

Z427/1033(2009)-(26)



NUAA2010055224

Z427
1033 (2009) - (26)

机电学院

052



2010055224

26

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	张丽宏 汪炜	硕士生 教授	052	PVDF传感器在液体压力激波测试中的应用	压电与声光	2009, 31 (4)
2	肖任勤 汪炜	硕士生 教授	052	电火花电解复合切割多晶硅的表面形貌及减反射特性研究	机械科学与技术	2009, 28 (5)
3	高强 汪炜	硕士生 教授	052	高强度聚焦超声的压力性测试实验研究	电加工与模具	2009年第3期
4	丁维育 汪炜	硕士生 教授	052	硅阵列通孔微细电火花电工试验研究	电加工与模具	2009年第6期
5	江一 汪炜	硕士生 教授	052	激波辅助纯钛微细群孔光刻电解试验研究	第13届全国特种加工 论文集	2009
6	彭昀 汪炜	硕士生 教授	052	Design and develop of megasonic system and its application on PZT nano power dispersion	The Internatational Technology and Inovation Conference 2009	2009
7	汪炜	教授	052	High efficiency slicing of low resistance silicon ingot by wire electrolytic-spark hybrid machining	Journal of Materials Processing Technology	2009
8	孙玉利 左敦稳	讲师 教授	052	高校理工科本科毕业设计存在的问题及对策	黑龙江教育	2009卷第10期
9	孙玉利 左敦稳	讲师 教授	052	关于高校理工科本科毕业设计选题的探讨	高校教育研究	2009卷第15期
10	卢文壮 左敦稳 徐锋	教授 教授 副教授	052	Stress in Diamond Coating on Cutting Tools Deposited by Hollow Substrate Holder	Key Engineering Materials	2009, (407-408)
11	卢文壮 左敦稳 孙玉利	教授 教授 硕士生	052	Temperature Field during CMP GaAs Wafer Using an AID	Key Engineering Materials	2009第416卷
12	李军 朱永伟 左敦稳	讲师 教授 教授	052	Optimization of Polishing Parameters with Taguchi Method for LBO Crystal in CMP	J. Mater. Sci. Techno 1.	2009, 25 (5)
13	李军 朱永伟 左敦稳	讲师 教授 教授	052	Influence of slurry pH on material removal rate and surface roughness of super precision polishing of LBO crystal	Proc. of SPIE	2009年7282卷
14	徐锋 左敦稳 卢文壮 朱永伟 王珉	副教授 教授 教授 教授 教授	052	Grid bias and substrate bias effects on the mechanical properties of diamond films prepared by HFCVD	Transactions of Nonferrous Metals Society of China	2009, s3
15	王立朝 谷安 张新朋 方志军	硕士生 讲师 硕士生 硕士生	052	基于运动控制卡的多工位数控冲床控制系统的应用研究	机电一体化	2009年7期
16	王立朝 谷安 张新朋 方志军	硕士生 讲师 硕士生 硕士生	052	数控机床自动编程系统的应用研究	机电一体化	2009年8期
17	方志军 谷安 王立朝 张新朋	硕士生 讲师 硕士生 硕士生	052	基于触须传感器的移动机器人系统设计	中国仪器仪表	2009年1卷
18	谷安 方志军	讲师 硕士生	052	机器人触须传感器的静态工作机理	山东大学学报	2009年29卷5期

