

装备修复用铜合金涂层制备方法及应用研究

刘基凯, 苏新勇

(青岛前进船厂, 山东 青岛 266001)

摘要: **目的** 为解决某型舰水泵叶轮轮毂等装备关键部件修复的难点问题, 对电弧喷涂制备的铜合金涂层进行了重点研究。**方法** 通过光学显微镜、扫描电子显微镜、显微硬度计、拉伸试验机、磨损试验机等对所制备的涂层的显微形貌、显微硬度、结合强度、抗冲蚀性能等进行了评定。**结果** 采用电弧喷涂技术制备的铜合金涂层组织致密, 涂层与基体之间的结合强度平均值为 18.58 MPa, 显微硬度平均值为 187.5HV_{0.3}, 高于基体硬度, 孔隙率平均值为 4.1%, 冲蚀角为 30° 和 90° 时, 铜合金涂层的磨损质量分别为 0.024 g 和 0.020 g, 显示出优异的耐磨抗冲蚀性能。**结论** 采用电弧喷涂技术在水泵叶轮轮毂表面制备了铜合金涂层, 不仅恢复了原设计尺寸, 而且大幅提升了水泵叶轮表面的耐磨抗冲蚀性能, 同时基体不产生变形, 不需要进行动平衡试验, 节能节材, 预计使用寿命可提高 3 倍以上。该技术可为大、新型装备其他关键铜质部件维修保障提供新思路和新方法。

关键词: 铜合金涂层; 电弧喷涂; 耐磨抗冲蚀性能; 装备维修; 延寿保障; 典型应用

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)09-0134-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.09.021

Preparing Technology and Application of Cupreous Coatings in Equipment Repairing

LIU Ji-kai, SU Xin-yong

(Qingdao Qianjin Shipyard, Qingdao 266001, China)

ABSTRACT: **Objective** To solve the key difficulty in repairing a certain type of ship pump impeller hub and other key parts, key research is carried out on cupreous coating prepared by electric arc spraying. **Methods** The microstructure, microhardness, bonding strength and erosion resistance of the coating were assessed by optical microscope, SEM, microhardness tester, tensile testing machine and abrasion tester. **Results** The cupreous coatings were uniform in composition. The bonding strength between coating and substrate was 18.58 MPa; the microhardness was 187.5HV_{0.3} (higher than the substrate); and the average porosity was 4.1%. When the erosion angle was 30° and 90°, the wear mass was 0.024 g and 0.020 g respectively (the coating has excellent wear resistance). **Conclusion** Cupreous coating is prepared on water pump impellers by electric arc spraying technology, which not only recovers the primary dimension, but also improves the wear resistance. Meanwhile the substrate does not deform. No balance test is required. Energy and materials are both saved. It is estimated that the life span will extend for 3 times. This technology provides a new concept and method for repairing key copper parts of large and new equipment.

KEY WORDS: cupreous coating; electric arc spraying; wear-resisting and erosion resistance; equipment repairing; extended life-span guarantee; typical application

收稿日期: 2016-02-17; 修订日期: 2016-03-31

Received: 2016-02-17; Revised: 2016-03-31

作者简介: 刘基凯 (1981—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事表面工程、绿色维修与装备再制造技术开发及推广应用工作。

Biography: LIU Ji-kai(1981—), Male, Master, Engineer, Research focus: technology development, popularization and application on surface engineering, green maintenance and equipment remanufacture.

舰艇装备服役于海洋氛围，运行工况十分苛刻。为提高装备部件的适应性、可靠性和使用寿命，在舰艇建造时，设计人员不得不大量采用铜质材料部件。尽管铜质材料耐蚀性好，有较高的强度、优良的塑性和冷热加工成形性，但其性能具有局限性，易遭受磨损、划伤、空泡腐蚀等。例如某型舰多个型号、不同用途的水泵叶轮轮毂密封运动部位产生磨损和腐蚀，影响正常使用。铜质材料部件价值昂贵，研究采用新型表面工程技术手段修复和强化表面损伤的装备铜质材料部件，可避免报废，具有重大意义。

