

共晶石墨钢研究进展及应用分析

胡志涛，原乐

(山西建邦集团铸造有限公司，山西 临汾 041000)

摘 要：共晶石墨兼顾了淬火钢的强韧性、耐磨性与球铁的自润滑性、吸音减震性能而发展出的一种“结构赋能材料”，其本质是“在连续铸造的强冷却条件下，在狭窄的伪共晶区获得全断面 100%共晶石墨、100%球化率的球铁型材，经等温淬火而制备的超细密 Fe/G 复合材料”。共晶石墨钢在具备传统钢质结构材料所要求的力学性能之外，还被赋予如下性能和微观组织优势：依赖石墨的固体润滑作用，使摩擦副零件表面具有了自润滑性能；恰当直径的石墨球使材料有效吸收声波和震动，提高热导率，降低温升。总之，共晶石墨钢给原本以力学性能为主的钢铁结构材料又赋予了物理性能、化学性能和工程适用性能，依赖石墨的独特特性，可广泛应用于精密传动领域。

关键词：共晶石墨钢；应用；自润滑性；吸音减震性

无论军工装备还是民用装备，精密传动机构中关键基础零部件所用材料，均以钢质材料为主。传统钢质材料（碳钢、低合金钢、高合金钢）的设计目标，以满足机械零件所需的力学性能为主，亦即是作为结构材料来使用的，而较少考虑其它性能。为了适应越来越复杂和严酷的使用工况，有必要在单纯的结构材料之外，发展出一种“结构赋能材料”，即以结构材料为本体，使其具有力学性能之外其它的一种或多种性能的复合材料。以“电、磁、光、热”转换及其效应为使用价值的功能材料，大多以独立器件的形式与结构零件捆绑集成，而从材料本身组织性能的原始复合上讲，“结构赋能材料”在其已有的力学性能之外可以赋予的性能，主要包括：自润滑、低摩擦、低噪音、低温升、高阻尼（减震）、高导热、防锈蚀等性能。

1 共晶石墨钢对结构材料“赋能”的技术原理

1.1 石墨的润滑功能

共晶石墨钢基体中镶嵌的石墨球，是使共晶石墨钢具有自润滑、低噪音等等一系列性能的关键要素。石墨是碳质元素结晶矿物，它的结晶格架为六边形层状结构（见图 1）。在石墨晶体中，同层的碳原子间距为 1.42 \AA ，每一个碳原子以三个共价键与另外三个原子相连。六个碳原子在同一个平面上形成了正六连连形的环，伸展成片层结构，属于原子晶体。而层与层之间相隔 3.40 \AA ，距离较大，是以范德华力结合起来的，属于分子晶体。原子晶体和分子晶体的内力差距很大，据计算，层与层间碳原子的结合力要比同一层内碳原子间的结合力小 100 多倍。故在受到外力作用时，石墨层面容易发生解理，而同层原子间不易分离，所以石墨永远呈现“片状结构”。石墨片之间的摩擦系数，低至 0.05，石墨的开始氧化温度为 $325 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，成为最稳定可靠最常用的固体润滑剂。在滑动轴承中，早就利用石墨的润滑性能，采用镶嵌石墨圆柱的方法，制造出自润滑轴承，如图 2 所示。

显而易见，这种自润滑结构不能用于滚动轴承和齿轮之类重要零件，因为在基体材料中机械镶嵌石墨块，严重破坏了材料的整体强度和动载能力，制造工艺也十分繁琐。要想利用石墨的自润滑等性能，必须寻找一种“冶金镶嵌”的方法，也就是在材料凝固成形阶段就获得了“钢基体+石墨球”的浑然一体的复合组织。球墨铸铁和 ADI 材料属于这种“冶金镶嵌”石墨球的复合组织，然而二者的石墨形态不甚理想，致使其承受高速动载的性能欠缺。球墨铸铁的力学性能太低，无需赘言。即使对等温淬火球墨铸铁 ADI(Austempered Ductile Iron)材料来说，由于所镶嵌的石墨球直径较大（ $50 \leq d \leq 100 \text{ }\mu\text{m}$ ），对基体的割裂

