



国防科技图书出版基金

Solid Lubricant Coating Technology
Under Extreme Environment

特种环境 固体润滑涂层技术

熊党生 李建亮 秦永坤 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

特种环境固体润滑涂层技术

Solid Lubricant Coating Technology Under Extreme Environment

熊党生 李建亮 秦永坤 著

国防工业出版社

·北京·



图书在版编目(CIP)数据

特种环境固体润滑涂层技术/熊党生, 李建亮, 秦永坤著. —北京: 国防工业出版社, 2016.7
ISBN 978-7-118-10750-0

I. ①特… II. ①熊… ②李… ③秦… III. ①固体润滑—涂层技术—研究 IV. ①TH117.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 153291 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 18 字数 336 千字

2016 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 99.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 固体润滑涂层的典型使用环境与应用领域	1
1.1.1 空间环境	1
1.1.2 航空工业和先进能源装备领域	3
1.1.3 高速切削工具和模具领域	5
1.1.4 低温条件	5
1.2 特殊环境和工况下的润滑涂层	5
1.2.1 空间环境用润滑涂层	6
1.2.2 航空工业与先进能源装备用润滑复合涂层	10
1.2.3 高速切削工具用润滑涂层	11
1.3 固体润滑涂层的发展与趋势	12
1.3.1 第一代: 单组元涂层	13
1.3.2 第二代: 多层和多组元涂层	14
1.3.3 第三代: 梯度、超点阵和纳米结构涂层	14
1.3.4 第四代: 智能涂层(自适应或变色龙涂层)	15
1.3.5 织构化与固体润滑复合涂层	16
1.4 本书内容简介	16
参考文献	17
第 2 章 新型固体润滑涂层设计	19
2.1 固体润滑涂层的设计基础	19
2.1.1 润滑涂层的低摩擦设计	19
2.1.2 润滑涂层的耐磨损设计	21
2.1.3 润滑涂层的强韧化设计	21
2.1.4 润滑涂层的环境适应性设计	22
2.2 耐磨润滑复合涂层	23
2.2.1 涂层中的润滑组元	23
2.2.2 硬质涂层基体组元	24

2.2.3	含有润滑组元的硬涂层	25
2.2.4	掺杂其他元素的润滑涂层	25
2.3	韧性纳米复合润滑涂层	25
2.3.1	韧性纳米晶/非晶复合涂层	26
2.3.2	控制晶粒尺寸和织构的纳米晶涂层	27
2.3.3	多层纳米复合涂层	28
2.3.4	梯度功能涂层	29
2.4	空间交变环境条件下的润滑涂层	29
2.4.1	空间干/湿交变环境的润滑涂层	29
2.4.2	空间大气/真空交变环境润滑涂层	30
2.4.3	空间高低温交变环境润滑涂层	31
2.5	宽温度环境条件下的润滑涂层	32
2.5.1	高速切削刀具用高温润滑硬涂层	32
2.5.2	航空航天用高温润滑涂层	34
2.6	研究展望	35
	参考文献	35
第3章	硫化物润滑涂层	38
3.1	过渡金属硫族化合物涂层	38
3.1.1	过渡金属硫族化合物的晶体类型与晶体取向	38
3.1.2	过渡金属硫族化合物的润滑机制	40
3.1.3	影响摩擦学行为的材料因素	43
3.1.4	摩擦学行为的环境依赖性	44
3.1.5	过渡金属硫化物的改性	49
3.2	元素掺杂的过渡金属硫化物涂层	50
3.2.1	掺杂元素对过渡金属硫族化合物结构的影响	50
3.2.2	掺杂元素对过渡金属硫族化合物涂层性能的影响	53
3.2.3	金属掺杂过渡金属硫化物	54
3.2.4	非金属元素掺杂过渡金属硫化物涂层	66
3.2.5	化合物掺杂过渡金属硫族化合物	70
3.3	MoS ₂ 基复合涂层	73
3.3.1	多层纳米结构涂层	73
3.3.2	具有自组装结构的纳米复合涂层	75
3.4	研究展望	76
	参考文献	77