目前，高速电弧喷涂、等离子喷涂、冷喷涂、电阻热能焊补、激光熔覆等高新表面工程技术手段，均能制备出装备修复用的铜合金功能涂层^[1-6]，其中高速电弧喷涂技术效率最高，使用范围最广，是目前制备铜合金涂层最佳方法之一^[7-14]。高速电弧喷涂可以在不提高工件温度、不使用贵重基底材料的情况下制备出结合强度高（一般情况下是火焰喷涂层的 2.5 倍）的耐磨抗腐蚀涂层，迅速使损伤装备零部件恢复或超过原技术性能和价值，同时喷涂效率比普通火焰喷涂提高 2~6 倍，能源利用率达 57%（火焰喷涂能源利用率仅为 13%），能源费用仅为火焰喷涂的 1/10^[15]。

文中利用高速电弧喷涂工艺方法制备了铜合

金涂层，探讨了该涂层用于某型舰凝水增压泵叶轮等关键部件修复的可能性。通过光学显微镜、扫描电子显微镜、显微硬度计、拉伸试验机和冲蚀试验机对所制备的涂层进行了评定。

1 试验

1.1 设备及涂层制备

采用上海康阜实业有限公司生产的 KF-500I 型等电弧喷涂设备，主要由电弧喷涂枪、控制箱、电源、送丝装置及压缩空气系统等组成。试样基体材料选用 QA19-4 铜合金，喷涂材料为由北京廊桥表面技术发展有限公司生产的牌号为 Cu9Al4Ni4Fe 的 LX41 铝青铜丝（化学成分如表 1 所示）。制备 100 mm×70 mm×8 mm 试样，经打磨除锈、丙酮去油后，对试样边角处进行修整，去除锐角。之后采用钢砂对表面进行喷砂处理，彻底去除表面附着异物，露出新鲜基体，喷砂压力 0.5~0.7 MPa，喷砂后在 2~3 h 内喷涂。表面预处理完成后，采用电弧喷涂技术在试样表面制备铜合金涂层，工艺参数（喷涂电压、电流及喷涂距离）如表 2 所示，喷涂结束后缓慢冷却至室温。

表 1 LX41 铝青铜丝化学成分
Tab.1 The chemical component of LX41

元素	Al	Fe	Mn	Ni	Pb	Si	Sn	Zn	Cu
质量分数/%	8~11	2.5~4.5	≤3.0	2.5~5.0	≤0.1	≤0.1	≤0.2	≤0.5	余量

表 2 电弧喷涂制备铜合金涂层工艺参数
Tab.2 The parameters of electrical arc spraying cupreous coating

Parameters	U/V	I/A	L/mm
Coating	35±1	200±1	150~200

1.2 方法

对试样切割、镶嵌后依次在 400[#]、600[#]、800[#]、1000[#]的不同规格的耐水砂纸上进行磨制，再在型号为 W14 的金相砂纸上磨制，之后进行机械抛光。采用 LEICA（莱卡）-DMI-5000M 型倒置金相显微镜、Philips XL-30 型环境扫描电子显微镜、PV9830/10/NewXL-30.132-2.5 型能谱仪进行显微组织分析。在 HXD-1000TM 数字式显微硬度计测

硬度，测量时所加载荷为 0.3 N，加载时间为 20 s。根据 GB/T 8642—2002 制作 ϕ 25 mm×50 mm 试样，分别采用电弧喷涂和氧乙炔火焰喷涂制备涂层，涂层厚度约 0.5 mm，采用 E-7 胶粘接试件，在温度为(20±5)℃、环境湿度不大于 75%的环境条件下，按照质量比 A（环氧树脂）：B（固化剂）=10：1.5 配制 E-7 胶，均匀涂覆在试样表面并加压固定（10~50 kPa），清除余胶并在(100±2)℃下固化 3 h，采用 DWD-20 型微机控制电子万能拉伸试验机测试结合强度。冲蚀磨损试验在 GW/CS-MS 冲蚀试验机上进行。试验条件：大气环境，磨料为白刚玉砂，压缩空气压力为 0.15 MPa，冲蚀角度为 30°和 90°。采用精度为 0.1 mg 的 BS210S 型分析天平测量试样的冲蚀磨损失重。

2 结果及分析

2.1 显微组织分析

图 1 和图 2 分别为电弧喷涂铜合金涂层的金相显微组织照片和扫描电镜照片。可知,涂层与基体之间结构完整,无任何缺陷,涂层内部熔化效果良好,没有大的孔洞和裂纹等明显缺陷,涂层内的层状边界聚集着少量孔隙,涂层表面有一定程度的形貌起伏,并存在孔隙。