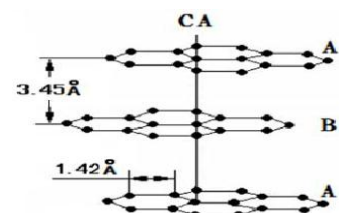


图 1 石墨的原子结构



图 2 传统的自润滑滑动轴承

作用仍然不可忽视,加之球化率达不到 100%,存在着应力集中的隐患,只能用在载荷较小的构件上,对于齿轮、轴承这类关键零件来说,不堪重任。

1.2 共晶石墨钢中石墨形态的特点

共晶石墨钢,其石墨形态克服了普通 ADI 材料中的不足,具有如下特点:

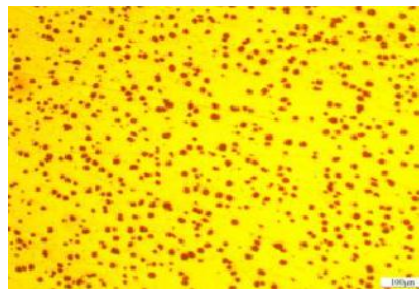
(1) 石墨为 100% 的共晶石墨球。铁水的碳当量处在狭窄的共晶成分范围内,冷却时不与相图上的液相线相交,故无初生的石墨或奥氏体晶粒产生,只有在温度降到窄小的伪共晶区后才同时结晶出石墨球和奥氏体枝晶。这种材料中的石墨球的直径,在 $15\sim 25\ \mu\text{m}$ 之间,平均为 $20\ \mu\text{m}$ 。需要强调,直径 $< 10\ \mu\text{m}$ 的石墨球在随后的球化退火和等温淬火过程中,因曲率半径太小,碳原子容易溶入铁素体,失去了石墨的应有作用。所以,平均直径 $20\ \mu\text{m}$ 的石墨球,是最佳尺寸。

(2) 球化率 100%。由于冷却速度快,过冷度大,石墨的密排六方晶体的棱边上,结晶潜热大于 {1000} 基面上的结晶潜热,导致基面快速生长,最后得到圆球形石墨。

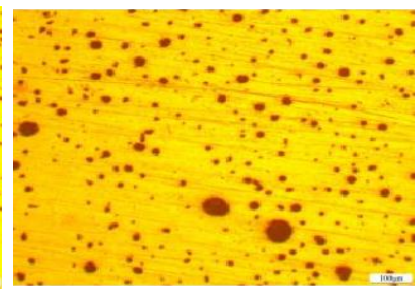
(3) 石墨球在小尺度范围内弥散分布。与石墨球同时生长的奥氏体枝晶,扰乱了铁水在微区内的流动,从而也阻挡了石墨球的成串漂浮,使之弥散分布。

(4) 在随后的球化退火和等温淬火过程中,极个别石墨块棱角处的碳原子最先溶解进铁素体,使石墨球的圆整度进一步提高,球化率达到 100%。

由于以上原因,共晶石墨钢的石墨形态与普通 ADI 有了重大区别,如图 3 所示。图中 (a) 为 100% 共晶石墨球,球径 $15\sim 25\ \mu\text{m}$,而 (b) 为普通 ADI 的石墨形态,其中包含了较大的石墨球或石墨块,相应地,石墨球数量也要少。定量金相



(a) 共晶石墨钢



(b) 普通 ADI

图 3 共晶石墨钢和普通 ADI 中石墨形态的对比

测定表明,共晶石墨钢中的石墨球密度为 $300\sim 700$ 个/ mm^2 ,而工业生产的普通 ADI 的石墨球密度为 200 个/ mm^2 以下。

1.3 共晶石墨钢中石墨球的吸音减震功能

石墨具有吸音减震功能,其强弱与总表面积大小相关。共晶石墨钢中石墨球,体积小,球数多,与基体间的交界面积,约是普通 ADI 的 20 倍以上,对声波和震动的传播形成了强大的阻尼,吸音减震功能较强。

