

*Functional coatings and surface modification
tribology research and its applications*

功能涂层和表面改性摩擦学 研究及其应用

—— 田军论文选集



兰州大学出版社

功能涂层和表面改性摩擦学 研究及其应用

田军论文选集

兰州大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

功能涂层和表面改性摩擦学研究及其应用:田军论文
选集/田军著. —兰州:兰州大学出版社,2009.3
ISBN 978-7-311-03233-3

I. 功… II. 田… III. ①金属复层—文集②金属表面保
护—文集 IV. TG174.4-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 043189 号

责任编辑 张微伟

封面设计 天河

书 名	功能涂层和表面改性摩擦学研究及其应用 ——田军论文选集
作 者	田军 著
出版发行	兰州大学出版社(地址:兰州市天水南路 222 号 730000)
电 话	0931-8912613(总编办公室) 0931-8617156(营销中心) 0931-8914298(读者服务部)
网 址	http://www.onbook.com.cn
电子信箱	press@onbook.com.cn
印 刷	甘肃天河印刷有限责任公司
开 本	880×1230 1/16
印 张	33.5(插页 6)
字 数	834 千
印 数	1~1000 册
版 次	2009 年 4 月第 1 版
印 次	2009 年 4 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978-7-311-03233-3
定 价	68.00 元

(图书若有破损、缺页、掉页可随时与本社联系)

本论文选集由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资助出版。

主要编辑人员：徐 洮 余来贵 王 潇 罗状子 魏同波
郭宝刚 梁 军 张学俊 刘 亮

田军简介

田军博士 1963 年 8 月 20 日出生于陕西淳化县，1979 年毕业于兰州市第十六中学，1983 年 7 月毕业于兰州大学物理系金属物理专业，获理学学士学位，并留校任物理系科研秘书，1984 年 7 月调入中国科学院兰州化学物理研究所工作。1990 年 7 月获理学硕士学位，1996 年 6 月被聘为副研究员，1997 年 1 月获理学博士学位，1998 年 12 月被聘为研究员，1999 年 10 月被聘为固体润滑国家重点实验室副主任，2000 年 1 月赴日本进行合作研究（一年），2001 年 1 月被聘为中科院兰州化学物理研究所创新项目首席研究员，2001 年 7 月被聘为博士研究生导师。1998 年 7 月加入中国共产党。

田军博士自 1984 年到兰州化物所工作以来，一直从事材料摩擦学与润滑防护材料的研究工作。先后承担完成了国家安全、国家基金、院重点项目等多项任务，为我国国家安全建设做出了突出的贡献。1989 年获中科院科技进步二等奖（一般参加），2001 年获甘肃省科技进步一等奖一项（排名第四）、三等奖一项（排名第二），2002 年获甘肃省科技进步一等奖一项（排名第一）。1999 年发表论文 16 篇，获得个人论文发表数量全国排名第三的优异成绩。田军博士自从事科研工作以来，共发表论文百余篇，申请专利 17 件，编写专业论著 1 部，受到国内外同行的高度评价。1997 年获兰州分院“优秀青年科技工作者”称号，同年获中科院“亿利达奖学金”。

田军博士自步入科学殿堂的那一天起，就全身心地投入到科学研究之中。他热爱科研，潜心研究，忘我工作，不懈追求；他勤奋刻苦，扎实工作，精益求精，一丝不苟。在他身上充分体现了时代责任和科学精神的完美统一，为青年科技工作者树立了光辉的榜样。

他的导师薛群基院士给予他高度评价：“田军博士具有探索求真的理性精神，实验取证的求实精神，开拓创新的进取精神，竞争协作的团结精神，执著敬业的献身精神，是一位品学兼优、淡泊名利、业绩突出、不可多得优秀青年科学家。”

他顽强拼搏、自强不息、坚韧不拔的精神也充分体现在他与病魔的抗争之中。在患病的 5 个多月里，坚强的他始终把微笑留给关心他的亲朋和同事，把痛苦留给自己。他热爱生活，热爱事业，热爱家庭和亲人，热爱老师、同学和朋友，即使在病床上，他关心的还是实验室的评审、项目的申报和学生的论文。他要关心的太多太多，他不能割舍的也太多太多。

田军博士从事科技工作的 20 年，是永不停息、不断进取的 20 年，他把自己的聪明才智和绚丽无悔的青春全部奉献给了祖国的科技事业。他是一位具有崇高思想境界和远大追求的优秀共产党员，是新时期青年知识分子的典范和楷模。

内容提要

《田军论文选集》共收录论文 96 篇，内容涉及材料制备与改性、材料摩擦学及材料防护等领域，大体上可以分为以下六部分内容。

1. 离子注入陶瓷表面改性研究

离子注入会导致材料表层原子组成、电子组态和显微结构发生变化，因而改变材料表面的物理、力学、化学和摩擦学特性。离子注入作为一种重要的表面改性技术，在陶瓷材料摩擦学表面改性方面具有重要的应用价值。

