

张弋飞¹张昕辉²

(1、北京坚润表面材料研究所 北京 100034)

(2、上海领异金属表面材料有限公司 上海 200431)

摘要：本文介绍了一种新的润滑材料——金属基润滑梯度材料 LGM，它是除油和固体润滑剂外的第三种润滑材料。采用辉光放电原理制造的、与金属零件冶金接合的润滑梯度表面材料。能降低金属零件的摩擦系数、减少磨损，是从源头上节能节材的润滑材料。与油叠加使用可进一步改善耐摩擦磨损性能，铁基 LGM 能提高接触疲劳性能一倍。已用于滚动轴承、轴瓦、齿轮，工具模具、内燃机、压缩机、柱塞泵……能使它们延长寿命。并以 LGM 钢代铜做轴瓦、以 LGM 碳钢代合金钢做滚动轴承。耐千度高温的 LGM 热轧辊提高寿命 50~100%。LGM 汽油机平均节能 4.7%。LGM 轴向柱塞马达机械效率提高 35.6%。已有用 LGM 材料的产品具有自主知识产权。

关键词：润滑 梯度材料 渗硫 表面材料 低摩擦 磨损

Lubrication Gradient Material on metal matrix

Zhang Yifei¹Zhang Xinhui²

(1、Beijing Tough& Lubricating Inst Beijing 100034)

(2、Shanghai Innovation surface Material Co., Ltd Shanghai 200431)

Abstract: A new lubricating materials - Lubrication Gradient Materials (abbrev LGM) on metal matrix are introduced. As the third lubricating material besides oil and solid lubricant, this surface material with metallurgical bonding metal matrix were made by the method of glow discharge. The LGM obviously reduced the frictional coefficient of metal parts up to 30%, and also highly improved the wear-resistance properties combine with the lubricating oil, especially the contact fatigue properties of iron matrix rise 100%. The anti-fiction metal parts were widely used, such as the sliding shoes of automotive air-conditioning compressors, the gears of truck gearbox, the shafts and roller wheels and sliding bearings of marine diesel engines, the stators and rotors of hydraulic pump, the ball-bearings of aviation instrument, the roller-bearings of hot rolling machine etc. The petroleum consumption of automotive engines with LGM parts economize 4.7%, and the mechanical efficiency of axial piston motors increase 35.6%. Some LGM parts applied for patents

Keywords: lubricating sulfurizing anti-fiction surface material gradient material

前言：

机器消耗能量的源头是摩擦，若要节能，那就要减少摩擦，降低摩擦系数。摩擦系数低了，不仅节约了能量，还能减少机器零件的磨损，增加了机器的寿命，是延长机器寿命最有效的方法。这样减少摩擦成为人类发展及当前节能减排最重大的科技课题。

经过人类数千年的努力，降低摩擦最有效的方法之一，是采用油润滑（另一个是以滚动代滑动）。除油脂以外，还有固体润滑剂（膜）：如二硫化钼、二硫化钨、金膜、银膜、聚四氟乙烯等，

早在 1985 年就有低温离子渗硫专利问世^[1]，到 1998 年又有润滑耐磨梯度材料申请专利^[2]。这两项发明不仅涉及金属材料及工艺领域；更重要的是，开创了一种新的润滑材料---金属基润滑梯度材料（简称润滑梯度材料或 LGM）；它与润滑油类似，能够普遍应用运动零部件，大幅度减少零部件的磨损，提高机器寿命，从源头上节能。本文综合了有关的论文及试验报告、应用报告，特别是材料的梯度结构，摩擦磨损性能及机器的节能试验，作较详细的介绍。

1、润滑梯度材料 LGM 的结构

金属 M 与金属硫化物 M[S]或金属氧化物 M[O]联合组成的复合材料 M[S]或 M [S] + M[O]的浓度从表面到内部逐步降低，在内部浓度则降成零。而金属 M 的浓度从内部到表面逐步降低，在表面浓度可以不降成零。

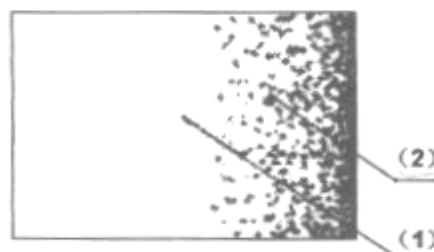
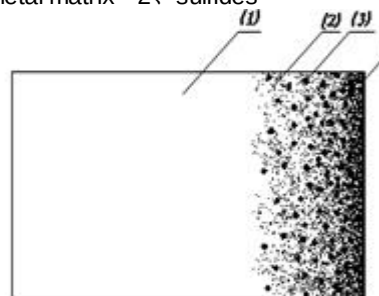


图 1—1 硫化物 LGM 结构图

Fig1-1. Sketch map of Lubrication Gradient Material with Sulfide

1、metal matrix 2、sulfides



图（1—2）硫化物氧化物 LGM 结构图

Fig1-2. Sketch map of Lubrication Gradient Material with Sulfide and oxide

1、metal matrix 2、sulfides 3、oxides

上述的上述的（a）金属 M 与金属硫化物 M[S]或

(b) 金属 M 与金属氧化物 M[O]、冶金接合呈梯度分布的金属材料因具有润滑性能,今命名为**金属基润滑梯度材料** (简称**润滑梯度材料或 LGM**) 其示意图如

(图 1—1) 是金属 M 与金属硫化物 M[S]组成的 LGM。^[3]

(图 1—2) 是金属 M、金属硫化物 M[S]、金属氧化物组成的 LGM^[2]。

润滑梯度材料 LGM 的润滑耐磨作用由金属硫化物金属氧化物产生, 它们的熔点、强度都低于金属, 在摩擦时的温度、压力下某些部份结构变化或破碎呈粉状或半熔状提高了润滑性能及抗咬合性能。特别是 FeS、CuS、MoS₂、CrS、NiS、CoS……同属六方点阵 P63 / mmc 空间群, 具有极好的润滑性能。

早在上世纪八十年代硫化物梯度材料以“表面硫化物层”专利出现, 作者及一些人称为离子渗硫或渗硫。本文在有些图、表中仍予以保留并将以往文献中的硫蒸气离子渗硫多数改为润滑梯度材料 LGM, 特予以说明。

1.1. 铁基润滑梯度材料:

主要成份是铁, 其硫化物主要是 FeS 其结构与二硫化钼一样同属 P6₃ / mmc 空间群, 具有润滑性能, 熔点 1193℃, 其他还有 FeS₂ 等. 氧化物 Fe₃S₄ \ Fe₂O₃ \ FeO 等。以 GCr15 轴承钢为例⁽

(a) LGM GCr15 材料^[4]

从材料断面**硫化物、氧化物** A E S 谱 (图 1—3)。(图 1—4) XRD 分析可以看出 LGM GCr15 的硫化物、氧化物呈梯度分布。其厚度约 120μm

(图 1—5) 是硫化物氧化物 LGM GCr15 的断面金相。

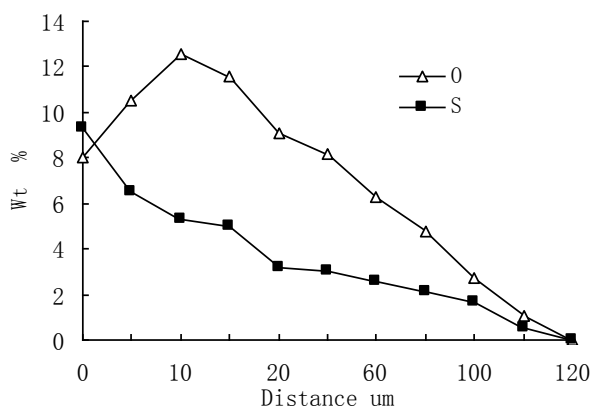


图 1—3 硫化物氧化物 LGM-GCr15 钢 AES 分析
Fig1-3. AES analyzing of elements of LGM with GCr15 steel

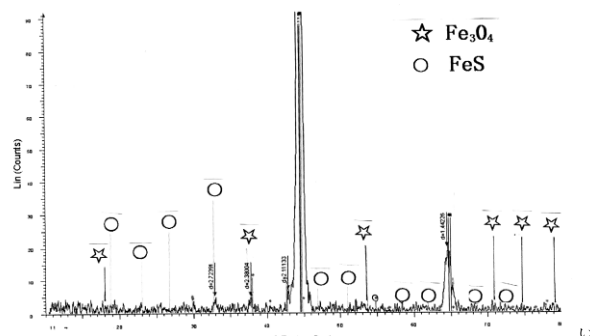


图 1—4 硫化物氧化物 LGM-GCr15 钢 XRD 分析
Fig1-4. XRD analyzing of sulfides and oxides of LGM with GCr15 steel

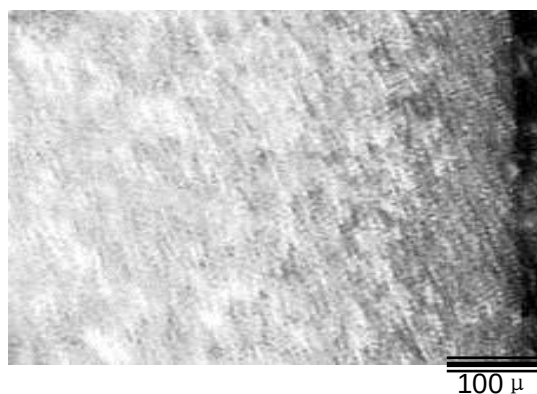


图 1—5 硫化物氧化物 LGM-GCr15 钢金相
Fig1-5. Microstructure of sulfides and oxides of LGM with GCr15 steel

(图 1—6) 是**硫化物 LGM** 材料断面 A E S 谱, (图 1—7) 是断面 XPS 图, 可以看出硫化物 LGM 材料厚度约 120μm。

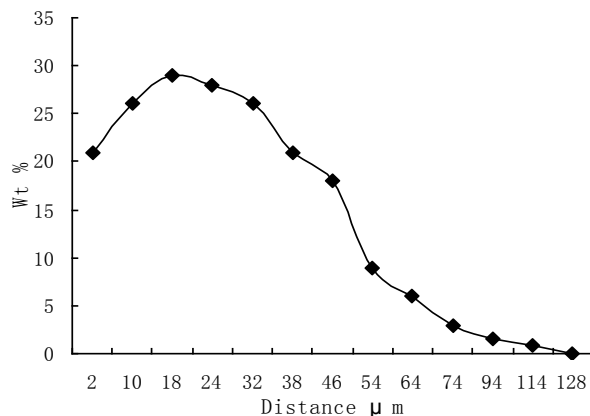


图 1—6 硫化物 LGM-GCr15 钢断面 AES 分析
Fig1-6. Cross-section AES analyzing of sulfur element of LGM with GCr15 steel

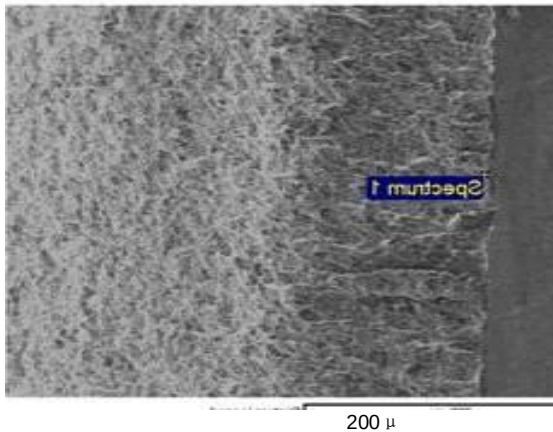


图 1—7 硫化物 LGM-GCr15 钢断面扫描电镜图
Fig1-7. Cross-section SEM micrograph of sulfur element of LGM with GCr15 steel

