

用于高温重载的碳轴承

R. R. Paxton

(Pure Industries Inc. St. Marys, PA)

一、前言

碳轴承具有自润滑性、抗化学性、耐高温性、尺寸稳定性和高承载能力等优点,因而可简化轴承系统的设计。这种轴承可用于一般轴承难以胜任的许多场合。碳轴承的性能还在不断改善,现已有含各种添加剂、浸渍剂和使碳自身发生化学转变等多种新的品种。采用碳轴承,由于不要供油系统、油封或脂封和定期润滑,还可减轻设备重量、缩小设备体积,所以在经济上对制造厂家或用户都是有利的。碳轴承原材料价格便宜,来源充足,尽管这类轴承的加工费用约占轴承总成本的90%,但选用碳轴承仍比其它轴承要便宜些。

二、制造方法

以天然或合成石墨、石油焦、烟黑和活性碳等为填充物,其在典型的混合材料中约占75%。附加物成分为合成树脂、煤焦油沥青、石油沥青、糖或碳水化合物等其它含碳材料,它可占到混合材料的50%。添加剂是在配料过程中加入,用来改善轴承的性能的,它包括抛光剂、成膜剂、抗氧化剂和石墨化剂等,一般不超过混合材料的10%。其制造工艺为:

1. 原材料: 按要求选择碳填充物、粘接剂和添加剂;

2. 混合: 加热混合材料,使原料转变成塑性的团料;

3. 粉末准备工作: 将热的塑性团料冷却、碾碎和混合;

4. 成型: 将粉末模压、挤压或等静压成型;

5. 烘烤: 控制烘烤过程的时间、温度和压力,将有机粘接剂碳化;

6. 石墨化: 在371℃以上工作的轴承,需进行热处理来细化颗粒结构,用蒸汽处理可获得特殊的表面性能;

7. 粗加工: 将毛坯加工到尽可能接近成品的形状,使浸渍后的加工减到最少;

8. 浸渍: 在真空或压力下将树脂、金属或玻璃等渗入碳部件的空隙中,得到所要求的性能;

9. 固化: 使树脂浸渍剂交联和硬化;

10. 精加工: 精磨和精研至尺寸和光洁度达到允许的范围。

三、温度适应性

许用温度高、散热性好、抗热冲击性优良是碳轴承的重要特性。它们常运转在其它轴承不现实或不可能的工作条件下。

轴承在寿命期间,若必须在204℃以上的温度下工作几个小时以上时,就需考虑选用碳轴承,因为它不需润滑剂,导热性好,而且其强度和硬度会随温度的升高而提高。在2204℃时的强度为其室温强度的二倍。

由于碳的热膨胀系数比大多数金属的小(约为钢的 $1/4$)，当温度升高时，金属轴的热胀量大于碳轴承的，则间隙将缩小。这个问题可用一个简单而有效的方法来解决：即将一个薄的碳衬套套入预热到使用时将达到的最高温度的钢套内，加热的钢套的内径与冷的碳衬套的外径为滑配合，当金属冷却后使碳衬套受压，于是碳轴承的孔径就受到金属套的控制，使碳轴衬孔与金属轴之间的间隙几乎保持恒定。

许多实际应用证明，碳轴承能在 204°C ~ 677°C 的高温及到 -190°C 的低温下工作。

四、恶劣的工作环境

碳轴承不受溶剂、酸、碱和水的影响。因为它对大多数化学物质都是惰性的，所以可用于食品、药物或对含油、脂敏感的化学品接触处，或必须浸在汽油、喷气式发动机燃料、氟里昂或其它有机液体和盐水、盐酸、氢氟酸等腐蚀性液体中。碳轴承可反复用蒸汽、溶剂进行清洁和消毒而无不利的影响，也不需加注润滑油脂，所以在不能用油、脂的食品加工和医疗设备上有很高的应用价值。

尽管碳要靠吸附气体来实现润滑，似乎不适于真空中使用，但经过浸渍不溶性的氟化钙或氟化锂的碳轴承，在 482km 高空的气压下，其磨损量只比大气中稍有增加。

碳不受质子、电子、X-光辐射的影响。碳轴承对于核反应是安全的，它暴露在X-射线和快中子的辐照下，可工作 10000 小时。但若剂量超过 10^{20} 中子/ cm^2 时，似乎会引起尺寸变化。

