

doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2013.05.017

石墨-磷酸铝铬润滑涂层的制备及其摩擦学性能*

刘灿灿^{1,2}, 陈磊¹, 周健松¹, 周惠娣¹, 陈建敏¹

(1. 中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 以磷酸 H_3PO_4 、氢氧化铝 $Al(OH)_3$ 和氧化铬 CrO_3 为原料合成了磷酸铝铬胶黏剂 (ACP), 并制备了以该磷酸铝铬为胶黏剂, 胶体石墨为固体润滑剂的粘结固体润滑涂层。研究了石墨与磷酸铝铬胶黏剂的质量比、磷酸铝铬胶黏剂中金属离子与磷酸根的比值、铬含量以及磷酸铝铬的合成温度对润滑涂层摩擦磨损性能的影响。结果表明: 磷酸铝铬胶黏剂的耐温性能优良, 以磷酸铝铬为胶黏剂的石墨固体润滑涂层具有优异的减摩抗磨性能; 磷酸铝铬胶黏剂的组成、分子结构对固体润滑涂层的摩擦磨损性能有较大影响, 其中当磷酸铝铬胶黏剂中金属离子与磷酸根的比值 (M:P) 为 1:3, 铬铝比 (Cr:Al) 为 1:3, 合成温度为 100~110 °C 时, 石墨-磷酸铝铬润滑涂层的摩擦磨损性能最好。

关键词: 磷酸铝铬; 石墨; 摩擦学性能; 粘结固体润滑涂层

中图分类号: TG174.4; TG115.58 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2013)05-0096-07

Preparation and Tribological Behaviors of Graphite-phosphate Solid Lubricating Coatings

LIU Can-can^{1,2}, CHEN Lei¹, Zhou Jian-song¹, Zhou Hui-di¹, CHEN Jian-min¹

(1. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: By using aluminum hydroxide $Al(OH)_3$, phosphoric acid H_3PO_4 and chromium oxide CrO_3 as raw materials, the aluminum chromium phosphate (ACP) binder were prepared. The coatings were obtained by using phosphate as the base material and graphite as the lubrication. The effects of synthesis condition of binder and the amount of addition of graphite on tribological properties of the lubricating coatings was investigated. The results show that the lubricating coatings have excellent heat-resisting performance and anti-friction and wear-resistance properties. Besides, tribological properties of the lubricating coatings are related with their synthesis conditions, which contain mass ratio of graphite and aluminum phosphate chrome adhesive, molar ratio of metal and phosphoric acid, the content of chromium, and the synthesis temperature of aluminum phosphate chrome adhesive.

Key words: aluminum chromium phosphate; graphite; tribological properties; bonded solid lubricating coating

0 引言

一般而言, 润滑材料对温度都很“敏感”, 如常规油脂类润滑材料的最高使用温度通常不超过 200 °C, 聚合物基自润滑材料 (包括有机涂层) 的极限使用温度为 400 °C, 若超过 400 °C, 机械的润

滑问题会变得异常困难, 此时可选用的润滑材料和技术范围迅速变窄, 仅无机润滑材料可供选择^[1]。但随着航空、航天、核能和微电子等高新技术产业的迅速发展, 现有润滑材料已不能满足更高工作温度的要求, 急需发展一种在较宽环境温

收稿日期: 2013-04-25; 修回日期: 2013-07-24; 基金项目: * 国家自然科学基金 (51175491)

作者简介: 刘灿灿 (1990-), 女 (汉), 山东济宁人, 硕士生; 研究方向: 表面摩擦与磨损

网络出版日期: 2013-09-25 17:27; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20130925.1727.008.html>

引文格式: 刘灿灿, 陈磊, 周健松, 等. 石墨-磷酸铝铬润滑涂层的制备及其摩擦学性能 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(5): 96-102.

度(-50~1 000 ℃)下,具有稳定摩擦因数和较好防护性能的材料。粘结固体润滑涂层又称干膜润滑剂,是固体润滑材料的主要类型之一,它是利用粘结剂将固体润滑剂以及填料粘附在金属基底材上,从而起到润滑作用。目前,超过 400 ℃以上,耐高温粘结固体润滑材料的基体材料的选择多以硅酸盐和磷酸盐为主^[2-3]。作为固体润滑剂载体,磷酸盐胶黏剂与硅酸盐相比^[3-4],耐水性较好、固化收缩率小、固化温度低,并在接近 500 ℃时完全脱水形成偏磷酸盐,可以看作是一种较为理想的高温材料^[5]。