(b) LGM 碳氮共渗 20 钢

(图 1—8) 是硫化物 LGM 碳氮共渗 20 钢材料断面 AES 谱^[3], (图 1—9) 是断面金相, 可以看出硫化物 LGM 材料厚度约 160μm。(图 1—10) 是其 XRD 图。硫化物是 FeS。

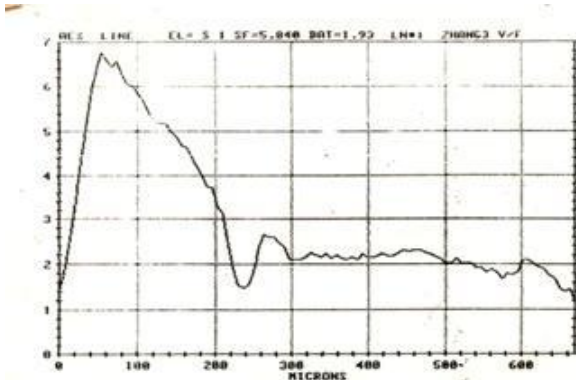


图 1—8 硫化物 LGM 断面 AES 谱
Fig1-8. Cross-section AES analyzing of sulfur element of LGM with carbon-nitriding steel

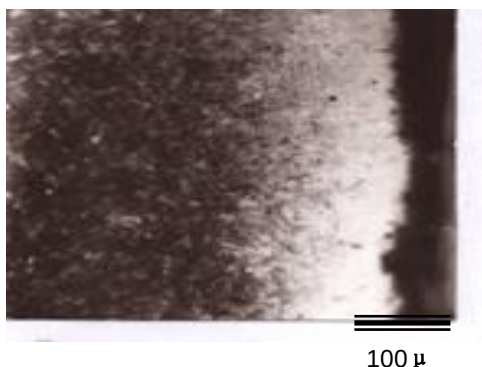


图 1—9 硫化物 LGM 断面金相
Fig1-9. Microstructure of sulfides of LGM with carbon-nitriding steel

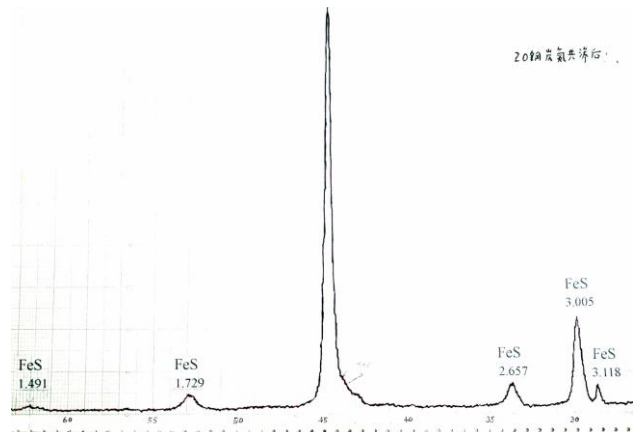


图 1—10 硫化物 LGM XRD 图
Fig1-10. XRD analyzing of sulfides and oxides of LGM with carbon-nitriding steel I

(c) 其他 LGM 钢铁材料:

从 LGM 10 钢、45 钢、40Cr 钢、T10 钢、W18Cr4V 钢、灰铁等, 其金相、XRD、AES 谱^[3] [5] [6], 均表明是硫化亚铁 (FeS) 为主的铁基梯度材料,。从 T10#钢 (图 1—11) 可以看出, 在放大 1000 倍以后最外表面有约 1μm 黑色纯化合物 Fe[S]及 Fe[O]。此层的内面是点状化合物, (这在 T10 钢金相所没有的) 直径小于 1μm 弥散分布在原珠光体基体中 (类似渗氮钢中的扩散层), 由表面到心部化合物逐渐减少。

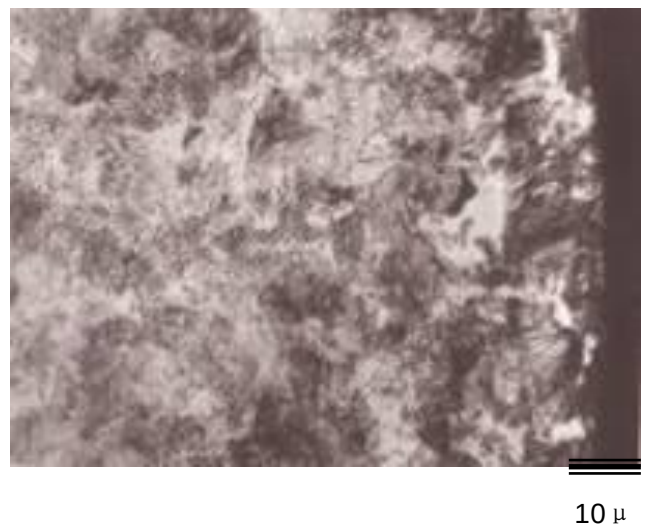


图 1—11 硫化物 LGM-T10 钢断面金相
Fig1-11. Microstructure of sulfides of LGM with tool steel(× 1000)

由于制造工艺的原因, 渗硫整个工艺过程常避不开空气中的氧, 在钢铁材料离子渗硫时, 因氧的存在不按人们的设计自然的生成了氧化物。采用电子探针方法的分析仪器或其他分析仪器, 都可以检测出。

1.2. 非铁金属基润滑梯度材料

(a) LGM 黄铜

黄铜主要成份是铜、锌，等。从其断面 AES 谱（图 1—12）、

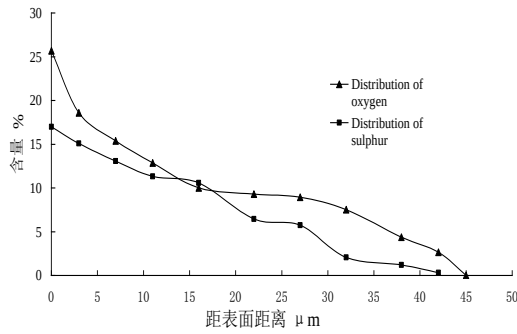


图 1—12 硫与氧在 LGM 黄铜中梯度分布
Fig1-12. Cross-section AES analyzing of elements of LGM with brass

可以看出黄铜断面的硫化物、氧化物呈梯度分布。其厚度约 40μ 。（图 1—13）是 X R D 图，其硫化物主要是 CuS_2 ， $\text{Cu}_{1.96}\text{S}$ ，氧化物是 Cu_2O 等。

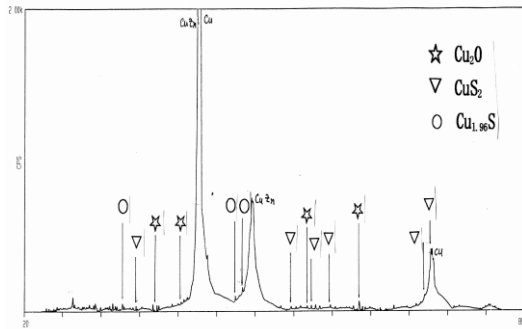


图 1—13 LGM 黄铜 x R D 谱
Fig1-13. XRD analyzing of sulfides and oxides of LGM with brass

(b) LGM 镀铬 T4 铜

钢水结晶器用的镀铬 T4 铜，其 LGM 材料的 A E S 图如（图 1—14）硫氧深度约 40μ ，其硫化物是 Cr_3S_4 及 $\text{Cu}_{1.96}\text{S}$ 。氧化物为 Cu_2O 见（图 1—16）

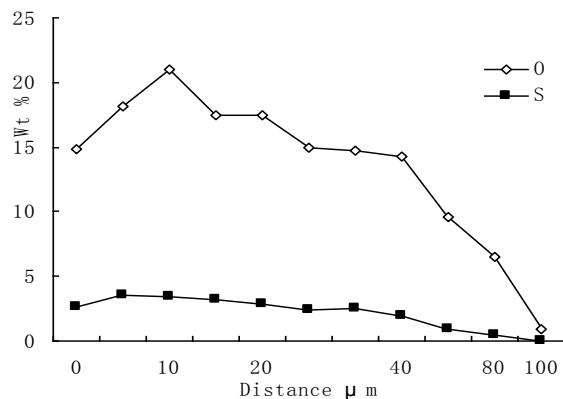


图 1—14 LGM 铜镀铬断面 A E S 图
Fig1-14. Cross-section AES analyzing of elements of LGM with chromium plating on copper

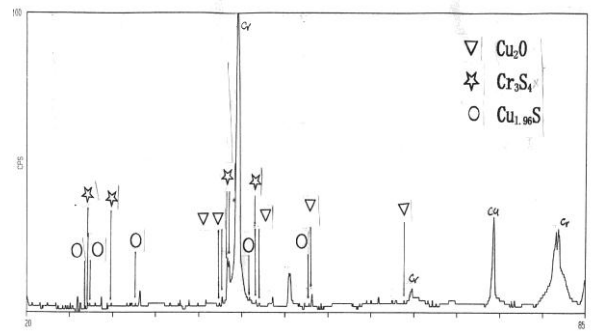


图 1—15 LGM 铜镀铬 X R D 图
Fig1-15. XRD analyzing of sulfides and oxides of LGM with chromium plating on copper

(c) LGM 硬质合金 YT-15^[7]

硬质合金 YT-15 由碳化钨、碳化钛及粘结剂钴组成，钴含量少，只有 10%，呈不连续分布。

硫化物 Co_3S_4 ，从其 A E S 分析（图 1—16）、X R D 图（图 1—17）可以看出是钴的硫化物 Co_3S_4 、呈梯度分布。硫厚度约 15μ 。

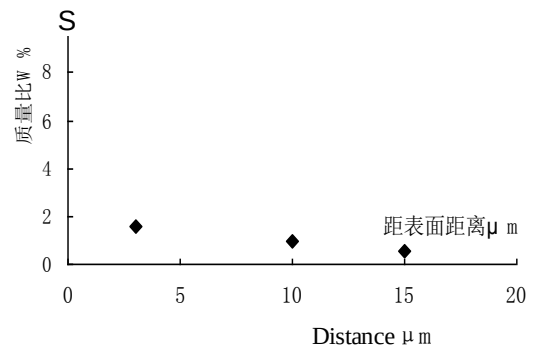


图 1—16LGM YT—15 硬质合金断面 AES 图
Fig1-16. Cross-section AES analyzing of elements of LGM with tungsten carbon

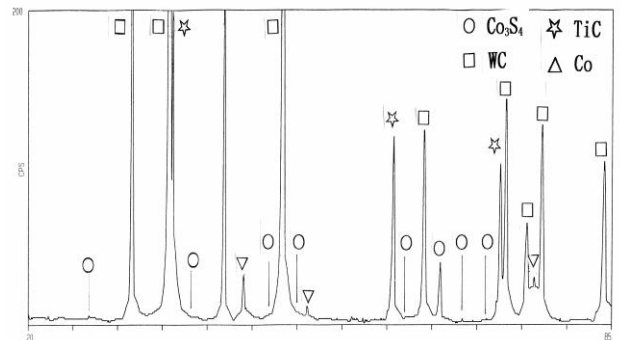


图 1—17 LGM YT—18 硬质合金 X R D 图
Fig1-17. XRD analyzing of sulfides and oxides of LGM with tungsten carbon