五、工作条件

碳轴承的摩擦系数和磨损率一般都随负荷和转速的增大而下降，在转速为 $100\text{r}/\text{min}$

或以下工作时，轴颈轴承的允许磨损量最高可达轴颈直径的 1% 或 0.20mm 。承受交变负荷的球面轴承的允许磨损量仅为上述值的 $1/3$ 或 0.067mm 。主轴转速在 $1000\text{r}/\text{min}$ 或以上的轴颈轴承的最大允许磨损量为轴颈直径的 0.5% 。推力轴承的磨损极限为 0.635mm 。

在高负荷下应用时，碳的承载能力可用碳衬-金属的套筒轴承或球面轴承来使其增大。这种轴承在实验室高达 $6.895 \times 10^7\text{Pa}$ 的负荷下测量了它的磨损量。结果表明，如碳的品种和轴表面材料为最佳组合时，其磨损量仅为 $5 \times 10^{-8}\text{mm}/\text{m}$ 。在另一种典型的试验机上，当轴承在空气中摩擦速度为 $3.6\text{m}/\text{s}$ 、温度为 300°C 、接触压力为 $2.58 \times 10^9\text{Pa}$ 时，所测得的磨损量为 $0.001\text{mm}/\text{h}$ 。

碳轴承还可适用于长期高静载伴有低速小位移的场合下。在如 $1.72 \times 10^7\text{Pa}$ 的静负荷下可不加润滑剂。

碳在负荷下没有屈服、冷流或加工硬化现象。与大多数的轴材料相比，碳的弹性模量低，由于负荷分布在宽的面积上，故可避免轴产生应力集中。碳衬轴颈还可承受空气动力的颤振引起的脉动负荷。

六、浸渍剂的作用

将各种物料浸渍到碳精态碳或石墨化态碳的空隙中，有时也可以同时浸渍那些可使碳表面起化学反应的材料(如形成很硬的碳化硅)。采用这种方法可使碳的性能适合于更广泛的要求。当碳基轴承达到温度极限前，热塑性的浸渍剂，如石蜡、树脂、金属、无机盐、陶瓷等会溶化而流出，因此，在这样的温度下应采用热固性浸渍剂，如酚醛树脂、环氧树脂、聚酯、呋喃树脂等。这些材料在高温时发生碳化而保留在轴承内。

在需要增加轴承硬度的应用中，可利用与碳的化学气相反应，在碳轴承内径表面形

成碳化硅膜，这样的表面上还保留有游离的石墨颗粒以润滑轴承。

一般来讲，含有热塑性或热固性的浸渍剂的碳轴承的抗压强度可达 $3.1 \times 10^8 \text{ Pa}$ ，适应温度达 260°C ，渗银的碳轴承有优异的热传导性，可用到 510°C ；渗无机盐（如磷酸铝、磷酸锌）的碳轴承可用到 680°C 的高温，在此极限温度下的抗压强度为 $1.9 \times 10^8 \text{ Pa}$ 。

当使用温度超过 327°C 时，通常要加入不易挥发的氧化抑制剂，如磷或硼的化合

物，它们有助于降低与空气的反应（或损失强度），和改善抗磨性。

当轴承在 $-47 \sim -251^\circ\text{C}$ 的液态气体、真空或干燥条件下工作时，通常至少要含有5%无机膜形成剂，如银、不溶的氟化物或磷酸盐等。银和氟化钡通常能作为空间及高真空应用的浸渍剂，因为它们能大大地改善抗摩和抗磨性能。

现介绍几种碳轴承的室温特性，见表1所列。

表1 几种轴承级碳的室温特性

	多孔碳	浸渍以下物质的碳			
		树脂	巴氏合金	铜	玻璃
品种*	P-5	P-9288	P-5732	P-55	P-2003
密度($\text{kg}/\text{m}^3, \times 10^{-3}$)	1.72	1.90	2.25	2.40	2.00
压应力($6.895 \times 10^6 \text{ Pa}$)	30	40	27	55	33
弹性模量($6.895 \times 10^{10} \text{ Pa}$)	2.4	3.5	3.8	4.4	2.2
肖氏硬度 C	85	95	70	95	90
热膨胀系数($4.57 \times 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{h}/^\circ\text{C}$)	2.5	2.9	2.6	2.7	2.7
导热率($5.9 \text{ m}/\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)	5	9	9	8	45
最高荐用温度($^\circ\text{C}$)	315	260	204	315	621