国外早在 20 世纪 60 年代就开始了磷酸盐的研究,开发出了很多性能优良的耐高温粘结剂。俄罗斯在磷酸盐基复合涂层领域的研究已有几十年历史,对各种磷酸盐的结构、性能等有较全面的了解。70~80 年代,美国空军实验室等单位进行了磷酸盐基材料的常温、高温电性能等的详细测试^[6]。到 20 世纪 80~90 年代,磷酸盐基复合材料的固化温度已经降到了 170 ℃,使用温度可达 1 200 ℃。由于该领域的敏感性,目前国外均未见有关材料具体制备方面的研究报道。国内于 20 世纪 70 年代开始研究磷酸盐胶黏剂,但仅仅在磷酸一氧化铜的研究方面较为成熟^[7],目前加强了其在复合材料、耐火材料、陶瓷材料、涂料和其它方面的应用研究^[8-11]。杨小波等^[10]利用磷酸铝铬树脂制备了纤维增强复合材料,使用温度极限值达 1 200 ℃。霍冀川等^[12]制备出了磷酸铝铬粘合剂,并分析研究了体系的固化特性和耐热性能,体系在 1 100 ℃内具有优异的耐热性能。然而,国内针对磷酸盐的研究主要集中在高温防护及粘接材料方面,针对高温润滑方面的研究较少,有代表性的是丁勇等^[13]以磷酸铝为胶黏剂,制备了以石墨、二硫化钼为润滑相的固体润滑涂层,并考察了二者之间的润滑协同作用,但当温度到达 700 ℃时,涂层从基材上脱落。鉴于磷酸铝铬更为优异的耐高温特性,有必要开展以磷酸铝铬为胶黏剂的高温润滑涂层研究,为解决我国相关高技术领域的高温润滑问题提供研究基础积累和技术应用。

鉴于此,文中以石墨为润滑填料,以磷酸铝铬盐为胶黏剂,制备了粘结固体润滑涂层,并在 CSM 栓-盘摩擦磨损试验机上考察了该粘结固体润滑涂层的摩擦学性能,同时研究了磷酸铝铬的

组成、合成温度及石墨添加量对涂层性能影响。

1 试 验

1.1 主要化学试剂和原料

磷酸,氢氧化铝,氧化铬,多聚甲醛,以上材料都是分析纯;胶体石墨粉剂,去离子水。

1.2 磷酸铝铬胶黏剂的合成

以 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 CrO_3 、磷酸为主要原料,按照一定化学计量比,通过液相反应合成胶黏剂。为探讨胶黏剂中金属离子与磷酸根的比值(M:P,摩尔比)、铬添加量,以及合成温度 3 种因素分别对胶黏剂性能的影响,采用单一变量法合成了不同化学组成的磷酸铝铬胶黏剂,列于表 1。具体制备过程如下:称取适量磷酸、去离子水及 CrO_3 ,在 80 ℃ 恒温油浴中反应 20 min,并不断搅拌。然后向红棕色澄清溶液中加入 $\text{Al}(\text{OH})_3$,并将油浴温度升高至反应温度,恒温反应 3 h,降温至 80 ℃ 以下,向混合液中加入多聚甲醛,由于这一过程有大量的气泡产生,所以可以通过控制甲醛的加入量来降低反应的剧烈程度。最后冷却,装瓶备用。

表 1 不同磷酸铝铬胶黏剂的合成

Table 1 Synthesis of different chromium aluminum phosphate adhesives

Experimental groups	Constants	Variables
Group 1	Cr : Al = 1 : 3 T = 90 ℃	M : P = 0.8 : 3, 1.0 : 3, 1.2 : 3, 1.4 : 3
Group 2	M : P = 1 : 3 T = 100 ℃	Cr : Al = 0 : 3, 1 : 6, 1 : 3, 1 : 2
Group 3	Cr : Al = 1 : 3 M : P = 1 : 3	T = 80, 90, 100, 110, 120 ℃

1.3 固体润滑涂层的制备

将胶体石墨分散在磷酸铝铬胶黏剂中,二者之间的质量比分别设定为 1.3 : 1, 1.4 : 1, 1.5 : 1, 1.6 : 1 和 1.7 : 1;用类似于油漆的喷涂工艺将此涂料喷到 45 钢块试样表面,喷涂前试样表面经喷砂处理,其粗糙度为 $(2.00 \pm 0.20) \mu\text{m}$,加热固化。用测厚仪测得该涂层的厚度为 8~15 μm 。

1.4 固体润滑涂层性能检测

在标准马口铁(50 mm × 120 mm × (0.2 ~

0.3 mm)上,依据 GB 1732 进行抗冲击性能检测;依据 GB/T 1720-79(89)进行附着力测定;依据 GB/T 1731-93 进行柔韧性测定。