2 润滑梯度材料的干磨擦性能

2. 1. LGM GCr15 钢的摩擦系数^[4]:

无油干摩擦试验在 Falex 试验机上进行, 测试条件: 转速 290rpm, 载荷 50lb, 时间 300 秒,

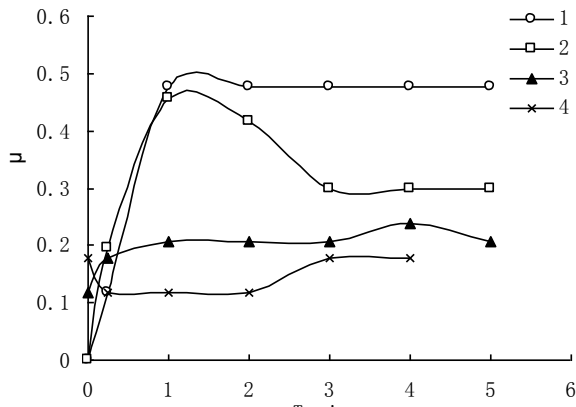
无油干摩擦 与有油润滑 (20#机油, 将 V 型块及圆柱型销浸入油中) 试验。

试验分四组进行; 在 (图 2—1) 中可以看出, 在无油干摩擦条件下摩擦副双方均为 LGM-GCr15 时有最低的摩擦系数, 与有油润滑 GCr15 钢相比, 油润滑摩擦系数最低。(图 2—2) 是上图的平均摩擦系数和最终摩擦系数。

(图 2—2) 表明, 当摩擦副双方均为轴承钢 GCr15 时, 干摩擦系数的平均值为 0.3567;

当与摩擦副均为 LGMGCr15 时, 干摩擦系数平均值降至 0.1954, 即 LGM 材料干摩擦系数降低了 45.02 %

梯度材料干摩擦 LGMGCr15 与油润滑 GCr15 比较, 干摩擦系数高了 23.43 % 。



1、GCr15 Vs GCr15 2、LGMGCr15 Vs GCr15
3、LGMGCr15 Vs LGMGCr15 4、GCr15 Vs GCr15 with oil lubricant
图 2—1 材料干摩擦系数与 GCr15 油润滑系数
Fig2-1. Fiction coefficients of different materials of frictional couple under non-oil (1.2.3) and oil lubricant (4)

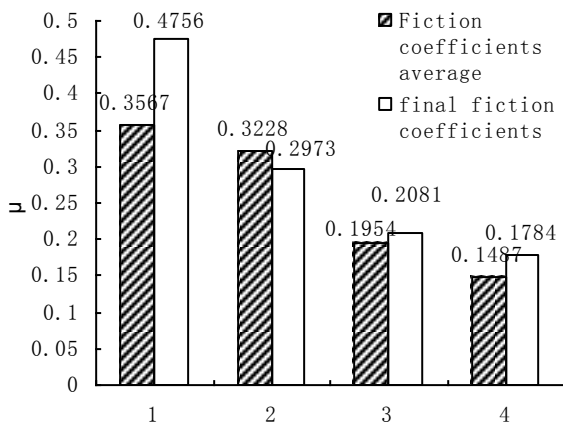


图 2—2 平均摩擦系数与最终摩擦系数

1 2 3 4 内容同 (图 2—1)

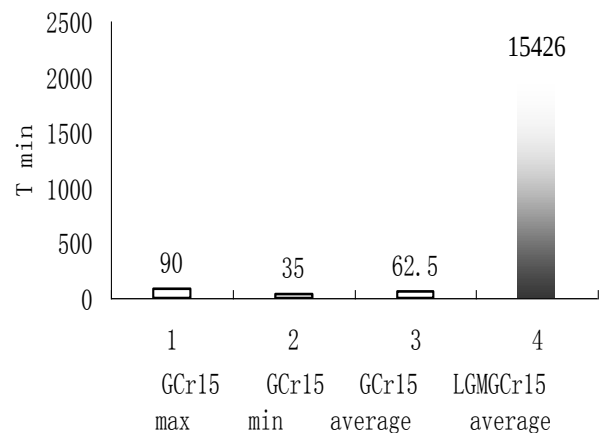
Fig2-2. Fiction coefficients average and final fiction coefficients (1.2.3.4 same with Fig2-1)

2.2. 干摩擦轴承试验^[4]

单列向心 204 轴承, 轴承材料为 GCr15 钢。无油干摩擦疲劳实验在 7502 杠杆式加载试验机上进行, 转速 2400rpm/min 径向载荷 1863N, 试验条件: 无油干摩擦 试验用轴承: 单列向心 204 轴承试验轴承 LGM-GCr15 8 套, GCr15 8 套 冷却方式: 自然冷却。

干摩擦轴承的疲劳寿命与油润滑普通轴承设计寿命对比如 (图 2—3) (图 2—4)

(图 2—3) 是干摩擦运行的普通 GCr15 轴承与 LGM 轴承疲劳寿命对比。普通轴承干摩擦平均运行寿命仅有 62 分钟, 是油润滑 GCr15 轴承设计寿命 1/1000; LGMGCr15 干摩擦平均寿命 15426 分钟 (257.1 小时)。(图 2—4) 看到干摩擦运行的 LGM 轴承平均寿命为油润滑轴承设计寿命的 1/4, 是普通轴承干摩擦运行寿命



1.GCr15 最高寿命 2. GCr15 最低寿命
3. GCr15 平均寿命 4. LGM GCr15 平均寿命

图 2—3. 无油干摩擦运行的普通 GCr15 轴承疲劳寿命与 LGMGCr15 轴承平均寿命

Fig2-3. Fatigue lifetimes of GCr15 bearings and

LGM-GCr15 bearings under non-oil lubricant

1.03 小时) 的 250 倍。LGM 轴承疲劳寿命最高达 573 小时, 是有油润滑轴承设计寿命 57%;

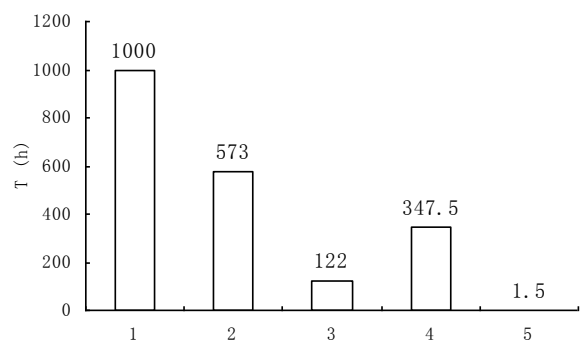


图 2—4. 干摩擦轴承寿命与油润滑轴承设计寿命

1. 油润滑轴承设计寿命 2. LGM 干摩擦轴承最大值 3. LGM 干摩擦轴承最小值 4. LGM 干摩擦轴承平均值 5. 普通轴承干摩擦运行平均值

Fig2-4. Lifetime of different rolling bearings with non-oil

lubricant and design lifetime of bearing under oil

1. Rating value of rolling bearings under oil lubricant
2. Max value of LGM rolling bearings under non-oil
3. Min value of LGM rolling bearings under non-oil
4. Average value of LGM rolling bearings under non-oil
5. Average value of general rolling bearings under non-oil

试验后测量得知 LGM 轴承是游隙增大,精度失效而终止试验(轴承仍可继续运行)。不象普通轴承都是由于烧坏卡死而失效。

3 LGM 与油叠加的润滑、耐磨性能

3.1. LGM45 钢叠加 150 号机油的滚动摩擦系数^[9]

试验在 MM200 摩擦试验机上进行,试验结果见(图 3-1)。LGM45 钢滚动摩擦系数降低 14%~42%。载荷小时下降约 40%, 载荷加大 200kg 时降低 14%。说明摩擦系数载荷的增加而增大

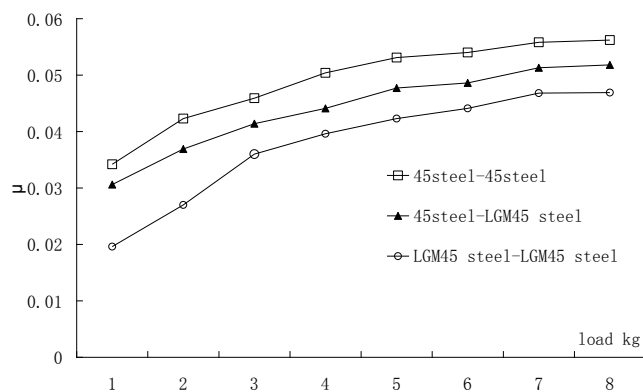


图 3-1 不同材料的油润滑滚动摩擦系数
Fig3-1. Rolling frictional coefficient of different materials under oil lubricant

3.2 钢铁与铝青铜叠加 20 号机油的摩擦系数的比较^{[6] [8]}

试验采用 Falex 试验机,试样是轴与 V 形块。V 形块固定,而轴以 90rpm 转动。(图 3-2)是几种钢铁在不同载荷下的摩擦系数与铝青铜比较。可以看到摩

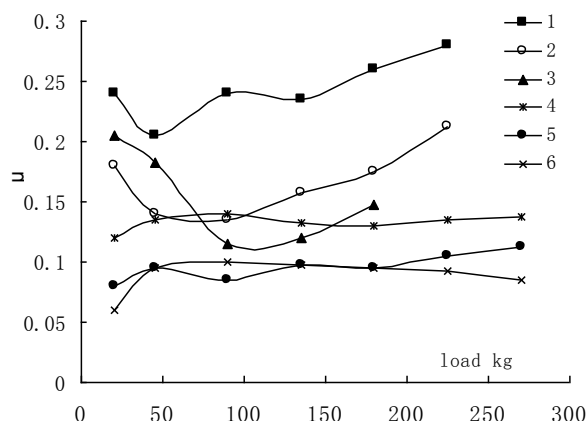


图 3-2 不同载荷下摩擦系数

- 1- 调质 40Cr 钢轴与青铜 V 形块
- 2- 调质 40Cr 钢轴与渗硫 45 钢 V 形块
- 3- 调质 40Cr 钢轴与渗硫灰铸铁 V 形块
- 4- 调质 40Cr 钢轴与渗硫球墨铸铁 V 形块
- 5- 渗硫灰铸铁钢轴与渗硫灰铸铁 V 形块
- 6- 渗硫 45 钢轴与渗硫 45 钢 V 形块

Fig3-2. Friction coefficient-load curve of different materials

1. 40Cr axis vs. bronze V-block
2. 40Cr axis vs. 45 steel of sulfurized V-block
3. 40Cr axis vs. grey iron of sulfurized V-block
4. 40Cr axis vs. ductile iron of sulfurized V-block
5. Grey iron of sulfurized axis vs. grey iron of sulfurized V-block
6. 45 steel of sulfurized axis vs. 45 steel of sulfurized V-block

擦副一方为 40Cr(调质)钢而另一方为 LGM 的灰铁、球铁、45 钢时,其摩擦系数仅为青铜摩擦系数的 2/3~1/2。当灰铁与 45 钢双方均 LGM 时,其摩擦系数降到青铜摩擦系数的 1/3。LGM 钢铁优于铜合金摩擦性能,完全可以用 LGM 钢铁来代替昂贵的铜合金。

对于铝青铜,在载荷超过 400Lb(182kg)后,产生剧烈磨损。摩擦系数与温度直线上升,逐步粘着在轴的表面。对于 LGM 球铁及 LGM 45 钢来说,载荷为 236kg 时分别为 0.14 及 0.17, 而铝青铜最低的摩擦系数为 0.24。这说明 LGM 钢铁更宜于做高载荷下的滑动轴承。

