdot \frac{\omega_1}{\omega_2} = 51.7\text{mm}$$

这与普通单珠滚压 0.12mm 的进给量有较大差距，但由于旋转滚压运动具有循环特性，与普通滚压运动有根本性不同，因此进给量的差距可暂不考虑。

以上计算为旋转滚压加工提供一些参考和指导，具体的工艺参数还需要根据实际加工效果来进一步优化并确定。

3.5 滚压力计算

为了给滚压工装的设计和实际的加工试验提供指导，需要对滚压力进行初步的计算。首先确定球体材料的力学性质以及加工要求。球体材料为 1Cr18Ni9Ti，强化层厚度小于 5mm ，材料的力学性质见表 1。

表 1 1Cr18Ni9Ti 的力学性质

弹性模量 E	193GPa	抗拉强度 σ_b	520MPa
屈服强度 σ_s	205MPa	伸长率 δ_s	40%
收缩率 ψ	60%	布氏硬度 HB	187
硬度修整系数 K_p	$K_p=0.01\text{HB}-0.4$		

(下转第 47 页)