

专题——恭贺胡如南教授八十寿辰

十论现代表面工程

李金桂

(中航工业北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘 要: 表面加工技术可以追溯到古代, 后来形成油漆、电镀、热喷涂三个行业。20 世纪 60 年代, 电子束、离子束和激光束进入表面加工技术领域, 引发了表面技术翻天覆地的变化与进步, 逐步形成现代表面工程学。以最简要的方式论述了现代表面工程的确切定义、两大使用原则、三大技术、四大功能、表面工程学的形成。现代表面工程的确切定义为: 物体表面施加保护层的理论、技术、材料、工艺和标准称为表面工程。两大使用原则为表面与整体同时进行设计制造的原则、建立和维持表面保护层完整性原则。三大技术包括表面改性转化技术、薄膜技术和涂镀层技术。四大功能包括控制腐蚀、摩擦润滑匹配、表面功能转化和表面装饰。表面工程学包括坚实的理论基础、雄厚的技术内涵、表面保护层的设计、实施工程车间的设计与检测和不同领域广泛的应用研究。

关键词: 表面工程; 技术; 功能; 使用原则; 表面工程学

中图分类号: TG174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)06-0001-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.06.001

Ten on Modern Surface Engineering

LI Jin-gui

(AVIC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

ABSTRACT: Surface processing technology can be traced back to the ancient, and later formed three industries of paint, electroplating, and thermal spraying. In 1960s, the electron beam, ion beam and laser beam entered the surface processing technology field, which caused the change and progress of surface technology, and gradually formed the modern surface engineering. The paper discusses the exact definition of modern surface engineering, two principles of use, three major technologies, four major functions, and the formation of surface engineering. The theory, technology, materials, processes and standards for the application of the protective layer on the surface of an object are called surface engineering. Two principles are the principle of simultaneous design and manufacture of the surface and the overall, and the principle of establishment and maintenance of the integrity of surface protection. Three major technologies include surface modification and conversion technology, thin film technology and coating technology. Four features include control of corrosion, friction and lubrication, surface functional transformation and surface decoration. Surface engineering includes a solid theoretical foundation, strong technical content, the design of the surface protection layer, the implementation of the engineering workshop design and testing, and a wide range of applications in different fields.

KEY WORDS: surface engineering; technology; function; use principle; science of surface engineering

收稿日期: 2016-03-10; 修订日期: 2016-04-28

Received: 2016-03-10; Revised: 2016-04-28

作者简介: 李金桂 (1936—), 男, 教授, 主要研究方向为航空材料、腐蚀控制及表面工程。

Biography: LI Jin-gui (1936—), Male, Professor, Research focus: aerospace materials, corrosion control and surface engineering.

笔者几十年来长期从事“航空材料”、“腐蚀控制”和“表面工程”方面的研究工作,在“表面工程”领域发表了《现代表面工程设计手册》等六部专著^[1-6]和大量论文,其中以“表面工程”为主题的论文有九篇,如“表面工程学形成与发展”、“再论现代表面工程”等^[7-11]。本文作为延续,定名为“十论现代表面工程”,作为小结。

1 一条定义

2002 年一月出版的《国防科技名词大典》^[12]将“表面工程”定义为:将材料表面与基体一起作为一个系统进行设计,利用表面改性转化技术、薄膜技术和涂镀层技术,使材料表面获得材料本身没有而又希望具有的性能的系统工程。它是近代技术与经典表面工艺相结合、繁衍、发展起来的;它拥有坚实的科学理论基础,像表面界面理论、表面失效理论、腐蚀科学、摩擦科学等;它包括表面转化改性、薄膜、涂镀层材料与制备工艺、施涂与检测技术、表面组成与结构分析技术、表面性能测试技术、检验方法、标准、评价和质量保证、工艺过程控制等,为形成新型表面和表面层工程化生产的成套技术。它可有效地改善和提高材料和产品的性能(耐蚀、耐磨、装饰性能),确保产品使用可靠和安全,延长使用寿命,或赋予材料和器件特殊的物

理和化学性能,例如声光磁电的转换和存储性能,使电子器件多功能化和超小型化,有效地节约有限的资源和能源,减少环境污染,维护可持续发展。

2 两条原则^[2]

