

固体润滑概论 (12)

西村 允

(日本航空宇宙技术研究所)

12. 金属加工

12.1 前言

固体润滑剂若是在高温下也能发挥润滑作用, 那么它在切削、磨削、压力加工和锻造等金属加工方面的应用也都将是活跃的。实际上, 在以锻造为主的塑性加工领域已经使用了固体润滑剂, 而其在切削和磨削领域的应用却都还停留在试用阶段。

即使在同样是塑性加工的压延加工方面, 不论是冷加工还是热加工却都还没有使用固体润滑剂。尽管如此, 今后在热压延加工中还是有可能使用的。

下面将着重阐述用于锻造方面的固体润滑。本章的主要参考资料是文献[4]。

12.2 用于塑性加工的固体润滑剂

塑性加工用的固体润滑剂可以采用坯料涂敷或金属模具涂敷, 既有只涂敷其中之一的, 也有将两者全都涂敷的。

一般说来, 塑性加工用的固体润滑剂需要具备以下特性:

- (1) 摩擦系数低;
- (2) 在加工温度下是稳定的;
- (3) 对金属模具和坯料均无腐蚀;

(4) 不污染环境;

(5) 脱模性好。

用于金属模具涂敷的固体润滑剂不仅应对表面的附着强度高, 而且还需满足反复使用的要求。用于坯料涂敷的固体润滑剂最好是在加工中停留于坯料的表面, 而在加工之后又应当能够很容易从坯料的表面被清除掉。实际上, 要使固体润滑剂兼有如此矛盾的性质是很困难的。目前, 成品表面固体润滑剂的清除方法正在成为急待研究的一大课题。

塑性加工大都必须承受 $2 \times 10^8 \text{ Pa}$ 以上那样大的单位面积压力, 尤其在升温加工的温锻和热锻的情况下, 都要使用以石墨为主的固体润滑剂进行润滑。下面就对使用石墨和 MoS_2 等的情况加以说明。

(a) 石墨

石墨有天然石墨和人造石墨之分。虽然目前人们在这两种石墨是否都可以应用于塑性加工的认识上还有分歧, 但对诸如粒径、粒度分布、杂质的种类与含量, 以及结晶度等都是决定石墨润滑性的重要因素却无争论。

石墨之所以多用于塑性加工, 除了它基本具备上述塑性加工用固体润滑剂所应有的特性之外, 其价格低廉也是原因之一。

就高温安定性而言, 比石墨更好的固体润滑剂很少。石墨是一种温度越高强度越大

的稀有物质，即在从常温到2500℃的温度范围内，其抗拉、抗弯和抗压强度均随温度的上升而增大，最大值可达常温值的2倍〔2〕。图12.1所示为石墨的抗拉强度-温度曲线〔8〕

石墨的剪切强度也具有与图12.1所示曲线同样倾向的温度特性，因而可以推断它的润滑性在高温下也会降低。但是，其在空气中短时间使用的最高温度可达1000℃，而且此时的强度变化也很小。因此，与常温时相比，其润滑特性的变化也不太大。正是由于石墨具有这样的温度安定性，所以可将其应用于温塑性加工和热塑性加工。

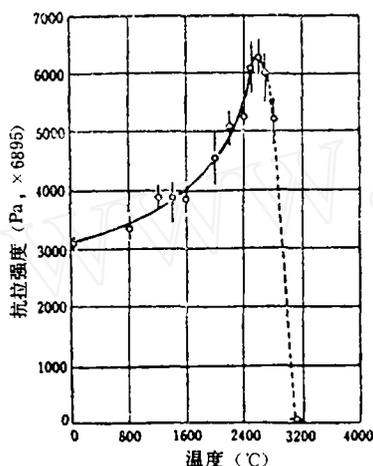


图12.1 多结晶石墨的抗拉强度-温度曲线〔8〕

石墨的另一个优点是可以与水共存，即使是以水为冷却剂或载体使用石墨，其润滑特性也不会象MoS₂的那样变差。因此，在水中分散特性良好的胶体石墨已经商品化，并且可以与水混合使用。

用于塑性加工的石墨粒径一般是1~300μm，当其粒径小于1μm时，则摩擦特性较差〔4〕。但是，若就锻造而言，因为分散安定性更为重要，所以作为水分散的胶体石墨，其粒径在1μm以下也是可以使用的。

