

南京航空航天大学
论文集

(二〇〇五年) 第18册

机电学院

(第2分册)

南京航空航天大学科技部编

二〇〇六年三月

机电学院

052 系

序号	姓名	职 称 或学历	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期
1	王玮琳 田宗军 黄因慧 刘志东 何静波	硕士生 副教授 教 授 副教授 硕士生	052	激光重熔金属涂层的研究现状与发展	2005年中国机械工程学会年会	2005
2	何静波 黄因慧 田宗军 刘志东 王玮琳	硕士生 教 授 副教授 副教授 硕士生	052	激光重熔过程流场及温度场的数值模拟研究现状和发展	2005年中国机械工程学会年会	2005
3	刘朝晖 黄因慧 田宗军 刘志东 陈劲松	硕士生 教 授 副教授 副教授 博士生	052	纳米陶瓷材料复合电沉积工艺的研究及发展现状	2005年中国机械工程学会年会	2005
4	陈劲松 黄因慧 刘志东 田宗军	博士生 教 授 副教授 副教授	052	Jet electrodeposition oriented by rapid prototyping	Trans Nonferrous Met. Soc. China	2005. 13. 3
5	陈劲松 黄因慧 刘志东 田宗军	博士生 教 授 副教授 副教授		喷射电沉积快速成形的定域性试验研究	全国博士生论坛（机械工程）论文集	2005. 9
6	陈劲松 黄因慧 刘志东	博士生 教 授 副教授	052	电沉积复合镀层的研究动态与应用	电镀与环保	2005. 6
7	黄因慧 陈劲松 田宗军	教 授 博士生 副教授	052	喷射电铸快速成形基础试验研究	2005两岸三地快速成形与模具技术研讨会	2005
8	黄因慧 沈达理 田宗军	教 授 博士生 副教授	052	纳米Al ₂ O ₃ 粉末的激光烧结成形试验研究	2005两岸三地快速成形与模具技术研讨会	2005
9	刘志东	高 工	052	高速走丝电火花线切割工作液的性能要求及研究方向	航空精密制造技术	2005. 41. 3
10	张庆奎 陈 澜 赵良才 黄因慧	博士生 教 授	052	基于CPC的大型定制产品全寿命敏捷供应链信息模型研究	华东船舶工业学院学报	2005. 19. 2
11	史先传 朱 荻 徐惠宇	博士生 教 授 博士生	052	电解加工的间隙检测与控制	机械科学与技术	2005. 24. 5
12	明平美 朱 荻 曲宁松	博士生 教 授 副教授	052	电铸工艺对工具电极材料抗电蚀性能的影响	机械科学与技术	2005. 24. 5

13	明平美 胡洋洋	博士生 博士生	052	微细电火花加工MEMS器 件技术关键分析	微纳电子技术	2005. 4
14	张文峰 朱 荻	博士生 教 授	052	Ni-ZrO-2纳米复合电铸 层耐蚀性的研究	电镀与环保	2005. 25. 1
15	李冬林 朱 荻 曲宁松	硕士生 教 授 副教授	052	电火花成形加工工具电 极损耗的研究	机械制造与自动化	2005. 34. 4
16	韩 潇 朱 荻 李冬林	硕士生 教 授 博士生	052	电火花工具电极耐电蚀 性能的试验研究	电加工与模具	2005. 6
17	王明环 朱 荻 徐惠宇	博士生 教 授 博士生	052	提高微细电解加工精度 的研究	电加工与模具	2005. 3
18	雷卫宁 朱 荻	博士后 教 授	052	基于高性能沉积层的精 密电铸技术的研究进展	兵器材料科学与工程	2005. 6
19	薛玉君 朱 荻 靳广虎 赵 飞	博士后 教 授	052	电沉积Ni-La-20-3纳米 复合铸层的摩擦磨损性 能	摩擦学学报	2005. 25. 1
20	朱 荻 王明环 明平美 张朝阳	教 授 博士生 博士生 博士生	052	微细电化学加工技术	纳米技术与精密工 程	2005. 3. 2
21	张文峰 朱 荻	博士生 教 授	052	Ni-ZrO-2纳米复合电铸 层表面形貌、组织结构 及性能研究	中国机械工程	2005. 16. 13
22	朱增伟 朱 荻 曲宁松 雷卫宁	博士生 教 授 副教授 博士后	052	Pulse electroforming of nickel under perturbation of hard particles	Transaction of Nonferrous metals Society of China	2005. 15. S3
23	朱增伟 朱 荻 李冬林	博士生 教 授 硕士生	052	回转体薄壁零件电铸基 础研究	第11届全国特种加 工学术会议专辑	2005
24	王 蕾 朱 荻	博士生 教 授	052	航空发动机叶片的电解 加工阴极设计	2005年中国机械工 程学会年会论文集	2005
25	朱 荻 张朝阳	教 授 博士生	052	微细电化学加工技术的 研究和发展	2005年中国机械工 程学会年会论文集	2005
26	王 蕾 朱 荻	博士生 教 授	052	Shap evolution and viediction of 3D workpieces in electrochemical Machining	Transaction of Nonferrous metals Society of China	2005. 15. 3
27	王明环 朱 荻 张朝阳	博士生 教 授 博士生	052	利用电解法制备针尖的 研究	2005年中国机械工 程学会年会论文集	2005