1) 表面与实体形成一个系统的原则。《表面工程学》明确提出,任何产品的设计、制造都离不开材料,也离不开表面和界面,主张:将材料表面与基体一起作为一个系统进行设计与制造,即在产品进行设计与制造的同时,进行其表面与界面的设计与制造。

2) 表面保护层完整性原则。表面保护层是提高材料及其制品的环境抗力,预防腐蚀最普遍、最有效、最受设计师青睐的保护技术。实践证明,只要材料及其制品表面保护层完整无损,其材料基体和制品就拥有环境抗力。所以,使用过程中需要不断保护、检查、修补、更新保护层。

3 三大技术^[2]

3.1 表面改性转化技术

运用现代技术改变材料表面、亚表面层的成分、结构和性能的处理技术称为表面转化技术,主要包括六大类,见表 1。

表 1 表面改性转化技术内涵

Tab.1 Connotation of surface modification technology

编号	类别	工艺技术	特点及用途
1	表面形变强化	喷丸强化 辊压强化 孔挤压强化	在金属表面、亚表面层形成压应力区
2	表面相变强化	感应加热表面淬火 激光表面淬火 电子束表面淬火 流态床表面硬化	在金属表面、亚表面层形成新的相变区,形成硬化层
3	离子注入	非金属离子注入 金属离子注入 复合离子注入 离子束混合	硼、氮、磷 铬、钼、银、铅、锡 钛+碳、铬+碳、铬+钼、铬+磷 钛+氮、钼+硅、钛+钡
4	表面扩散渗入	非金属元素表面扩散 金属元素表面扩散 复合元素表面扩散	渗碳、氮、硼、硅、碳氮共渗 渗锌、锡、铍、铝、铬、钨、钼、钒 渗铝铬、铝硅、铝钛、铜钢、铝铬硅、钨钼硼硅
5	化学转化	化学氧化 钝化 磷化 草酸盐处理 着色 钢件的发兰 磨光、滚光、抛光	在铝、镁、钢、铜表面上形成氧化膜 在钢铜锌镉铝镁钛上形成钝化膜 在钢铁上形成磷化膜 在钢铁上形成草酸盐膜 在钢、铜、不锈钢、钛、铬形成颜色 在钢件上形成黑色氧化膜 提高表面完整性和光洁度
6	电化学转化	耐蚀阳极氧化 粘结阳极氧化 瓷质阳极氧化 硬质阳极氧化 微弧等离子体阳极氧化 阳极氧化原位合成	在铝、镁、钛表面形成耐腐蚀氧化膜 在铝、镁表面形成易于粘结的氧化膜 在铝表面上形成瓷釉状氧化膜 在铝表面上形成高耐磨的硬氧化膜 在铝表面上形成超高硬度层或新型彩色装饰层 在铝表面上形成多种铝质功能材料膜