(图 3-3)是不同材料及表面状况的摩擦系数在 0~182kg 载荷间的平均值。为了便于与铜合金比较载荷最高取 182kg。

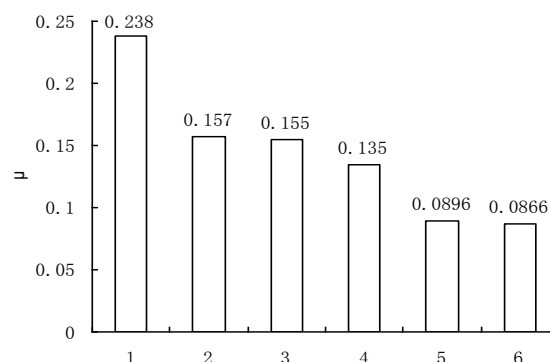


图 3-3 不同材料载 0-182kg 载荷下平均摩擦系数

(数字内容同图 3-2)

Fig3-3. Fiction coefficients average of different materials under load with 0-182 kg (1.2.3.4.5.6 same with Fig3-2)

3. 3 叠加 30 号机油 LGM 45 钢与铜合金的耐磨性对比^[10]

磨损试验在柱盘试验机上进行。试件的材料是 45 钢、渗硫 45 钢、铜合金,

图3-4是磨损率随压力的变化,可以看出有 LGM 的 45 钢在压力较低时与其他材料一样, 磨损与压力成正比; 但在压力较高的情况下的区域($P=14.7 \sim 36.8\text{Pa} \times 10$)磨损率几乎不随压力的增大

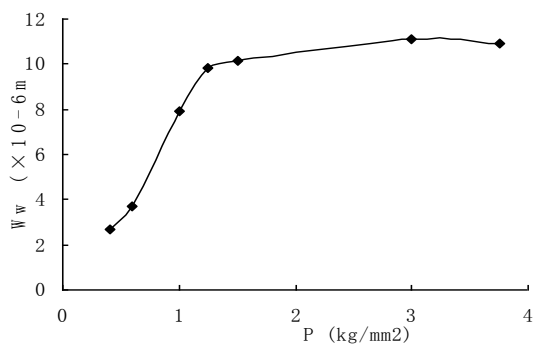


图 3-4 磨损率随压力变化

Fig3-5. Wear rate-pressure curve of LGM 45 steel

而增大,呈现出水平不变的趋势。这表明 LGM 材料在重载下有更好的耐磨性。

, (图 3-5) LGM45 钢与铜基轴承合金的磨损率见 (图 3-5); 当 $P \leq 14.7 \times 10 \text{ pa}$ 时.LGM 的 45 钢, 较铜基轴承合金的耐磨性高 2—4 倍。可以看到与现在通用的锡青铜比较, 较 ZQSn6—3 高 3.682 倍, 较 ZQSn10—1 高 3.44 倍。

当 $P \geq 29.7 \times 10 \text{ pa}$ 时,铜合金已粉化,铜合金的磨损率按曲线外推而得。粗略估算, LGM45 钢的耐磨性较铜合金高 4.5~9 倍。

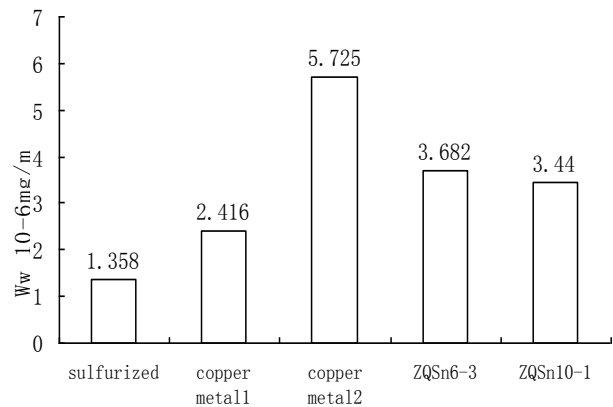


图 3-5 LGM45 钢与铜基轴承合金的磨损率

Fig3-5. Wear rate of LGM 45 steel and copper base bearing metals

3.4 叠加 30 号机油 LGM45 钢运转后粗糙度降低^[10]

在上节《c》的试验后进行了粗糙度检验。(图 3—6)是 LGM45 钢在磨损试验前后粗糙度; (图 3—7)是铜合金在磨损试验前后的粗糙度。可以看到铜

合金磨损试验前比较光洁,磨损后粗糙度增加而 LGM45 钢则相反.,即摩擦能使 LGM 的 45 钢更加光滑, 这就使真实接触面积增大;

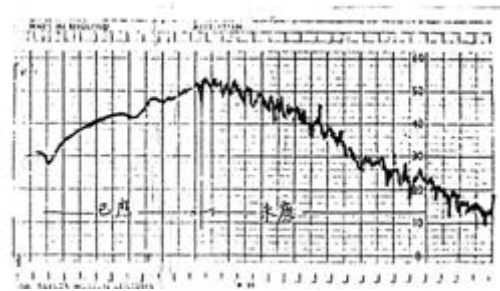


图 3-6 LGM45 钢在磨损试验前(右)后(左)粗糙度

Fig3-6. Surface roughness of LGM 45 steel before (L) frictional wear test and after(R) comparison

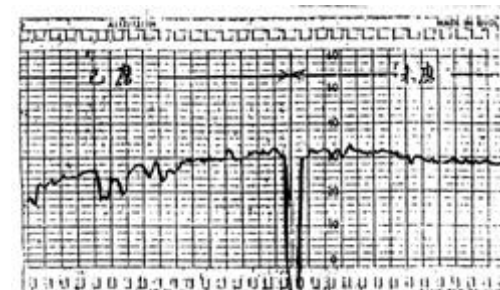


图 3-7 铜合金在磨损试验前(右)后(左)的粗糙度

Fig3-7. Surface roughness of copper base bearing metal before (L) frictional wear test and after(R) comparison



图 3-8 LGM45 钢摩擦试验后的表面

Fig3-8. Surface roughness of LGM 45 steel after frictional wear test

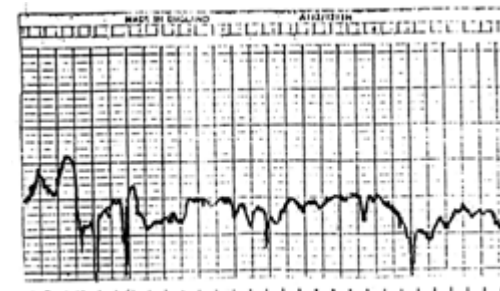


图 3-9 铜合金摩擦试验后的表面

Fig3-9 Surface roughness of copper base bearing metal after frictional wear test

在同样载荷下降低了真实接触应力,提高了耐磨

性,(图 3-9)及(3-8)可以看到摩擦试验后 LGM45 钢较铜合金更为光滑,即 LGM45 钢有更低的接触应力导致有更高的耐磨性。

3.5 LGM 25Cr2MoV 离子渗氮的钢钢叠加 50 号极压齿轮油的滑动摩擦系数^[11]

试件材料为 25Cr2MoV 经调质后,离子渗氮。渗氮温度为 500℃~520℃,渗氮层深为 0.5~0.6mm 硬度 HRc54~56。试验在 M-200 型摩擦试验机上进行,润滑采用 50 号极压齿轮油,下试件转速 $n=200\text{rpm}$,滑动速度:0.523m/s,在上试件打有小孔,孔底表面 0.5mm,用热电偶测量试件温度变化。试验结果见表 3-1,

表 3-1 叠加 50 号油润滑 LGM25Cr2MoV 离子渗氮的摩擦系数 ($V=0.523\text{m/s}$)

Table3-2. Compare friction coefficient of LGM25Cr2MoV ion-nitriding steel with untreated ion-nitriding steel

加载值		渗氮试样			渗氮后 LGM		
N	N/mm ²	摩擦	摩擦	摩擦	摩擦	摩擦	摩擦
		力矩	系数	温	力矩	系数	温
		N.mm		度 °C	N.mm		度 °C
1000	5	250	0.00478	29.13	190	0.00363	28.6
1500	7.5	320	0.00408	31.58	260	0.00332	29.14
2000	10	450	0.0043	33.78	400	0.00383	32.56

由表可知渗氮后 LGM 摩擦系数降低 10.9%~24.1%,平均降低 17.9%,温升在实验条件下降低 0.53~2.44℃,降低 1.82%~7.73%,平均降低 4.39%。

3.6 LGM GCr15 钢叠加 3 # 航空润滑油的四球机摩擦试验⁽¹²⁾

试验机的摩擦副的接触形式上面为一旋转球,下面为三球,试验钢球为 GCr15 钢。试验叠加 3 # 航空润滑油。1500r/min。10s。磨痕对比如(图 3-11)

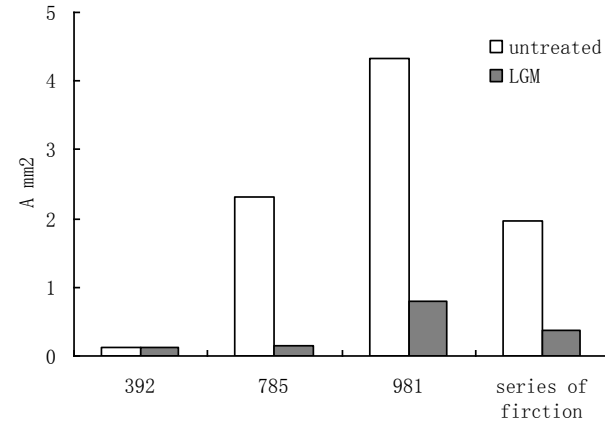


图 3-10 钢球磨痕面积比
Fig3-10 Compare wear area of LGM bearing balls with untreated balls by a four-balls tester

表明 LGM 的承载能力由原始 120KgF 提高到 160kgF,提高了 33%,当负荷为 40kg,运转 30 秒时, LGM 球的磨痕面积较原球减少 10%;当负荷为 80kg 时,磨痕较原表面减少 74%,100kg 时减少 83%;长磨试验试验中,在载荷 40kg 下,试验时间 20min。磨痕面积减少了 80%。

3.7 LGM45 钢叠加有添加剂的液体石蜡的 P-V 图与摩擦系数随压力的变化^{[13][14]}

试验在球一盘试验机上进行,钢球硬度为 Hv700,圆盘材料为 45 钢、硬度 Hb391,以液体石蜡非循环滴注式润滑。(图 3-11)表明:45 钢盘,以纯液体石蜡润滑(曲线 1)。当 $V=1\text{m/s}$ 时,其承载能 235.4N。

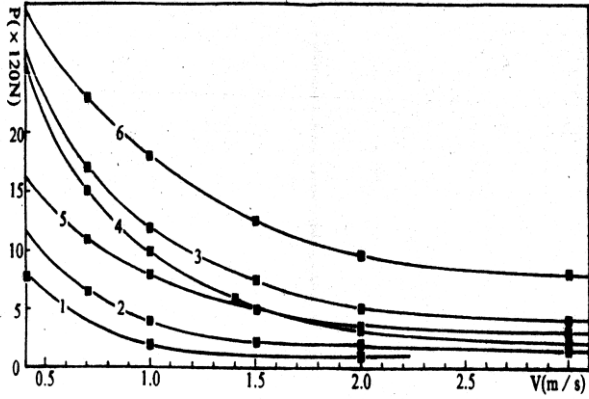


图 3-11 LGM 叠加多种润滑添加剂的 P-V 图

1. 45 钢纯液体石蜡润滑
2. 45 钢 TCP(磷酸甲酚酞)加入液体石蜡润滑
3. 45 钢 SO(磷化烯烃)加入液体石蜡润滑
4. 渗硫 45 钢纯液体石蜡润滑
5. 渗硫 45 钢 TCP 加入液体石蜡润滑
6. 渗硫 45 钢 SO 加入液体石蜡润滑