28	明平美 朱 荻	博士生 教 授	052	铜-石墨复合电极材料耐 电蚀性试验研究	机械工程材料	2005. 29. 11
29	王明环 朱 荻 徐惠宇	博士生 教 授	052	电化学腐蚀法制备针尖 的试验研究	传感器技术	2005. 3
30	曲宁松 朱 荻 雷卫宁	副教授 教 授 博士后	052	纳米复合材料的微细电 铸技术研究	中国机械工程	2005. 16增 刊 (EI收 录)
31	雷卫宁 朱 荻	博士后 教 授	052	纳米Al2O3精密电铸过程 的影响与分析	2005年中国机械工 程学会年会论文集	2005
32	明平美 朱 荻	博士生 教 授	052	铜-石墨复合电极材料制 备及抗电蚀性能分析	中国机械工程	2005. 16. 11
33	徐惠宇 朱 荻 史先传	博士生 教 授 博士生	052	微细电解加工系统设计 及实验研究	航空精密制造技术	2005. 41. 4
34	徐惠宇 朱 荻 史先传	博士生 教 授 博士生	052	电化学微细加工监控系 统的研究	传感器技术	2005. 24. 7
35	史先传 朱 荻 徐惠宇	博士生 教 授 博士生	052	电解加工中最小间隙检 测方法	传感器技术	2005. 24. 5
36	张朝阳 朱 荻 王明环 曲宁松	博士生 教 授 博士生 副教授	052	超短脉冲电流微细电解 加工技术研究	中国机械工程	2005. 16. 14
37	朱增伟 朱 荻	博士生 教 授	052	硬质粒子抗扰动下铜电 沉积研究	电化学	2005. 11. 4
38	蒋军涛 朱 荻	硕士生 教 授	052	基于稀土LaCl-3的精密 电铸工艺研究	机械制造与自动化	2005. 34. 3
39	徐惠宇 朱 荻	博士生 教 授	052	窄缝精密电解加工的实 验研究	机械科学与技术	2005. 24. 1
40	安庆龙 傅玉灿 徐九华 王云峰 任守良 徐鸿钧	博士生 副教授 教 授 硕士生 硕士生 教 授	052	面向绿色制造的高效冷 却技术及其试验 (英 文)	南航学报 (英文 版)	2005. 22. 3
41	张义平 王少刚 徐九华	副教授 副教授 教 授	052	Interfacial reaction control during pulsed argon arc welding of SiCp/Al composites	中国有色金属学报 (英文版)	2005. 15. 3
42	马伯江 徐鸿钧 傅玉灿 肖 冰	博士生 教 授 副教授 副教授	052	高频感应钎焊金刚石界 面特征	焊接学报	2005. 26. 3

43	马伯江 徐鸿钧 傅玉灿 肖冰 徐九华	博士生 教授 副教授 副教授 教授	052	两种钎焊金刚石工具微 观结构的对比分析	机械工程材料	2005. 29. 7
44	苏宇 何宁	博士生 教授	052	基于ANFIS的铝合金铣削 加工表面粗糙度预测模 型研究	中国机械工程	2005. 16. 6
45	Asif I qbal 何宁 李亮	博士生 教授 副教授	052	A fuzzy expert system for optimization of high-speed milldy process	proceedings of the fifth international workshop on Robot motion and controe会议	2005
46	赵威 何宁 李亮	博士生 教授 副教授	052	航空薄壁件圆角的铣削 加工试验研究	工具技术	2005. 39. 3
47	谷安 倪高红	讲 师 工程师	052	低速走丝电火花线切割 机导丝嘴运动的处理方 法	电加工与模具	2005. 1
48	谷安 倪高红	讲 师 工程师	052	可重构电火花加工机床 的基础研究	电加工与模具	2005. 247
49	王旭亮 谷安 刘新华	硕士生 讲 师 硕士生	052	低速走丝电火花线切割 机ISO代码的后置处理	电加工与模具	2005. 2
50	王旭亮 谷安 刘乐全	硕士生 讲 师 硕士生	052	低速走丝电火花线切割 机导丝嘴位置算法的研 究	电加工与模具	2005. 4
51	王旭亮 谢清华 谷安	硕士生 硕士生 讲 师	052	数控线切割机床刀补功 能的研究与应用	机电工程技术	2005. 34. 9
52	王旭亮 谷安 滕伟辰	硕士生 讲 师 工程师	052	数控慢走丝线切割机床 锥度切割新探	精密制造与自动化	2005. 3
53	杨建阳 左敦稳 黎向锋 张勇康 王珉	硕士生 教授 副教授 教授 教授	052	激光冲击成形TA2钛合金 的变形与残余应力	南航学报	2005. 37 (增刊)
54	王宗荣 左敦稳 王珉	博士生 教授 教授	052	TC4钛合金高速铣削参数 的模糊正交优化	南京理工大学学报	2005. 29. 6
55	布光斌 程足发 左敦稳 王珉	博士生 硕士生 教授 教授	052	拉紧条件下铝合金铣削 残余应力的试验研究	南航学报	2005. 37 (增刊)