在 CSM 柱-盘摩擦试验机上测试涂层的摩擦学性能。上试样为 GCr15 轴承钢球 (AISI 52100),硬度为 61~64 HRC, R_a 为 $0.02 \mu\text{m}$, $\Phi 6 \text{ mm}$ (兰州轴承厂);下试样为以 45 钢为基底的粘固体润滑涂层。试验条件为:振幅 2.5 mm,频率 9 Hz,载荷 14 N,室温下进行,测其磨损寿命。所得结果为 3 次测定的平均值。

2 结果与讨论

2.1 基础胶耐热性及石墨添加量对润滑涂层性能的影响

合成的磷酸铝铬胶黏剂是作为耐高温润滑涂层的基体材料,这就要求其耐温性能良好,因此通过 TG-DSC 考察了其耐温性能,结果表明不同分子组成的基础胶黏剂,均具备良好的耐温性能。图 1 给出了胶黏剂由室温至 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 的 TG-DSC 曲线。图中显示,胶黏剂由室温到 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 有一个明显的吸热及失重过程,其中在 $110 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右出现较为明显的吸热峰,这主要是胶黏剂中水分的挥发所造成的;此外,在 $110\sim 300 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内吸热现象虽然不明显,但伴随有较为明显的失重现象,这主要是由磷酸铝铬体系发生交联反应,以及体系中结晶水的脱除;在 $310 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上该胶黏剂基本不产生明显失重现象,说明胶黏剂已充分交联固化。此外, TG-DSC 曲线在 $850\sim 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 内出现吸热峰,但无失重产生,表明这种现象是由于胶黏剂内部相变过程所致^[14],胶黏剂具有良好的耐高温性能。

从磷酸铝铬胶黏剂在不同煅烧温度下的 XRD 图谱(图 2)可知,磷酸铝铬胶黏剂在 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 下为非晶态,非晶态结构具有三维连续性,更容易调整内在的压应力,更有利于复合材料的应用。 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上为晶态结构,晶态结构由晶粒间连锁作用相对刚硬,粘附性降低。 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,胶黏剂部分仍以非晶态存在,但出现了微量结晶态的 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3(\text{B})$,在 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3(\text{B})$ 中,四面体的 PO_4 连接形成 $(\text{PO}_3)_n$ 链结构。 $700\sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$ 间,胶黏剂中存在两种晶态,分别是环形的 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3(\text{A})$ 和 $\text{Cr}(\text{PO}_3)_3$ 。 $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,胶黏剂中存在 3 种晶态,分别是 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3(\text{A})$, $\text{Al}(\text{PO}_3)_3(\text{C})$ 以及

$\text{Cr}(\text{PO}_3)_3$,当温度升到 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$,体系中又出现了高温相 AlPO_4 。通过磷酸铝铬胶黏剂在不同煅烧温度下的 XRD 图谱,可进一步明确 TG-DSC 曲线在 $850\sim 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 内出现的吸热峰是由于胶黏剂内部的相变所致,胶黏剂的耐温性能良好。

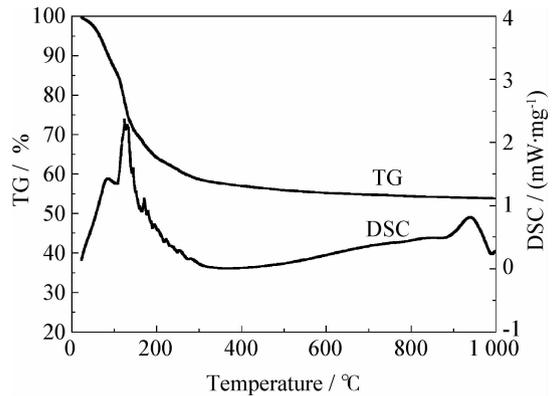


图 1 磷酸铝铬胶黏剂 ($M:P=1:3$, $Cr:Al=1:3$, 合成温度为 $100 \text{ }^\circ\text{C}$) 的 TG-DSC 曲线

Fig. 1 TG-DSC spectrum of the aluminum chromium phosphate binder ($M:P=1:3$, $Cr:Al=1:3$, synthesis temperature= $100 \text{ }^\circ\text{C}$)