Fig 3-11. Pressure-velocity curve of LGM and different oil-additives

1. 45steel-liquid paraffin
2. 45steel-TCP of liquid paraffin
3. 45steel-SO of liquid paraffin
4. LGM 45steel-liquid paraffin
5. LGM 45steel-TCP of liquid paraffin
6. LGM 45steel-SO of liquid paraffin

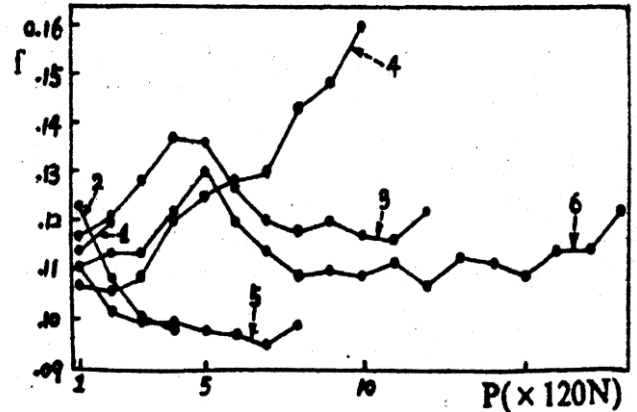


图 3-12 LGM 叠加多种润滑添加剂的摩擦系数随压力变化

Fig 3-12. Pressure-friction coefficient curve of LGM and different oil-additives(1.2.3.4.5.6 same with Fig3-12)

而 LGM45 钢盘则为 1172N。如 LGM45 钢加入 SO 添加剂,则承载力达 2040N。较纯液体石蜡提高 8.7 倍。比有添加剂 SO (磷化烯烃) 提高了近一倍。(图 3-12) 表明,LGM45 钢盘添加 TCP(磷酸甲酚腊),可获得最低的摩擦系数

3.8 LGM45 钢叠加有添加剂 30 # 机油的承载能力对比试验^{[15] [3]}

在基础油 (30 号机油) 中,添加 ZDDP (二烷基二硫化磷酸锌)、DBDS (二苄二硫), MoDDP (二烷基二硫化磷酸钼) 及含硫 0.01% 等来增加承载能力,实验在 Falex 型试验机上进行试验,轴与 V 形块皆为 45 钢 HRc55~56 试验时转速 360rpm,线速度 0.12m/s。本实验是 LGM45 钢叠加基础油(30 机油)的承载能力进行对比。实验结果如 (图 3-13)。可以看到,LGM45 钢,使用 30 # 机油,不加添加剂有最大承载能力。这表明 LGM45 钢叠加基础油优于用润滑油的 45 钢。

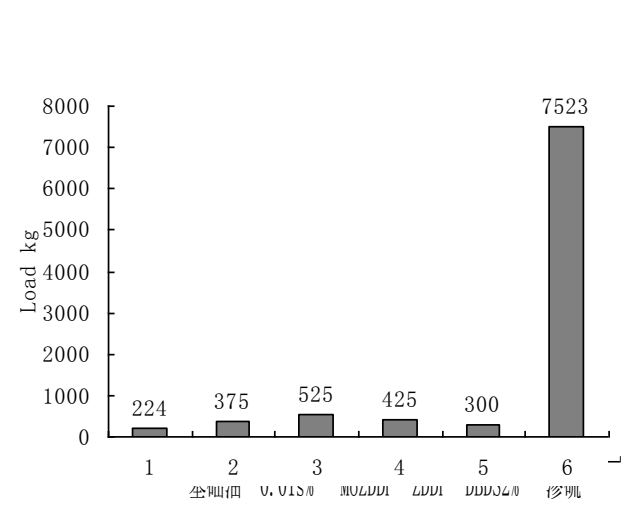


图 3-13 LGM 与多种润滑添加剂的承载比较
Fig 3-13. Compare load capacity of LGM with different oil-additives

3.9 表面应力与接触疲劳性能

a) 残余应力试验

残余应力试验在 M S F - 2 M X 射线应力测定仪上进行,结果如 (表 3-2) 。

表 3-2 LGM 与 T10 钢、GCr15 钢残余应力对比
Table 3-3. Compare surface residual stress of LGM bearing steel with untreated bearing steel and untreated T10 steel

T10 钢			GCr15 钢		
编号	LGM 工艺	应力值 (MPa)	编号	LGM 工艺	应力值 (MPa)
T0	空白	+54.9	G0	空白	-316.5
T1	140℃	-94.5	G1	140℃	-372.4
T2	260℃	-110.7	G2	130℃	-405.7

可见 LGM 材料增加压应力,这是 LGM 材料提高疲劳性能的一个重要的原因。

b) LGM45 钢接疲劳试验^[16]

试验在 J P - 52 接触疲劳试验机上进行,以测定纯滚动疲劳寿命。冷却用 5 号锭子油。根据试验数据,绘出 LGM45 钢与 45 钢试样的 $\sigma - N$ 曲线如 (图 3-15)。

LGM45 钢疲劳寿命提高,提高幅度从 77.6% 到 110.4%,平均提高 92%。随接触应力增大,疲劳寿命减小。

接触应力 σ /MPa	疲劳寿命 N /(未渗碳)	疲劳寿命 N /(渗碳)	寿命提高百分数/%
4 245	$1.055 8 \times 10^6$	$1.874 88 \times 10^6$	77.6
4 859	$0.781 2 \times 10^6$	$1.643 88 \times 10^6$	110.4
5 348	$0.698 8 \times 10^6$	$1.317 12 \times 10^6$	88.5
5 760	$0.629 16 \times 10^6$	$1.202 88 \times 10^6$	91.2

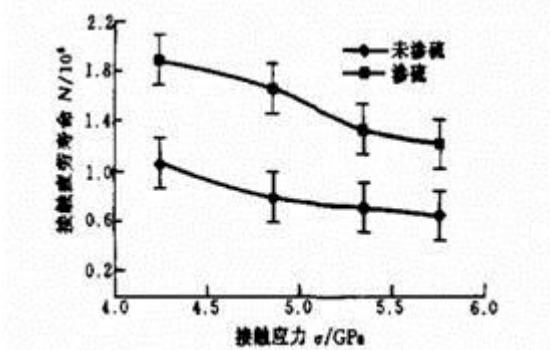


图 3-14 LGM45 钢与普通 45 钢 $\sigma - N$ 曲线
Fig3-14. Compare contact fatigue of LGM 45 steel with untreated 45 steel

c) LGM 20CrMnTi 钢碳氮共渗的接触疲劳寿命

中国矿大研究生的接触疲劳寿命试验,也显著提高,有相类似的效果^[17]。

4 润滑梯度材料 LGM 的应用:

LGM 经企业应用,已经有使用报告、台架试验报告等 6 0 余篇,,今重点介绍内燃机、车用空调压缩机、滚动轴承、代替铜瓦的钢轴瓦、齿轮、柱塞泵及柱塞偶件、热轧辊 纺纱机钢领 工具模具等。

4.1 内燃机

a) BN492QALGM 汽油发动机节能台架试验^[19]
^[18]

BN492 汽油机上的活塞环、汽缸套、曲轴、凸轮轴、

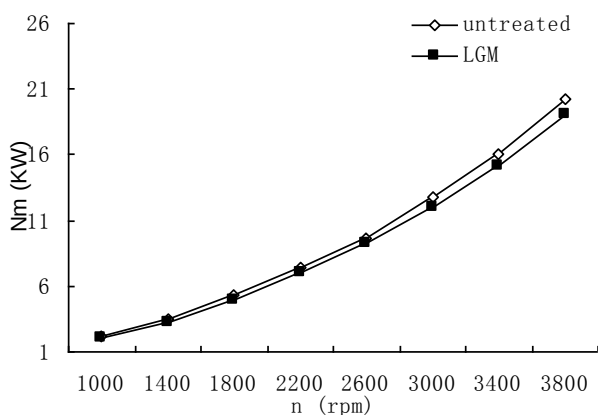


图 4—1 原机与 LGM 发动机机械损失功率与转速的关系
Fig4-1. Compare mechanical loss of power-rotational speed curve of LGM engine with untreated engine

挺柱、气门及摇臂轴等,均采用 LGM 材料,经 23 小时磨合运转后,用扭矩仪测得机械损失功率已经稳定。而普通汽油机需 74 小时磨合,机械损失功率才得稳定。这表明 LGM 汽油机,磨合时间较原机缩短 2/3。

(图 4—1)是原机和 LGM 汽油机的机械损失功率随转速的变化。可以看出, LGM 汽油机的机械损失功率平均降低 4.7%,在转速为 3800rpm 时下降 7%。

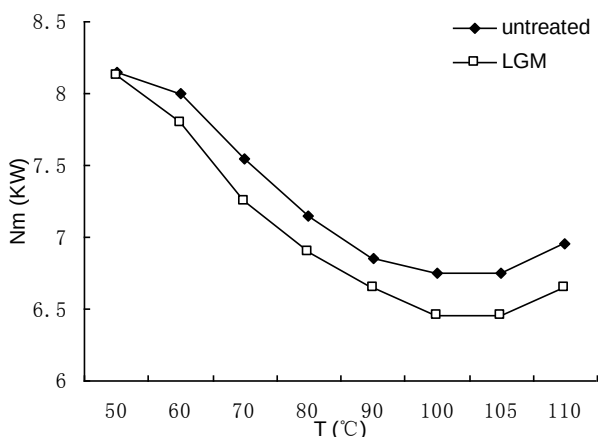


图 4—2 原机与 LGM 汽油机的机械损失功率随润滑油温度的变化
Fig4-2. Compare mechanical loss of power-oil temperature curve of LGM engine with untreated engine

(图 4—2)是原机 LGM 汽油机的机械损失功率随润滑油温度的变化。LGM 汽油机的机械损失率比原机有所降低,油温愈高,下降得愈多,可以认为油温愈高油的粘度降低,油膜愈薄,金属表面直接接触损失愈大,而 LGM 机减摩作用也愈大,所以当油温为 100℃时,LGM 汽油机机械损失功率降低了 4.5%。

b) SL2105B 渗硫柴油机节油试验^[20]

二台 SL2105B 普通柴油机与二台 SL2105B 渗硫柴油机进行负荷特性、速度特性对比试验。

渗硫柴油机和非渗硫柴油机标定工况工况的燃油消耗率、排温和烟度试验结果和特性曲线表明,渗硫柴

油机燃油消耗率低非渗硫柴油机。2台渗硫柴油机标定工况燃油消耗率平均值为236. 0 g / (kW · h), 较2台非渗硫柴油机燃油消耗率平均值240. 5 g / (kW · h) 低1. 90% ;最大扭矩点工况(表略), 2台渗硫柴油机平均燃油消耗率为236. 5 g / (kW · h), 较2台非渗硫柴油机平均燃油消耗率241. 1 g / (kW · h) 低1. 95% 渗硫柴油机在进行出厂试验时磨合运转时间缩短0. 5 h, 缩短了出厂试验时间, 既节约了燃油和机油

c) LGM 摩擦副在船舶柴油机应用。^[41]