19	王维 朱荻 曲宁松 黄绍服	博士生 教授 教授 博士生	052	Influence of Insulation Thickness on Electrochemical Drilling Stability and Accuracy	Transactions of Nonferrous Metals Society of China	2009年26卷3期
20	王少华 朱荻	博士生 教授	052	微尺度线电极电解加工	航空学报	2008年30卷9期
21	王少华 朱荻 曲宁松 王昆	博士生 教授 教授 博士生	052	微细缝结构电解加工研究	中国机械工程	2009年20卷8期
22	刘勇 朱荻 曾永彬 黄绍服 余宏兵	博士生 教授 讲师 博士生 博士生	052	Experimental Invertigation on Electrochemical MicroMachining of Complex Shape Parts	Key Engineering Materials	2009, (407-408)
23	王维 朱荻 曲宁松 黄绍服	博士生 教授 教授 博士生	052	Effect of the electrode insulation thickness on the Size Accuracy of Bored Hole in ECD process	Key Engineering Materials	2009, (407-408)
24	胡洋洋 朱荻 曲宁松 曾永斌 明平美	博士生 教授 教授 讲师 博士后	052	Fabrication of high-aspect-ratio electrode array by combining UV-LIGA with micro electro-discharge machining	Microsystem technologies	2009年15卷4期
25	徐正扬 朱荻 朱栋	讲师 教授 博士生	052	发动机叶片电解加工变间隙阴极修正法	机械工程学报	2009年45卷9期
26	朱荻 曲宁松 李寒松 曾永彬 李冬林 钱双庆	教授 教授 教授 讲师 博士生 博士生	052	Electrochemical micromachining of microstructures of micro hole and dimple array	CIRP Annals-Manufacturing Technology	2009年58卷1期
27	李红英 云乃彰 朱永伟	硕士生 教授 教授	052	超声电解复合微细加工硬质合金试验研究	航空制造技术	2009年第1期
28	毛计庆 云乃彰 孟轶 曲宁松	硕士生 教授 硕士生 教授	052	LabVIEW-快速构建步进电机控制系统的利器	电机与控制应用	2009年36卷1期
29	唐笑 刘壮	硕士生 讲师	052	三轴数控铣床几何误差软件补偿技术研究	中国制造业信息化	2009年38卷11期
30	衡冲 刘壮	硕士生 讲师	052	阴极周期跳跃式微细电解加工的正交试验研究	电加工与模具	2009年第6期
31	邱中军 刘壮 衡冲	硕士生 讲师 硕士生	052	阴极往复运动的电化学加工方法初探	机械制造与自动化	2009年38卷3期
32	刘壮 邱中军 衡冲 曲宁松	讲师 硕士生 硕士生 教授	052	阴极跳跃进给的微细电化学加工	中国机械工程	2009年20卷15期
33	刘壮 邱中军 曲宁松	讲师 硕士生 教授	052	Effect of Tool Electrode Insulation on Electrochemical Micro Drilling Accuracy	纳米技术与精密工程	2009年7卷4期
34	刘壮 王维 曲宁松	讲师 硕士生 教授	052	提高小孔电解加工精度的试验研究	机械科学与技术	2009年28卷3期
35	刘壮 邱中军 衡冲	讲师 硕士生 硕士生	052	基于阴极周期往复运动的微细电解加工系统	传感器与微系统	2009年28卷3期

36	刘壮	讲师	052	长距离激光焊接工作站的运动学分析与仿真	激光杂志	2009年30卷3期
37	刘壮 邱中军 衡冲 曲宇松	讲师 硕士生 硕士生 教授	052	Electrochemical Micro Drilling of Stainless Steel with Tool Electrode Jump Motion	Materials Science Forum	2009年626-627卷
38	梁利诚 高长水	硕士生 副教授	052	基于MATLAB的微细铣削加工测试系统开发	机械制造及自动化	2009年第3期
39	王志刚 高长水	硕士生 副教授	052	硬质合金和聚晶金刚石电火花加工用微能脉冲电源的研究	电加工与模具	2009年第3期
40	霍树青 高长水	硕士生 副教授	052	火心式换能器设计中节面位置的选择与分析	电加工与模具	2009年第2期
41	王强 薛善良	硕士生 副教授	052	基于本体的船舶传动装置设计知识建模研究	中国制造业信息化	2009年38卷19期
42	吴志成 薛善良	硕士生 副教授	052	基于J2EE的船舶传动装置结构管理	机械与电子	2009年1期
43	陈锦东 黎向锋 左敦稳 田昕	硕士生 教授 教授 硕士	052	基于MSC, Fatigue的带孔板疲劳寿命仿真	Machine Building&Automation 机械制造用与自动化	2009年38卷1期
44	田昕 黎向锋 左敦稳 陈锦东	硕士生 教授 教授 硕士	052	基于有限元带隔板双槽钢焊接梁焊接仿真优化	Machine Building&Automation 机械制造用与自动化	2009年38卷1期
45	赵宇飞 左敦稳 孙玉利 卢文壮	硕士生 教授 博士后 教授	052	基于有限元法的硅片水冻固结磨料抛光温度场分析	金刚石与磨料磨具工程	2009年1期
46	苏雁 左敦稳	硕士生 教授	052	微波数字复合基板金属化孔工艺方法	电子工艺技术	2009年30卷3期
47	顾远之 左敦稳	硕士生 教授	052	温热理疗床身模态分析及其结构优化	Machine Building&Automation 机械制造用与自动化	2009年38卷1期
48	杨春 卢文壮 左敦稳	硕士生 教授 教授	052	HFCVD系统中衬底温度场与气相空间场的数值分析	人工晶体学报	2009年38卷2期
49	王明娣 左敦稳 王珉 石世宏	硕士生 教授 教授 教授	052	光内送粉激光熔覆工艺参数对单层熔覆质量的影响	南京航空航天大学学报	2009年41卷3期
50	缪宏 左敦稳 王鸿宇 汪洪峰	博士生 教授 博士 博士	052	Surface characteristics of 10Ni3MnCuAl steel by shot peening	Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics	2009 年26卷3期
51	左敦稳 李军 黎向锋	教授 讲师 教授	052	国内部分高校机械制造技术专业必修课的比较研究	南京航空航天大学学报	2009年11卷期
52	孙玉利 左敦稳 李军	博士后 教授 讲师	052	高校理工科本科毕业设计存在的问题及对策	黑龙江教育(高教研究与评估)	2009年10期
53	王宏宇 左敦稳 王明娣 邵建兵	博士生 教授 副教授 硕士	052	纳米CeO ₂ p对镍基高温合金表面NiCoCrAlY激光熔覆涂层氧化行为的影响	金属学报	2009年45卷8期
54	王宏宇 左敦稳 马浩 王明娣 陆英艳	博士生 教授 硕士 博士 工程师	052	工艺参数对压片预置式激光熔覆涂层微观质量的影响	材料工程	2009年9期