1.4 共晶石墨钢中的石墨形态所引致的其它性能

(1) 细小弥散的石墨球也提高了材料的导热能力,热导率比钢提高近一倍,加之因自润滑性能而省却了使用润滑油脂,散热条件良好,用其所制的零部件的温升较低。低温升的有益效果除了能保持传动机构原始装配精度之外,对军事装置来说,红外辐射较小,隐身性增加。

(2) 设备在严寒环境下使用,灵活性不受影响。因为使用润滑脂的传动机构,在低温下受润滑脂粘稠度增加的影响,转速和加速度转矩会显著降低。

(3) 裸露在摩擦面上的石墨坑的深度平均为 $10\ \mu\text{m}$,石墨坑的面积约占总摩擦面积的 15% 左右,正好形成了减少摩擦力的最佳表面织构形态,进一步产生了减摩效果。

(4) 共晶石墨钢的比强度高于调质钢和铝镁合金,有助于设备的轻量化。

1.5 共晶石墨钢微观组织的优越性

与细小的石墨球相对应,共晶石墨钢的基体组织也比普通 ADI 组织更细密,但仍与普通 ADI 一样,是由含硅量较高的细针状和薄片状铁素体以及高碳奥氏体组成,细小的高碳奥氏体有些分布在铁素体针片之间,有些镶嵌在铁素体针之内的亚晶界上。

2 共晶石墨钢自润滑性在精密传动件上应用分析

在机械装置中,所有摩擦副零部件——轴承(包括滚动轴承、关节轴承、滑动轴承)旋转、齿轮传动、导轨滑块运行的前提条件是要有良好的润滑。然而由于加工、装配精度的限制和使用中的弹性变形影响,无论在理论上还是在实际使用中,都无法避免不良润滑甚至无润滑的情况发生。不良润滑(边界润滑)大大增加了摩擦材料表面的磨损率,而无润滑(干摩擦)更是在短时间内导致摩擦副零件报废。有关流体膜润滑、边界润滑和无润滑条件对材料磨损率的影响,如图7所示。

由图可见,无论是载荷大小、速度快慢还是温度高低,流体膜润滑都会大大降低材料的磨损率,延长摩擦副零件的精度寿命和使用寿命,而在干摩擦条件下,零部件的精度和使用寿命很短。

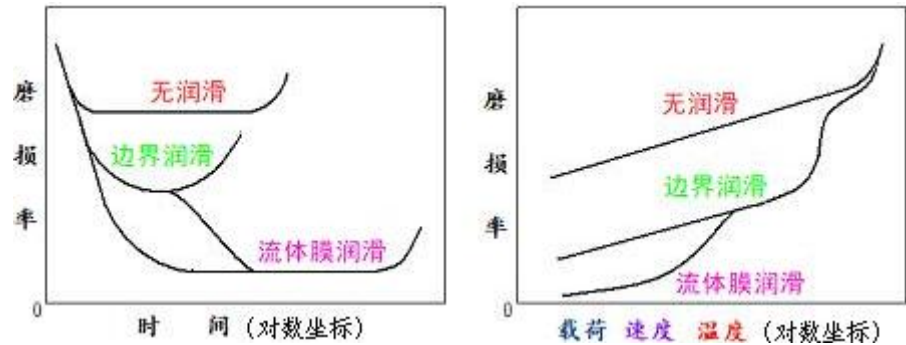


图7 润滑状况对材料磨损率的影响

(1) 对于齿轮啮合传动,即使在精确装配机构中,除了节圆处是滚动摩擦之外,齿面其余部位都有滑动摩擦存在,而滑动摩擦容易拉断油膜,形成瞬间干摩擦。在一般工程载荷下,瞬间干摩擦可使齿面局部点达到 700℃左右高温(即“闪温温度”),两点瞬间焊合(图8)后又瞬间撕裂,造成“粘着磨损”。在中低速运动中,粘着磨损是最主要的磨损形式,在高速运动下还会引起氧化磨损,如图9所示。避免瞬间干摩擦的一个措施是附加强力喷油机构,但在多数情况下,出于空间体积限制和制造成本的考虑,无法进行强力喷油润滑。