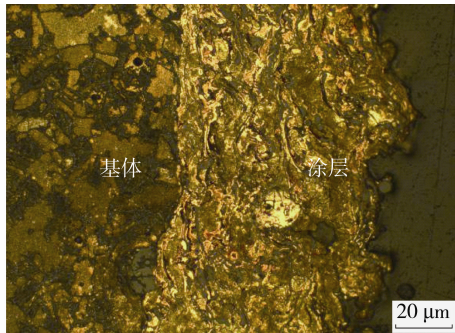
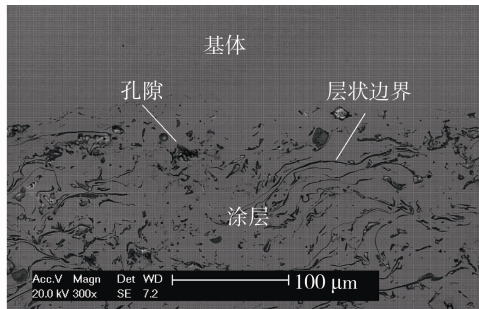
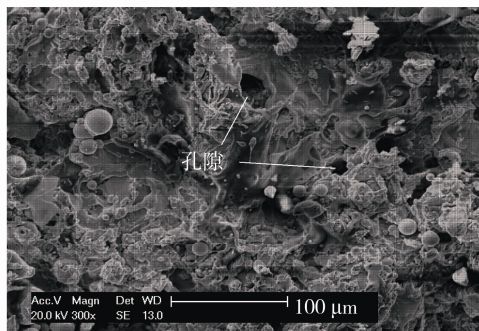


图 1 电弧喷涂铜合金涂层的金相显微组织照片
Fig.1 The metallography photoes of the electrical arc spraying coating



a 截面

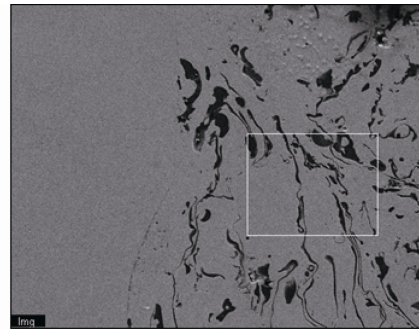


b 表面

图 2 电弧喷涂铜合金涂层的扫描电镜照片
Fig.2 The SEM photoes of the electrical arc spraying coating:
a) cross section, b) surface

图 3 为电弧喷涂铜合金涂层的能谱分析结果。由成分分析可以看出,涂层的主要组成元素是 Cu、

Al、Ni、Mn,这与喷涂合金粉末的组成一致,与此同时,还发现涂层中存在少量的氧元素,这说明喷涂过程中可能有少量的氧化物生成。



Element	Wt%	At%
O K	03.03	09.78
AlK	10.31	19.73
MnK	00.33	00.31
NiK	00.53	00.47
CuK	85.80	69.71

图 3 电弧喷涂铜合金涂层的能谱分析
Fig.3 The EDS analysis of the electrical arc spraying coating

2.2 结合强度测试

表 3 为电弧喷涂铜合金涂层的结合强度测试结果。电弧喷涂制备的铜合金涂层断裂位置均在涂层与基体之间,说明测量数值反映了涂层与基体之间的结合强度的实际值。由表 3 可知,涂层与基体之间的结合强度的平均值为 18.58 MPa,约为普通火焰喷涂层结合强度的 2.5 倍,这是因为电弧喷涂铜合金时,涂层具有自结合性能,使结合强度大幅提高。

表 3 高速电弧喷涂铜合金涂层结合强度测试结果
Tab.3 The bonding strength of the electrical arc spraying coating

No.	Measure value/MPa			Average/MPa
Arc spraying coating	16.08	18.02	21.63	18.58
Flame spraying coating	7.68	7.58	7.23	7.50

2.3 显微硬度测试

基体和铜合金涂层显微硬度测试结果如表 4 所示。由表 4 可以看出,铜合金涂层硬度高于基体硬度。材料的耐磨性与硬度虽没有直接的对应关系,但硬度在一定程度上却表征涂层的耐磨性,因此,涂层的高硬度对耐磨性有利。