55	王宏宇 左敦稳 孙玉利 徐锋 张丹	博士生 教授 讲师 副教授 博士	052	Microstructure of nanometer Al2O3 dispersion strengthened Ni-based high-temperature protective coating by laser cladding	Transaction of Nonferrous Metals Society of China	2009年 卷 19 期
56	任卫涛 卢文壮 杨春 左敦稳 徐锋	硕士生 教授 硕士 教授 副教授	052	NCD/Si3N4 界面接触应力分析	硅酸盐通报	2009年 28卷 1期
57	杨春 卢文壮 左敦稳 徐锋 任卫涛	硕士生 教授 教授 副教授 硕士	052	SiN4陶瓷轴承NCD涂层制备中的温度场模拟	机械制造与自动化	2009年38卷3期
58	卢文壮 左敦稳 任卫涛 杨春 徐锋 王珉	教授 教授 硕士 硕士 副教授 教授	052	金刚石涂层的纳米压痕力学性能研究	人工晶体学报	2009年38卷1期
59	相丙坤 左敦稳 黎向锋	副教授 教授 教授	052	从专利文献分析金刚石涂层工具技术进展	人工晶体学报	2009年38卷5期
60	相丙坤 左敦稳 李多生 陆海泉 陈荣发	副教授 教授 博士 硕士 博士	052	大面积球面金刚石膜的均匀沉积研究	人工晶体学报	20 09年38卷1期
61	马浩 左敦稳 王珉 王宏宇 陈拥军	硕士生 教授 教授 博士 硕士	052	基于ANSYS的压力预置式激光熔覆温度场仿真	机械制造与自动化	20 09年38卷 4期
62	丁子昀 左敦稳 郭魂	博士生 教授 博士后	052	基于“框体拼接”法的多框体有限元法建模技术研究	机械制造与自动化	2009年38 卷 1期
63	丁子昀 左敦稳 郭魂 黎向锋	博士生 教授 博士后 教授	052	多点装夹方案对多框体铣削变形影响的有限元分析	南京航空航天大学学报	2009年41卷 5 期
64	周亮 左敦稳 孙玉利 朱永伟	硕士生 教授 博士后 教授	052	微晶玻璃低温脆塑转变机理的研究	硅酸盐通报	2009年28卷5期
65	周亮 左敦稳 康静 李茂 朱永伟 孙玉利	硕士生 教授 硕士 硕士 教授 博士后	052	纳米CeO2在水相介质中的分散性能研究	机械制造与自动化	2009年38卷1期
66	黄铭敏 左敦稳 汪洪峰	硕士生 教授 博士	052	汽车的激光焊接模拟热源模型研究	现代零部件	2009年9期
67	康静 左敦稳 朱永伟 孙玉利 周亮 李茂	硕士 教授 教授 博士后 硕士 硕士	052	采用水结合剂抛光盘的温度场仿真	机械制造与自动化	2009年8卷2期