第 4 章 碳基材料润滑涂层	80
4.1 类金刚石碳涂层	80
4.1.1 DLC 涂层的结构	80
4.1.2 氢对类金刚石碳涂层润滑机制的影响	82
4.1.3 环境气氛对类金刚石碳涂层的影响	86
4.1.4 DLC 涂层在超高真空中的摩擦学行为	89
4.1.5 DLC 涂层在干燥惰性气氛中的摩擦学行为	91
4.1.6 DLC 涂层在 H_2 气氛中的摩擦学行为	93
4.1.7 DLC 涂层在高温条件下的摩擦学行为	94
4.1.8 DLC 涂层在极热原子氧暴露条件下的摩擦学行为	95
4.2 DLC 改性与复合涂层	96
4.2.1 元素掺杂 DLC 涂层	96
4.2.2 梯度功能 DLC 涂层	98
4.2.3 纳米晶碳化物/非晶 DLC 韧性涂层	99
4.2.4 $MoS_2/a-C:H$ 复合涂层	100
4.2.5 纳米复合涂层 (DLN)	100
4.2.6 DLC 涂层的应用	101
4.3 其他碳基润滑涂层	104
4.3.1 纳米金刚石涂层	104
4.3.2 类石墨碳涂层	106
4.3.3 碳化物衍生碳 (CDC)	106
4.3.4 石墨烯	108
4.4 研究展望	111
参考文献	112
第 5 章 自润滑复合渗镀层	116
5.1 含石墨或氟化石墨复合镀层	117
5.2 碳纳米管复合镀层	119
5.3 镍基含 MoS_2 复合镀层	121
5.4 镍基含 BN 复合镀层	127
5.4.1 复合镀层的结构	127
5.5 等离子渗 Mo 层	131
5.6 表面渗铬	132
5.6.1 渗 Cr 层的形貌组成	132
5.6.2 渗 Cr 层的高温摩擦学性能	133

5.7	等离子 MoN 共渗层	134
5.7.1	合金表面渗层的力学性能	135
5.7.2	复合渗层的摩擦性能	136
	参考文献	137
第 6 章	氟化物与软金属润滑涂层	139
6.1	PS 系列润滑涂层的设计与制备	139
6.1.1	PS 系列润滑涂层的材料选择	139
6.1.2	PS 系列润滑涂层的设计原则	141
6.1.3	PS 系列润滑涂层成分设计	142
6.1.4	涂层制备工艺	144
6.2	PS 系列润滑涂层的组分与性能	145
6.2.1	PS101 润滑涂层	145
6.2.2	PS200 系列润滑涂层	146
6.2.3	PS300 系列润滑涂层	150
6.2.4	PS400 系列润滑涂层	156
6.3	PS 涂层与其他涂层的复合	161
6.3.1	PS200 与银膜复合	161
6.3.2	Cr ₂ O ₃ 密封 PS212	161
6.3.3	PS212 与酯类油复合润滑	162
6.3.4	PS304 与聚酰亚胺复合	162
6.3.5	PS400 (PS304) 与 MoS ₂ 复合涂层	163
6.3.6	顶层箔片表面润滑涂层与轴涂层 PS304 协同作用	163
6.4	环境对润滑涂层性能的影响	166
6.4.1	气氛的影响	166
6.4.2	滑动速度的影响	167
6.4.3	温度的影响	167
6.4.4	配副材料的影响	168
6.4.5	表面粗糙度对气体箔片轴承承载能力的影响	169
6.5	含氟化物与软金属的固体润滑涂层应用	170
6.5.1	气体箔片轴承	170
6.5.2	发动机汽缸套	171
6.5.3	高速轴封	172
6.5.4	燃气涡轮发动机控制阀顶杆	173
6.6	研究展望	173