56	郭 魂 左敦稳 王树宏 王 焱 王 珉	博士生 教 授 工程师 工程师 教 授	052	拉伸装夹对航空框类零件加工变形影响的有限元分析	南航学报	2005. 37 (增刊)
57	李多生 左敦稳	博士生 教 授	052	Effect of residual-stress on microyield behavior of Al alloy reinforced by SiCp	Trans Nonferrous Met. Soc. China	2005. 15. 3
58	韩荣耀 韩贞荣 吴 松 黎向锋 左敦稳	硕士生 硕士生 硕士生 副教授 教 授	052	刨床空载时声音信号特征的研究	机械制造与研究	2005. 34. 6
59	宋胜利 徐 锋 左敦稳 王 珉	副教授 讲 师 教 授 教 授	052	大面积热丝化学气相沉积系统衬底温度自回归模糊神经网络控制技术	机械工程学报	2005. 41. 7
60	艾云龙 左敦稳 王 珉	博士生 教 授 教 授	052	ZrO ₂ (n)、SiC(w)的分散及与MoSi ₂ 基质的均匀混合工艺研究	材料热处理学报	2005. 26. 2
61	闫 静 左敦稳 王 珉	讲 师 教 授 教 授	052	塑性精确理论在双轴柔性滚弯技术中的应用	中国机械工程	2005. 16. 3
62	陈荣发 左敦稳 李多生 相炳坤 赵礼刚 王 珉	博士生 教 授 博士生 讲 师 博士生 教 授	052	甲烷浓度对等离子喷射金刚石厚膜生长稳定的影响	金属学报	2005.41.10
63	曹振中 左敦稳 黎向锋 卢文壮	硕士生 教 授 副教授 副教授	052	P型掺杂金刚石厚膜的电火花加工	人工晶体学报	2005. 34. 3
64	高长伟 黎向锋 左敦稳 王 珉 张勇康 任旭东	硕士生 副教授 教 授 教 授 教 授	052	TC4钛合金板激光冲击成形实验研究	应用激光	2005. 25. 3
65	王树宏 左敦稳 黎向锋 王 珉	博士生 教 授 副教授 教 授	052	预拉伸铝合金厚板7050T7451内部残余应力分布测试理论及试验研究	应用科学学报	2005. 23. 2

66	徐 锋 左敦稳 卢文壮 黎向锋 相炳坤 王 珉	讲 师 教 授 副 教 授 副 教 授 讲 师 讲 师	052	连续多试样纳米金刚石 膜沉积设备及工艺	南航学报	2005. 37 (增刊)
67	王明娣 钟康民 左敦稳 王 珉	博 士 生 教 授 教 授 教 授	052	绿色夹具——基于气动 肌腱与机械增力机构的 夹具系统	南航学报	2005. 37 (增刊)
68	王明娣 钟康民 左敦稳	博 士 生 教 授 教 授	052	气动肌腱驱动的铰杆 ——杠杆增力机械手	工艺装备	2005. 43. 49 3
69	曹振中 左敦稳 黎向锋 卢文壮	硕 士 生 教 授 副 教 授 副 教 授	052	CVD金刚石厚膜电加工表 面粗糙度分析	金刚石与磨料磨具 工程	2005. 1
70	陈荣媛 左敦稳	硕 士 生 教 授	052	采用CCD图象评价工件加 工表面烧伤的可行性研 究	苏州大学学报(工 科版)	2005. 25. 4
71	郭 魂 左敦稳 王树宏 徐礼林 王 珉	博 士 生 教 授 工 程 师 硕 士 生 教 授	052	EFFECT OF TOOL-PATH ON MILLING ACCVRACY UNDER CLAMPING	Transaction of Nanjing university of Aeronautics&Astro nautics	2005. 22
72	杨根莲 黎向锋	硕 士 生 副 教 授	052	虚拟制造的回顾与展望	设计与研究	2005. 32. 7
73	朱永伟 徐家文	博 士 后 教 授	052	大扭曲叶片整体涡轮电 解加工工艺研究	宇航材料工艺	2005. 35. 6
74	徐家文 云乃彰 唐亚新 K. P. Ra jurkar	教 授 教 授 硕 士 生 教 授	052	The modelling of NC- electrochemical contour evolution machining using a rotary tool-cathode	Tournal of Materials Processing Technology	2005. 159
75	朱永伟 徐家文 薛林强	博 士 后 教 授 硕 士 生	052	大扭曲叶片整体涡轮电 解加工工艺设计与试验	电加工与模具	2005. 1
76	葛媛媛 徐家文	硕 士 生 教 授	052	数字化制造在电解加工 中的应用	电加工与模具	2005. 1
77	彭思平 徐家文 李 颖 杨 倩	硕 士 生 教 授 硕 士 生 助 教	052	微细电解加工机理探讨	电加工与模具	2005. 2
78	王福元 徐家文 吴 祥	硕 士 生 教 授 讲 师	052	电解加工过程中智能故 障诊断方法的研究	机械制造	2005. 43. 48 7

79	王福元 徐家文 吴 祥	硕士生 教 授 讲 师	052	基于多信息融合的电解 加工智能故障诊断系统	控制技术与自动化	2005.5
80	李 颖 徐家文 彭思平	硕士生 教 授 硕士生	052	超纯水微细电解加工的 基础研究	电加工与模具	2005.3
81	朱永伟 徐家文	博士后 教 授	052	异形曲面电解加工进给 运动分析与设计	航空精密制造技术	2005.41.3
82	朱永伟 徐家文	博士后 教 授	052	整体构件异形曲面电解 加工运动分析与设计	宇航材料工艺	2005.3
83	林广义 汪 炜 刘正坝 董 岐 刘 浏	博士生 副教授 教 授 硕士生 硕士生	052	多阵元液体压力激波发 生器设计与声场数值模 拟	南航学报	2005. 37. 1
84	翟洪军 任艳芳 刘正坝 汪 炜 安鲁陵	博士生 博士生 教 授 副教授 副教授	052	四轴WEDM机床运动分析 及其在NC仿真中的应用	南航学报	2005. 37. 3
85	蒋 凯 汪 炜 刘正坝	硕士生 副教授 教 授	052	高深宽比微细结构的激 波辅助电火花加工方法 研究	2005年机械工程学 会论文集	2005年11月
86	翟红存 薛重德	硕士生 副教授	052	基于DSP的SPWM变频调速 系统的实现	机械与电子	2005. 115
87	吴冰洁 云乃彰 朱永伟	硕士生 教 授 副教授	052	超声微细加工工具设计 与制作研究	05年中国机械工程 学会年会论文集	2005年11月
88	张天鹏 云乃彰 陈建宁 赵 星	硕士生 教 授 实验员 硕士生	052	商品电火花成形机微细 加工的应用探索	05年中国机械工程 学会年会论文集	2005年11月
90	赵 星 云乃彰 陈建宁	硕士生 教 授 实验员	052	电火花线切割微细加工 的实践	05年中国机械工程 学会年会论文集	2005年11月
91	赵剑峰 张建华 赵剑峰 余承业 黄因慧	副高 副教授 教授 教授 教授	052	镍合金激光直接烧结成 形制件显微结构及微观 缺陷	中国机械工程	2005. 16. 3