68	冯海虎 缪宏 左敦稳 薛善良	硕士 博士 教授 副教授	052	飞机起落架抗疲劳制造工艺决策支持系统研究	中国制造业信息化	2009年38卷19期
69	王鸿翔 左敦稳 卢文壮 林欢庆	博士生 教授 教授 硕士	052	EACVD小型化系统摆动衬底设计及温度场仿真研究	中国机械工程	2009年20卷5期
70	左敦稳	教授	052	现代加工技术	北京航空航天大学出版社	2009年8月
71	缪宏 左敦稳 王红军 汪洪峰	博士 教授 讲师 硕士	052	Surface Characteristics of 10Ni3MnCuAl Steel by Peening	Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics	2009年26卷3期
72	缪宏 左敦稳	博士 教授	052	Effect of Surface Topography on Stress Distribution of Vacuum Plate Glass for Different Aluminum Alloy Braced Pillars	Key Engineering Materials	2009年407-408卷
73	汪洪峰 左敦稳	博士 教授	052	Numerical Analysis of Surface Residual Stress of NC milling 7075-T7451 Aluminum Alloy	Key Engineering Materials	2009年407-408卷
74	王宏宇 左敦稳	博士 教授	052	Preparation Process of Metal Matrix Micro/Nano-powders Reinforced by Nanometer Particles	Advanced Materials Research	2009年60-61卷
75	王宏宇 左敦稳	博士 教授	052	Microstructure of Nanometer Al2O3 Dispersion Strengthened Ni-based High-temperature Protective Coatings by Laser Cladding	Transaction of Nonferrous Metals Society of China	2009年19卷 3期
76	王宏宇 左敦稳	博士 教授	052	Effects of Processing Parameters on Energy Efficiency of Squash Presetting Laser Cladding	Materials Science Forum	2009年628-629卷
77	王宏宇 左敦稳	博士 教授	052	Effects of Processing Parameters on Energy Efficiency of Squash Presetting Laser Cladding	Advanced Materials Research	2009年79-82卷
78	赵礼刚 左敦稳	博士 教授	052	The Analysis on the Stability of Diamond Wire Saw Cutting Process for the Silicon	Key Engineering Materials	2009 年407-408 卷
79	何宁	教授	052	高速切削应用技术	金属加工（冷加工）	2009, (22): 25-28
80	丁强 何宁 李亮 杨吟飞	硕士生 教授 教授 博士生	052	Windows下基于LabWindows/CVI8.0的实时数据采集	工业控制计算机	2009, 22(10): 66-67
81	王琦 何宁 李亮 戚宝运	硕士生 教授 教授 博士生	052	变速切削抑振技术的研究现状	机械制造与自动化	2009, 38(3): 34 - 36
82	方强 李亮	硕士生 教授	052	基于机器视觉的人造大理石台板表面凹坑检测	机械制造与自动化	2009, 38(3): 97-99
83	田桂祥 李亮 何宁	硕士生 教授 教授	052	开放式微细铣削数控系统的开发	工具技术	2009, 27(6): 1051-1055

84	肖茂华 何宁 李亮 陆爱华	博士生 教授 教授 硕士生	052	镍基合金高速切削中锯齿状切屑毛边和刀具磨损研究	工具技术	2009, 416: 264-268
85	中志刚 何宁 李亮	博士生 教授 教授	052	高速硬铣削加工刀具磨损监测研究	中国机械工程	2009, 626-627 : 195-200
86	卞荣 李亮 何宁 赵威 戚宝运 田佳	硕士生 教授 教授 副教授 博士生 硕士生	052	低温微量润滑高速铣削PH13-8Mo刀具磨损试验研究	工具技术	2009, 43(7): 14-17
87	包杰 李亮 何宁 曹白洋 黄亮	硕士生 教授 教授 博士生 博士生	052	国外微细铣削研究综述	机械科学与技术	2009, 28(8): 1018-1022
88	包杰 李亮 何宁 曹白洋 黄亮	硕士生 教授 教授 博士生 博士生	052	高速精密直线电机微铣削系统的动态性能研究	机械科学与技术	2009, 28(10):1384-1388
89	包杰 李亮 何宁	硕士生 教授 教授	052	基于PC的开放式数控系统微铣削伺服控制的研究	机械科学与技术	2009, 28(9): 1230-1234
90	曹白洋 何宁 李亮	博士生 教授 教授	052	刀具切削刃钝圆对微细切削加工尺寸效应影响的有限元模拟研究	机械科学与技术	2009, 28(2): 186-190
91	江通悦 何宁 李亮 徐益铭 徐广铭	博士生 教授 教授 副教授 副教授	052	基于惯性修正的铣削力系数辨识	装备制造技术	2009, (2): 4-6
92	田佳 何宁 李亮 赵威 戚宝运 卞荣	硕士生 教授 教授 副教授 博士生 硕士生	052	微量润滑切削加工性能影响因素的研究	工具技术	2009, 43(2): 3-8
93	中志刚 何宁 李亮	博士生 教授 教授	052	Application of fuzzy logic and self-organizing network to tool-wear classification	Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics	2009, 26(1): 9-15
94	曹白洋 何宁 李亮 黄亮 包杰	博士生 教授 教授 博士生 硕士生	052	微细铣削机床系统构建及微小型零件加工实验研究	工具技术	2009, 43(3): 11-15
95	何宁 杨吟飞 李亮 赵威	教授 博士生 教授 副教授	052	航空结构件加工变形及其控制	航空制造技术	2009, (6): 32-35
96	江通悦 何宁 李亮 柳大虎	博士生 教授 教授 硕士生	052	薄壁零件高速铣削振动影响因素研究	淮阴工学院学报	2009, 18(1): 13-17
97	江通悦 何宁 李亮 柳大虎	博士生 教授 教授 硕士生	052	薄壁零件的铣削加工稳定性研究	机床与液压	2009, 37(12): 15-17