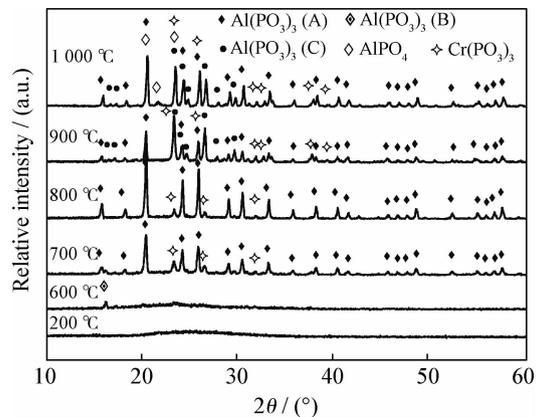


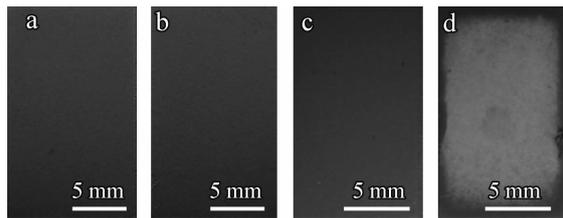
图 2 不同煅烧温度下磷酸铝铬胶黏剂 ($M:P=1:3$, $Cr:Al=1:3$, 合成温度为 $100 \text{ }^\circ\text{C}$) 的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of the aluminum chromium phosphate binder ($M:P=1:3$, $Cr:Al=1:3$, synthesis temperature= $100 \text{ }^\circ\text{C}$) heated at various temperatures

将石墨-磷酸铝铬 (RGP 为 1.5:1) 涂料涂覆于 45 钢试样上,固化后,分别放于 400 、 500 和 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 煅烧 2 h。图 3 为煅烧前后石墨-磷酸铝铬固体润滑涂层照片。从图中可以看出,室温下,涂层为灰黑色;温度升到 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,涂层开始转变为灰白色,表明涂层中石墨已被氧化。图 4 为煅烧前后石墨-磷酸铝铬涂层的表面形貌,从图中可

以看出室温下涂层表面形貌是不规则鳞型,这是石墨粉末的形貌;在 400~500 °C 高温下,石墨仍保持着原有形貌;但温度升到 600 °C 时,石墨鳞片消失,表明石墨已氧化挥发,这与涂层照片显示一致。石墨自身氧化温度为 400 °C^[15],但在石墨-磷酸铝铬涂层中石墨氧化温度变为 600 °C,这种现象表明磷酸铝铬胶黏剂不仅自身耐温性能优越,还对石墨有一定的保护作用,使其氧化温度滞后。

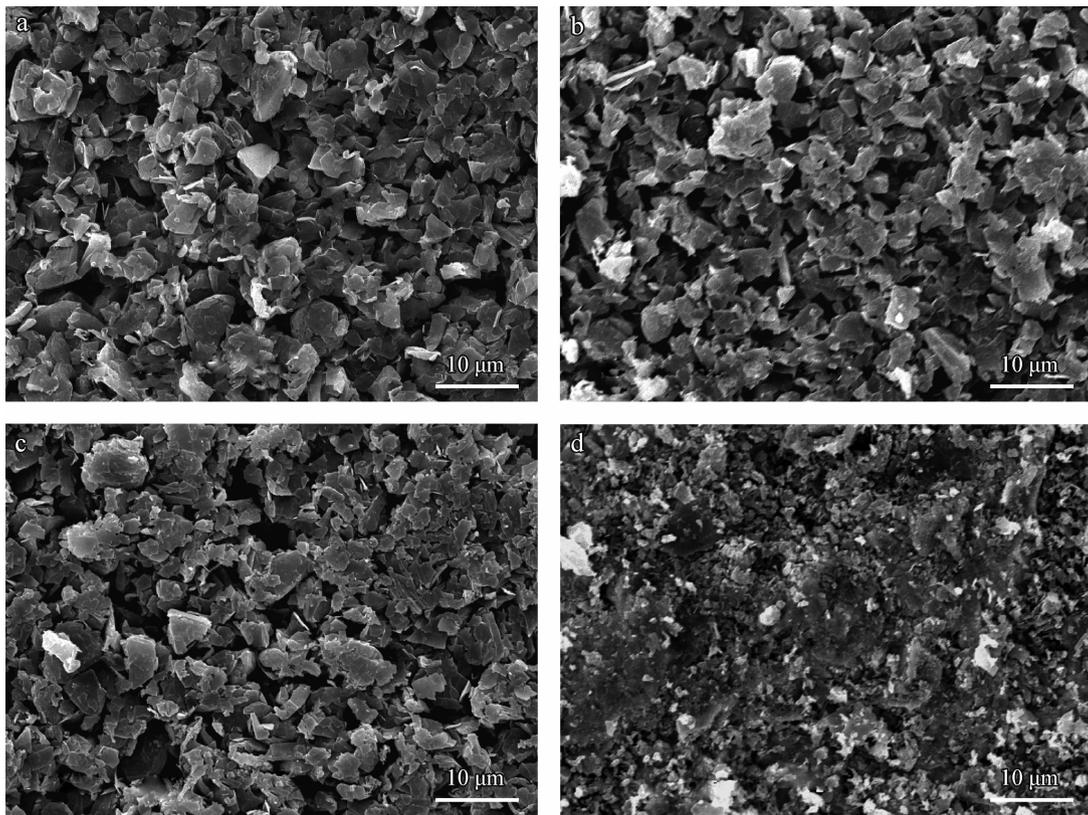
明确了胶黏剂体系的耐温性能后,则需进一步研究体系的粘固比,即石墨与磷酸盐胶黏剂的