参考文献	174
第7章 环境适应性固体润滑涂层	176
7.1 环境适应性润滑涂层的设计	176
7.1.1 环境适应性润滑复合涂层设计与材料选择	176
7.1.2 含多种润滑剂的纳米复合涂层	177
7.2 第一代环境适应性润滑涂层	178
7.2.1 MoS_2 - PbO 润滑薄膜	178
7.2.2 ZnO-WS_2 薄膜	178
7.3 第二代环境适应性润滑涂层	179
7.3.1 自适应 YSZ/Au/DLC/MoS_2 纳米复合涂层	179
7.3.2 空间和大气环境的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{DLC/Au/MoS}_2$ 变色龙涂层	181
7.3.3 空间自适应 WC/DLC/WS_2 纳米复合涂层	183
7.3.4 $\text{MoS}_2\text{-Sb}_2\text{O}_3\text{-C}$ 自适应纳米复合涂层	186
7.4 第三代环境适应性润滑涂层	187
7.4.1 YSZ/Au 纳米复合涂层	188
7.4.2 YSZ-Ag-Mo 纳米复合涂层	188
7.4.3 具有 TiN 扩散阻碍层的适应性纳米复合涂层	191
7.4.4 含 MoS_2 纳米相的 YSZ-Ag-Mo 纳米复合涂层	195
7.4.5 复层结构 (YSZ-Ag-Mo)- TiN - (YSZ-Ag-Mo) 自适应纳米复合涂层	196
7.4.6 多层结构纳米复合涂层	198
7.4.7 氮化物基自适应涂层	202
7.5 研究展望	203
参考文献	204
第8章 表面织构与固体润滑复合涂层	207
8.1 表面织构化技术	207
8.1.1 激光表面织构化概述	207
8.1.2 激光与材料表面的相互作用	208
8.1.3 激光织构化形貌	211
8.1.4 表面织构化方法	212
8.2 涂层表面织构化	214
8.2.1 TiCN 涂层	215
8.2.2 TiAlCN 涂层	215
8.2.3 Ti-TiC-TiC/DLC 涂层	215
8.2.4 类金刚石 (DLC) 膜	216

8.2.5	镀铬涂层	217
8.2.6	VN 涂层	218
8.3	结构化表面涂层	219
8.3.1	结构化表面涂覆润滑剂	219
8.3.2	结构化表面溅射沉积膜	226
8.3.3	结构化表面镀层	230
8.3.4	结构化表面渗层	232
8.3.5	结构化表面 DLC 膜	236
8.4	纳米结构化表面润滑涂层	237
8.5	研究展望	239
	参考文献	239
第 9 章	固体润滑涂层性能评价方法	242
9.1	固体润滑涂层的基本性能测试	242
9.1.1	涂层厚度的测量	242
9.1.2	膜-基体复合材料硬度测试	243
9.1.3	热膨胀性能测试	243
9.1.4	涂层结合性能测试	244
9.1.5	热导率测试	245
9.2	评价涂层摩擦学性能的典型试验装置	247
9.2.1	高温往复球盘摩擦试验机	247
9.2.2	往复式高温摩擦磨损试验机	247
9.2.3	高温销-盘旋转摩擦试验机	249
9.2.4	真空 (UHV) 球-盘式摩擦试验机	249
9.2.5	气氛可控的球盘滑动摩擦试验机	250
9.2.6	湿度可控的球-盘式摩擦试验机	251
9.2.7	Falex 销-盘式摩擦试验机	251
9.2.8	超低摩擦涂层的测量	252
9.3	模拟实际工况摩擦测试装置	252
9.3.1	空气箔片轴承试验机	252
9.3.2	衬垫-盘结构的 MiTi 高速高温摩擦试验机	254
9.3.3	轴承力矩测试系统	255
9.3.4	模拟空间原子氧环境摩擦学测试装置	256
9.4	涂层摩擦磨损原位测试装置	257
9.4.1	带有扫描白光干涉仪的往复销-盘摩擦试验机	258