98	申志刚 何宁 李亮	博士生 教授 教授	052	Extraction Fuzzy Linguistic Rules from Neural Networks for Maximizing Tool Life in High-Speed Milling Process	Chinese Journal of Mechanical Engineering,	2009, 22(3): 341-346
99	B.Y.Qi, N.He, L.Li	博士生 教授 教授	052	Experimental Study of HSM Hardened Steel AISI D2	Advanced Material Research	2009, 69-70: 374-378
100	Liang Huang Ning He Liang Li	博士生 教授 教授	052	Study on an Open CNC System of 3-Axis Micro Milling Machine Tool	Advanced Material Research	2009, 69-70: 369-373
101	A. Iqbal N. U. Dar N. He I. Khan L. Li	博士生 教授 教授 教授 教授	052	Optimizing cutting parameters in minimum quantity of lubrication milling of hardened cold work tool steel	Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B - Journal of Engineering Manufacture	2009, vol.223(no.B1)
102	BaoYun Qi Ning He Liang Li Wei Zhao	博士生 教授 教授 副教授	052	Investigation on White Layer Formation in PCBN Hard Turning GCr15	第十届切削与先进制造技术学术会议	2009-11
103	李亮 包杰 何宁	教授 硕士生 教授	052	Application of acoustic emission sensor for detecting tool breakage in micro milling	多材料微制造(4M) 2009国际会议	2009-09
104	丁文锋 徐九华 陈珍珍 程 泽 傅玉灿	副教授 教授 博士生 硕士生 教授	052	A study on effects of TiB2 contents on reactive products and compressive strength of brazed CBN grains	Surface and interface analysis	2009, 41(3): 238-243
105	丁文锋 徐九华 陈珍珍 苏宏华 傅玉灿	副教授 教授 博士生 副教授 教授	052	Preparation of Brazed CBN Abrasive Tools using Composite Fillers of AgCuTi Alloy and TiB2 Particles	Advanced Materials Research	2009, 76-78: 131-136
106	丁文锋 徐九华 陈珍珍 杨长勇 傅玉灿	副教授 教授 博士生 博士生 教授	052	Microstructure characteristics of CBN/steel joints brazed with TiB2 modified active filler	Materials Science and Technology	2009, 25 (12):1448-1452
107	杨长勇 徐九华 丁文锋 陈珍珍 傅玉灿	博士生 教授 副教授 博士生 教授	052	Effect of cerium on microstructure, wetting and mechanical properties of Ag-Cu-Ti filler alloy	Journal of Rare Earth	2009, 27(6): 1051-1055
108	陈 燕 徐鸿钧 傅玉灿 苏宏华	副教授 教授 教授 副教授	052	Effect of Ti Addition on Shear Strength of Brazing Diamond and Ag Based Filler Alloy	Key Engineering Materials	2009, 416: 264-268
109	陈 燕 徐九华 傅玉灿 苏宏华 丁文锋	副教授 教授 教授 副教授 副教授	052	Finite Element Analysis of Residual Stress in Diamond/Steel Brazed Joint	Materials Science Forum	2009, 626-627: 195-200
110	陈 燕 徐鸿钧 傅玉灿 苏宏华	副教授 教授 教授 副教授	052	Ni-Cr 合金真空钎焊金刚石的表面石墨化	焊接学报	2009年30卷9期