92	赵剑峰 黄因慧 赵阳培	副高 教授 博士生	052	Microstructure Feature of Nanocrystalline Copper Prepared by Selective Electrodeposition with Electrolyte Jet	中国国际纳米制造 技术会议论文集	2005
93	赵剑峰 黄因慧 赵阳培	副高 教授 博士生	052	Mechanical Properties of metal part fabricated by Selective Electrodeposition with Electrolyte	第三届国际快速制 造会议论文集	2005
94	赵剑峰 李悦 王蕾	副高 助理研 究员 高工	052	Nano-SiC Particles Reinforced Plasma Sprayed WC-Co Coating by Laser Melting Process	第8届先进加工与制 造技术会议论文集	2005
95	沈理达 赵剑峰	博士生 教授	052	A study on a general rapid prototyping software based on distributed technology	第三届国际快速制 造会议论文集	2005

激光重熔金属涂层的研究现状与发展*

王玮琳 田宗军 黄因慧 刘志东 何静波

(南京航空航天大学机电学院 南京 210016)

摘要: 利用激光技术改善金属涂层性能的研究近年来在国内外得到了广泛的关注并取得了一定的进展, 在阅读和了解现有文献的基础上, 综述了目前国内外关于激光重熔金属涂层的制备方法、结构特点及优异性能等研究现状, 总结了存在的问题, 提出了解决的办法, 并对该项技术今后的发展进行了展望。

关键词: 激光重熔 金属涂层 纳米晶材料 合金粉末

0 前言

涂层技术是表面工程科学的重要组成部分, 它能赋予零件表面耐磨性、耐高温、耐腐蚀、抗氧化、抗疲劳、防辐射、导电、导磁、绝缘、装饰等多种特殊的功能, 是提高产品质量、节约能源和资源、获得显著技术经济效益的一种新的表面强化技术, 在许多工业部门获得越来越广泛的应用^[1]。与喷涂、堆焊等涂层技术相比, 激光技术所形成的涂层具有结合强度高、致密度高、稀释度低、组织细小及性能优良等特点, 有着广阔的应用前景。近年来用高能量密度激光束熔覆高熔点和耐磨损的金属、陶瓷涂层是现代材料科学技术中的一个很活跃的研究领域^[2]。

将激光技术与传统表面涂层技术相结合, 形成一种新的涂层复合制备技术——激光表面重熔技术。激光重熔可以在普通的材料上获得高硬度、高耐磨性、高强度、良好的耐蚀性以及抗高温性能; 还可使零件的内部仍保持较好的韧性, 使零件的机械性能具有耐腐蚀性好、冲击韧性高、疲劳强度高的特点。同时激光表面重熔又是局部快速凝固非平衡物理冶金过程, 具有功率密度高、工件变形小、工艺简便、重复性好等特点, 可以获得超细组织和结构, 这使其在世界各国都得到广泛而又迅速的应用^[3]。

1 激光重熔金属涂层

1.1 激光重熔技术的发展

1960 年美国加利福尼亚州 Hughes 研究所研究员 Maiman 用 $\Phi 6$ mm、长 45 mm 的红宝石单晶体发射出波长为 $0.6943\ \mu\text{m}$ 的红色脉冲激光, 随后各种激光器和激光的应用如雨后春笋般地发展起来。利用激光作为热源进行材料加工从激光出现不久即取得了很大的成就, 到了 70 年代初期, 随着高功率激光器的出现, 激光用于金属表面强化的应用也引起了广泛的兴趣^[4]。激光表面强化虽然可以提高材料表面层的性能, 但它并不能完全改变材料的表面性能, 使之达到耐磨、抗腐蚀、耐冲蚀、耐疲劳、抗高温氧化等多种性能。

1976 年美国 AVCO 公司 D. S. Gnanamuthn 取得激光熔覆专利, 1979 年日本公布了激光熔覆在汽轮机叶片上应用专利, 这标志着激光熔覆技术正式应用于生产领域。但 20 世纪 70 年代中期到 80 年代中期国外激光熔覆的发展较慢, 80 年代以前激光表面处理发表的论文篇数远少于切割和焊接, 论文的篇数比大体为切割: 焊接: 表面处理=3: 2: 1, 直到 80 年代末, 每年发表的有关激光熔覆表面处理的文章篇数超过了切割和焊接的文章篇数^[5]。目前此项技术被广泛用于提高钢铁材料、铝合金及其他有色合金的耐磨性和耐蚀性^[6]。

上世纪 80 年代末, 随着陶瓷涂层优良性能的展现, 热喷涂技术特别是等离子喷涂技术在表面涂层技术中得到广泛、全面应用。不过研究人员很快发现, 尽管等离子喷涂具有沉积速度快、生产效率高、适用范围广等优势, 但是等离子喷涂陶瓷涂层存在一些固有的缺陷, 如: 具有典型的层状结构、不可避免地在涂层中产生较多的裂纹、涂层孔隙度较高等。激光重熔为这一技术难题的解决提供了新的途径, 消除了喷