9.4.2 摩擦分光计	259
9.4.3 原位拉曼摩擦试验装置	259
9.4.4 环境 AFM	260
9.5 涂层以及磨损表面微观结构表征	260
9.5.1 电子探针微观分析	261
9.5.2 三维光学轮廓仪	261
9.5.3 扫描电子显微镜 (SEM)	262
9.5.4 透射电子显微镜 (TEM)	262
9.5.5 X 射线衍射 (XRD)	263
9.5.6 X 射线光电子能谱 (XPS)	263
9.6 研究展望	263
参考文献	264

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Application environment and field of special solid lubricating coatings	1
1.1.1 Space environment	1
1.1.2 Field of aviation industry and advanced energy equipment	3
1.1.3 Field of high-speed cutting tool and mould	5
1.1.4 Tribology field at low temperature	5
1.2 Typical lubricating coatings for extreme environment	5
1.2.1 Lubricating coatings for space environment	6
1.2.2 Lubricating composite coatings for aviation industry and advanced energy equipment	10
1.2.3 Lubricating coatings for high-speed cutting tool	11
1.3 Development and trend of lubricating coatings in extreme environment	12
1.3.1 First generation: mono-component coatings	13
1.3.2 Second generation: multilayered and multi-component coatings	14
1.3.3 Third generation: Gradient, superlattice and nano-structure coatings	14
1.3.4 Forth generation: Intelligent coatings (self-adaptive or chameleon coatings)	15
1.3.5 Textured/solid lubricating composite coatings	16
1.4 Introduction of the book	16
References	17
Chapter 2 Design of new solid lubricating coatings	19
2.1 Design basis of solid lubricating coatings	19
2.1.1 Design for low friction	19
2.1.2 Design for high wear resistance	21
2.1.3 Design for strengthening and toughening	21
2.1.4 Design for environmental adaptability	22
2.2 Wear resisting and lubricating composite coatings	23
2.2.1 Lubricating components in coatings	23

2.2.2	Matrix components of hard coatings	24
2.2.3	Hard coatings containing lubricating phases	25
2.2.4	Element-doping lubricating coatings	25
2.3	Nano composite lubricating coating with high toughness	25
2.3.1	Nanocrystalline/amorphous composite coatings	26
2.3.2	Nanocrystalline coatings containing controlled grain size and texture	27
2.3.3	Multilayer nanocrystalline composite coatings	28
2.3.4	Functional gradient coatings	29
2.4	Lubricating coatings for alternating space environment	29
2.4.1	Dry/wet alternating environment	29
2.4.2	Atmosphere/vacuum alternating environment	30
2.4.3	High/low temperature alternating environment	31
2.5	Wide temperature range environment	32
2.5.1	High temperature field in high-speed cutting tool	32
2.5.2	High temperature field in aerospace	34
2.6	Research prospect	35
	References	35
	Chapter 3 Sulfide lubricating coating	38
3.1	Transition metal chalcogenide coatings	38
3.1.1	Crystal type and orientation	38
3.1.2	Lubricating mechanism	40
3.1.3	Material factors affecting tribological behavior	43
3.1.4	Environment dependence of tribological behavior	44
3.1.5	Modification of transition metal chalcogenide	49
3.2	Doping transition metal chalcogenide coatings	50
3.2.1	Influence of doping element on structure	50
3.2.2	Influence of doping element on coating properties	53
3.2.3	Metal-doping transition metal chalcogenide	54
3.2.4	Non-metallic element-doping transition metal chalcogenide	66
3.2.5	Compound-doping transition metal chalcogenide	70
3.3	MoS ₂ -based composite coatings	73
3.3.1	Multilayer nano-structure coatings	73
3.3.2	Nano composite coatings containing self-assemble structure	75
3.4	Research prospect	76