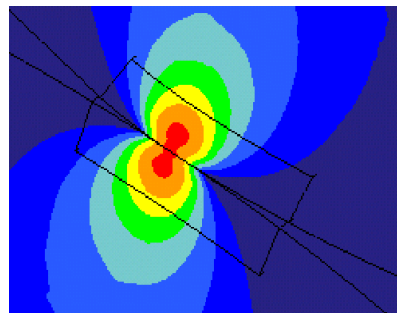


图8 齿面间的闪温和焊合

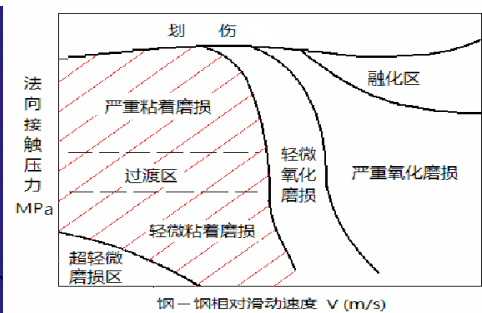
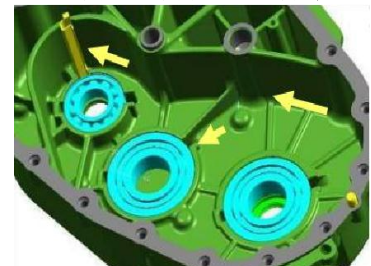


图9 齿面磨损形式分布



图10 博格华纳的电动汽车减速器中的润滑油路



粘着磨损一旦发生并有少量累积,便会导致因果恶性循环,很快使齿轮精度丧失,使用寿命缩短。多数传动机构采用“飞溅润滑”和“油链润滑”等方案,巧妙地解决了齿轮传动中的润滑问题,但其代价是需要严密的密封结构以防止漏油,密封抱紧结构必然增加摩擦阻力和温升,减损了运动的灵活性。此外,需要经常检查和定期注油,也增加了维护成本。譬如博格华纳的电动汽车减速器上,采用了所谓的“无节制设计”方案,利用齿轮的自然泵送作用来润滑轴承和密封件。见图10。这样的结构必然需要可靠的密封,由此带来诸多不便。

另外,在精密减速器(谐波减速器、RV 减速器、行星减速器等)中,狭窄的空间内无法实施飞溅润滑或油链润滑,只能填充润滑脂。润滑脂过稀容易渗漏,过稠则难以锥入摩擦面。在高速旋转机构中可以靠吸力解决锥入润滑的难题,但在减速器中无就无法实现,过多的润滑脂并不能发挥作用,反而增加了剪切热,同时阻挡了热量散发,成了保温材料。

(2) 滚动轴承旋转时,受加工和装配精度的影响,在滚动体与套圈之间总会有一定的滑动摩擦存在。轴承旋转的线速度大大高于齿轮,润滑的重要性更加显著。世界轴承制造最大企业——瑞典 SKF 公司对轴承寿命(L10na)估算的简化公式是:

$$L_{10na} = \alpha_1 \alpha_{skf} (C/P)^{\epsilon}$$

其中 α_l 、 C 、 P 、 ε 是与轴承材料、加工与装配有关的参数，而系数 α_{skf} 的取值范围在 1~50 之间，确定的取值主要地决定于润滑状况。也就是说，对滚动轴承而言，润滑是其寿命长短的决定性要素。事实上，工程使用中的轴承多数是由润滑不良或无润滑造成。

为了保证润滑又不渗油，移动装备（车辆轮毂轴承）上采用大填充量润滑脂密封结构。这一方案的副作用有二：一是润滑脂本身有剪切热产生，大量堆积又影响热量散发；二是润滑脂的黏着性增加了传动机构的启动阻力，降低了加速度转矩和灵活性。