3.2 薄膜技术

运用近代表面沉积技术，在零件（或衬底）表面沉积出厚度为 100 nm~1 μm 或数微米薄膜的形

成技术，称为薄膜形成技术或薄膜技术。按用途，可以分为光学薄膜、微电子学薄膜、光电子学薄膜、集成光学薄膜、信息存储膜和防护功能薄膜等六大类，见表 2。

表 2 薄膜技术
Tab.2 Thin film technology

编号	类别	不同作用的薄膜	举例
1	光学薄膜	阳光控制膜	Al ₂ O ₃ 、SiO ₂ 、TiO ₂ 、Cr ₂ O ₃ 、Ta ₂ O ₅ 、NiAl、Au、Ag、Cu、Al、金刚石和类金刚石
		低辐射系数膜	
		防激光致盲膜	
		反射膜	
		增反膜	
		选择性反射膜	
2	微电子学薄膜	窗口薄膜	Si、GaAs、GeSi Sb ₂ O ₃ 、SiO、SiO ₂ 、TiO ₂ 、ZnO、AlN、Se、Ge、SiC、PbTiO ₃ In ₂ O ₃ 、SnO ₂ 、Al ₂ O ₃ 、Ta ₂ O ₅ 、Fe ₂ O ₃ TaN、Si ₃ N ₄ 、SiC、YBaCuO、BiSrCaCuO、Nb ₃ Sn、Nb ₃ Ge BaTiO ₃ 、金刚石和类金刚石 Al、Au、Ag、Cu、Pt、NiCr、W
		电极膜	
		电器元件膜	
		传感器膜	
		超导元件膜	
		微波声学器件膜	
		晶体管薄膜	
		集成电路基片膜	
3	光电子学薄膜	热沉或散射片膜	HF/DFCL、COIL、Na ⁺³ 、YAG、HgCdTe InSb、PtSi/Si、GeSi/Si PbO、PbTiO ₃ 、(Pb,La)TiO ₃ 、LiTaO ₃
		探测器膜	
		光敏电阻膜	
		光导摄像靶膜	
		光波导膜	
4	集成光学薄膜	光开关膜	Al ₂ O ₃ 、Nb ₂ O ₅ 、LiNbO ₃ 、Li、Ta ₂ O ₅ LiTaO ₃ 、Pb(Zr,Ti)O ₃ 、BaTiO ₃
		光调制膜	
		光偏转膜	
		激光器薄膜	
5	信息存储膜	磁记录膜（磁带、硬磁盘、软磁盘、磁卡、磁鼓等用）	r-Fe ₂ O ₃ 、Co-r-F ₂ O ₃ 、CrO ₂ 、FeCo、Co-Ni CD-ROM、VCD、DVD、CD-E、GdTbFe、CdCo、InSb Sr-TiO ₂ 、(Ba,Sr)TiO ₃ 、DZT、CONiP、CoCr
		光盘存储膜	
		铁电存储膜	
6	防护用薄膜	耐腐蚀膜	TiN、CrN、SiO ₂ 、MCrAlY、NbC、TaC、ZrO ₂ 、ZrO ₂ +Y ₂ O ₃ TiN、TaN、ZrN、TiC、TaC、SiC、BN TiCN、NiCrA、MCrAlY 系列、金刚石和类金刚石薄膜 Al、Zn、Cr、Ti、Ni、AlZn、NiCrAl CoCrAlY、NiCoCrAlY+HfTa Au、Ag、Cu、Al、Pt MoS ₂ 、石墨 TiC、TiCN、CrC
		耐冲刷膜	
		耐高温氧化膜	
		防潮防热膜	
		高强度高硬度膜	
		装饰膜	
		润滑和自润滑膜	
		成型加工（防磨损、防咬合、防开裂）	

3.3 涂镀层技术

表面涂覆一层或多层表面层的形成技术称为涂镀层技术，分为五大类，见表 3。

采用古典技术、近代技术或二者相结合在零件

表 3 涂镀层技术
Tab.3 Coating technology

编号	类别	不同用途及工艺	举例及说明
1	电化学沉积	防腐蚀镀层	Zn、Cd、CdO ₃ -Ti、Zn-Ni 等
		抗氧化镀层	Ni、Ni-SiC、Au、Pt 等
		耐磨镀层	硬 Cr、乳白 Cr、Ni-P 等
		减磨防粘导电层	Ag、Au、Pt、Pd、CuNiIn 等
		装饰镀层	Au、Cu、Cu/Ni/Cr 等
		电刷镀、激光电镀、脉冲电镀、化学镀等	
2	有机涂层	通用防腐蚀涂层	酚醛、聚氯乙烯、环氧树脂、聚氨脂、防腐蚀涂层等
		专用防腐蚀涂层	化工防腐蚀、耐酸、耐油、耐氨水及重防腐蚀涂层
		工业专用涂层	飞机、舰船、汽车、火车、大桥等专用涂层
		特种功能涂层	电磁功能：绝缘涂层、导电涂层、磁性涂层
			电磁波功能：发光涂层、吸波涂层、迷彩涂层等
			热功能：防火涂层、耐热涂层、隔热涂层、高温涂层
3	无机涂层	抗高温氧化涂层	W ₂ 、T ₁ 、B-1000 高温珐琅涂层
		热障涂层	MCrAlY-ZrO ₂ /Y ₂ O ₃ 、MCrAlY-Al ₂ O ₃ -ZrO ₂ /Y ₂ O ₃
		耐磨涂层	WC/Co、CoCrW/NiAl、Cr ₂ O ₃ -NiCr、TiC-NiCrBSi
		封严涂层	聚苯酯/铝硅、ZrO ₂ /Y ₂ O ₃
		耐腐蚀涂层	BN 火焰喷涂层、Hf-Mo-Si 化物、Zn、Al、Al-Zn
		尺寸恢复涂层	碳钢、不锈钢、铝青铜、NiCrBSi-NiAl
4	热浸镀层	热浸镀金属	Zn、Al、Pb、Sn
		热浸镀二元合金	ZnAl、SnPb
		热浸镀三元合金	ZnAlRe、ZnCuAl
5	防锈膜	防锈水剂	以水为基加入适量缓蚀剂形成的防锈水剂
		防锈切削液	兼有防锈、润滑作用的乳化油（液）
		防锈油脂	由基础油脂、缓蚀剂、助剂和成膜剂组成的油性缓蚀剂
		气相防锈材料	在常温下能升华并具有防锈效果的化学物质
		可剥性塑料	在制品表面涂敷形成的塑料膜具有防锈和防表面损伤的功能