(a) Room temperature (b) 400 °C (c) 500 °C (d) 600 °C

图 3 煅烧前后石墨-磷酸铝铬涂层照片

Fig. 3 Photographs of graphite-phosphate coatings before and after calcination



(a) Room temperature (b) 400 °C (c) 500 °C (d) 600 °C

图 4 煅烧前后石墨-磷酸铝铬涂层的表面形貌

Fig. 4 Surface morphologies of graphite-phosphate coatings before and after calcination

质量比(RGP)。石墨作为润滑相,对润滑涂层摩擦磨损性能有直接影响。图 5 给出了不同粘固比时涂层的摩擦学性能,从图中可见 RGP 对涂层的摩擦系数影响不大,但对涂层的磨损寿命有较大影响;当 RGP 为 1.5 : 1 时,涂层有最佳的理化性能和磨损寿命。这是由于 RGP 为 1.3 : 1 时,石墨含量相对低,涂层不能形成完整的润滑膜,进而不能发挥有效的润滑作用;随着石墨含量的增多,在摩擦表面形成完整的润滑膜,使材料的摩擦性能大大提高,RGP 为 1.5 : 1 时,涂层摩擦性能达

到最佳;当 RGP 为 1.7 : 1 时,石墨含量过高,会观察到浮粉现象,致使胶黏剂对石墨的结合强度降低,摩擦过程中石墨容易脱落,在涂层表面容易形成缺陷,从而加剧了涂层的摩擦与磨损^[16-17]。

2.2 磷酸铝铬结构因素对润滑涂层性能的影响

作为涂层成膜物的胶黏剂,磷酸铝铬的结构因素直接影响涂层的很多性能,如耐温性、柔韧性、机械强度等,因此需研究磷酸铝铬胶黏剂的结构与润滑涂层的理化性能和摩擦学性能的对应关系。

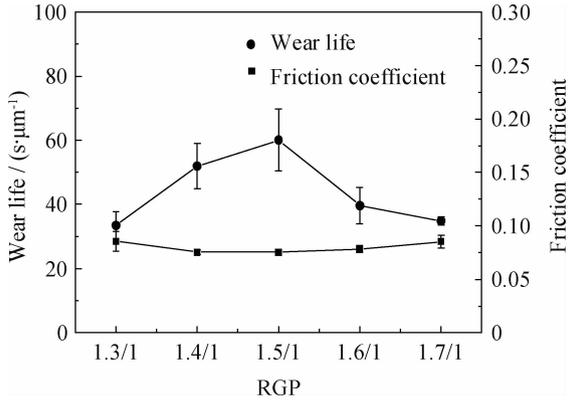


图5 不同粘固比对涂层摩擦学性能的影响(磷酸铝铬胶黏剂中 M:P=1:3, Cr:Al=1:3, 合成温度为90℃)
Fig. 5 Friction coefficient and wear life of the composite coatings as a function of RGP (the aluminum chromium phosphate binder, M:P=1:3, Cr:Al=1:3, synthesis temperature=90℃)

2.2.1 胶黏剂中 M:P 比对润滑涂层性能的影响

Al^{3+} 作为磷酸树脂的主要金属离子具有较好的粘接性、强度及一定的防水性能^[18], 故将 Al^{3+} 确定为磷酸盐胶黏剂的主要金属离子。胶黏剂体系中金属与磷酸的摩尔比(M:P)减小时, 磷酸盐水溶液的稳定性相应提高, 但漆膜的固化性和耐水性则下降; 反之, 磷酸盐水溶液的稳定性降低, 但漆膜的固化性和耐水性提高^[3,19]。因此要通过控制 M:P, 调整基础胶的分子组成, 使以磷酸盐胶黏剂制备的润滑涂层拥有最佳的摩擦磨损性能。