* 国家自然科学基金(50175053)和江苏省自然科学基金重点(BK2004005)资助项目。

料很有前途的一种方法^[18]。与传统的纳米晶体材料制备法相比,电沉积法获得的纳米晶体具有以下一些优点:可以获得晶粒尺寸在1~100 nm的各种纯金属纳米晶体材料;所得的纳米晶体材料具有很高的密度和极少的空隙率,制备纳米晶体材料受尺寸和形状的限制很少;不必像溶胶凝胶法那样需要繁杂的后续过程,可以直接获得大批量的纳米晶体材料;以相对较低的投资成本得到产率非常高的产品,技术上的困难较小、工艺灵活、易于控制,很容易由实验室向工业现场转变^[19]。

电沉积获得纳米晶体的方法可以分为直流电沉积、脉冲电沉积、复合共沉积和喷射电沉积等技术。传统的电沉积方法电流密度小,因而沉积速率低,生长的晶粒较为粗大。但制备纳米晶体要求的电流密度远大于一般电沉积的电流密度,晶核的生长速率高,晶体长大的速率小,所以晶粒的尺寸可以控制在纳米范围内。直流电沉积纳米晶体往往采用比较大的电流密度,在加入有机添加剂的条件下,通过增大阴极极化,使得结晶细致,从而获得纳米晶体。脉冲电沉积可以通过控制波形、频率、通断比以及平均电流密度等参数,使得电沉积过程在很宽的范围内变化,从而获得具有一定特性的纳米晶体镀层。复合共沉积纳米晶体多采用恒定的直流电,在电沉积金属的过程中加入纳米微粒,使得纳米微粒与金属共同沉积。喷射电沉积是一种局部高速电沉积技术,由于其特殊的流体力学性能,并具有高的热量和物质传输率,以及高的沉积速率而在纳米晶体制备方面受到注目。电沉积时,一定流量和压力的电解液从阳极喷嘴垂直喷射到阴极表面,使得电沉积反应在喷射流与阴极表面冲击区发生。电解液的冲击不仅对镀层进行了机械活化,同时还有效地减少了扩散层的厚度,改善电沉积过程,使得镀层致密,晶粒细化。

1.3 涂层的组织性能比较

当前,等离子喷涂是激光重熔前的涂层制备的主要方法,所以在分析涂层的组织和性能时也是将等离子喷涂层激光重熔前后的组织结构和性能比较作为主要的研究对象。

1.3.1 涂层组织

通过扫描电子显微镜对重熔前后的涂层微观结构进行观察发现,等离子喷涂层有很大的孔隙度,涂层内部为处于熔融或高塑状态的准晶粉末与基体碰撞变形凝固后相互堆积在一起形成的层状结构,涂层与基体之间是简单的机械结合^[15]。图2为在GrAl钢表面等离子喷涂Ni—20Cr层激光重熔前后的SEM图^[15],由图中可以看出,重熔后所得等离子喷涂—激光重熔涂层表面组织明显细化,激光重熔有效地消除了等离子喷涂层的层片状组织形态,形成了以树枝晶和等轴晶为主的涂层组织,涂层的孔隙率大幅度地下降,孔隙率不高于0.5%^[14]。

对不同的金属材料的枝晶组织和相结构分布以及和激光参数的关系也不尽相同,但总的来说,随着激光重熔的条件不同,枝晶组织呈现出不同的形态,常见的枝晶组织有胞状枝晶和柱状枝晶两种。当采用较小的激光比能进行重熔时,喷涂层尚未熔透,在扫描速度较快的条件下,重熔层在表面和熔体与未熔层界面上同时形核。表面形核长大的枝晶呈胞状,界面形核长大的枝晶呈柱状。当采用较高的激光比能且扫描速度较快的条件下进行重熔时,仅在熔体与未熔层界面形核长大,涂层底部为等轴晶,上部为柱状晶。当采用较高的激光比能且扫描速度较慢的条件下进行重熔时,喷涂层完全熔透,重熔层组织均为大致沿热流方向的柱状晶^[7,20]。

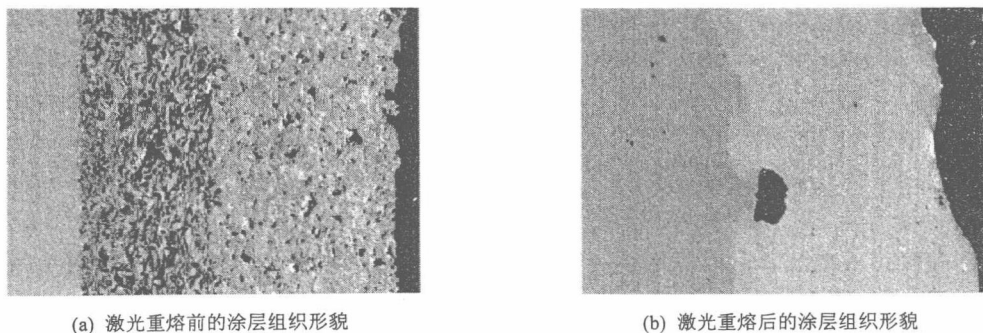


图2 等离子喷涂Ni-20Cr层SEM图

1.3.2 涂层性能

在激光重熔铜排表面等离子喷涂Cr层和Ni层的试验中,等离子层的电阻率随试样厚度的减小,喷涂层和重熔层的电阻率都呈指数形式增加(见图3)^[6]。当试样厚度达到一定的程度后,整体试样的电阻率