(b) 二硫化钼

MoS₂在350℃时就发生氧化，故其高温特性不如石墨的好，而且它的价格也比石墨的高。因此，MoS₂多用于金属模具的润滑，而对于消耗量大的坯料润滑却很少使用。一般说来，MoS₂的耐载荷能力高于3×10⁹Pa，其高载荷下可以生成FeS那样的铁硫化物或铁-钼硫化物而防止烧结。

(c) 其他固体润滑剂

石墨和MoS₂都是灰黑色的，因而有时候残留在表面的粉末会损害成品美观。如果固体润滑剂是无色或白色的，则在这种场合下使用是很适合的。因为氮化硼(BN)是白色的，而且熔点高于3100℃，所以可被用作润滑脱模剂。但其价格昂贵是个突出问题。如果这个问题得以解决，那么它的特性就能得到有效的应用。

其他如硫化锌(ZnS，无色，1185℃升华)或玻璃等都是可以作为金属加工用的固体润滑剂。在低温、中温和1100℃的高温下，可以分别使用磷酸盐玻璃、硼酸盐玻璃和硅酸盐玻璃〔4〕。它们多被用于挤压加工。但是，考虑到玻璃在摩擦部位可能变成粘性流体，因而也许应该将其归入流体润滑的范畴。

12.3 锻造

金属加工，尤其在塑性加工的情况下，将坯料进行升温加工是很有好处的。图12.2为墩粗件在压力加工中变形力与温度的关系曲线〔4〕。可以看出，当温度高于400℃时，变形力就随温度的上升而迅速减小。因此，在进行高温加工的情况下，不仅可以降低工作压力，而且还有可能进行深度加工。

高温加工时的润滑方法是一个重要问题。尤其在锻造中流体膜不能承受载荷的情况下，就要使用固体润滑剂。

按照加工温度，可以把锻造分为冷锻、温锻和热锻三种。

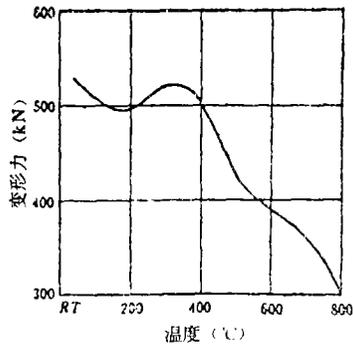
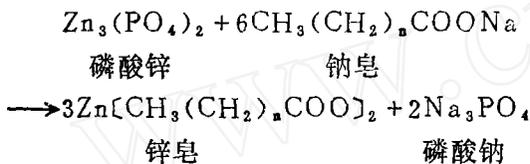


图12.2 墩粗件在压力加工中的变形力-温度曲线〔4〕

在冷锻中加工钢的情况下，可以对其表面进行化学处理。使经过磷酸盐处理的钢与金属皂反应而形成化学镀层。以使用钠皂的情形为例，反应是按下式进行的〔4〕：



这个反应不仅生成了磷酸层的表面，而且直至深部还有5~60%的磷酸层也发生反应而生成锌皂。这种锌皂具有低摩擦特性，即使在高载荷下也能防止金属接触。这样的化学镀层处理对钢是非常有效的，可以广泛应用于挤压加工或单纯的压力加工。

但是，因为锌皂的润滑特性是随温度上升而变差的，所以用锌皂的金属模具的上限温度为200℃。对于更高温度或小型成品则是使用MoS₂的场合。使用方法是在干燥状态下将MoS₂附着在坯料的表面，或是将其分散在水中进行喷涂。这样形成的涂层之重量前者（干态）为10~25g/m²，后者（水分散）为5~15g/m²。MoS₂的分散量为5~15%。

使用MoS₂的主要问题是如前所述的加工后MoS₂的清除困难和成本上升。对于成本来说，虽然可以通过诸如简化工艺等途径加以克服，但是总的看来尚无根本的解决办

法。

温加工的温度范围在从冷加工的上限温度到坯料的再结晶温度之间。钢的温加工温度是300~800℃。在低于500℃的温度下使用的润滑剂是水加石墨。虽然在500~600℃的温度范围内也可以使用水加石墨，但要添加氧化硼（B₂O₃）以防止石墨氧化。在这个温度范围内，一氧化铅（PbO）是一种很好的润滑剂，但因其毒性问题，所以现在还没有使用。