G32 型船用万吨级柴油机, 其中 8 缸 8G32 型机型功率 3552KW, 转速 600rpm, 最高燃烧压力 18.3MPa,排气温度 360℃; LGM 材料解决了滑动摩擦副滚轮、滚轮销、衬套三偶件, 在柴油机出厂磨合阶段中的烧伤、卡死问题; 整机磨合阶段合格率由 20%提高到 100%, G 系列柴油机偶件均应用 LGM 材料, 通过 CCS 和 BV 船级社的型式认可。

4.2 滚动轴承:

a) LGM 203 滚动轴承台架试验^[5]

203 滚动轴承,采用 LGM GCr15 钢,按国家机械工业局滚动疲劳寿命规程,分组淘汰法进行,试验机型号 zs/30,试验转速 10000 转/分,径向负荷 1873N,20 号机油循环润滑,在洛阳轴承厂常温下进行,结果如(表 4—1)

表 4—1LGM 203 轴承的疲劳寿命

Table 4-1. Compare fatigue life of LGM rolling bearings with untreated bearings

	试验数量 N(套)	有效数量 N(套)	额定寿命 L10(h)	中值寿命 L50(h)	特征寿命 V(h)	平均寿命 Lm(h)
LGM 轴承	20	10	161	361	1423	386
GCr15 轴承	10	9	123	229	258	259
LGM/GCr15 轴承			1.31	1.58	1.64	1.49

由于轴承在运输过程中略有锈蚀,试验数据有些影响。但仍大大提高了疲劳寿命

b) 应用于工业企业的滚动轴承:

廿一世纪以来至今河北、江苏两企业专职生产 LGM 轧机等轴承。1987 年至今,众多企业使用 LGM 轴取得良好效果,并写了使用报告,摘要介绍如下:

年产 21 万吨热轧带钢的链板运输机 308 轴承 寿命由 6 个月提高到 20 个月

高速线材轧机 6206 导卫轴承, 平均寿命提高 2 个周期 ,

乘用车推力滚针轴承平均寿命提高 2 个周期+

汽车空调压缩机(无油润滑)提高寿命 3 · 2 倍,

轧辊轴承(圆锥滚子四列圆柱、深沟球)使用寿命可以达到原寿命的 1.5~3 倍,

值得注意的是 45 钢内外圈轴承台架试验, 疲劳寿

命与 GCr15 钢轴承相当

4.3 轴瓦（轴套）

a) LGM08 钢与双金属、D U材料对比试验

对比试验按国标进行。MM— 200 摩擦试验机。转速 200 r p m。滚轮硬度 H R C 40~44。滚轮直径 Φ40。试块：30×7×2•5mm 油润滑，时间 75 分钟试验结果见（表 4—2）

表 4—2 LGM08 钢与双金属 DU 材料摩擦磨损性能
Tale4-3 Compare frictional wear properties of LGM steel with bimetal and DU

材料	转数	摩 擦 力矩	积累磨 擦功	摩擦系 数	磨痕宽 度
LGM08 钢	15014	2.48	2323	0.062	2.10
双金属	15028	3.5	3643	0.088	2.12
D U 件	15000	3.2	2878	0.080	3.25

可以看到与双金属、D U 比较，LGM08 钢有最小的摩擦系数及最低的磨损量。摩擦系数比双金属低 30%，较 DU 材料低 22.5%。

积累摩擦功较双金属 DU 材料都低。节能效果显著。

b) 应用于工业企业的 LGM 滑动轴承:

LGM 滑动轴承经众多企业使用，特别在冶金企业如杭钢等，在取得良好效果后写了使用报告，摘要介绍如下：

1) 以 LGM 钢瓦代铜

薄板轧机 10 钢替代 ZQAL9-4 铜用于轧辊侧瓦 128-160 小时 200 小时以上,可以多次修磨

液压摆式剪板机液压缸 20 钢代替双金属用导向套,连续运动 60000 次(有油润滑 8600 次,无油干摩擦运动 52000 次), 磨损量仅 0.005mm, 明显优于双金属导向套

LGM45 钢替代 ZQSn6-6-3 铜用于支撑瓦铜寿命不足 1 个月 LGM45 钢瓦寿命 3 个月

2) LGM 铜瓦

摇杆式冷床摇杆 LGM 铜瓦(15000 次/24 小时)寿命提高三倍,

轧机高速轴 LGM 铜布司、升降台主轴 LGM 铜瓦及曲柄 LGM 铜布司、轧机滑块式万向接轴及热连轧机传动用滑块式接轴 LGM 铜滑块均提高寿命 2~6 倍,

热剪机主轴铜轴套普通寿命 1~2 个月 LGM 寿命 4~5 个月,

热轧机(400℃,24 小时运转) 套普通寿命 1 星期 LGm 寿命 1 个月

4.4 齿轮

a) LGM 离子渗氮 25Cr2MoV 齿轮的弯曲疲劳性能和胶合承载能力台架试验⁽¹¹⁾

齿轮参数 Z1=Z2=50,Mn=3mm 直齿标准齿轮,精度等级 7 级。齿轮材料为 25Cr2MoV。齿轮经调质后 500~520℃离子渗氮,渗氮层有效深度为 0.5mm~0.6mm,齿轮成品硬度 HRc54~56。试验在机械封闭杠杆加载式综合试验台上进行。试验采用 GB3480-83 标准进行计算。经过实验及计算,得到失效概率为 1%的极限应力 σFLIM,及不同可靠度下的寿命 N 值。离

子渗氮齿轮的可靠度

R=0.5 时 σFLIM=525.94N/mm,R=0.99

,R=0.99 时 ,σFLIM=403.77N/mm 。

齿轮在 R-S-N 曲线见（图 4-3）

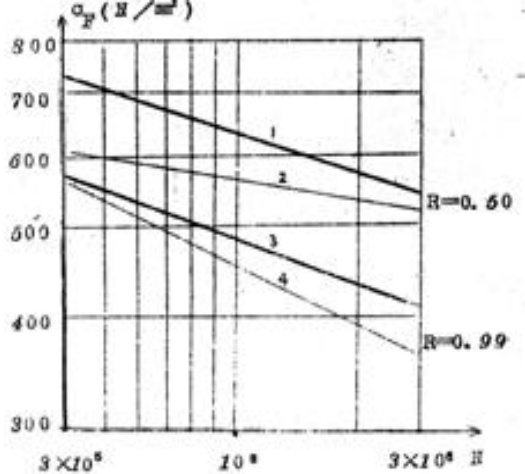


图 4—3 LGM 齿轮与离子氮化齿轮 R—S—N 曲线对照

1、2LGM 齿轮 3、4 离子氮化齿轮

Fig4-3. Compare R—S—N curve of LGM gears with ion-nitriding gears

1.2 LGM gears 3.4 ion-nitriding gears

由图（4—3）可见,LGM 一齿轮的疲劳强度 σFLIM 较非 LGM 材料齿轮高了 10.34%,已达到渗碳齿轮的水平,此种结果与用有限元分析摩擦力对弯曲应力的影响结果一致,即齿面上摩擦力愈小、齿根的应力愈小,由于 LGM 离子渗氮齿轮的弯曲疲劳极限应力已达到渗碳淬火水平,因此完全可以 LGM 离子渗氮齿轮来代替渗碳淬火的齿轮。

胶合对比试验:^[11]

试验加载从 500Nm 开始,初始油温为 29℃,试验结果列于表（4—3）

表 4—3 齿轮胶合试验结果

Table4-5. Compare agglutination test of LGM gears with ion-nitriding gears

序 号	失效时的载荷 T N • m		失效时的接触应力 σ H N/mm ²	
	LGM	渗氮	LGM	渗氮
1	800	700	2551.03	2388.079
2	750	650	2470.898	2302.283
3	750	600	2470.898	2213.164

试验齿轮的参数、材料、硬度、热处理工艺及试验机同(a)。LGM 离子渗氮在齿轮在本试验条件下,其抗胶

合承载能力可提高 18.2%,由表可见试验时的接触应力是非常大的,都在寿命曲线的水平线以上。故此结果是可信的,偏保守的。

b) 应用于工业企业的 LGM 齿轮:

LGM 齿轮已在冶金企业应用,有良好的经济效益,现摘要介绍

LGM 铝青铜蜗轮 炼钢厂耙吊(转速 570 转/分,24 小时连续作业)普通蜗轮 2—2.5 个月 LGM12 个月以上
连铸机热剪前辊道(高温烘烤) CL4 齿形联轴器提高 1 倍以上

100 吨钢包吊车主钩式传动副小齿轮 4 个月提高到 8 个月以上

连铸拉矫机双包络球面 LGM 蜗杆付寿命提高 4 倍以上

电炉长轴齿轮/主动轮齿圈/蜗轮箱齿轮(无油脂润滑,干摩擦),提高 2 倍寿命,电炉电极升降(干摩)齿轮提高 2 倍寿命

减速机长短人字齿轮、8M-10M LGM 人字齿轴,寿命提高 1—3 倍

推钢机 10M25Z 齿轮/Φ400 LGM 人字齿轮轴/拖轮/肖轴提高 2~3 个周期

Φ16 焊管机组 LGM 伞形齿轮(M7:Z21)寿命三倍以上

剪切机齿轮(M4,Z30)、普通 6 个月使用 34 件 LGM 下降到 9 件

(M4,Z32) 6 个月使用 21 件下 LGM 降到 7 件
薄板轧机(轴向载荷 600 吨,250℃工况)压下螺杆/螺母延长寿命 1 倍以上

4.5 热轧辊、导卫辊

a) 高速线材轧机辊环 [21]

整条高速线材轧机中全部 9 个架次的 LGM 辊环完成了工业化试验,前后历经四年时间。结果表明 LGM 辊环实际使用寿命比普通辊环平均增加 1.5 倍,普通硬质合金辊环使用 3~4 天, LGM 梯度材料辊环使用 5~6 天, 辊环槽底的裂纹以纵向裂纹为主,而不是象硬质合金 WC 辊环出现的横向裂纹。结果见(表 4—4)

表 4—4 高速线材钴基 WC 轧辊对比
Fig4-8. Compare production of LGM tungsten carbon wire rod mill roller with untreated wire rod mill roller

	第一组 槽压钢 数 量 (吨)	第二组 槽压钢 数 量 (吨)	第三组 槽压钢 数 量 (吨)	第四组 槽压钢 数 量 (吨)	第五组 槽压钢 数 量 (吨)
LGM 轧辊	623.02	887.63	911.91	861.32	769.11
普通 轧 辊	378.2	434.41	466.23	442.43	269.96

b) 其他轧辊类的应用如(表 4—5) [22] [23]

表 4—5 LGM 轧辊(辊环)类零件的应用
Fig4-9. LGM cool and hot roller applications

序号	轧辊种类	使用对比
1	冷硬铸铁热轧辊 (21)	磨损情况相同条件下,轧制钢材多一倍;由于表面润滑,提高了轧制出的线材表面质量
2	中镍铬钼无限冷硬铸铁轧辊	寿命延长一倍,成品表面光滑
3	球墨铸铁平辊,45 钢,轴承钢扭转导卫辊	平均轧制量增加 1 倍

4. 6 压缩机

a) 汽车空调压缩机 :

国内最大的中德日合资汽车空调器公司生产的定排量 10B、10D、BX 系列;先进的单向变排量 PV、PXE 系列,其中轴承、齿轮多种零件采用 LGM 材料后台架试验见表 4—6

表 4—6 汽车空调压缩机 LGM 零件运转对比
Table4-10. Compare running time of different metal parts of LGM with untreated metal parts in automotive air-conditioning compressors under non-oil