趋于平缓。这是因为,激光熔覆层和等离子喷涂层的厚度均在 0.2 mm 左右,随着试样中铜的比例的增加,涂层部分对电阻率的影响逐渐减小。此外,等离子喷涂层的电阻率远远高于激光熔覆层的电阻率,甚至大于纯金属 Cr 的电阻率($0.13 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$),这是因为喷涂层是由层状组织组成,其中存在大量孔隙所造成的,而激光熔覆层的组织则要比喷涂层均匀致密得多。在一定的试验条件下,随基材厚度的增加,激光重熔和等离子喷涂层的整体电导率将不断增加,激光重熔后熔覆层的电导率均高于等离子喷涂层相应的电导率,这说明了激光重熔后涂层具有较好的导电性能^[6,21]。

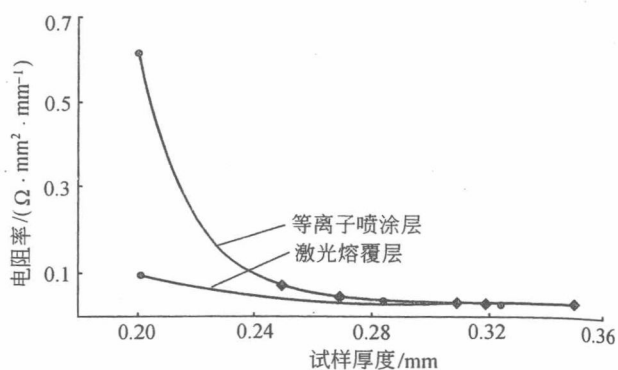


图3 激光重熔等离子 Cr 层电阻率与试样厚度的关系

由于激光表面重熔有效地消除了等离子喷涂层片状结构,使之转变为等轴晶与树枝晶,消除了表层中的疏松、孔隙等缺陷,提高了涂层的致密度与结合强度,阻止了腐蚀介质渗入,减少了阳极溶解,促使涂层中合金元素均匀分布,减少了涂层中微电池数目,改善了涂层的耐蚀性。另外,在喷涂层中加入适量的稀土,可以增加涂层韧性,明显减少激光重熔过程中重熔层的裂纹,使涂层有效地保护了基体、提高了试样的耐蚀性^[7,22,23]。

对 WC-Co 等离子喷涂层及激光重熔层的摩擦磨损特性的研究表明,激光重熔层的耐磨性能明显高于等离子喷涂层^[24]。在 Q345 钢表面激光重熔 Co 基合金堆焊层的磨损失重小于焊态堆焊层,并且激光高速扫描重熔堆焊层具有最小的磨损量^[17]。在碳钢、铸铁和不锈钢表面激光熔覆 $\text{Cr}_3\text{C}_2(\text{Ni}-\text{Cr}-\text{Mo})$ 复合涂层后获得了细小的组织和颗粒的均匀分布,与等离子喷涂方法相比较,在高接触载荷下耐磨性有大幅度地提高^[25]。

在激光重熔 Cr 等离子喷涂层中,等离子喷涂和激光重熔后的涂层硬度都远大于原始基材硬度,涂层平均硬度为 200 HV 左右(175~230 HV),是基体的 3 倍^[6]。而在激光重熔 75/25 $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}$ 等离子涂层中,激光重熔前的结合层显微硬度平均强度为 56.7 MPa(标准偏差为: $s=3.2$),经过重熔后,测量到的结合层硬度为 59.3 MPa,强度略有提高。可见激光重熔不仅对提高等离子喷涂层的显微硬度作用明显,而且还会提高结合层的显微硬度^[26]。

由此可知,激光重熔后的金属涂层,组织形貌得到了明显细化,致密度、导电性、耐蚀性和硬度显著提高,耐磨性能大幅度地提高。

1.4 影响激光重熔的参数

对激光参数的影响主要集中在激光的扫描速度对涂层性能的影响上。对等离子喷涂—激光重熔制备 AlCuF 准晶涂层的研究中,当扫描速度较低(3 mm/s)时,所得涂层致密且熔池深度已越过涂层与基体的界面而到达基体内部。当激光功率固定(300 W)时,随着扫描速度的增加,熔池逐渐变浅且涂层内部也出现一定的熔化不充分区域。当激光束扫描速度分别为 3 mm/s 和 4.5 mm/s 的工艺过程所得等离子喷涂—激光重熔涂层的与基体熔化充分,涂层形成细小的晶粒,结构均匀致密。这表明,激光扫描速度较低的情况下激光重熔过程中激光熔化涂层和基体所形成的熔池较深且熔池存在的时间相对较长,这使得涂层中各组元原子有足够的时间充分扩散而均匀混合实现合金化,以生成成份均匀结构致密的新相。当激光扫描速度大于 7.5 mm/s 时,涂层中有局部区域熔化不充分。虽然相对于原等离子喷涂涂层,激光重熔涂层的空隙度有很大程度的减小。但由于激光扫描速度过高,在激光熔化过程中激光能量向涂层的耦合量不足以使涂层的熔化深度达到涂层—基体界面。同时涂层内部的熔化也不完全充分,由于元素扩散不充分因而最终分布不均匀,从而影响涂层本身的性能以及涂层与基体的结合强度^[15]。

扫描速度在激光重熔 Co 基合金堆焊层上的影响也比较显著,由图 4^[17]所示,随着磨损时间的增加,焊态及激光重熔堆焊层的磨损量均加大,经金相组织分析可知,提高激光扫描后快速熔化和快速凝固使 Co 基合金重熔堆焊层晶粒细化导致的细晶强化作用,同时 C、Cr、W、Fe 等合金元素对 γ -Co 的固溶强化作用以及细小共晶碳化物对 γ -Co 的弥散强化作用,这一切均使得激光重熔堆焊层硬度高于焊态堆焊层硬度,同时形成一种在 γ -Co 基体上分布着高硬度碳化物的网架组织结构,表现出良好的耐磨性。而经两种不同的扫描速度激光重熔堆焊层磨损表面,没有撕裂特征,高速相对低速仅显示出一些较浅而窄的犁沟痕