① C^+ 离子注入 Al_2O_3 单晶表面层结构和摩擦学性能研究

研究了 C^+ 注入 $\alpha-Al_2O_3$ 单晶样品的表面残余应力、显微硬度、断裂韧性和注入层破坏临界负荷等力学性能的变化。结果表明， C^+ 离子注入 Al_2O_3 单晶表面硬度增加较小，而表面层破坏临界负荷增大。由于表面残余压缩应力和表面非晶化的协同效应，注入层具有较高的表面韧性和表面层破碎临界负荷。

采用喇曼光谱仪、X 射线光电子能谱仪、电子探针和 X 射线衍射仪分析了注入改性层及磨损表面的化学特征和相组成，发现高剂量 C^+ 离子注入导致 Al_2O_3 表层发生非晶化转变并形成非晶石墨相，从而降低表面电阻和滑动摩擦系数；与此同时，注入层的非晶化导致 Al_2O_3 陶瓷表面发生塑性变形，从而改善摩擦磨损性能。

② N^+ 离子注入陶瓷表面结构和摩擦学性能研究

N^+ 离子注入 Ti/Si_3N_4 样品时导致界面混合、界面粘着力增加和表面粗糙度减小，从而使其同 GCr15 钢对摩时的摩擦系数降低，而注入时的 C 污染导致滑动初期摩擦系数大幅降低。 N^+ 注入 Ag/Al_2O_3 后，界面间发生原子级混合，导致 Ag 膜附着力明显增强；注入引起的 C 污染、表层硬度提高和界面粘结强度的增大有利于明显改善 Ag 薄膜的减摩性能。

N^+ 离子注入可以显著改善 SiO_2 单晶表面的摩擦磨损性能。经 $1 \times 10^{17} N^+/cm^2$ 剂量的氮离子注入后， SiO_2 单晶表面的耐磨性能同注入前相比提高近 4 个数量级； N^+ 离子注入使 SiO_2 表面形成具有良好抗塑变和剪切能力的微晶态与非晶态共存的混合结构，从而使 SiO_2 单晶的抗磨性能得到大幅度提高。

2. γ 射线辐照碳纤维和聚合物表面改性研究

① ^{60}Co γ 射线辐照对碳纤维表面及其复合材料层间剪切强度的影响

经 $1 \times 10^2 \sim 1 \times 10^3$ Gy 剂量的 ^{60}Co γ 射线辐照后，聚丙烯腈 (PAN) 基中强碳纤维本身的力学性能显著提高，由此制备的碳纤维环氧复合材料的层间剪切强度 τ_{ILSS} 提高了 31% 左右。采用合适剂量的 γ 射线在空气中对碳纤维进行辐照处理后，碳纤维表面的含氧官能团浓度和石墨化程度提高，表面粗糙度增大，纤维与树脂的反应性和锚固作用加强。当辐照剂量 $\geq 1 \times 10^4$ Gy 时，辐照损伤及热效应使碳纤维的力学性能下降，表面碳化及撕裂程度加剧，从而使得碳纤维环氧复合材料的层间剪切强度 τ_{ILSS} 降低。

② ^{60}Co 辐照对聚四氟乙烯 (PTFE) 表面结构和表面能的影响

为了改善氟聚合物的加工性能及二次加工性能，以不同剂量的 ^{60}Co γ 射线对 PTFE 进行辐照

处理,发现辐照后 PTFE 粉末表面晶相保持不变,PTFE 的机械强度降低,故其模压试样致密性较好、表面光滑;辐照后 PTFE 表面形成大量的极性亲水基团,从而使得表面极性分量增加,而色散分量变化较小。

3. 层间化合物的制备及摩擦学性能研究

① 石墨层间化合物的制备

石墨层间化合物 (graphite intercalation compound, 简称 GIC) 指在晶体石墨层面之间插入异类原子、分子或离子,同时不破坏石墨自身的二维网状结构而生成的新型化合物,亦称插入层间化合物或夹层化合物。插入的异类物质使石墨的层间距明显增大,层间剪切力降低,润滑性能改善。

以山东南墅鳞片石墨作为原料,采用溶剂法合成了三阶的氯化铁石墨层间化合物,发现石墨鳞片大小、溶液浓度、合成时间等对石墨层间化合物的阶数影响不大;南墅小鳞片石墨很容易进行插入反应,当存在少量水分时依然如此。

② 石墨层间化合物的摩擦学性能研究

将采用溶剂法合成的三阶氯化铁—南墅小鳞片石墨层间化合物同石墨氯化铁进行机械混合,分别擦涂于 45# 钢和 1Cr18Ni9Ti 不锈钢表面。在擦涂过程中,石墨层间化合物夹层剂氯化铁逐步脱插并与钢底材发生反应,形成均匀且较厚的极压复合膜;而石墨氯化铁机械混合物在擦涂过程中则生成由氯化物水合物及石墨组成的非均匀混合膜。因此,石墨层间化合物擦涂膜的耐磨寿命明显优于石墨氯化铁机械混合物擦涂膜。