111	霍文国 徐九华 傅玉灿	博士生 教 授 教 授	052	Grinding Force and Surface Integrity on Dry Belt Grinding of TA15 Titanium Alloys	Key Engineering Materials	2009, 416: 269-273
112	詹伟强 苏宏华 傅玉灿 张 贝 徐九华	硕士生 副教授 教 授 博士生 教 授	052	Li-Ti铁氧体陶瓷精密磨削的试验研究	中国超硬材料技术发展论坛论文集	2009年10月
113	苏宏华 傅玉灿 徐九华 丁文锋 徐鸿钧	副教授 教 授 教 授 副教授 教 授	052	Porous Metal Bond Matrix with High Porosity and Large Pore Size Fabricated Using Pore-forming Agent	Key Engineering Materials	2009, 416: 279-283
114	陈珍珍 徐九华 丁文锋 杨长勇 傅玉灿	博士生 教 授 副教授 博士生 教 授	052	TiN颗粒增强AgCuTi合金钎焊CBN磨粒的界面微结构	稀有金属材料与工程	2009, 38(8): 1398-1401
115	刘 鹏 徐九华 傅玉灿	博士生 教 授 教 授	052	Tool Wear and Surface Integrity in High Speed Milling of Forging and Cast TA15 Alloys with Coated Carbide Tools	Materials Science Forum	2009, 626-627: 189-194
116	周 恒 傅玉灿 陈 燕 赫青山	博士生 教 授 副教授 博士生	052	多层钎焊金刚石砂轮干打磨钛合金的试验研究	材料科学与工艺	2009年17卷增刊1
117	田 霖 徐九华 苏宏华 张 贝	硕士生 教 授 副教授 博士生	052	金刚石砂轮磨削铁氧体的表面粗糙度与形貌分析	金刚石与磨料磨具工程	2009, 2: 26-30
118	范 敏 苏宏华 丁兰英	硕士生 副教授 博士生	052	涂敷六方氮化硼的电镀CBN磨头磨削钛合金的试验研究	中国超硬材料技术发展论坛论文集	2009年10月
119	危卫华 徐九华 傅玉灿 杨树宝 侯红亮 王耀奇 李志强	博士生 教 授 教 授 博士生	052	置氢钛合金TC4的切削加工性研究	南京航空航天大学学报	2009, 41(5): 633-638
120	马 可 徐鸿钧 傅玉灿	博士生 教 授 教 授	052	The Effect of a Rotating Heat Pipe in a Brazed Diamond Grinding Wheel on Grinding Temperature	Key Engineering Materials	2009, 416: 274-278
121	张 华 徐家文 王占明	博士生 教 授 讲 师	052 052 理学院	Investigation of a novel hybrid process of laser drilling assisted with jet electrochemical machining	Optics and Lasers in Engineering	2009, v 47, n 11
122	鲍怀谦 徐家文	博士生 教 授	052	超纯水微细电解加工的可行性研究	哈尔滨工业大学学报	2009, 41(5)
123	张 华 徐家文 王占明 袁立新	博士生 教 授 讲 师 博士生	052 052 理学院 052	喷射液束电解——激光复合加工可行性研究	中国机械工程	2009, 20(8)
124	吴建民 徐家文	博士生 教 授	052	数控电解加工整体叶轮阴极三维流场数值模拟	中国机械工程	2009, 20(7)

125	丁仕燕 徐家文	博士生 教授	052	数控超声磨削陶瓷叶片型面刀位轨迹计算	哈尔滨工业大学学报	2009,41(3)
126	吴建民 徐家文	博士生 教授	052	基于CFD技术的数控电解加工流场数值模拟	系统仿真学报	2009,21(1)
127	王福元 徐家文 赵建社 葛媛媛	博士生 教授 副教授 硕士生	052	电场和流场数值模拟的电化学加工阴极设计	哈尔滨工业大学学报	2009,41(7)
128	吴建民 徐家文	博士生 教授	052	电解加工阴极空间运动及其对成形规律的影响	华南理工大学学报 (自然科学版)	2009,37(4)
129	张 华 徐家文 王占明 袁立新	博士生 教授 讲师 博士生	052 052 理学院 052	喷射液束电解——激光复合加工工艺试验研究	航空学报	2009,30(6)
130	吴小康 徐家文	硕士生 教授	052	利用UG动态装配实现数控电解加工过程模拟	哈尔滨工业大学学报	2009,41(11)
131	吴 锐 徐家文 赵建社 吴建民	博士生 教授 副教授 博士生	052	基于叶片扭角分析的整体叶轮展成电解加工运动设计	华南理工大学学报 (自然科学版)	2009,37(11)
132	张 华 徐家文 王占明	博士生 教授 讲师	052 052 理学院	镍基高温合金喷射液束电解——激光复合加工试验研究	材料工程	2009,4
133	吴 锐 徐家文 赵建社	博士生 教授 副教授	052	基于间隙特性的数控展成电解加工效率	中国机械工程	2009,20(3)
134	朱昌洪 朱永伟 邵建兵 陈拥军	硕士生 教授 硕士生 硕士生	052	化学镀纳米金刚石/镍复合镀层制备及其摩擦学性能	中国表面工程	2009, 22(4)
135	朱永伟 王军 李军 林魁	教授 硕士生 讲师 硕士生	052	固结磨料抛光垫抛光硅片的探索研究	中国机械工程	2009,9(6)
136	朱永伟 向军 沈湘黔 林魁	教授 博士生 教授 硕士生	052	有机凝胶先驱体转化法制备尖晶石型铁氧体MnFe2O4纤维	南京航空航天大学学报	2009,41(2)
137	陈拥军 朱永伟 邵建兵 朱昌洪	硕士生 教授 硕士生 硕士生	052	化学复合镀槽内流场的数字模拟	机械制造与自动化	2009,38(5)
138	李茂 朱永伟 左敦稳 李军	硕士生 教授 教授 讲师	052	偏心距在偏心抛光中对去除速率均匀性的影响	机械制造与自动化	2009,38(1)
139	王军 李军 朱永伟 林魁	硕士生 讲师 教授 硕士生	052	游离与固结金刚石磨料抛光手机面板玻璃的试验研究	金刚石与磨料磨具工程	2009, (2)
140	胡洋洋 朱 荻 李寒松 曲宁松 明平美	博士生 教授 副教授 教授 博士后	052	UV-LIGA制作微细电解阵列电极	第13届全国特种加工学术会议论文集	2009