References	77
Chapter 4 Carbon-based lubricating coatings	80
4.1 DLC coatings.....	80
4.1.1 Structure of DLC coatings.....	80
4.1.2 Influence of hydrogen on the lubricating mechanism	82
4.1.3 Influence of environmental atmosphere	86
4.1.4 Tribological behavior in ultrahigh vacuum	89
4.1.5 Tribological behavior in dry inert atmosphere	91
4.1.6 Tribological behavior in hydrogen atmosphere	93
4.1.7 Tribological behavior at high temperature	94
4.1.8 Tribological behavior in extremely hot atomic oxygen exposure conditions	95
4.2 Modification of DLC coatings	96
4.2.1 Doping DLC coatings.....	96
4.2.2 Functional gradient DLC coatings	98
4.2.3 Carbide nanocrystalline/amorphous DLC coatings.....	99
4.2.4 MoS ₂ /a-C:H composite coatings.....	100
4.2.5 Nano DLN coatings.....	100
4.2.6 Application of DLC coatings	101
4.3 Other carbon-based lubricating coatings.....	104
4.3.1 Nano diamond coatings	104
4.3.2 GLC coatings.....	106
4.3.3 Carbide -derived carbon (CDC)	106
4.3.4 Graphene.....	108
4.4 Research prospect	111
References	112
Chapter 5 Self-lubricating diffused and electroplated composite coatings	116
5.1 Graphite or carbon monofluoride-containing electroplating composite coatings.....	117
5.2 Carbon nanotube-containing electroplating composite coatings.....	119
5.3 MoS ₂ -containing nickel-plating coatings.....	121
5.4 BN-containing nickel-plating coatings	127
5.4.1 Structure of composite plating coatings	127
5.5 Plasma molybdenizing coatings	131
5.6 Chromizing coatings	132

5.6.1	Morphologies of chromizing coatings	132
5.6.2	Tribological properties of Chromizing coatings at high temperature	133
5.7	Plasma molybdenizing and nitriding duplex-treated coatings	134
5.7.1	Mechanical properties of composite diffused coatings	135
5.7.2	Tribological properties of composite diffused coatings	136
	References	137
	Chapter 6 Fluoride and soft metal lubricating coatings	139
6.1	Design and preparation of PS coatings	139
6.1.1	Material selection	139
6.1.2	Design principle	141
6.1.3	Composition design	142
6.1.4	Preparation process	144
6.2	Compositions and properties of PS lubricating coatings	145
6.2.1	PS101 lubricating coating	145
6.2.2	PS200 lubricating coating	146
6.2.3	PS300 lubricating coating	150
6.2.4	PS400 lubricating coating	156
6.3	Composite coating of PS coatings with other coatings	161
6.3.1	PS200/Ag film	161
6.3.2	Cr ₂ O ₃ -sealing PS212	161
6.3.3	PS212/ polyhydric alcohols composite lubricating coating	162
6.3.4	PS304/ polyimide lubricating coating	162
6.3.5	PS400 (PS304)/MoS ₂ composite coating	163
6.3.6	Synergy of foil surface lubricating coating and bearing surface PS304 coating	163
6.4	Influence of environment on properties of lubricating coatings	166
6.4.1	Influence of atmosphere	166
6.4.2	Influence of sliding speed	167
6.4.3	Influence of temperature	167
6.4.4	Influence of counterface	168
6.4.5	Influence of surface roughness on load capacity of gas foil bearing	169
6.5	Application of fluoride and soft metal lubricating coatings	170
6.5.1	Gas foil bearing	170
6.5.2	Engine cylinder liner	171