4 四大功能^[2]

材料的表面技术，即表面改性、薄膜沉积或涂镀层施加，功能和作用十分广泛，例如：提高材料或零件的耐蚀性、抗高温氧化性；提高其对周围环境和运行环境抗害的抗力；提高耐热、导热、隔热、吸热、热反射的性能；赋予材料特定的物理

特性，如导电、绝缘、半导体特性、超导、电磁屏蔽、发光、消光、光反射、光选择吸收、雷达波隐身、红外隐身、亲油、亲水、亲某种涂层、可焊、粘着、传感等；赋予材料声、光、磁、电转换的特种功能等；赋予材料特定的化学特性，如耐酸、耐碱、耐特种液体、催化等；赋予制件表面装饰特性，如鲜艳的色彩、图文，非金属制件表面金属化、光化、抗老化等；提高材料制件表面完整性，降低粗

糙度，降低表面缺陷，提高表面光亮度，提高抗应力腐蚀、抗疲劳、抗腐蚀疲劳的能力。表面工程技术的四大功能可见表 4。

表 4 表面工程技术的功能和作用		
Tab.4 The function and effect of surface engineering technology		
编号	功能	作用
1	提高耐腐蚀能力	抗均匀腐蚀
		防晶间腐蚀与剥蚀
		防电偶腐蚀
		抗点腐蚀、耐磨蚀
		抗高温氧化与热腐蚀
		延缓腐蚀疲劳
		抗应力腐蚀和氢脆
2	提高耐磨与减磨能力	抗摩擦磨损
		减磨、润滑
		提高摩擦性能
		抗冲刷
		防粘结，防咬合
3	赋予表面特种功能	声、光、磁、电的转换
		导电、绝缘、超导
		存储记忆
		发光、消光、光反射、光选择吸收
		红外波、雷达波吸收与反射传感
	赋予表面其他物理特性	亲油、亲水
		可焊、粘着
		疏某种介质
		耐热、导热、隔热、吸热、热反射
	赋予表面其他化学特性	耐水、耐酸、耐碱、耐盐
		耐特种介质
		催化
4	提高表面完整性	抗损伤
		提高光洁度
		提高清洁度
		提高致密度
	赋予制件表面装饰特性	美化装饰
		美丽的图案、鲜艳的色彩
		非金属表面的金属化、抗老化
		金属的陶瓷化

5 表面工程学^[2,7—8]