4. 低表面能防污、防蜡、减阻、降噪功能涂层材料研究

① 低表面能防蜡功能涂层材料研究

蜡、胶质等沉积在油管、井下装置和矿场油气管线表面,从而降低油井的出油能力、输油管线的输运能力及容器的贮油能力。当原油温度低于临界浊点温度时,蜡晶分子向固体表面扩散,聚集形成固状三维网络结构并吸附于管壁,从而堵塞油流管道。

在管道内壁面涂敷亲水/疏油的光滑涂层不仅可防止蜡的附着,也可防止运输过程中油罐容器或设备表面的油质粘附,同时涂层还具有一定的防腐蚀作用。因此,在油田生产和输运过程中,可以采用多功能涂层来防止结蜡,其中改性有机硅涂层防止结蜡的效果较好。

② 含氟低表面能无毒防污功能涂层材料研究

海洋生物污损率为 5% 时的阻力相当于洁净表面的 2 倍,相应的燃料消耗增加 10% 左右,因此必须严格控制船体表面粗糙度、减小涂漆钢体表面与水的摩擦阻力以及海洋生物污损所产生的摩擦阻力。就作用机理而言,有毒防污涂层中的防污毒剂以一定的速度 ($>$ 临界致死量) 从涂层中不断渗出,并在漆膜表面形成有毒环境,从而防止海洋生物附着生长,但有毒物质导致严重的环境污染。因此,研制了改性无毒含氟高分子涂层,其表面光滑、无毒且不挂水珠,可减少藤壶等水生物附着。研究表明,PTFE 材料并不能减少绿藻和玻璃海鞘的附着,其表面粗糙度、结晶度、化学基团的变化对防污性能影响较小;而涂层表面的有机硅氧烷是其具有良好防污性能的主要原因。

③ 低表面能减阻、降噪功能涂层材料研究

非溶性低表面能涂层材料具有表面富集和微孔状结构,表面能很低,可降低表面摩擦阻力,从而减小模型流噪声。低表面能涂层具有很强的疏水性和较小的壁面—水相互作用力,且耐老化性能较好,其作为一种新型功能涂层,在减阻和降噪方面具有广阔的应用前景。

研究表明,低表面能涂层在非吸声的作用下能有效地降低边界层流体噪声,涂层组分的配比

不同,其降低流体噪声的效果亦不同。以涂覆低表面能涂层的回转体模型为例,当频率大于截止频率时,噪声声级仍以频率的负三次方比率迅速下降。这说明低表面能涂层可减小壁面的切变应力,增大流体边界层厚度,从而降低边界层的高频流噪声。

针对降低鱼雷流噪声的需要,研制了室温固化低表面能涂层材料(厚度为 $100\sim 200\ \mu\text{m}$),重点解决了在 $3\sim 50\ \text{kHz}$ 频率范围内降低流噪声 $4\ \text{dB}$ 以上、且涂层材料有效期达2年的问题。研究表明,在湍流边界和混合边界状态下,低表面能涂层都能降低平板阻力 10% 左右;涂层材料的机械、物理、化学性能稳定;对铝合金、黑色金属、木材等无腐蚀作用;使用工艺简单,具有较强的实用性,可有效提高鱼雷攻击的隐蔽性和命中率。

5. 铝合金表面微弧氧化(MAO)改性研究

① 铝合金表面微弧氧化陶瓷层制备原理及工艺

将Al、Ti、Mg、Zr等金属或合金置于电解质水溶液中,在强电场作用下,阳极表面出现微弧光放电现象,微弧区瞬间高温烧结作用导致氧化物陶瓷相的形成,这就是微弧氧化技术,又称为“火花放电沉积”或“微等离子体氧化”等。以 $5\ \text{g/L}$ 的NaOH作为电解液, Na_2SiO_3 作为调节剂,控制电极电压为 $500\ \text{V}$,电流密度为 $10^3\ \text{A/m}^2$,制备了一系列铝合金微弧氧化涂层,并考察了表面改性层的摩擦学特性。研究表明,当打磨去除厚度约为 $110\ \mu\text{m}$ 的微弧氧化铝合金涂层表面的疏松层($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$)以后,涂层主要由 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 构成。虽然微弧氧化铝涂层的摩擦系数较高,但其耐磨性能极佳。通过改变工艺条件和在电解液中添加不同胶体微粒,可以方便地调整膜层的微观结构、特征,从而实现膜层的功能设计。