6.5.3	High-speed shaft seal	172
6.5.4	Control valve mandril of gas turbine engine	173
6.6	Research prospect	173
	References	174
Chapter 7 Environment adaptive solid lubricating coatings		176
7.1	Design of adaptive lubricating coatings	176
7.1.1	Design and material selection	176
7.1.2	Nano composite coating containing multiple solid lubricants	177
7.2	First generation of environment adaptive solid lubricating coating	178
7.2.1	MoS ₂ -PbO lubricating film	178
7.2.2	ZnO-WS ₂ film	178
7.3	Second generation of environment adaptive solid lubricating coatings	179
7.3.1	Self-adaptive YSZ/Au/DLC/MoS ₂ nano composite coating	179
7.3.2	Al ₂ O ₃ /DLC/Au/MoS ₂ chameleon coating	181
7.3.3	Space self-adaptive WC/DLC/WS ₂ nano composite coating	183
7.3.4	MoS ₂ -Sb ₂ O ₃ -C self-adaptive composite coating	186
7.4	Third generation of environment adaptive solid lubricating coatings	187
7.4.1	YSZ/Au nano composite coating	188
7.4.2	YSZ-Ag-Mo nano composite coating	188
7.4.3	Adaptive nano composite coating using TiN as diffusion barrier layer	191
7.4.4	YSZ-Ag-Mo nano composite coating containing MoS ₂ nano phase	195
7.4.5	(YSZ-Ag-Mo)-TiN -(YSZ-Ag-Mo)) multiple layers self-adaptive nano composite coating	196
7.4.6	Multiple layers nano composite coating	198
7.4.7	Nitride-based self-adaptive coating	202
7.5	Research prospect	203
	References	204
Chapter 8 Surface texture/solid lubricating composite coatings		207
8.1	Surface texturing technology	207
8.1.1	Overview	207
8.1.2	Interaction between laser and material surface	208
8.1.3	Morphologies of surface texture	211
8.1.4	Methods of surface texturing	212
8.2	Surface-textured coating	214

8.2.1	TiCN coating	215
8.2.2	TiAlCN coating	215
8.2.3	Ti-TiC-TiC/DLC coating	215
8.2.4	DLC film	216
8.2.5	Chromium-plated coating	217
8.2.6	VN coating	218
8.3	Coatings on textured surface	219
8.3.1	Smearing lubricants on textured surface	219
8.3.2	Sputtering film on textured surface	226
8.3.3	Plating coating on textured surface	230
8.3.4	Diffusion coating on textured surface	232
8.3.5	DLC film on textured surface	236
8.4	Nano surface texture/lubricating coating	237
8.5	Research prospect	239
	References	239
Chapter 9 Properties evaluation methods of solid lubricating coatings		242
9.1	Basic properties measurement	242
9.1.1	Coating thickness	242
9.1.2	Hardness	243
9.1.3	Thermal expansion properties	243
9.1.4	Adhesive properties	244
9.1.5	Thermal conductivity	245
9.2	Equipments for evaluating tribological behavior	247
9.2.1	High temperature reciprocating ball-on-disc friction test rig	247
9.2.2	High temperature reciprocating friction and wear test rig	247
9.2.3	High temperature rotating pin-on-disc test rig	249
9.2.4	UHV ball-on-disc friction test rig	249
9.2.5	Atmosphere controllable ball-on-disc friction test rig	250
9.2.6	Humidity controllable ball-on-disc friction test rig	251
9.2.7	Falex pin-on-disc friction test rig	251
9.2.8	Mearsurement of ultralow friction coefficient coatings	252
9.3	Friction test rigs simulating actual working conditions	252
9.3.1	Gas foil bearing test rig	252
9.3.2	MiTi high speed and high temperature liner-disc friction test rig	254

9.3.3	Bearing torque test system.....	255
9.3.4	Friction test rig simulating space atomic oxygen environment.....	256
9.4	Friction in-situ test rig.....	257
9.4.1	Reciprocating pin-on-disc friction test rig with scanning white light interferometer	258
9.4.2	Friction spectrometer.....	259
9.4.3	In-situ Raman friction test rig.....	259
9.4.4	Environmental AFM.....	260
9.5	Surface micro-structure characterization of coatings and wear surface.....	260
9.5.1	Electron probe micro-analysis.....	261
9.5.2	3D optical profilometer	261
9.5.3	Scanning electron microscope (SEM)	262
9.5.4	Transmission electron microscope (TEM)	262
9.5.5	X-ray diffraction (XRD)	263
9.5.6	X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)	263
9.6	Research prospect	263
	References	264