现代表面工程技术是提高材料及其制品使用可靠性、安全性、经济性和耐久性，尽可能延长其使用寿命的最普遍、最实用、最经济、最受青睐的

成套技术，又拥有坚实的理论基础及大批的科研生产技术队伍，顺理成章地迅速形成一门新的学科是历史的必然。其涵盖的内容见表 5。

表 5 现代表面工程学所涵盖内容	
Tab.5 Content of modern surface engineering	
类别	涵盖的内容
表面工程基础理论	腐蚀与防护理论
	表面摩擦与磨损理论
	表面完整性与界面理论
	表面物理化学、表面化学物理
	表面工程技术手册、现代表面工程设计手册
	表面装饰与美学、现代表面工程技术和应用
	表面功能与复合膜层的设计原理
表面工程技术	表面功能材料及其制备工艺
	表面失效理论及其分析理论
	表面转化技术：表面形变强化、表面热流强化、表面合金化、化学转化、电化学转化、离子注入
	薄膜技术：光学薄膜、电子学薄膜、光电子学薄膜、集成光学薄膜、金刚石薄膜、防护用薄膜
	涂层技术：电化学沉积技术、有机涂层技术、无机涂层技术、热浸镀技术、防锈技术
	表面膜层成分结构设计
	表面复合功能膜层设计
表面工程技术设计	表面（膜）层选择与应用设计
	表面工程施工设计
	表面工程设备设计
	表面工程车间设计
表面工程应用	表面膜层功能特性手册
	表面（膜）层材料及加工技术
	表面分析与检测技术、试验方法、标准
	表面质量与工艺过程控制
	表面工程管理与经济分析

6 结语

防止材料腐蚀的研究可以追溯到古代，三千多年前中国的大漆、二千多年前秦始皇墓中的青铜剑表面改性就是极好的例证。后来发展了三个行业，即电镀、油漆和热喷涂。20 世纪 60 年代，三束（电子束、离子束和激光束）进入表面加工技术领域，引发了表面加工技术翻天覆地的变化与突飞猛进

的发展。1983 年英国成立表面工程学院, 1986 年欧洲热处理学会更名为欧洲热处理与表面工程学会, 并出版了国际性表面工程杂志, 有关表面改性、薄膜、涂层以及表面工程综合性技术的会议频频召开。近 50 年来, 表面工程技术成为世界各国优先公关的关键技术, 20 世纪 90 年代, 世界上出现了《表面工程学》。

我国近几十年来表面工程也有了长足发展, 笔者为此发表专著和论文进行推广。本文作为小结, 论及了近代表面工程的一条定义、两大原则、三大技术、四大功能以及表面工程学的内涵, 以感谢老师和各位同行的教育与帮助。

参考文献

- [1] 李金桂. 表面工程技术和缓蚀剂[M]. 北京: 中国石化出版社, 2007.
LI Jin-gui. Surface Engineering Technology and Corrosion Inhibitor[M]. Beijing: China Petrochemical Press Co Ltd, 2007.
- [2] 李金桂. 现代表面工程设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
LI Jin-gui. Modern Surface Engineering Design Manual[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000.
- [3] 李金桂. 表面保护层设计与加工指南[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
LI Jin-gui. Guide for the Design and Manufacture of Surface Protective Layers [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.
- [4] 李金桂. 现代表面工程技术与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
LI Jin-gui. Modern Surface Engineering Technology and Application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
- [5] 李金桂. 防腐蚀表面工程技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
LI Jin-gui. Corrosion Protection Surface Engineering Technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [6] 李金桂. 清洗剂、除锈剂与防锈剂[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
LI Jin-gui. Cleaning Agent, Rust Remover and Anti Rust Agent[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [7] 李金桂. 表面工程学的研究[J]. 表面技术, 1996(5): 1—5.
LI Jin-gui. Study of Surface Engineering[J]. Surface Technology, 1996(5): 1—5.
- [8] 李金桂. 表面工程学及其发展[J]. 材料保护, 1996, 29(6): 13—15.
LI Jin-gui. Surface Engineering and Its Development[J]. Materials Protection, 1996, 29(6): 13—15.
- [9] 李金桂. 再论现代表面工程[J]. 中国表面工程, 1998(3): 1—7.
LI Jin-gui. On Modern Surface Engineering[J]. China Surface Engineering, 1998(3): 1—7.
- [10] 李金桂. 现代表面工程的新进展[J]. 航空工程与维修, 1999(2): 13—15.
LI Jin-gui. Development of Modern Surface Engineering[J]. Aviation Engineering and Maintenance, 1999(2): 13—15.
- [11] 李金桂. 现代表面工程应用问题的探讨[J]. 中国表面工程, 1999(4): 8—10.
LI Jin-gui. Discussion on the Application of Modern Surface Engineering[J]. China Surface Engineering, 1999(4): 8—10.
- [12] 李金桂. 国防科技名词大典(表面工程部分)[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.
LI Jin-gui. The National Defense Science and Technology NOUN Ceremony (Surface Engineering Section) [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002.