② 微弧氧化陶瓷层及多层复合自润滑涂层的摩擦学性能研究

Al合金内层微弧氧化涂层主要由 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 构成,其承载能力强,同陶瓷偶件对摩时磨损率仅为 $(3\sim 5)\times 10^{-6}\ \text{mm}^3/\mu\text{m}$,摩擦系数为 0.45 。在内层微弧氧化铝涂层表面引入粘结固体润滑膜可以得到自润滑、耐磨多层复合涂层,其具有低摩擦、高耐磨等优异性能。

6. 纳米微粒填充聚合物复合材料摩擦学性能研究

以纳米和微米氧化物颗粒填充二氮杂萘联苯型聚醚砜酮(PPEsk)复合材料为研究对象,较系统全面地考察了载荷、滑动速度和环境温度对PPEsk及其复合材料摩擦磨损性能的影响。通过显微分析,从物理、化学和微观结构出发探讨了纳米和微米颗粒填充复合材料的磨损机制。结果表明,并非所有纳米氧化物颗粒都能改善PPEsk的摩擦磨损性能,纳米和微米氧化物填充PPEsk的摩擦磨损性能主要受填料和PPEsk分子之间的界面特性及填料性质的影响。当温度为室温至 $270\ ^\circ\text{C}$ 时,纳米 Al_2O_3 、 SiO_2 及 TiO_2 均能大幅度提高PPEsk的耐磨性能,而纳米ZnO反而使其磨损率增大。

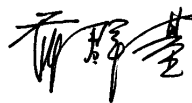
序

田军博士离开我们已经五年多了，五年来，我们大家一直都很怀念他，他的骨肉至亲更是将悲痛埋在心中，将对他的思念化为坚强地生活和努力地工作与学习。

田军的同学、同事和家人收集整理了田军从事科研工作期间发表的近百篇论文，准备出一本论文集，嘱我作一序言。有关研究论文的内容我不再评价，阅读的诸位可以从论文中感受，只在此写下我的感想作为纪念，也权作序言。

田军博士是我所带过的学生中最优秀的博士之一。他是一个品德非常好的人，为人谦和，对人诚恳，团结同学和同事，处处工作第一，他人第一。记得 2002 年 12 月中旬，他病起住院，恰好我因身体不适住院，和他楼上楼下，他每天早上拖着病体上楼探视我，师生情谊，可见一斑。2003 年 3 月底，他在北京住院，在开完院工作会议后，我和赵书记去医院看他，见他身体虚弱，我心中很难过，但他反过来安慰我说“治疗很好，很快可回所工作”，让我不要担心。就在 2003 年 5 月中旬他离开我们前几天我去医院看他，他已有时昏迷，醒来时，还对我说“老师，你很忙，我没事的”，即便临危，也不忘关心别人。2000 年我在日本开会，他辗转数百里赶到筑波接我去他所在的日本原子力研究所考察，彻夜长谈，至今仍历历在目。田军博士思维敏捷，善于学习，有很强的创造力。仅在攻读博士学位期间，他就在国内外发表学术论文 36 篇。从和他对研究工作的讨论中可以看出，他的基础扎实，知识面宽广，有很好地把握学科发展方向的能力。二十年的工作中，他在材料制备、摩擦学和材料防护研究领域做出了优秀的成绩，为学科的发展、实验室的进步做出了重要贡献，是一位不可多得优秀青年科学家。

田军同志二十年来涉足的科研领域主要包括离子注入陶瓷表面改性研究， γ 射线辐照碳纤维和聚合物表面改性研究，层间化合物的制备及摩擦学性能研究，低表面能防污、防蜡、减阻、降噪功能涂层材料研究，铝合金表面微弧氧化（MAO）改性研究，以及纳米微粒填充聚合物复合材料摩擦学性能研究等。这本论文集收录了田军博士发表的学术论文共 96 篇。论文集的出版很有意义，既是一种纪念，又是一份科研成果和心血的集成与总结。我希望这些论文能对后来者的学习和研究工作起到作用。