141	刘 勇 朱 荻 曲宁松 曾永彬 黄绍服 余宏兵	博士生 教 授 教 授 讲 师 博士生 硕士生	052	镍基高温合金的微细电解加工工艺研究	第13届全国特种加工学术会议论文集	2009
142	曲宁松 钱双庆 朱 荻	教 授 博士生 教 授	052	电解转印加工平面摩擦副表面微小凹坑阵列的研究	第13届全国特种加工学术会议论文集	2009
143	王少华 朱 荻 曲宁松 曾永彬 朱 兵	博士生 教 授 教 授 讲 师 硕士生	052	微尺度线电极电解线切割技术研究	第13届全国特种加工学术会议论文集	2009
144	余胜东 朱 荻 李学磊 曲宁松 朱增伟	硕士生 教 授 博士生 教 授 副教授	052	阴极平动式摩擦辅助精密电铸的研究	电加工与模具	2009, 01
145	焦峰 曲宁松 朱增伟 李学磊	硕士生 教 授 副教授 博士生	052	复合电铸CoNiMnP-BaFe _{(12)O₍₁₉₎} 磁性复合材料工艺研究	电加工与模具	2009, 01
146	孙毅 曲宁松 李寒松 李冬林 刘建	硕士生 教 授 副教授 博士生 硕士生	052	微小群孔阵列的照相电解加工技术研究机械	制造与自动化	2009, 02
147	谢文清 朱 荻 曲宁松 王 维	硕士生 教 授 教 授 博士生	052	管电极电解加工监控系统的设计与试验研究	机械制造与自动化	2009, 04
148	刘向蕾 朱 荻 曾永彬 刘 勇 黄绍服	硕士生 教 授 讲 师 博士生 博士生	052	电解磨削复合加工精密扩孔研究	电加工与模具	2009, 02
149	周 峰 朱 荻 明平美 胡洋洋	硕士生 教 授 博士后 博士生	052	UV-LIGA技术制备大厚度高开孔率精细金属网板	精细化工	2009, 06
150	宋 曼 曲宁松 钱双庆 李寒松 杨培剑	硕士生 教 授 博士生 副教授 硕士生	052	微小凹坑阵列的电解转印加工试验研究	电加工与模具	2009, 05
151	明平美 朱 荻 周 锋 胡洋洋 曾永彬	博士后 教 授 硕士生 博士生 讲 师	052	用UV-LIGA技术制造大通孔率精细镍网(英文)	光学精密工程	2009, 06
152	张剑剑 朱 荻 李寒松	硕士生 教 授 副教授	052	基于数字图像处理技术的微小群孔快速检测系统	传感器与微系统,	2009, 06
153	田宗军 王东生 沈理达	副教授 博士生 讲 师	052	TiAl合金表面激光重熔陶瓷涂层组织及耐磨性能	南京航空航天大学学报	2009,41(3)
154	田宗军 王东生 沈理达	副教授 博士生 讲 师	052	等离子喷涂纳米Al ₂ O ₃ -13TiO ₂ 陶瓷涂层研究	稀有金属材料与工程	2009,38(10)