在600℃以上的温度下可以使用石墨加水或石墨加水加有机溶剂。其中有添加ZnS的，根据情况有时也可以使用玻璃。

一进入热锻造，钢坯温度就要上升到1100~1200℃，而金属模具的温度是150~300℃，最高也只不过是500℃，因而这时的润滑膜就要承受700℃以上的温度梯度。在如此苛刻条件下可以使用以石墨为主体的润滑剂。表12.1列出了金属模具用润滑剂的组分及其各自的应用目的。

表12.1 水基金属模具润滑剂举例〔4〕

组 分	含量(wt%)	应用目的
胶体石墨	36.60	润滑，脱模剂
水	38.60	载体，冷却剂
乙二醇	9.02	流动剂，抗氧剂
钼酸钠	5.00	粘结剂，防腐剂
五硼酸钠	3.18	粘结剂
碳酸钠	4.83	流动剂，形成润滑膜
CMC*	0.77	增粘剂，分散安定剂

* CMC，羧甲基纤维素钠盐。

添加10~15%的胶体石墨（粒径为0.1~1μm）作为原液，在实际使用时，再将其调制成浓度为1~2%的稀溶液，并用喷雾器喷涂在金属模具上，使之在金属模具的表面形成固体润滑膜。

这种方法的缺点是很难清除掉残留在成品表面上的石墨。为了避免石墨的灰黑色污染，有时也使用白色或无色的固体润滑剂（例如BN、ZnS或磷酸盐等）。

在铜和铝基坯料的锻造中，也可以使用

石墨加水。但是，即使在铝基坯料的情况下，也同样存在着成形后的石墨清除问题。

对于钛基坯料则使用玻璃作为润滑剂。

12.4 轧制

在轧制线、棒、管等加工中，利用热轧钢管制造无缝钢管过程中的固体润滑很引人注目。

间濂等^[6]认为，在无缝钢管的制造工艺中，固体润滑工艺的摩擦条件、润滑剂和润滑方法大体如图12.3所示。在1100~1200℃下用作润滑剂的主要是石墨。石墨既可以是粉末状的，也可以是颗粒状的，或者是将它们调制成分散液使用。

从固体润滑的角度来看，无缝钢管的制造所采用的工艺方法是十分有趣的。图12.3表明使用的是已经成形为管状的坯料，而在

图中所示制造过程之前，就有将钢棒成形为钢管的工艺过程。这种工艺是将称作冲孔销的圆锥顶住钢棒的中心，再将钢管挤开而进行钢管成形。这里的问题是冲孔销表面与钢管内表面之间的滑动摩擦。这种钢管内表面是刚形成的新生面，因而容易以其活性与冲孔销表面粘着。据文献^[7]报道，这里的润滑可以利用冲孔销表面生成的氧化物来解决。也就是说，只要在冲孔销的表面温度下有能软化的氧化物，它就可以起到固体润滑剂的作用。要很好地实施这种方法，就应当精心选择可以连续形成氧化膜的销材料和摩擦条件。这种条件的确定是制约本方法能否成功的关键，但要很好地把压住它却并非易事。作者认为，这种方法作为一种自润滑的固体润滑方法，同样也适用于其他加工领域。

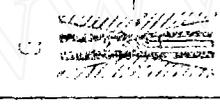
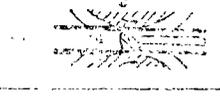
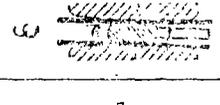
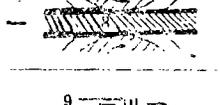
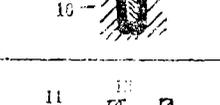
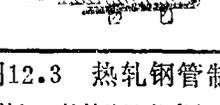
工 艺	接 触 状 态	摩 擦 条 件	润 滑 条 件
辗 轧 机		(A)1200 (B)8 (C)0.8 (D)1.2(断线) (E)1.2(断线) (F)3Cr-1 Ni	(a)石墨 (b)在轧制前投入挤压制品的内表面 (c)50g/m ²
心 棒 轧 管 机		(A)1100 (B)10 (C)4 (D)15 (E)4 (F)25Cr-3Ni	(a)石墨或石墨加食盐 (b)向芯铁内部喷涂 (c)50g/m ²
整 形 机		(A)1000 (B)12 (C)1 (D)1(断线) (E)1(断线) (F)锌铁	(a)石墨 (b)在轧制前投入挤压制品的内表面 (c)20g/m ²
心 轴 轧 管 机		(A)1100 (B)10 (C)2 (D)4 (E)10 (F)5Cr-1.5 Mo	(a)重油加石墨 (b)喷涂在棒材上 (c)30g/m ² (石墨)
Ehrhardt 压 力 机		(A)1200 (B)6 (C)0.06 (D)1.5 (E)20 (F)5Cr-1.5 Mo	(a)石墨(胶体状和粉末状) (b)喷涂和投入 (c)50g/m ²
顶 管 机		(A)1100 (B)8 (C)0.1 (D)6 (E)60 (F)25Cr-3Ni	(a)石墨, 硼砂 (b)喷涂和撒敷 (c)200g/m ²