表 4 显微硬度测试结果 (HV_{0.3})
Tab.4 The results of microhardness (HV_{0.3})

Sample	Measure value	Average
QA19-4	145.3、170.7、179.8、 156.9、167.5	164.0
Arc spraying coating	190.4、197.4、176.2、 198.3、175.4	187.5

2.4 耐磨抗蚀性能测试

基体、铜合金涂层的磨损质量测试结果如表 5 所示。由表 5 可知，冲蚀攻角为 30°和 90°时，基体的损失质量略大于铜合金涂层的损失质量。磨损后的微观形貌如图 4 和图 5 所示。由图 4 和图 5 可以看出，铜合金涂层表面的形貌起伏较小，铸造铝青铜基体表面出现明显的孔洞和粒子剥离。磨损试验结果表明，铜合金涂层的耐磨性能优于铸造铝青铜基体。这是因为铝青铜涂层内部为典型的层状结构，内部形成的氧化铝则是很好的硬质相，冲蚀磨损时，硬质相抵挡了磨粒的切削作用，因此铜合金涂层耐磨抗蚀性能较高。

表 5 基体和涂层的磨损质量
Tab.5 The loss weight of substrate and coating g

Sample	Loss weight of 30°	Loss weight of 90°
QA19-4	0.054	0.193
Arc spraying coating	0.024	0.020

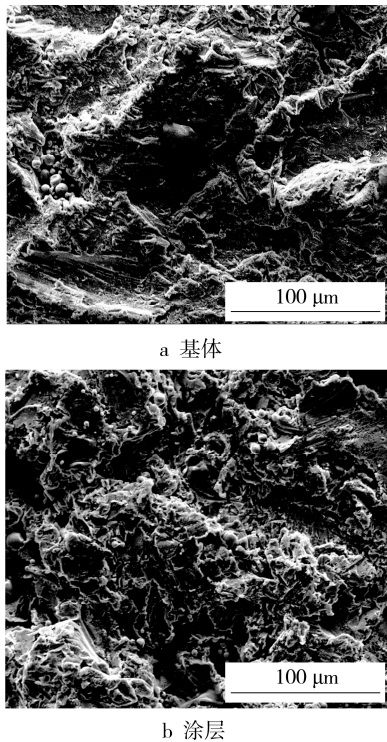


图 4 30°攻角基体和涂层冲蚀磨损后的 SEM 照片
Fig.4 The SEM photoes of substrate and coating under 30°: a) substrate, b) coating

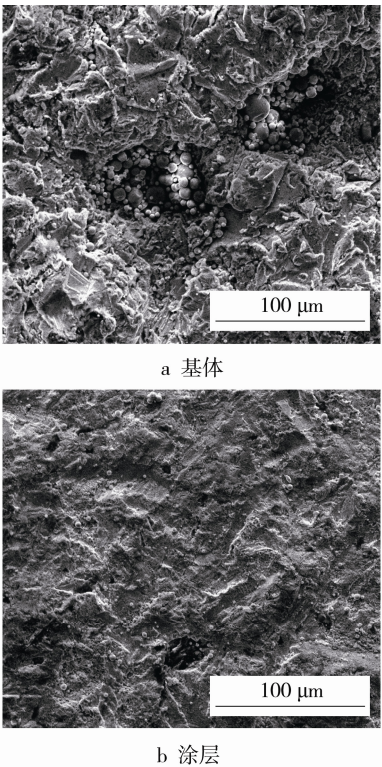


图 5 90°攻角基体和涂层冲蚀磨损后的 SEM 照片
Fig.5 The SEM photoes of substrate and coating under 90°: a) substrate, b) coating

2.5 涂层孔隙率

采用灰度法测定涂层横截面的孔隙率，试样测试前按金相制样标准进行研磨和抛光，涂层的平均孔隙率值取 5 次测量数据的平均值。经测量，铜合金涂层孔隙率为 4.1%，较低的孔隙率对提高涂层硬度有利，能够有效提高和改善涂层质量。