2008.12.9日

陈辉强

目 录

离子注入陶瓷表面改性研究

1. The solid film lubrication by carbon ion implantation into α - Al_2O_3 . Nucl Instrum Meth in Phys Res, 1998, B 143 (4): 488~492
..... Tian J, Wang Q Z, Xue Q J
2. Effect of interfacial mixing by N^+ implantation on the adhesion and friction of Ti film on Si_3N_4 . J Adhes Sci Technol, 1998, 12 (10): 1 071~1 080
..... Tian J, Wang Q Z, Chen Y F, Yu L G, Wang L J, Xue Q J
3. The effect of interfacial mixing on $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$ by N^+ implantation. J Mater Sci, 1999, 34 (16): 4 051~4 055 Tian J, Wang Q Z, Chen Y F, Xue Q J
4. Reaction in Al_2O_3 surface layers upon ion implantation. J Mater Chem, 2000, 10 (2): 565~569 Tian J, Wang Q Z, Chen Y F, Xue Q J
5. The effect of nitrogen ion implantation on wear behavior of single-crystal SiO_2 . J Phys D: Appl Phys, 2000, 33 (4): 426~429
..... Xu T, Lu J J, Tian J, Xue Q J
6. Influence of nitrogen ion implantation on tribological properties of nanocrystalline diamond films. J Phys D: Appl Phys, 2002, 35 (8): 788—793
..... Xu T, Yang S R, Chen M, Tian J, Xue Q J, Li J Q, Guo W T
7. SiCN thin film prepared at room temperature by r. f. reactive sputtering. Appl Surf Sci, 2002, 185 (3/4): 262~266
..... Wu X C, Cai R Q, Yan P X Liu W M, Tian J
8. Post boronizing ion implantation of C45 steel. Appl Surf Sci, 2002, 195 (1~4): 74~79
..... Yan P X, Wei Z Q, Wen X L, Wu Z G, Xu J W, Liu W M, Tian J
9. 离子注入 α - Al_2O_3 陶瓷材料的表面改性研究. 核技术, 1996, 19 (2): 75~79
..... 王齐祖, 陈玉峰, 田军, 杨晓鸿, 王志宏
10. N^+ 离子注入 α - Al_2O_3 的表面结构及摩擦性能. 核技术, 1997, 20 (4): 204~209
..... 田军, 王齐祖, 陈玉峰, 杨晓鸿, 薛群基
11. N^+ 离子束增强 $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜附着力及其摩擦学研究. 机械工程材料, 1997, 21 (3): 4~6 田军, 王齐祖, 陈玉峰, 杨晓鸿, 薛群基
12. 110 keV N^+ 注入 α - Al_2O_3 陶瓷材料的摩擦学研究. 硅酸盐学报, 1997, 25 (2): 188~191
..... 田军, 王齐祖, 陈玉峰, 杨晓鸿, 王志宏
13. 离子束混合增强陶瓷基体上金属薄膜附着力的研究. 核技术, 1997, 20 (1): 13~17
..... 王齐祖, 陈玉峰, 王维洁, 王天民, 折晓黎, 田军
14. C^+ 离子注入红宝石表面的喇曼光谱研究及表面润滑性. 机械科学与技术, 1997, 16: 62

- ~64 田军, 王齐祖, 王丽娟, 周兆福, 阎逢元, 薛群基
15. C^+ 离子注入对 Al_2O_3 单晶表面韧性的影响. 兰州大学学报 (自然科学版), 1998, 34 (3): 52~55 田军, 王齐祖, 王丽娟, 薛群基
16. N^+ 注入 Ti/Si_3N_4 的摩擦行为研究. 硅酸盐学报, 1998, 26 (2): 206~209
..... 田军, 杨晓鸿, 陈玉峰, 王齐祖, 薛群基
17. 氮离子注入 SiO_2 单晶磨损机理的 SEM 研究. 摩擦学学报, 1999, 19 (4): 289~293 ...
..... 徐洮, 薛群基, 田军

γ 射线辐照碳纤维、聚合物表面改性研究

1. Surface modification of PTFE by ^{60}Co γ-ray irradiation. J Appl Polym Sci, 1998, 69 (3): 435~441 Tian J, Xue Q J
2. Excretion of biotrace elements using the multitracer technique in mice. J Radio Anal Nucl Chem, 1999, 240 (3): 963~967
..... Wang X, Yin X M, Zhang X, Li Z W, Tian J, Wu M, Sheng X L
3. The excretion of biotrace elements using the multitracer technique in tumour-bearing mice. Appl Radiat Isotopes, 2000, 53 (6): 969~974
..... Wang X, Tian J, Yin X M, Zhang X, Wang Q Z
4. Distribution of trace elements in normal and tumor-bearing mice using the multitracer technique. Biol Trace Elem Res, 2001, 81 (2): 177~183
..... Wang X, Tian J, Yin X M, Zhang X, Qin Zh, Li Z W, Wang Q Z, Li Sh B
5. ^{60}Co 辐照对 PTFE 表面结构和表面能的影响. 中国塑料, 1997, 11 (5): 37~41
..... 田军, 薛群基
6. 碳纤维的表面处理对其力学性能和结构的影响. 合成纤维, 1998, 27 (1): 10~12
..... 田军, 薛群基, 王齐祖
7. ^{60}Co γ 射线辐照对碳纤维表面及其复合材料层间剪切强度的影响. 复合材料学报, 1998, 15 (4): 1~5 田军, 王齐祖, 杨生荣, 薛群基
8. γ 射线对 $La_{0.96}Tb_{0.01}Dy_{0.03}BO_3$ 荧光粉发光性能影响的初步探讨. 辐射研究与辐射工艺学报, 2000, 18 (1): 52~56
..... 田军, 齐尚奎, 杨晓鸿, 金祺新, 王齐祖, 薛群基