道,堆焊层只发生了微量塑性变形,表面局部剥离,因而其磨损量极小^[17]。

2 激光重熔金属涂层存在问题及改进方法

由于激光重熔过程中激光能量在较短的时间内迅速增加,而涂层材料的熔点与基体材料熔点却不尽相同,且它们之间的热膨胀系数、弹性模量和导热系数等物理参数相差很大,在激光辐照后所形成的熔池区域的温度梯度很大,由此产生的热应力容易导致涂层产生裂纹或剥落。等离子层和金属基体之间只限于机械结合,往往因为局部加热而容易剥落,特别是喷涂层未熔透时,更容易剥落。另外,在金属基体与涂层之间易出现裂纹和孔洞^[27]。总之,裂纹的产生和涂层的剥落是激光表面处理涂层最棘手的问题。

通过激光重熔,等离子涂层的孔隙率和气孔均有明显地下降,但是随着激光的作用喷涂的金属被蒸发而导致了涂层厚度的相应的减少^[14]。因此,尽管激光重熔通过减少涂层内部微观结构的不同相性降低了涂层的孔隙率,但是却是以牺牲了涂层厚度和提高了涂层密度作为代价的^[22]。

为了获得质量优异、无缺陷或少缺陷的激光重熔涂层,一方面应从理论上对作为激光重熔技术理论基础的快速凝固理论及复合涂层界面精细结构作深入的研究,揭示激光重熔过程的本质;另一方面,应从工艺上对涂层的构成与质量进行控制与改进^[28],或加入某种添加剂降低涂层与基体之间的物理性能的差异(如线膨胀系数、弹性模量等),以减少熔覆后的热应力和组织应力。

3 结论

激光表面重熔技术,由于对基体材料无限制、又可根据实用性能要求设计涂层的组成,可在廉价的基体表面获得性能优异的表面涂层,且可消除喷涂层的层状结构、大部分孔隙和氧化物夹杂,形成均匀致密的金属涂层,并可显著地改善涂层的组织和耐磨、耐蚀、导电等性能,是其他表面处理工艺无法比拟的,因而可以预料其在众多领域具有巨大的发展潜力。

参 考 文 献

- 1 陈学定,韩文政.表面涂层技术.北京:机械工业出版社,1994
- 2 唐人剑,陆伟,严彪,等.激光重熔铝基 Al_2O_3 陶瓷复合层的组织结构研究.材料科学与工程学报,2003,22(4):557~560
- 3 许友谊.全 20CrMnTi 表面激光重熔的组织与性能研究.应用激光,2002,23(4):401~404
- 4 李志忠.激光表面强化.北京:机械工业出版社,1992
- 5 张魁武.国外激光熔覆材料、工艺和组织性能的研究.金属热处理,2002,27(6):1~8
- 6 安耿,梁工英,黄俊达,等.激光重熔 Cr 等离子喷涂层的组织及其导电性的研究.热加工工艺,2004,1:9~11
- 7 陈传忠,雷廷权,包全合,等.等离子喷涂—激光重熔陶瓷涂层存在问题及改进措施.材料科学与工艺,2002,10(4):432~435
- 8 李淑华,沈长林,邵德春.激光表面重熔对等离子喷涂氧化铝陶瓷涂层耐腐蚀性的影响.材料科学与工艺,1994,2(3):72~76
- 9 吴秋红,陶曾毅,崔昆,等.激光重熔陶瓷层的显微组织和相结构.金属学报,1995,31(11):508~512
- 10 JASIM L M, RAWLINGS R D, WEST D RF. Characterization of plasma sprayed layers of fully yttria-stabilized zirconia modified by laser sealing. Surface and Coatings Technology, 1992, 53: 75~86
- 11 陈传忠,王文中,曹怀华,等.激光熔覆 Al_2O_3 -NiCrAl 层的脆性及摩擦磨损特性.中国激光,1999,25(9):841~846
- 12 G Y Liang, T T Wong. Microstructure and character of laser remelting of plasma sprayer coating (Ni-Cr-B-Si) on Al-Si alloy. Surface and Coatings Technology, 1997: 121~126
- 13 You Wang, Radovan Kovacevic, Jiajun Liu. Mechanism of surface modification of CeO_2 in laser remelted alloy spray coatings. Wear, 221, 1998: 47~53
- 14 Buta Singh Sidhu, D Puri, S Prakash, et al. Mechanical and metallurgical properties of plasma sprayed and laser remelted Ni-20Cr and Stellite-6 coatings. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 159: 347~355