按照试验组 Group 1 设定的合成因素制备了一系列的磷酸铝铬, 并分别以制备的磷酸铝铬作为基础胶, RGP 为 1.5:1 时配制了固体润滑涂层。图 6 给出了不同 M:P 值对涂层摩擦性能的影响, 由图中可以看到 M:P 值对涂层的摩擦系数影响不大, 但对涂层的磨损寿命有较大影响。随着 M:P 值的增加, 涂层的磨损寿命逐渐增加, M:P 值为 1:3 时, 涂层的磨损寿命达到最大值; 随后涂层的磨损寿命随着 M:P 值的增加而降低。这是由于当 M:P 值为 0.8:3 时, 磷酸盐胶黏剂的合成过程中有磷酸剩余, 剩余的磷酸与金属基体反应生成气体, 导致固化后涂层内部和表面存在气孔, 降低了涂层的致密性。在摩擦过程中, 这些气孔的存在降低了涂层的耐磨性能, 使涂层的摩擦寿命降低。当 M:P 值大于 1.2:3

时, 合成胶黏剂中有氢氧化铝剩余, Kingery^[20] 认为 $Al(H_2PO_4)_3$ 是磷酸盐胶黏剂中粘结性能最好的成分, 剩余的氢氧化铝致使胶黏剂中的有效粘结成分降低, 胶黏剂对骨料的粘结强度下降, 磨损过程中造成骨料脱落, 涂层的磨损寿命降低。

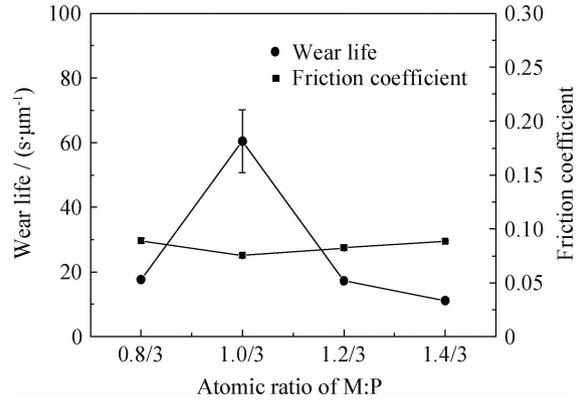


图6 M:P 值对涂层摩擦学性能的影响(磷酸铝铬胶黏剂中 Cr:Al=1:3, 合成温度为90℃)
Fig. 6 Friction coefficient and wear life of the composite coatings as a function of M:P atomic ratio (the aluminum chromium phosphate binder, Cr:Al=1:3, synthesis temperature=90℃)

2.2.2 胶黏剂中铬含量对润滑涂层性能的影响

相对于 Al^{3+} 离子, Cr^{3+} 半径较大, 在相同电荷数的情况下, Cr^{3+} 离子的静电场强度较小, 对邻近 O^{2-} 的静电力作用相对减弱, 这样增加了系统的无序度, 使体系的能量降低, 促进了体系中非晶结构的形成, 提高了系统的稳定性。同时, Cr^{3+} 能降低磷酸铝体系脱水缩聚过程中的反应活化能, 致使脱水缩聚过程加快, 可以使磷酸盐体系脱水缩聚生成的固化网络更坚实, 致密度更高, 粘结效果更好, 与填料结合更紧密, 所以涂层硬度随胶黏剂中铬含量的增加而增大。但铬含量较高, 造成成膜过程中脱水过快, 漆膜脆性过大, 室温长时间放置后出现脱膜、开裂现象^[14,19]。磷酸铝铬胶黏剂的致密性、粘结性对涂层摩擦性能影响较大, 故需研究铬添加量对涂层摩擦磨损性能的影响关系。

按照试验组 Group 2 设定的合成因素制备了一系列的磷酸铝铬, 并分别以制备的胶黏剂作为基础胶, RGP 为 1.5:1 时配制了润滑涂层, 考察了不同 Cr:Al 值对涂层摩擦性能的影响。图 7 给出了不同 Cr:Al 值对涂层摩擦性能的影响, 由图中可以看到, Cr:Al 值对涂层的摩擦系数影响不大, 但对涂层的磨损寿命有较大影响, 其中在

Cr : Al 值为 1 : 3 时,涂层拥有较长的磨损寿命,表明在此铬添加量下,胶黏剂的脱水速度适中,使涂层的致密性增加,同时保证涂层不会出现脱膜现象。

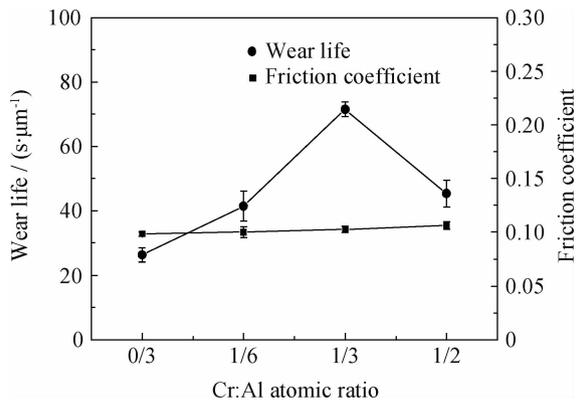


图 7 Cr : Al 值对涂层摩擦学性能的影响(磷酸铝铬胶黏剂中 M : P = 1 : 3, 合成温度为 100 °C)