（3）关节轴承(包括向心关节轴承和杆端关节轴承)，其结构特点导致润滑脂难以加注和储存。因此，除了在某些航空部件上使用金属/金属关节轴承并执行严格的定期加注油脂制度外，在大多数场合下是采用“自润滑轴承”，这种轴承的球形摩擦面上，粘贴了聚四氟乙烯膜。聚四氟乙烯膜的摩擦系数很小，也能工作在 150℃ 的温度，然而它无硬度可言，又抵抗不了挤压变形，故其使用寿命和可靠性有限。在球关节上镶嵌石墨块，是另一种自润滑结构，见图 11 (c)。这种轴承制作工艺复杂，成本较高。

（4）滑动轴承。滑动摩擦比滚动摩擦的摩擦阻力大得多，所以滑动轴承比滚动轴承更需要良好的减摩性、耐磨性、抗咬合性和抗压强度，也需要良好的摩擦顺应性、磨合性，耐腐蚀性、抗疲劳性，以减少摩擦磨损，延长轴承的使用寿命。

在滑动轴承的材料选择和结构设计上，最早就开始了制造自润滑滑动轴承的实践。如用含铅的 ZCuPb30（30 铅青铜）制造滑动轴承，用于高速、重载、承受冲击载荷的场合；用含油含石墨的粉末冶金材料制作轻载滑动轴承；使用最多的是以铜合金



图 11 关节轴承



图 12 涂覆自润滑材料的滑动轴承



图 13 镶嵌石墨柱的滑动轴承

或钢作瓦背，在其上涂覆一层低摩擦的塑料材料（图 12），以及在铜合金筒壁上镶嵌石墨柱（图 13）。

这两种滑动轴承的缺点是，除了制造工艺复杂之外，前者的涂覆层既然是塑料材料，硬度就不会高，减摩好而耐磨性差，同时还有一个与基体材料结合力大小的问题。后者所用材料为铜合金，成本高，密布其上的孔洞也降低了轴承的整体强度。

（5）直线导轨依靠滚珠、滚针或滚珠在导轨和滑块之间作无限滚动循环，与滑动摩擦的直线导轨相比较，滚动摩擦的结构比较复杂，但是其摩擦系数只有后者的 1/50。由于启动摩擦力小，相对的无效运动较少出现，很容易达到微米级的进给和 0.2 μm 的重复定位精度。直线导轨副中，导轨与滑块之间作了约束单元设计，可同时承受上下左右各个方向上的载荷。直线导轨使用广泛，但在一些特殊场合尤其是军工装备上，传统产品缺乏自润滑，暴露出了固有的缺陷，适应不了特殊的工况需要。譬如安装在复杂设备心部的直线导轨，难以定期加注润滑油，导致其在使用一段时间后，因缺油而干摩擦，丧失精度，寿命缩短；因操作维修工疏忽而未定期加注润滑油；在一些特定设备（如医疗测试、真空设备）上不允许有油气蒸发。

解决问题的出路仍然是自润滑。现在所应用的“自润滑导轨副”是在端盖与刮油片之间附加一个润滑机构，滑块外端备有一个可换式油箱，油箱内装导油元件，由润滑机构来润滑导轨珠槽。显然，这种导轨只是延长了定期加油的时间间隔，并不属于真正意义上的自润滑。

3 共晶石墨钢吸音减震性在精密传动件上应用分析

噪音和震动对军工装置隐身性的影响很大，在齿轮和直线导轨上尤其明显。

3.1 齿轮传动

一对齿轮啮合时，相同的基圆展开角所对应的渐开线弧长不相等，由此产生齿面相对滑动，整个啮合

线上齿廓间相对滑动速度的大小随啮合点位置不同而改变。在运转过程中,因齿面滑动摩擦力的方向在节点处要发生翻转,导致齿轮节点上发生力的脉动,形成脉动冲击;另一方面,每个受力轮齿周期性的弹性变形使下一个受力轮齿不能得到设计齿廓的平滑接触而发生碰撞,形成了“啮合冲击力”,激发起齿轮的周向、径向和轴向震动,从而产生噪声。加工和装配中不可避免存在着的齿距、齿形与系统等误差,强化了上述机理的作用效应,使震动和噪声进一步加大。