*表中的品种为Pure Carbon公司设计的。

七、使用方法简便

碳轴承的形状简单，套筒轴承用于承受径向负荷；盘状轴承用于承受推力负荷；球面轴承用于有调心要求的场合。

使用碳轴承具有较好的经济效益。对于同一额定负荷，选用的碳轴承不仅尺寸比滚动轴承小，重量也较轻，而且可在机内安装，它比机外安装所需的空间要小得多。

当在具有一定粘度的液体中工作时，碳轴承与青铜或巴氏合金衬轴承的设计方法相同，但碳轴承所允许的间隙较大，而且在负载下都能启动、停止。如果液体中含有悬浮的固体颗粒时，则推荐用硬度不低于HRC35的钢轴。对于浸没式工作的碳轴承与材料和光洁度选择得当的轴相配，其寿命比同样环境中工作的铜或巴氏合金轴承要长得多。

干摩擦下碳轴承的磨损率在 $10^{-7} \sim 10^{-12} \text{ mm}/\text{mm}$ 之间，它取决于碳的等级、轴的材料及其光洁度、温度和负荷。在最高温度下工作时，轴的硬度以不低于HRC35为好，推荐的径向间隙为轴径的0.25%，但不小于 0.025 mm 。

现将推荐使用的的数据列于表2。

表2 推荐的碳轴承设计数据
($\times 39.37 \text{ mm}$)

轴 径	最小间隙	最小壁厚
0.25	0.001	0.090
0.50	0.002	0.125
1.00	0.003	0.187
1.50	0.004	0.312
2.00	0.006	0.437
3.00	0.008	0.625
4.00	0.009	0.750
5.00	0.011	1.0

八、设计中应注意的事项

1. 使碳轴承处于受压状态, 因为碳的抗压强度为抗拉强度的5~10倍。
2. 轴承机构的应力都必须确实在其各自材料的设计极限内。
3. 要考虑和计算热膨胀对轴承及相邻结构的影响。
4. 用较保守的摩擦系数0.15~0.20来估计其发热量, 以确定是否需要冷却。
5. 采用硬度不低于HRC35的轴, 如有可能, 最好采用镀铬轴。
6. 不要在未全面考虑各种因素时随意将碳轴承换成其它轴承。
7. 不要用青铜或铝轴。
8. 没有自调心结构时不宜采用碳轴承, 因为这难以保证轴承的对中心性。
9. 除非负荷特轻的情况下, 摩擦速度不得超过1 m/s。
10. 与碳对摩时, 轴或止推垫表面的光洁度推荐值为0.04~0.08 mm (rms)。

九、应用实例

碳轴承能在各种环境和条件下工作, 以下介绍几个应用实例。

1. 玻璃退火炉传送装置用轴承

碳-石墨衬轴承在空气和炉气中干转, 最高温度为274℃, 钢轴的转速为30r/min, 轴径为38mm, HRC35, 光洁度为0.04~0.08 mm (Ra)。

2. 飞机燃料泵用轴承

渗银的碳-石墨轴承, 为向心推力轴承, 浸没在JP5、JP6飞机燃料中工作。轴是直径为15.875mm的镍合金G, 光洁度为0.10~0.020 mm (Ra), 负荷为 5.85×10^6 Pa, 液体温度为-53~70℃。

3. 制冷压缩机用轴承

渗巴氏合金的碳-石墨轴承, 轴材为铸铁, 轴径28mm, 光洁度为0.40 mm (Ra), 负荷为 7.58×10^6 Pa, 用含1%100-SSU汽轮机油的氟里昂F-22飞溅润滑, 轴速为3480 r/min, 正常温度为38℃, 有时在-7~177℃之间变化。

4. 飞机发动机定子支承轴承

浸渍氧化抑制剂的石墨衬轴承, 承受 3.45×10^6 Pa的摆动负荷, 转速为0~0.1 m/s, 在热空气中及温度峰可达599℃的喷气发动机排气口工作。轴径为11mm, 轴材为A-286钢, 硬度为HRC45, 光洁度为0.04~0.08 mm (Ra)。

(王志平摘译自《Machine Design》, 57(1985), 29: 90~95. 徐锦芬校)

(上接第131页)

从事实际工作的专家对八十年代润滑的各种问题进行的讨论, 其中第2卷登载的内容就是固体润滑。

此外, 有关摩擦学的总体情况, 已经出版的有木村好次和岡部平八郎合著的《摩擦学概论》, 养贤堂, (1982)。本书的特点是

内容丰富、通俗易懂。

参 考 文 献(略)

(王安钧译自日刊《机械の研究》37(1985), 12: 1387~1391)