Fig. 7 Friction coefficient and wear life of the composite coatings as a function of Cr : Al atomic ratio (the aluminum chromium phosphate binder, M : P = 1 : 3, synthesis temperature = 100 °C)

2.2.3 胶黏剂合成温度对润滑涂层性能的影响

磷酸铝铬胶黏剂体系的合成是缩聚过程,属于可逆反应和逐步反应,分子量随反应时间的延长而逐渐增大,但单体的转化率却几乎与时间无关。同时随着聚合温度升高时,单体活性提高,使聚合反应发生;首先单体分子反应生成低聚物,短期内单体的转化率很高,随后低聚物间继续相互缩聚,分子量缓慢增加^[21-23];但随着聚合温度的继续升高,聚合过程中往往伴有化学降解、链交换等副反应,致使反应的聚合度降低。高分子化合物的聚合度对高分子的机械强度、粘度有很大影响^[24],从而对制备的润滑涂层的柔韧性、粘附能力产生影响,故需研究磷酸盐胶黏剂的合成温度对涂层磨损性能的影响关系,合理地控制胶黏剂的聚合温度。

按照试验组 Group 3 设定的合成因素制备了一系列的磷酸铝铬,并分别以制备的胶黏剂作为基础胶,RGP 为 1.5 : 1 时配制了固体润滑涂层,明确了不同合成温度对涂层摩擦性能的影响。图 8 给出了磷酸盐胶黏剂的合成温度对涂层磨损寿命的影响,由图中可以看出合成温度对涂层的摩擦系数影响不大,但对涂层的磨损寿命有一定的影响。其中,当温度在 100~110 °C 之间时,涂层

具有较佳的磨损寿命,表明在此温度段内,合成的磷酸盐胶黏剂聚合度适中,胶黏剂的机械强度,粘结能力较佳,使磷酸盐涂层的摩擦性能达到最佳。

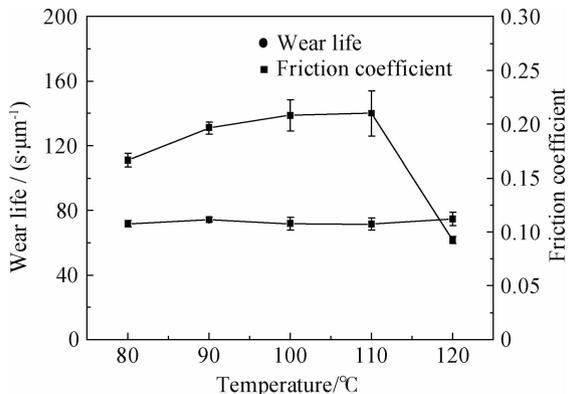


图 8 胶黏剂合成温度对涂层摩擦学性能的影响(磷酸铝铬胶黏剂中 M : P = 1 : 3, Cr : Al = 1 : 3)

Fig. 8 Friction coefficient and wear life of the composite coatings as a function of synthesis temperature (the aluminum chromium phosphate binder, M : P = 1 : 3, Cr : Al = 1 : 3)

3 结论

研究中,以磷酸铝铬为胶黏剂,石墨为润滑相制备了石墨-磷酸盐固体润滑涂层,并将其涂覆于 45 钢试样上,该涂层具有优异的减摩抗磨性能。为使石墨-磷酸盐涂层拥有良好的摩擦磨损性能,涂层的制备条件应为:

(1) 固体润滑涂层中,石墨与磷酸铝铬胶黏剂的质量比值为 1.5 : 1。

(2) 磷酸铝铬胶黏剂中,金属离子与磷酸根的摩尔比(M : P)为 1 : 3,铬铝离子比(Cr : Al)为 1 : 3,合成温度保持在 100~110 °C 之间。

此外,磷酸铝铬胶黏剂不仅具有优良的耐热性能,还可以对添加的石墨起到一定的抗氧化保护作用,使其开始氧化温度滞后。通过进一步地润滑相复配,磷酸盐涂层有望发展为高性能的宽温域连续润滑涂层,这将在后续工作中进行。

参考文献

- [1] 薛群基,吕晋军. 高温固体润滑研究的现状及发展趋势[J]. 摩擦学学报, 1999, 19(1): 91-95.
- [2] 肖泽辉,冀运东. 磷酸铝铬铁高温涂层的研制[J]. 现代铸铁, 2003, 23(2): 53-55.
- [3] 冯莉,刘辉. 磷酸盐耐热涂层的研制[J]. 涂料工业, 2002, 44(8): 14-16.