节点脉动冲击与齿轮的传递功率、转速和齿面粗糙度正相关,而啮合冲击力与齿轮齿轴材料的弹性模量和结构设计有关。多年来,工程师们通过选用适当的模数、齿数、变位系数、齿廓修形、提高齿轮精度、合理控制基节差、合适的工艺手段与热处理方法、合理设计齿轮箱体结构、选用适当的润滑油、提高装配精度等等方法,在减震降噪方面取得了显著的成就。一个突出的事例就是,在以内燃机为动力的汽车上,变速箱的噪声远远低于发动机。

然而,随着输入给减速器的转速成倍增加的现实(如电动汽车的电机转速 $\geq 12\,000\text{ r/min}$,是燃油车发动机输出转速的4倍以上),原有的精密传动机构噪音太大,因为在其它条件相同的情况下,噪音强度与机构的转动速度正相关。此外,高转速机构在启动和停机过程中,必然有多个阶数的系统固有频率的共振被激发出来,造出较大噪音和震动。轻量化设计要求齿轮的传递功率加大,增加了齿轮的节点脉动幅度和啮合冲击力,也提高了传动噪声。目前,减速器噪声问题已经成为电动汽车设计制造中的拦路虎之一。

在机械设计和制造的合理性与加工装配达到极致之后,进一步降低噪音的有效途径自然是使用新材料。传统高阻尼材料很难兼顾强韧性和耐磨性,而共晶石墨钢具有比淬火钢低得多的振幅响应(图14)。本项目前期实验结果表明,在模数3齿轮的齿根弯曲疲劳强度试验条件下(共振),系统的共振噪音比20CrMnTi 渗碳钢/42CrMo 钢制齿轮降低了3倍以上。图15是作齿根弯曲疲劳试验时的情形。

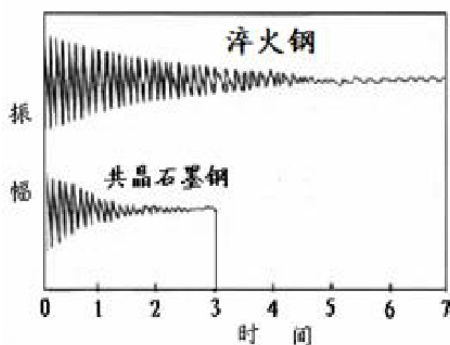


图14 淬火钢与共晶石墨钢的噪音对比



图15 齿轮齿根弯曲疲劳试验

3.2 直线导轨

随着直线导轨的运动速度越来越高,润滑和噪音问题将越来越严重。运动速度越高噪音越大,噪音来源于滚动体与保持架之间的撞击和与导轨的瞬间干摩擦,为此而有“静音导轨副”等新产品。静音导轨副的设计思路是在滚珠之间设置同步连接器,使得滚珠均匀等间隔的排列,不发生相互摩擦和碰撞,从而降低了噪声。同时因为在连接器上附加了储油结构,也降低了摩擦阻力。这种静音导轨副的不足之处是结构复杂。

直线导轨副的主体零件使导轨和滑块。传统的导轨和滑块材料选用轴承钢(GCr15等),在腐蚀环境下使用的材料是马氏体不锈钢(4Cr13)。这两种材料很耐磨,但都不具备自润滑和吸音减震功能。如果能用既耐磨又有自润滑和吸音减震功能的材料,则可彻底解决上述难题。

4 结语

共晶石墨兼顾了淬火钢的强韧性、耐磨性与球铁的自润滑性、吸音减震性能,具备传统钢质结构材料所要求的力学性能之外,依赖石墨的固体润滑作用,使摩擦副零件表面具有了自润滑性能;恰当直径的石墨球使材料有效吸收声波和震动,提高热导率,降低温升等优点,在精密传动领域存在广泛应用的可能性。