零件	类型	负载 (kg)	工况	干摩擦 咬死时 间	提高倍 数
			(转速 rpm)		
斜盘座挡 圈	梯度材 料	20	800	35 秒	2.33 倍
	普通	20	800	15 秒	
推理片/ 滚针推力 轴承/主 轴轴承	梯度材 料	负载干启动: 不添加 207cc 润滑油		大于 23 分	2.88 倍
	普通			8 分	
滑履/斜 盘	梯度材 料	10	800	大于 17 分	3.4 倍
	普通	10	800	5 分	
钢球/固 定齿轮/ 摆动齿轮	梯度材 料	20	800	2.5 分	1.67 倍
		20	1200	1.5 分	
	普通	20	800	75 秒	1.5 倍

可以看出 LGM 另件寿命都成倍提高。其整机(汽车空调)可靠性提高近 1—3 倍,且成本降低。
LGM 空调压缩机部件,年产量超过 600 万件;年安装压缩机 45 万台。国内市场份额超过 50%; LGM 整机、滑履与滑片生产企业获得了整机与零件的发明

专利^{[24][25]}

b) LGM 旋转压缩机

空调或冰箱用旋转压缩机的轴、叶片等运动零件合成 LGM 后进行压缩空气试验,其性能与原机对比。旋转压缩机低温离子渗硫后,功率可以减少 4~7%而流量增加 3%。

4. 7 LGM 工具、模具

a) 硬质合金车刀切削试验

选用的刀片为自贡硬质合金厂生产的 ZP35 牌号,相当于国际标准 ISO 的 P30~P35。LGM 刀片命名为 LGMZP35。

1. 刀具磨损及其寿命试验

用 LGMZP35 与 ZP35 对比,主要考验刀片的耐磨性。工件材料取 38CrNi3MoVA 低合金高强度钢(调质),HRC36~40, $\sigma_b=1.10\sim 1.14\text{GPa}$, $\sigma_s=14\sim 15\%$ 。机床:CW6163 普通车床,冷却润滑状态:干切;刀具角度: $Kr=75^\circ$, $S=-4^\circ$;切削用量:切削深度 $a_p=1\text{mm}$,进给量 $f=0.1\text{mm/r}$,改变 4 种切削速度 $V=50,70,90,110\text{ m/min}$;

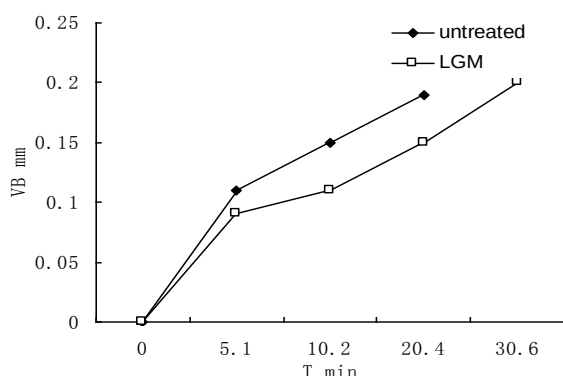


图 4-4 LGM ZP35 刀具与 ZP35 的对比切削试验
 $V=90\text{m/min}$

Fig4-4. Compare wearing capacity of LGM cutting tools with untreated cutting tools

现仅取(图 4-4) $V=90\text{ m/min}$; 切削速度下的对比磨损曲线。由试验数据可知,ZP35S 刀片的寿命较长,比未处理的 ZP35 刀片寿命高出 1 倍或近 1 倍。

2. 刀具冲击试验:

对比 ZP35 与 LGMZP35 刀片的抗冲击性能。工件材料取 C-N 合金钢(调质),HRC33,花键轴,齿数 6 机床:C620-3 普通车床 冷却润滑条件:干切; 改变 3 种切削速度 $V=70,86,110\text{ m/min}$ 记下每次切削时,车刀崩刃前的冲击次数 N。在图(4-5)上,画出两种刀片冲击次数的对比,由图(4-5)2 可见,在 $=70\text{m/min}$ 及 86m/min 时, LGMZP35 抗冲击性能略高于 ZP35; $V=110\text{m/min}$ 时,情况相反。

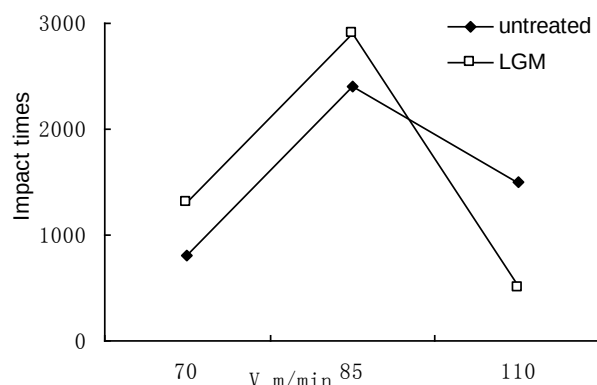


图 4-5 冲击次数对比

Fig4-5 Compare impact times of LGM cutting tools with untreated cutting tools

b) LGM 高速钢刀具 GCr15 钢量具、硬质合金刀具及模具工业应用效果

1) 高速钢刀具、合金钢模具量具

高速钢: 指状铣刀由切削 15 件提高到 110 件, $\Phi 100 \times 2$ 片铣刀切不锈钢由 2 件提高到 45 件
M3 滚刀、M10 滚刀提高寿命 3~4 倍
25/24/34.8 圆拉刀提高寿命 2 倍
M3 丝锥加工钛板寿命提高达 24 倍
M4 丝锥 M6 板牙切不锈钢寿命提高达 10 倍
GCr15 钢滚动轴承保持架冲压模提高 30%
搓丝板使用寿命增加 50%, 特别是加工不锈钢件
发动机连杆热锻模寿命增加 70%
GCr15 钢风磨套管, 风磨芯轴, 气动锥度量头, 针阀体内腔量具使用寿命提高 10 倍, 零件尺寸精度变化小于 1 微米

2) 硬质合金刀具、模具

硬质合金刀具 YT-5 切削 1Cr18Ni9Ti 不锈钢, 长度 3.185m 提高到 456m, 提高 113 倍,
YT-15 切削 A3 钢由 30 件提高到 >70 件
金属拉链硬质合金下模寿命 延长 60% 以上
不锈钢丝硬质合金拉丝模耐用度增加 50%, 钢丝表面光洁度提高
滚动轴承保持架冲压模提高 30%
搓丝板使用寿命增加 50%, 特别是加工不锈钢件

4. 8 纺纱机钢领及钢丝圈

钢领与钢丝圈是纺纱机上易磨损件, 早在上世纪 80~90 年代上海纺纱厂经工业试验 LGM20 钢氮碳共渗钢领能增加使用寿命达三倍^{[5][6][26][27]}。当时上海已使用 LGM 钢领数百万只并通过上海纺织局鉴定。当今纺纱机锭速不断提高, 已达 18000r/min, 线速度 60 米/秒高速、无油干磨擦运转。LGM 摩擦系数为 0.01~0.03,

LGM 钢领 (PG 1 — 4254 型), 在锭速 17920r/min , 前罗拉速度 224 r/min 的工艺条件下。 LGM 钢领的 3mm 毛羽数平均为 25.97 , 比普通 PG PG 1 — 4254 钢领的毛羽平均数 35.56 ,下降了 27% 左右。千锭时断头率 LGM 钢领平均数为 4.42 根, 普通钢领的平均数为 7.1 , 下降了 37.7% 。同时钢领表面合金化处理后直接上车, 细纱机不必减速。从纺织情况看, 无论是毛羽, 还是断头均有明显的优势;

LGM 钢丝圈与 LGM 钢领配套使用时磨合期缩短, 摩擦热较普通零件降低 1/3。使用周期在 30 天以上

4. 9 柱塞泵（马达）及其他机械

a) K8-102 斜盘式定量柱塞马达台架试验^[6], 柱塞马达配流盘材料为 GCr15 钢,缸体(摩擦副)为 QA119-4 青铜。额定压力 21MPa 排量 60ml/r 斜盘摆角 24° ,转速范围 100~1500rpm。试验用的泵,是因配流盘与缸体咬合不合格后, 采用 LGM。其中一台长期超载达 2700rpm。仍无咬合现象。停机解体发现配流盘表面岛块状局部变黑。这是由于缸体不平局部压力过大造成的。从（表 4—7）可以看到,柱塞马达中仅配流盘一个 LGM 零件,总机械效率提高 35.6%, 较国外进口原机总机械效率提高了 3.5%。

表 4—7 K8-102 轴向柱塞马达出厂实验数据比较

Fig4-7 LGM swash plate piston motor type test

试验批号	1	2	3
试验台数	51	9	2
配油盘止推盘处理状态	淬火 HRC60	淬火 HRC60+LGM	进口机未分析
平均空载排量 cc/r	62. 953	62. 69	62. 665
平均试验压差 MPa	20. 357	19. 676	19. 96
实际平均扭矩 N-M	184. 13	189. 17	184. 45
容积效率%	最高	97. 6	98. 43
	最低	92/61	94. 62
	平均	95. 88	96. 45
总效率 %	最高	88. 7	94. 53
	最低	83. 43	90. 53
	平均	86. 68	92. 11
机械+流阻效率 %	90. 43	95. 5	92. 31
油温℃	20-50	30-38	15-40

液压元件出厂实验技术指标 JB2133-2145-77	容积效率≥90%总效率≥84%油温50℃
液压元件出厂实验技术指标 JB2146-77	

b) LGM 在柴油机喷油泵的柱塞偶件等及冶金机械的应用^{[28] [29]}

1) 柴油机喷油泵的柱塞偶件等
柴油机喷油泵 A 型泵及 AW 型柱塞偶件、AW 泵出油阀座用 LGM45 钢替代 GCr15 钢, 运转周期相同,成本降低一半。 VE 泵端面凸轮和滚轮部件、PW 泵拉杆平均使用时间提高 100%
高压径向柱塞泵转子、阀芯, 轴连续运行超过 1 万小时, 噪音降低 10dB
玻璃制瓶机翻转轴、长轴、活塞寿命提高 4-5 倍
矿粉吊车抓斗上的旋转销轴和套提高寿命 100%
汽车减振器 Φ 20 、 35 钢镀铬减振器杆台架试验 1660 万次无漏油, 镀层由 0.025 减为 0.023

2) 冶金机械
热剪机刀架铜衬板提高 6-8 倍
热带连轧机(承受撞击和往复窜动) 机架牌坊内衬板提高 6-8 倍
热剪机钢衬板寿命 1-2 个月提高到 4-5 个月。
薄板轧机轧辊前后衬板 3 个月提高到 6 个月
240 吨行车及 170 吨行车^[25] Φ 700 Φ 500 制动轮提高 2 倍寿命以上
热剪机(剪切近千度的热钢) 热剪切刀片 16 小时提高到 60 小时

5 LGM 的生产工艺:

润滑梯度材料目前的生产工艺是: 真空反应室中有阴极、阳极。当反应室中有硫蒸气或硫蒸气及氧气时。在阴极及阳极间施以高电压直流电时,即产生辉光放电,硫离子与阴极盘上的工件产生物理化学作用与金属零件表面的元素化合,形成硫化物表面或硫化物及氧化物表面,对于钢铁而言,在温度 140~250℃保温二小时, 耗能少、成本低, FeS 渗层可达 80~200 μm 随材料不同而异。