图12.3 热轧钢管制造工艺中的润滑条件和固体润滑方法^[6]

(A)一被加工材料的温度(℃); (B)一单位面积压力(Pa, ×10⁷); (C)一滑动速度(m/s);
(D)一每一通道的滑动长度(m); (E)一每一通道的接触时间(s); (F)一工具材质
(a)一润滑剂种类; (b)一润滑剂的供给方法; (c)一润滑剂的供给量
1—轧棍; 2—销子; 3—轧棍; 4—销子; 5—轧棍; 6—销子; 7—轧棍; 8—心轴
9—心轴; 10—挤压成形模模体; 11—心轴; 12—铸模

12.5 磨削、研磨

在磨削加工中，将磨料与固体润滑剂混合使用，一般都能收到降低摩擦热和提高磨削速度的效果。目前，固体润滑剂在磨削加工中的应用还在进行广泛的试验，而要进入实用阶段还有待其在磨削砂轮中应用方法的解决〔8〕。

三宅〔8〕在研究用砂轮进行铁素体磨削的时候，发现砂轮的磨损与粘合剂的耐热性有依赖关系，认为一旦发热的原因——摩擦阻力减小，就可以使进刀量和进刀速度增大。因此，他研制了多种含不同固体润滑剂的砂轮，并且考察了这些砂轮在出现相同磨损率时进刀量与进刀速度之间的关系，结果示于图12.4。试验用的磨料是人造金刚石，粘结剂是聚氧苯甲酰。由图12.4可以看出，在添加了二硫化钨（ WS_2 ）或氟化石墨（CF）的情况下，进刀量和进刀速度都增大，而在添加了 MoS_2 或BN的情况下，进刀量和进刀速度都反而减小。

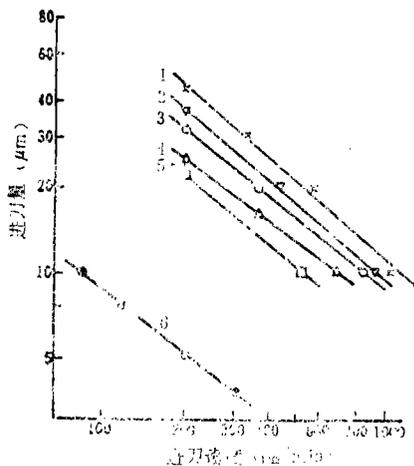


图12.4 在砂轮磨损率相同时的进刀量-进刀速度曲线〔8〕

芳族聚酯(POB)粘结的固体润滑剂复合砂轮

$V = 1320 \text{ m/min}$
1—POB- WS_2 -10; 2—POB-CF-10;
3—POB(不添加); 4—POB- MoS_2 -10;
5—POB-BN-10; 6—粘结剂为酚醛树脂

使用固体润滑剂的磨削效果之所以如此不同，这是由于固体润滑剂与粘结剂——聚氧苯甲酰的结合性能各有不同的缘故。若此二者相互结合良好，则磨料就结合得相当牢固，否则它就很容易脱落，因而磨削效果降低。

一系列的实验结果表明，适量地添加固体润滑剂，可以提高磨削比、磨削极限和加工面的光洁度。

但是，要提高喷汽发动机的压缩机效率，就必须尽可能地减小压缩机转动叶片与机壳内壁之间的间隙。Vogan等〔9〕通过试验发现，当叶片端部上附有磨料层，并且一旦接触到机壳时，内壁就会发生刮损。添加固体润滑剂对这种应用可能是有利的。此外，在诸如需要最大限度地缩小电动机的转子与定子之间间隙的情况下，这种方法也是可以采用的。