层间化合物的制备及摩擦学性能研究

1. A Graphite intercalation compound additive in oil. Lubrication Science, 1996 (8): 353~358 Tian J, Xue Q J
2. The deintercalation effect of $FeCl_3$ -graphite intercalation compound in paraffin liquid lubrication. Tribol Int, 1997, 30 (8): 571~574 Tian J, Xue Q J
3. Tribological properties of $FeCl_3$ -graphite intercalation compound rubbed film on steel. Carbon, 1997, 35: 430~432 Tian J, Xue Q J
4. Fabrication of MoO_3 nanoparticles on an MoS_2 template with $(C_4H_9Li)_xMoS_2$ exfoliation. J Mater Chem, 2003, 13 (3): 631~633
..... Shao X, Tian J, Xue Q J, Ma C L

5. 南墅鳞片石墨氯化铁层间化合物的溶剂法合成. 碳素, 1995 (4): 43~46
..... 田军, 赵家政, 薛群基
6. 石墨层间化合物的成膜性能及耐压抗磨性. 润滑与密封, 1996 (6): 34~36
..... 田军, 赵家政, 薛群基
7. 南墅小鳞片石墨的 FeCl_3 层间化合物结构研究. 新型碳材料, (4): 58~60
..... 田军, 赵家政, 薛群基
8. 石墨层间化合物中夹层剂脱插对固体润滑剂粘附于金属上的影响. 新型碳材料, 1997, 12 (2): 26~30 田军, 赵家政, 薛群基
9. 钢球在石墨层间化合物上微滑动的 SEM 观察. 电子显微学报, 1999, 18 (2): 207~211 田军, 赵家政, 薛群基
10. 稀土-石墨层间化合物的合成和应用前景. 稀土, 2000, 21 (6): 52~57
..... 邢玉梅, 田军, 邵鑫, 王丽娟
11. 膨胀石墨和柔性石墨的应用前景及发展趋势. 润滑与密封, 2001 (3): 58~67
..... 邢玉梅, 田军, 杨生荣
12. 柔性石墨的结构、密封性能及应用研究. 润滑与密封, 2001 (1): 63~65
..... 王丽娟, 田军

低表面能防污、防蜡、减阻、降噪功能涂层材料研究

1. Plate drag reduction with low surface energy coating in water tunnel. Chinese Sci Bull, 1997, 42 (4): 307~309 *Tian J, Xue Q J*
2. The effect of CrO_3 on the friction and wear of MoS_2 transfer film. Appl Surf Sci, 1997, 108: 471~475 *Tian J, Xue Q J*
3. Antiwear and lubrication properties of polyurethane/polytetrafluoroethylene bonded coating. J Appl Polym Sci, 2002, 86 (13): 3 454~3 459
..... *Tian J, Huang Y L*
4. Interfacial adhesion between polyurethane binder and polytetrafluoroethylene powder in bonded solid lubricant films. J Adhes Sci Technol, 2002, 16 (1): 47~57
..... *Tian J, Huang Y L*
5. Wettability effect of coatings on drag reduction and paraffin deposition prevention in oil. J Petrol Sci Eng, 2002, 36 (1/2): 87~95
..... *Zhang X J, Tian J, Wang L J, Zhou Zh F*
6. Thermodynamic evaluation of phase equilibria in NaNO_3 - KNO_3 system. Journal of Phase Equilibria, 2003, 24 (5)
..... *Zhang X J, Tian J, Xu K C, Gao Y C*
7. The phase diagram of KNO_3 - KClO_3 . Thermochimica Acta (In Press)
..... *Zhang X J, Tian J, Xu K C, Gao Y C*
8. 新型的无公害海洋防污涂料. 环境科学, 1993, 14 (5): 65~68
..... 田军, 徐锦芬, 赵永红, 周兆福
9. 含氟的聚合物及其应用. 功能高分子学报, 1995, 8 (4): 504~511
..... 田军, 徐锦芬, 潘光明, 周兆福, 薛群基