3 典型应用

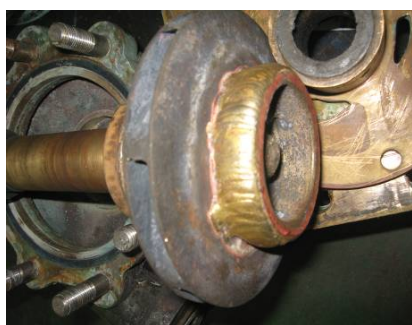
某型舰多个型号、不同用途的水泵叶轮轮毂密封运动部位产生磨损和腐蚀，影响正常使用。叶轮轮毂与密封环之间存在一定的间隙（CB/T 3706—1995），在叶轮转动过程中会受到海水侵蚀而产生腐蚀，同时由于振动等原因会造成叶轮轮毂与密封环之间间隙变小而产生摩擦，两方面共同作用是造成叶轮失效的主要原因。

叶轮轮毂的材料为 ZCuZn16Si4，其主要成分（以质量分数计）为：Cu 79%~81%，Si 2.5%~4.5%，其余为 Zn。该材料具有较高的力学性能和良好的耐蚀性，铸造性能好，流动性高，铸件组织致密，气密性好，适用于接触海水工作的管配件以及水泵、叶

轮、旋塞和在空气、淡水、油、燃料以及工作压力在 4.5 MPa 和 250 ℃ 以下蒸汽中工作的铸件。

传统的维修方法是, 采用氧-乙炔手工堆焊方法进行修复, 但该工艺方法有明显的局限性, 效率低, 耗材多, 对环境影响大, 特别是堆焊过程中, 由于热能量输入高, 会产生很大的应力集中, 使叶轮平衡破坏, 后续运行稳定性变差, 使用寿命下降, 甚至造成报废。图 6 为水泵叶轮堆焊修复过程照片, 可以看出, 水泵叶轮轮毂表面堆焊了大量的铜

合金, 由于热输入能量大, 容易造成叶轮变形(图 6b), 而且焊补过程中容易产生气孔(图 6c), 反复进行多次焊补和车削后也难以满足表面精度要求, 因此破坏叶轮原有动平衡性能, 甚至造成叶轮报废的情况时有发生。经研究论证, 采用电弧喷涂技术对该型舰上的凝水增压泵、消防泵叶轮轮毂密封面进行修复, 共修复大小叶轮 100 余件, 实舰应用至今, 均取得了满意效果。图 7 为电弧喷涂修复某型舰凝水增压泵铜合金叶轮现场照片。



a 堆焊后



b 发生变形



c 机械加工后

图 6 水泵叶轮堆焊修复过程照片

Fig 6 The photoes of welding of water pump impeller: a) after welding, b) deformation, c) after machining



a 喷涂后



b 机械加工后

图 7 电弧喷涂技术修复某型舰凝水增压泵叶轮照片

Fig.7 The photoes of electrical arc spraying water pump impeller: a) after spraying, b) after machining

4 结论

1) 采用电弧喷涂技术制备的铜合金涂层, 组织致密, 硬度和结合强度高, 显示出优异的抗冲蚀性能。

2) 通过对某型舰凝水增压泵叶轮轮毂部位制备铜合金涂层进行改性修复, 解决了铜合金贵重装备部件损伤修复和延长使用寿命的重点、难点问题, 不仅恢复了原设计尺寸, 而且大幅提升了叶轮表面的耐磨抗腐蚀性能, 同时基体不产生变形, 不需要进行动平衡试验, 节能节材, 预计使用寿命可提高 3 倍以上。

3) 该技术可为大、新型舰艇装备关键铜质部件绿色维修与再制造提供了新思路、新经验和新方法。

参考文献

- [1] 任红卫. 铜及铜合金的氩弧焊技术[J]. 黑龙江科技信息, 2007, 19: 2.
REN Hong-wei. Copper and Copper Alloy Arc Welding Technology[J]. Heilongjiang Technology Information, 2007, 19: 2.