- [4] Chung D D L. Acid aluminum phosphate for the binding and coating of materials [J]. Journal of Material Science, 2003, 38(13): 2785-91.
- [5] 冶银平, 周惠娣, 贾均红, 等. 高温防粘润滑涂料 [P]. 中国, CN98123517. 1999-06-02.
- [6] 张大海, 黎义, 高文, 等. 高温天线罩材料研究进展 [J]. 宇航材料工艺, 2001, 31(6): 1-3.
- [7] 汤旭相, 李瑞安. 氧化铜及其与磷酸反应产物的研究 [J]. 粘接, 1985, 6(2): 1-4.
- [8] 孙莉莎, 杨全兵. 骨料对磷酸盐基材料性能的影响 [J]. 混凝土及水泥制品, 2004, 31(6): 7-9.
- [9] 费洗非. 固体磷酸铝结合高强度刚玉浇注料的研制 [J]. 耐火材料, 2003, 37(6): 345-347.
- [10] 杨小波, 黄玉东, 张杰, 等. 磷酸盐基耐热复合材料的制备与性能 [J]. 化学与粘合, 2005, 27(2): 67-70.
- [11] 罗进文, 麻平, 郭卫红, 等. 磷酸盐基体及其纤维增强复合材料的研究 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2004, 31(2): 45-48.
- [12] 孙寅, 霍冀川, 雷永林. 磷酸铝粘剂剂的制备及热处理中的相变 [J]. 材料导报, 2011, 25(10): 98-101.
- [13] 丁勇. 高温润滑涂层的制备及性能研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.
- [14] Han H J, Kim D P. Studies on curing chemistry of aluminum-chromium-phosphates as low temperature curable binders [J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2003, 26(1/2/3): 223-228.
- [15] Sliney H E. Solid lubricant materials for high temperatures [J]. Tribology International, 1982, 15(5): 303-315.
- [16] 赖琛, 唐绍裘. 金属用耐磨耐高温涂料的研究 [J]. 涂料工业, 2002, 44(5): 1-3.
- [17] Formaneka B, Szymanska K, Szczucka L B. New generation of protective coatings intended for the power industry [J]. Journal of Material Processing Technology, 2005, 164-165(5): 850-855.
- [18] Morris J H, Perkins P G, Rose A E A, et al. The chemistry and binding properties of aluminum phosphates [J]. Chemical Society Review, 1977, 6(2): 173-194.
- [19] 王政阅, 徐明霞, 梁辉, 等. 磷酸铝粘剂剂固化机理的研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(A01): 565-568.
- [20] Kingery W D. Fundamental study of phosphate bonding in refractories: II, cold-setting properties [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1950, 33(8): 242-247.
- [21] Cotton F A, Wilkinson G. Advanced inorganic chemistry [M]. 5th edn. New York: Willy Interscience, 1988: 424-427.
- [22] Geoff R C. Descriptive inorganic chemistry [M]. W. H. Freeman and Company, 1995: 294-305.
- [23] Morris J H, Perkins P G, Rose A E, et al. Interaction between aluminum dihydrogen phosphate and quartz [J]. Journal of applied chemistry and biotechnology, 1976, 26(7): 385-390.
- [24] 潘祖仁. 高分子化学 [M]. 第4版. 北京: 化学工业出版社, 2007.

作者地址: 甘肃省兰州市城关区天水中路18号 730000
中国科学院兰州化学物理研究所
Tel: (0931) 4968 150
E-mail: liucan9933@163.com

• 学术动态 •

第17届全国残余应力学术会议暨国际残余应力研讨会(第2轮通知)

由中国机械工程学会材料分会残余应力专业委员会、中国机械工程学会失效分析分会喷丸技术专业委员会以及中国物理学会X射线衍射委员会共同举办的第17届全国残余应力学术会议暨国际残余应力研讨会,将于2013年10月底在上海朱家角古镇召开,本次会议由上海交通大学和爱派克测试技术(上海)有限公司共同承办。

本次会议征文范围包括但不限于:①重要装备制造加工中的残余应力;②关键零部件使用服役中的残余应力;③新材料及新工艺中的残余应力问题;④残余应力的消除与调控技术;⑤残余应力与材料性能;⑥残余应力与零部件失效分析;⑦喷丸强化技术与残余应力;⑧微观应力与组织结构;⑨残余应力的测试与计算;⑩与残余应力有关的其它问题。

此外,会议期间还召开国际残余应力研讨会,就一些前沿和普遍关注的学术和应用问题,邀请国内外知名专家学者做专题报告。邀请相关期刊负责人参加会议,优秀论文将推荐在刊物上发表。

(摘自中国机械工程学会网)