10. 水下流噪声及其消减措施. 材料科学与工程, 1996, 14 (2): 27~30
..... 田军, 徐锦芬, 薛群基
11. 聚合物表面的润湿性及其应用. 中国塑料, 1996, 10 (6): 25~32
..... 田军, 徐锦芬, 薛群基
12. 平板上低表面能涂层的水筒减阻研究. 科学通报, 1996, 41 (18): 1 667~1 669
..... 田军, 薛群基
13. 海洋天然胶粘剂. 化学与粘合, 1996 (3): 167~171
..... 田军, 王潇, 徐锦芬, 薛群基, 周兆福
14. 羟基封端聚二甲基硅氧烷预聚物与甲基丙烯酸(酯)的共混改性. 合成树脂及塑料, 1997, 14 (1): 43~45 田军, 薛群基, 王齐祖
15. 有机硅与聚氨酯预聚体或甲基丙烯酸丁酯化学共混物的相结构. 涂料工业, 1997 (2): 6~7 田军, 薛群基
16. 水动力试验和流噪声测试. 实验力学, 1997, 12 (3): 411~415
..... 田军, 薛群基
17. 低表面能涂层的减阻试验研究. 水动力学研究与进展 (A辑), 1997, 12 (1): 27~32
..... 田军, 徐锦芬, 薛群基
18. 粘性减阻技术及其应用. 实验力学, 1997, 12 (2): 198~203
..... 田军, 徐锦芬, 薛群基
19. 低表面能涂层材料降低海洋生物污损的研究. 环境科学, 1997, 18 (2): 40~42
..... 田军, 薛群基
20. 低表面能粉末填充复合聚甲基丙烯酸丁酯、醇酸树脂. 合成树脂及塑料, 1997, 14 (4): 59~60 田军, 薛群基
21. 含氟聚合物低表面能防污(蜡)、降噪功能涂层的研制及其应用. 塑料, 1997, 26 (3): 27~29 田军, 薛群基
22. 端羟基聚二甲基硅氧烷改性环氧树脂. 材料研究学报, 1997, 11 (2): 209~211
..... 田军, 薛群基
23. 聚氨酯/聚四氟乙烯耐磨防腐涂层表面结构的研究. 腐蚀科学与防护技术, 1997, 9 (3): 182~186 田军, 周兆福, 薛群基
24. 聚合物型原油降凝剂的作用机理及应用. 精细石油化工, 1997 (5): 5~8
..... 王丽娟, 田军
25. 水筒中涂层降低低频流噪声的作用. 材料工程, 1997 (10): 23~24
..... 田军, 薛群基
26. 复合涂层的表面能和机械性能研究. 涂料工业, 1997 (4): 16~18
..... 田军, 薛群基
27. 氟聚合物表面接触角滞后的研究. 高分子材料科学与工程, 1997, 13 (5): .
109~113 田军, 徐锦芬, 薛群基
28. 非溶性低表面能降噪涂层. 舰船科学技术, 1998 (1): 64~65
..... 田军, 周兆福, 徐锦芬, 朱锡清
29. 端羟基聚二甲基硅氧烷/蓖麻油改性聚氨酯嵌段共聚物的研究. 高分子材料科学与工程, 1998, 14 (6): 38~40 田军, 薛群基

30. 有机硅橡胶改性丙烯酸树脂的疏水性研究. 高分子材料科学与工程, 1998, 14 (4): 90~92 田军, 薛群基
31. 低表面能涂层厚度对降噪效果的影响. 力学与实践, 1998, 20 (1): 13~14 田军, 薛群基
32. 有机硅涂层表面能对海生物附着的影响. 海洋学报, 1998, 20 (5): 61~64 田军, 薛群基
33. 低表面能材料上海洋生物附着的研究. 涂料工业, 1998 (1): 11~14 田军, 辜志俊, 李克恭, 薛群基
34. 无毒防污涂层表面化学结构的研究. 环境科学, 1998, 19 (1): 46~49 田军, 薛群基
35. 蓖麻油改性聚氨酯与醇酸树脂的共混改性. 塑料工业, 1998, 26 (1): 103~105 田军, 薛群基
36. 天然矿石粉表面的氟烷烃处理对其表面疏水性的影响. 合成树脂及塑料, 1998, 15 (4): 12~15 田军, 薛群基
37. 氧化剂 CrO_3 在 MoS_2 润滑膜中的物理化学作用. 摩擦学学报, 1998, 18 (3): 279~282 田军, 赵家政, 薛群基
38. 涂层表面能色散分量和极性分量对涂层与液体石蜡间润湿性的影响. 石油与天然气化工, 1998, 27 (2): 113~114 田军, 薛群基
39. 水筒中涂层模型降低噪声总声级的研究. 应用声学, 1998, 17 (3): 34~36 田军, 薛群基
40. 涂层表面粗糙性对流体噪声的影响. 实验力学, 1998, 13 (4): 532~536 田军, 薛群基
41. 聚氨酯改性有机硅含氟涂层表面能的研究. 高分子材料科学与工程, 1999, 15 (4): 164~165 田军, 薛群基
42. 低表面能涂层降低流体噪声的试验研究. 应用科学学报, 1999, 17 (1): 114~118 田军, 薛群基
43. 涂层低表面能各分量降低流体噪声的试验研究. 应用力学学报, 1999, 16 (3): 109~111 田军, 薛群基
44. 原油管道输送防蜡减阻效果的实验室评价方法. 石油与天然气化工, 1999, 28 (3): 199~202 王丽娟, 张学俊, 田军
45. 油气田管道防蜡、减阻、防腐技术的发展及现状. 天然气与石油, 2000, 18 (4): 11~15 王丽娟, 田军, 薛群基
46. 树脂涂层对原油输送管道的壁面减阻作用. 石油炼制与化工, 2001, 32 (3): 57~61 张学俊, 王丽娟, 田军
47. 几种树脂基粘结涂层的性能评价. 机械工程材料, 2001, 25 (9): 28~42 周兆福, 邵鑫, 田军
48. 树脂涂层在原油管输中的防结蜡研究. 石油炼制与化工, 2002, 33 (2): 28~30 张学俊, 周兆福, 田军, 高忆慈