- [2] 陈健, 刘雪飘, 梁欢. 铜及铜合金表面等离子喷涂的应用进展[J]. 金属热处理, 2010, 35(9): 98—103
CHEN Jian, LIU Xue-piao, LIANG Huan. Research Progress and Application of Plasma Spraying on Copper Alloy Surface[J]. Heat treatment of metal, 2010, 35(9): 98—103
- [3] 张改璐, 潘应君, 柯德庆. 铜合金表面热喷涂(焊)涂层组织及性能研究[J]. 材料保护, 2014, 47: 13—15
ZHANG Gai-lu, PAN Ying-jun, KE De-qing. Study on the Microstructure and Properties of Thermal Spraying (Welding) Coating on Copper Alloy[J]. Material Protection, 2014, 47: 13—15
- [4] 朱胜, 周超极, 王晓明, 等. 铜合金表面超音速微粒沉积镍基涂层的耐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2015, 44(3): 138—142.
ZHU Sheng, ZHOU Chao-ji, WANG Xiao-ming, et al. Study on Anti-Corrosion Property of Nickel-based Alloy Coatings on Copper Surface Formed by Supersonic Particle Deposition[J]. Surface Technology, 2015, 44(3): 138—142.
- [5] 张杰, 张政, 闫华, 等. 铜和铜合金表面激光熔覆最新研究及进展[J]. 材料导报, 2014, 28(11): 68—72.
ZHANG Jie, ZHANG Zheng, YAN Hua, et al. Research and Development of Laser Clad Coating on Copper [J]. Material Review, 2014, 28(11): 68—72.
- [6] 白金元, 徐滨士, 许一, 等. 自动化电弧喷涂技术的研究应用现状[J]. 中国表面工程, 2006(S1): 267—270.
BAI Jin-yuan, XU Bin-shi, XU Yi, et al. The Present Researching and Applying Situation of the Technology of Automatic Arc Spraying[J]. China Surface Engineering, 2006(S1): 267—270.
- [7] 徐滨士, 马世宁. 发展优质高效的表面新技术——电弧喷涂技术[J]. 材料保护, 1993(12): 6—8.
XU Bin-shi, MA Shi-ning. Development of New High Quality Surface Engineering Tehnologies-Electric Arc Spraying[J]. Material Protection, 1993(12): 6—8.
- [8] 刘广海. 电弧喷涂技术的发展现状及其在主要工业领域的应用[J]. 金属加工(热加工), 2008(18): 26—29.
LIU Guang-hai. The Development Status of Electric Arc Spraying Technology and Its Spplication in the Field of Major Industrial Material Metal Forming[J]. Material Metal Forming, 2008(18): 26—29.
- [9] 张亚梅, 李午申, 冯灵芝, 等. 电弧喷涂技术的现状与发展[J]. 焊接, 2003(10): 5—8.
ZHANG Ya-mei, LI Wu-shen, FENG Ling-zhi, et al. Present Situation and Development Trend of Arc Spraying [J]. Welding & Joining, 2003(10): 5—8.
- [10] 许思勇, 李晖云, 张永俐. 电弧喷涂技术的发展及应用[J]. 云南冶金, 2002(3): 138—157.
XU Si-yong, LI Hui-yun, ZHANG Yong-li. Development and Application of Arc Spraying Technology[J]. Yunnan Metallurgy, 2002(3): 138—157.
- [11] 杜贵平, 黄石生. 电弧喷涂设备的现状与展望[J]. 表面技术, 2001, 30(6): 22—33.
DU Gui-ping, HUANG Shi-sheng. Development Trend of Arc Spraying Equipment[J]. Surface Technology, 2001, 30(6): 22—33.
- [12] 杜小红. 电弧喷涂技术在中国的发展和应[J]. 表面技术, 2000, 29(5): 21—23.
DU Xiao-hong. The Development and Application of Arc Spraying Technology in China[J]. Surface Technology, 2000, 29(5): 21—23.
- [13] 张文华, 胡正前. 电弧喷涂技术及其应用[J]. 国外建材科技, 1996(4): 21—24.
ZHANG Wen-hua, HU Zheng-qian. The Electric Arc Spraying Technology and Its Application[J]. Science and Technologies of Overseas Building Materials, 1996(4): 21—24.
- [14] 温瑾林. 电弧喷涂技术的进步[J]. 中国表面工程, 1994(1): 16—21.
WEN Jin-lin. The Advancement of Electric Arc Spraying [J]. China Surface Engineering, 1994(1): 16—21.
- [15] 徐滨士. 表面工程与维修[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
XU Bin-shi. Surface Engineer and Maintenance[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1996.