鹤田〔10〕曾就研磨作过报道，当把 MoS_2 和金刚砂混入润滑脂中对齿轮进行刮研时，与以往的湿式研磨相比，发现操作性能、安全性能和经济性能都有提高。

12.6 切削

众所周知，将TiC、TiN等耐磨性镀层镀于车刀、刨刀等的刀片或铣刀等切削工具上，都可以延长其使用寿命。同样，使固体润滑膜附着在丝锥（压头）和钻头上，也可以延长它们的使用寿命，但还没有达到实用的要求。可以认为，固体润滑在切削加工中的应用尚处于探索阶段。

13、结束语

至此，我们已经对固体润滑的概况进行了论述，并将其内容分为十二章排列起来总称为《固体润滑概论》。对粘结固体润滑膜、复合材料和添加剂等部分都作了比较详细的探讨，但没有就其中的共同问题进行更紧

密的关联。

固体润滑的适用温度范围是从 -270°C 左右到 1000°C 以上,因而也可以说很难找到通用的固体润滑剂。但也并非完全没有可能,作者认为薄膜就是其中之一。

所谓薄膜并不是前述的固体润滑涂层,而是指固体润滑涂层或复合材料的最表面的那层薄膜,以及在对偶材料的表面上形成的转移膜;若是在润滑油和润滑脂的情况下,则是在滑动面上形成的固体润滑膜。就是这些厚度一般为微米级、薄的也有 $5\sim 10\text{nm}$ 的膜显示出润滑效果。

固体润滑成功与否是不是就取决于这种薄膜的形成能力呢?如果薄膜的生成与消耗是平衡的,那就可以说润滑状态良好。若是薄膜在接连不断地消耗,那就会逐渐磨损。如果这种观点成立的话,那么重要的是应当了解直到怎样的条件下薄膜还能保持润滑性,以及当条件发生怎样的变化时,其润滑性就消失。

这种薄膜的组成不一定与基材的相同,它们之间的差异还可能很大。例如,作者在本刊(《机械の研究》)1985年第10期“背衬型轴承”部分所述Lancaster的研究结果就表明了这一点。应该强调的是要弄清楚实际上起润滑作用的薄膜,以及如何在基材表面上可以形成这种薄膜。

从实用的观点来看,这种技术也许还需要一个相当曲折的发展过程,有关的详细论述将另行发表。

就实用方面来说,迫切要求解决的最大问题是确立固体润滑的评价方法。实用结果与摩擦试验结果不对应是个要害问题。可以认为,关于这个问题需要做的事情的确很多,而我们的工作还只不过才刚刚开始。

日本润滑学会所属固体润滑研究会(主任委员是千葉工大的松永正久教授)已经着手组织二十多个有关单位对添加固体润滑剂的油脂和固体润滑膜的标准试样进行共同研

究。虽然目前尚不清楚这种共同研究能否很快确立固体润滑的评价方法,但是应当确信其至少可以为此奠定基础,因此预料共同研究的成果将是引人注目的。

下列参考书可供需要深入了解固体润滑的人们阅读:

(1) E. R. Braithwaite, *Solid Lubricants Surfaces*, Pergamon (1964)。这是有关固体润滑的第一部经典著作。

(2) F. J. Clauss, *Solid Lubricants and Self-Lubricating Solids*, Academic Press (1973)。本书作者曾在洛克希德飞机公司长期任职,其研究成果的突出特点是实用性强,数据充足。

(3) E. E. Bisson & W. J. Anderson, *Advanced Bearing Technology*, NASA SP-38, NASA (1964)。本书内容虽然不限于固体润滑,但对固体润滑却进行了非常详细的论述,特别是列举了很多超低温、高温和真空等条件下的实验例子。

(4) 松永正久、津谷裕子, *固体润滑手册*, 幸书房(1978)。本书对固体润滑的总体内容叙述得当,是修订版。

(5) 润滑, *固体润滑特集*, 日本润滑学会(1983年第5期)。本特集汇编了各个领域专家所提供的有关固体润滑的最新资料。

(6) R. R. Paxton, *Manufactured Carbon: A Self-Lubricating Material for Mechanical Devices*, CRC Press (1979)。本书对把碳和石墨用于机械部件润滑的情况作了介绍。

(7) *Solid and Liquid Lubricants for Extreme Environments*, ASLE SP-15, ASLE (1982)。本书对极限状态下的润滑方法进行了评论。

(8) *Tribology in the 80's*, NASA CP 2300, NASA (1984)。本书是各国

(下转第136页)

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)