- 15 袁伟东, 邵天敏, 瑟岛, 等. 等离子喷涂-激光重熔制备 AlCuFe 准晶涂层的研究. 材料工程, 2002, 11: 7~13
- 16 Guy Antou, Ghislain Montavon, Francoise Hlawka, et al. Characterizations of the pore-crack network architecture of thermal-sprayed coatings. Materials Characterization, 2004, 53: 361~372
- 17 洪永昌. 激光重熔扫描速度对 Co 基合金堆焊层组织及耐磨性的影响. 中国机械工程, 2004, 15(20): 1 876~1 879
- 18 扬建明, 朱获, 雷为宁. 电沉积法制备纳米晶材料的研究进展. 材料保护, 2003, 36(4): 1~4
- 19 邓姝皓, 龚竹青, 陈文汨. 电沉积纳米晶体材料的研究现状与发展. 电镀与涂饰, 2001, 20(4): 35~39
- 20 Chen Chuanzhong, Diangang Wang, Quanhe Bao, et al. Influence of laser remelting on the microstructure and phases constitution of plasma sprayed hydroxyapatite coatings. Applied Surface Science, 2005: 1~6
- 21 T T Wong, G Y Liang, G An, et al. The electrical conductivity of laser-remelted and plasma-sprayed Ni and Cr coatings. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 159: 265~271
- 22 Y N Wu, G Zhang, Z C Feng, et al. Oxidation behavior of laser remelted plasma sprayed NiCrAlY and NiCrAlY -Al₂O₃ coatings. Surface and Coatings Technology, 2001, 138: 56~60
- 23 Buta Singh Sidhu, D Puri, S Prakash, et al. Characterisations of plasma sprayed and laser remelted NiCrAlY bond coats and Ni3Al coatings on boiler tube steels. Materials Science and Engineering, 2004, A368: 149~158
- 24 H Chen, C Xu, Q Zhou, et al. Micro-scale abrasive wear behaviour of HVOF sprayed and laser-remelted conventional and nanostructured WC-Co coatings. Wear, 2005, 258: 333~338
- 25 BELMONDO A, CASTAGNA M. Wear resistant coating by laser processing. Thin Solid Films, 1979, 64: 249~256
- 26 J Mateos, J M Cuetos, R Vijande, et al. Tribological properties of plasma sprayed and laser remelted 75/25 Cr3C2/NiCr coatings. Tribology International, 2001, 34: 345~351
- 27 葛孝月, 武晓雷, 陈光南. 激光熔覆层陶瓷颗粒界面力学行为的数值分析. 金属热处理学报, 1998, 19(3): 26~28
- 28 冯志刚, 殷一贤, 邹至荣, 等. 激光涂复层质量控制研究. 激光杂志, 1995, 16(3): 118~122

作者简介: 王玮琳, 女, 1974 年生, 硕士研究生。研究方向为电沉积金属涂层激光重熔技术。

通信地址: 南京航空航天大学 284#, 邮编: 210016, 电话: 025-84892520。

E-mail: ww1_2005@126.com

激光重熔过程流场及温度场的数值模拟 研究现状和发展*

何静波 黄因慧 田宗军 刘志东 王玮琳 刘朝晖

(南京航空航天大学机电学院 南京 210016)

摘要: 阐述了运用数值模拟方法对激光重熔复合涂层深入研究的必要性, 简要的介绍了激光与材料相互作用的物理过程, 回顾已经报道过的激光重熔和激光熔覆温度场及流场的数值模拟, 并重点评述了激光重熔熔池温度场和流场的物理数学模型、复合涂层热物性参数、相变潜热以及介于固体和液体之间的糊状区等的处理方法。在此基础上, 分析了运用数值模拟方法研究激光重熔复合涂层温度场、流场的局限性和发展趋势。

关键词: 激光重熔 复合涂层 数值模拟 温度场 流场

0 前言

自 20 世纪 60 年代第一台激光器问世以来, 高能束作为一种清洁、可控性强的热源在材料切割、焊接、各种表面强化技术和凝固理论研究中发挥了重要作用^[1, 2]。其中激光表面重熔技术是一种复合表面技术, 它在改善材料耐磨、耐腐蚀、耐热等性能等方面都取得了明显效果^[3-6], 因而受到普遍关注, 吸引大量学者对此进行进一步的研究。

激光重熔的工艺特点是高功率激光束与材料的作用过程中产生熔池, 工艺质量的好坏与熔池内动力学过程密切相关。激光熔池中的传质、传热及流动对熔重熔层的组织和性能起决定性作用。因此, 为获得需要的凝固组织和优良的性能就必须准确地获取熔池中温度场、质场及流场的信息, 对熔池形状进行控制。由于激光熔池尺度小、温度极高、移动速度快, 对激光束与材料作用过程中熔池温度场信息很难通过试验方法测得。所以采用数学物理的方法从理论的角度对激光熔池动力学过程的研究必不可少。

从研究方法^[7]上看, 传热学可以分为试验传热学、分析传热学和数值传热学(即计算传热学)。随着高速、大容量的计算机的出现, 数值计算的方法得到飞速的发展, 它具有成本较低和能够模拟较复杂或较理想的过程等优点。目前, 国内外研究者多运用数值模拟技术对激光熔池传热传质冶金动力学过程进行较为详细的研究, 并以试验法来验证计算的结果^[8-13]。

自 20 世纪 70 年代起就有不少关于激光表面重熔的理论研究, 近几年来对激光熔池温度场、流场的数值模拟取得了相当大的进展, 已经能够比较准确地揭示熔池中由于表面温度梯度引起的表面张力流对熔池形状和温度场的影响^[14, 15]。但对激光熔池物理过程了解较少, 特别是对激光熔池中的成分分布及影响其分布的因素缺乏系统的研究, 不能从理论的高度建立起工艺参数与组织、性能之间的关系, 必须通过一系列的规划试验来确定最优工艺参数, 而这需要进行大量的工艺试验, 耗费大量的人力物力资源。因此, 运用数值模拟方法对激光重熔过程流场及温度场的研究具有重要的理论意义和重大的经济意义。

1 激光与材料的相互作用

具有一定能量密度分布的激光束照射在非透明材料表面, 一部分光束被反射, 剩余的被吸收, 吸收的能量转化为热量并向材料深处传导。激光功率密度增大时材料表面形成熔池, 由于表面存在温度梯度, 产生表面张力梯度效应, 使熔池液体流动且熔体处于高温状态, 液相传质具有对流传质和化学反应传质(合金元素烧损)或蒸发传质的复合特性。因此激光熔池内的温度场和流场是研究激光熔池内成分分布的基础。

激光加载条件、物体的形状、初始和边界条件以及物体的热物理性质决定了物体温度场的时空变化。

* 国家自然科学基金(50175053)和江苏省自然科学基金重点(BK2004005)资助项目。