任何材料的质量, 取决于其生产设备与生产工艺, LGM 也不例外, 硫蒸气低温离子渗硫发明已超过二十年, 科研、生产单位众多, 既有产品问世, 也进行了摩擦性能试验以至机理研究, 如文献 [30] [31] [32] [33] [34] [35] 等, 摩擦与耐磨损性能(包括微动磨擦)均有所提高, 但由于没有全面掌握材料生产过程各环节, 产品及实验试样, 层厚只有 2~20μm 有的自称是涂层、薄膜^{[35] [34] [40]}, 已不是通常的渗层概念。表 5—1 是具有代表性、采用固体硫化物作为反应气的 离子“渗硫”的厚度。

表 5—1 非梯度分布的离子渗硫(反应气为硫气)的厚度

序号	题目	材料	工艺	渗硫厚度	参考文献
1	含硫添加剂润滑下 CrMoCu 合金硫层的摩擦磨损性能研究	CrMoCu 合金铸铁	220℃ 保温 2 小时	5 μ	[36]
2	硫化亚铁固体润滑层减摩机理模型	45 钢	190℃ 保温 2 小时	7 μ	[34]
3	低温离子渗硫对滚动轴承用钢耐磨性能的影响	C20Cr Ni2Mo	190℃ 保温 2 小时	2 μ	[31]
4	离子渗硫层的抗擦伤性能及耐磨性研究	45 钢		7 μ	[37]
5	组合铣刀的离子渗硫	W9Mo 3Cr4V		14 μ	[38]
6	碳钢渗硫层面接触滑动摩擦特性的试验研究	45 钢	保温 2 小时	12 μ	[39]

如要规模化生产，满足工业要求，应采用完整的工艺与合格的设备以提高产品质量生成梯度材。

从发展的观点看，将会有更多且性价比更优的 LGM 品种及生产工艺。目前一种新的气体放电——雾态气体放电来制造新材料，低成本、更低摩擦系数的 LGM 材料即将问世。

6 使用 LGM 材料的产品，能取得自主知识产权

由于横跨金属表面改性和润滑两学科，润滑梯度材料 LGM 是具有自主知识产权的源头创新。使用 LGM 材料的机械能取得专利而具有自主知识产权：如、轴承及部件^[41]、复合渗层钢件^[42]、牙轮钻头^[43]、蜗轮副^[44]、空调压缩机、压缩机滑履^[24]、滑片式压缩机的滑片^[25]等均申请并获得了产品专利。为我国企业打破外国专利壁垒提供了有力的支持。

7 结语

润滑梯度材料 LGM:

(1) 是一种与金属零件冶金结合的：金属+金属硫化物+金属氧化物，或金属+金属硫化物的梯度材料。

(2) 此梯度材料具有降低摩擦系数减少磨损的性能，是源头上节能节约资源的润滑梯度材料。

(3) 具有良好的干摩擦性能、与润滑油叠加使用时，进一步降低摩擦系数减少磨损。且提高接触疲劳性能。既能用于干摩擦又能用于油润滑，使用面大于润滑油。

(4) 已用于滚动轴承、轴瓦轴套、齿轮、内燃机、工具、模具、注塞泵、压缩机、热轧辊……均能提高使用寿命。

(5) 使汽油机平均节能 4.7%。轴向注塞马达机械

效率提高 35.6%。

(6) 使轧钢厂用的铸铁、钢轧辊、导卫辊及硬质合金辊环等，在千度高温下使用寿命提高 50~100%

(7) 能以 LGM 钢代铜作轴瓦，以 LGM45 钢代轴承钢做滚动轴承、出油伐座。

(8) 目前 LGM 是用辉光放电渗硫或渗硫、氧制造的。对钢铁来说渗硫、渗硫氧温度一般在 200℃ 以下，耗能少、成本低，已成功的实现大规模工业生产。使用 LGM 材料的机械产品能申请专利。

文中引用了北京理工大学硕士生马星国提供的文章中数据，但在参考文献中未能写出，因在公开的文献中没有找到。在此致歉。

参考文献

- [1] 张弋飞.金属零件表面形成硫化物层的方法及设备[P].中国专利:CN85106828,1987 年 12 月 30 日;日本专利: JP1508879,平成 1 年 7 月 26 日; 欧洲专利(英国, 法国, 意大利, 德国, 瑞典): EP0218916,1991 年 12 月 27 日
- [2] 张昕辉,张弋飞. 具有良好润滑耐磨的金属基复合梯度材料,其制备方法和用途[P]. 中国专利 ZL98809509.2 美国专利 US6,468,679 欧洲(英国、德国、法国、瑞典、意大利) EP1052306 B1
- [3] Zhang Yifei Zhang Xinhui² Properties and applications of the sulphide lubricationality gradient material for metals and alloys [C] Proceedings of the ICSE Shanghai 1997
- [4] 张弋飞,张昕辉.离子渗硫方法制造的润滑耐磨梯度材料与干摩擦轴承[C]. 全国热处理学报(增刊)第七届全国热处理大会论文集,1999.
- [5] 张弋飞. 金属零件硫蒸气辉光放电渗硫的研究[J]. 金属热处理, 1989(4):51
- [6] 张弋飞. 硫蒸气辉光放电合成表面润滑材料 (FeS) 的性能及其应用[J]. 机械工程材料, 1990 (1): 3
- [7] 张弋飞,张昕辉润滑耐磨梯度材料 LGM 辊环与离子渗硫处理的轧辊[J]金属热处理, 2004(1):79
- [8] 许松年 吴建军 固体润滑技术的应用 冶金建设 [J]1995 年 5 期
- [9] 周榕 陆际清 张弋飞摩擦副零件辉光放电渗硫, [J] 金属热处理 1991 年 12 期
- [10]刘健海 王慧 45 钢表面渗硫处理后耐磨性能的研究 [J]固体润滑 1988 年 8 期
- [11]仇汉臣 傅德明 渗硫齿轮弯曲和胶合承载能力试验研究 [C] 中国机械工程学会机械传动专业学会齿轮专业第四次齿轮强度试验学术讨论会
- [12]张昕辉 张弋飞等梯度材料 LGMGr15 风磨芯轴 [C]

第八次全国热处理大会论文集 2003 年北京

[13]马雁声 钢表面改性层及极压抗磨添加剂的交互作用 (D) 清华大学博士学位论文 (1993 年)

[14]马雁声 45 钢化学热处理表面与极压抗磨添加剂的协同作用 [J] 北京科技大学学报 1995 年 1 期

[15]王旭 脉冲静态反应装置和表面膜摩擦学特性研究 {D} 清华大学硕士学位论文 (1990 年)

[16]张平 赵军军 45 钢离子渗硫层的接触疲劳性能研究 [J] 机械工程学报 2002 年 38 卷 1 期

[17]于志波 SCM420 钢和 20CrMnTi 钢碳氮共渗组织及接触疲劳的研究 (D) 中国矿大研究生部硕士学位论文 (1990 年 12 月)

[18]周榕 张弋飞应用“金属零件合成固体表面”技术提高发动机的机械效率[C]. 机械工程学会材料学会第二届年会论文 1990 年

[19]周榕 减少 492QA 汽油机摩擦损失研究 (D) 清华大学硕士学位论文 1990 年

[20]郑立新 低温真空等离子体渗硫技术在柴油机上应用性能试验[J] 内燃机 2005 年 4 期

[21]张兴利, 卢 斌, 等. 梯度材料 LGM 硬质合金轧辊 [J]. 轧钢 2001, 18, (4) :67-68.

[22]戚征宇渗硫技术在线材轧辊上的应用 [J] 首钢科技 1992 年 6 期

[23]张弋飞 张昕辉润滑耐磨梯度材料 LGM 辊环与离子渗硫处理的轧辊[J] 金属热处理 2004 年 1 期

[24]杨念萱, 周继峥等. 压缩机及压缩机滑履 [P] 中国专利申请号 200510111158. 7

[25]周继峥, 潘嘉晔等. 滑片式压缩机的滑片. [P] 中国专利申请号 200610148790. 3

[26]张弋飞等 钢领的气体放电渗硫[J] 湖北机械 1981 年 4 期

[27]张一鸣 张弋飞 低温渗硫钢领研究 [J] 纺织学报 1983 年 2 期

[28]施祖祯 陈俊华 金属表面渗硫技术应用效果 [J] 浙江冶金 2001 年 8 月 [3] 15

[29]许松年 吴建军固体润滑技术的应用与探索[J] 上海冶金专科学报 1993 年 3 期 14 卷

[30]王海斗 庄大明等 高速钢离子渗硫层的摩擦磨损性能研究[J] 摩擦学学报 2002 年 4

[31]王旭 戴雅康 刘世程 低温离子渗硫对滚动轴承用钢耐磨性能的影响[J] 铁道车辆 2004 年 8 期

[32]徐桂珍 周仲荣等 基体材料特性对涂层抗微动磨损性能的影响[J] 摩擦学学报 1999 年 3 期

[33]曲宝建等 低温离子渗硫工艺及渗硫层微观组织[J] 山东科学 1998 年 11 卷 3 期

[34]王海斗 徐滨士 刘家浚 庄大明 硫化亚铁固体润滑层减摩机理模型 [J] 金属热处理, 2005 (1) :

[35]刘家浚 王海斗 张宁 硫化物固体润滑涂层研究新进展 [C] 第八次全国热处理大会论文集 2003 年北京

[36]胡春华, 乔玉林', 马世宁, 高月德, 邹家平, 彭家安 含硫添加剂润滑下 CrMoCu 合金铸铁渗硫层的摩擦磨损性能研究[J] 摩擦学学报第 2006 年 6 期

[37]张宁 刘家浚离子渗硫层的抗擦伤性能及耐磨性研究[J] 金属热处理学报 2000 年 4 期

[38]方晓东 王燕华 组合铣刀的离子渗硫[J] 金属热处理 1998 年 12 期

[39]高伟 施忠良等 碳钢渗硫层面接触滑动摩擦特性的试验研究[J] 摩擦学学报 1998 年 18 卷 4 期

[40]康嘉杰 李固禄 王海斗 刘家浚 徐滨士 朱丽娜 层状固体润滑薄膜的研究进展[J] 金属热处理 2007 年 4 期

[41]张弋飞 有固体润滑表面的轴承和及轴承部件[P]. 中国专利 CN88220845.4

[42]毛红兵 一种钢件表面的渗硫渗硼复合层 [P]. 中国专利 CN00114511. 8

[43]毛红兵 具有固体润滑层的牙轮钻头 [P]. 中国专利 CN00114553. 3

[44]李春元 自润滑硬齿面平面蜗轮副 [P]. 中国专利 CN200520001534. 2

matreved@163..com

作者简介: 张弋飞 男 高工 湖北广济人 1933 年生、1956 年武汉大学物理系毕业,

研究方向: 雾态气体放电性质、雾态气体放电形成新材料及金属、陶瓷、高分子材料表面改性。

1966 年提出“非平衡态加热淬火原理”并在铸铁及钢中获得双相组织,“马氏体及 20%~25%铁素体组织的大功率高速柴油机球铁曲轴” 1969 年在东方红内燃机车上投入运行, 国外 1975 年才发表首篇双相钢论文。

应用辉光放电在铁、镍、钛、铌、…表面形成 Al 的多种合金、化合物层。在铝、铁、镍表面形成 Ti 的多种合金、化合物层。对聚合物、合成纤维、碳纤维等表面改性, 得到高吸水性合成纤维, 高绝缘性聚乙烯、聚氯乙烯等。在铁、铜、镍、铬、硬质合金等形成润滑梯度材料。

申请专利 8 项。