铝合金表面微弧氧化 (MAO) 改性研究

1. Structure and antiwear behavior of micro-arc oxidized coatings on aluminum alloy. Surf

- Coat Tech, 2002, 154 (1): 1~7
 Tian J, Luo Z Z, Qi S K, Sun X J
2. 铝合金表面微弧氧化耐磨润滑涂层. 材料保护, 2002, 35 (5): 4~6
 袁洋, 罗状子, 田军
 3. 液相等离子体电沉积表面处理技术. 材料科学与工程学报, 2003, 21 (3): 450~455
 魏同波, 田军
 4. 电流密度对铝合金微弧氧化膜的生长及结合力的影响. 材料保护, 2004, 37 (4): 4~6
 魏同波, 张学俊, 王博, 田军, 阎逢元
 5. LY 12 铝合金微弧氧化陶瓷层的结构和性能. 材料研究学报, 2004, 18 (2): 161~166
 魏同波, 田军, 阎逢元
 6. 铝合金微弧氧化陶瓷膜的性能研究. 材料科学与工程学报, 2004, 22 (4): 564~567
 魏同波, 郭宝刚, 梁军, 阎逢元, 田军

纳米微粒填充聚合物复合材料摩擦学性能研究

1. Tribological properties of SiO₂ nanoparticle filled phthalazine ether sulfone/phthalazine ether ketone (50/50 mol%) copolymer composites. J Appl Polym Sci, 2002, 85 (10): 2136~2144 Shao X, Tian J, Liu W M, Xue Q J, Ma C L
2. Surface graft polymerization of styrene onto nano-sized silica with a one-pot method. Polym J, 2003, 35 (4): 379~383 Liu P, Tian J, Liu W M, Xue Q J
3. 填料对聚合物基复合材料摩擦学行为的影响. 材料科学与工程, 2001, 19 (4): 116~121 邵鑫, 刘维民, 薛群基, 田军
4. 纳米 SiO₂ 对聚醚砜酮复合材料摩擦学性能的影响. 材料工程, 2002 (2): 38~42
 邵鑫, 田军, 刘维民, 马春林, 薛群基
5. 无机纳米粒子表面引发接枝聚合. 化学通报, 2003 (2): 73~77
 刘鹏, 田军, 刘维民, 薛群基

后记

离子注入陶瓷表面改性研究

The Solid Film Lubrication by Carbon Ion Implantation into α - Al_2O_3

Abstract: Improvement in tribological performance by C^+ 110 keV implantation can be achieved by having a more graphite-like carbon structure on Al_2O_3 . It was shown that fracture toughness and critical peeling load increased for a fluence of $5 \times 10^{17} \text{ C}^+/\text{cm}^2$ because of residual compression stress and amorphism of surface. The testing in a different implantation dose indicated that the friction and wear mechanism in Optimol fretting wear machine (SRV) was a combination of surface structure and its abrasive wear. Raman shift showed that the amorphous graphite was formed on Al_2O_3 surface with $5 \times 10^{17} - 1 \times 10^{18} \text{ C}^+/\text{cm}^2$ implantation dose, so that it reduced friction coefficient and wear of Al_2O_3 . Also it is noticed that the failure of lubrication due to graphite-like film wear is much earlier in the implantation sample with $1 \times 10^{17} \text{ C}^+/\text{cm}^2$ dose.

Keywords: carbon ion implantation, Raman, friction and wear, Al_2O_3

1 Introduction

Carbon films prepared by different techniques, e. g., sputtering, evaporation and plasma-assisted chemical vapor deposition, have different physical properties that depend on the deposition techniques. Owing to their ability to form different bonding configurations, carbon films can have a wide span of hardness values, as well as friction and wear properties. Ion implantation has been successfully applied in the semiconductor industry and also proven to be successful as a means to alter the physical and chemical properties in near-surface region of metals and alloys. It can be achieved by improving mechanical properties such as hardness, fracture toughness, and stress through a structural change of the Al_2O_3 by the ion implantation^[1-2]. The improved mechanical properties would be expected to improve the wear resistance of the layer^[3-4]. Improvement in tribological performance of ceramic can be achieved by having a more graphite-like structure in the surface through the C^+ implantation, while the improved surface improves the frictional property. This has led to extensive studies on the structure of carbon films using Raman spectroscopy^[5-6] and electron probe microanalysis (EPMA), all these techniques are more or less effective in elucidating surface structures.

2 Experimental

Single α - Al_2O_3 (ruby) crystal surface with 30° angle to C axis by Laue method, which