155	田宗军 王桂峰 黄因慧	副教授 博士生 教 授	052	金属镍电沉积中枝晶的分形生长	中国有色金属学报	2009,19(1)
156	刘志东 王振兴 李建军	教 授 硕 士 硕 士	052	基于复合工作液的低速运丝电火花 线切割 喷液极间流场研究	电加工与模具	2009,(4)
157	刘志东 汪 炜 邱明波	教 授 硕 士 博士生	052	太阳能硅片电火花电解复合切割制 绒机理研究	太阳能学报	2009,30(5)
158	刘志东 邱明波 汪 炜	教 授 博士生 教 授	052	太阳能硅片切割技术的研究	电加工与模具	2009,(3)
159	刘志东 赵丹 田宗军	教 授 硕 士 副教授	052	钛合金等离子喷涂纳米陶瓷涂层激 光重熔试验研究	应用激光	2009,29(1)
160	刘志东 邱明波 汪 炜	教 授 硕 士 副教授	052	太阳能级硅高效放电电解复合切割 制绒一体化研究	电加工与模具	2009,(6)
161	沈理达 田宗军 黄因慧	讲 师 副教授 教 授	052	基于激光重熔的纳米陶瓷颗粒改性 喷涂层的耐磨性研究	粉末冶金技术	2009,27(1)
162	宫 凯 黄因慧 田宗军	博士生 教 授 副教授	052	块体多孔金属镍的逐层扫描喷射电 沉积制备	材料工程	2009,(8)
163	王东生 田宗军 沈理达	博士生 副教授 讲 师	052	Microstructural characteristics and formation mechanism of Al2O3-13wt.%TiO2 coatings plasma-sprayed with nanostructured agglomerated powders	Surface & Coatings Technology	2009,203(10-11)
164	王东生 田宗军 沈理达	博士生 副教授 讲 师	052	Influences of laser remelting on microstructure of nanostructured Al2O3- 13wt.%TiO2 coatings fabricated by plasma spraying	Applied Surface Science	2009,255(8)
165	王东生 田宗军 沈理达	博士生 副教授 讲 师	052	Preparation and characterization of nanostructured Al2O3- 13wt.%TiO2 coating by plasma spraying	Rare Metals	2009,28(5)
166	王东生 田宗军 沈理达	博士生 副教授 讲 师	052	等离子喷涂纳米复合陶瓷涂层的组 织结构及其形成机理	中国有色金属学报	2009,19(1)
167	王东生 田宗军 沈理达	博士生 副教授 讲 师	052	等离子喷涂纳米团聚体粉末熔化过 程数值模拟	中国机械工程	2009,20(4)
168	王东生 田宗军 沈理达	博士生 副教授 讲 师	052	TiAl 合金表面激光重熔复合陶瓷涂 层温度场数值模拟及组织分析	中国激光	2009,36(1)
169	王东生 田宗军 沈理达	博士生 副教授 讲 师	052	TiAl 合金表面激光重熔热障涂层组 织及抗高温氧化性能	功能材料	2009,40(4)
170	王东生 田宗军 陈志勇	博士生 副教授 硕 士	052	TiAl 合金表面激光重熔等离子喷涂 MCrAlY涂层研究	材料工程	2009,(7)
171	王东生 田宗军 沈理达	博士生 副教授 讲 师	052	激光重熔纳米Al2O3~13wt%TiO2陶 瓷涂层组织及性能	稀有金属材料与工程	2009,38(9)

172	王东生 田宗军 陈志勇	博士生 副教授 硕士生	052	TiAl合金表面抗高温氧化涂层研究	中国腐蚀与防护学报	2009,29(1)
173	范晖 田宗军 黄因慧	博士生 副教授 教授	052	Fundamental Experiment of Laminated Templates Electro-deposition in Manufacturing Metal Part	Key Engineering Materials	2009,392-394
174	范晖 田宗军 黄因慧	博士生 副教授 教授	052	叠层模板电沉积中沉积均匀性的实验研究	华南理工大学学报	2009,37(9)
175	王桂峰 黄因慧 田宗军	博士生 教授 副教授	052	点阳极射流电沉积中三维枝晶的生长	电镀与环保	2009,29(4)
176	王桂峰 黄因慧 田宗军	博士生 教授 副教授	052	点阳极射流电沉积中的枝晶分形生长	材料工程	2009,29(4)
177	李建军 刘志东 田宗军	硕士生 教授 副教授	052	基于复合工作液的高压喷液电火花线切割实验分析	模具制造	2009,(1)
178	李建军 刘志东 程国柱	硕士生 教授 硕士生	052	硬质合金加工中的电火花多次切割工艺研究	电加工与模具	2009,(2)
179	刘伦乾 田宗军 王东生	硕士生 副教授 博士生	052	激光重熔对TiAl合金表面等离子喷涂热障涂层耐热腐蚀性能的影响	热处理技术与装备	2009,30(5)
180	徐安阳 刘志东 张艳	硕士生 教授 硕士生	052	钛合金电火花多次切割表面气体强化研究	电加工与模具	2009,(4)
181	毕勇 刘志东 邱明波	硕士生 教授 博士生	052	太阳能发电用P型单晶硅放电切割特性研究	硅酸盐通报	2009,28(6)
182	毕勇 刘志东 邱明波	硕士生 教授 博士生	052	进电方式对P型硅极间电阻影响的试验研究	电加工与模具	2009,(5)
183	王振兴 刘志东 田宗军	硕士生 教授 副教授	052	电火花多次切割提高硬质合金表面质量的研究	航空精密制造技术	2009,45(4)
184	高雪松 黄因慧 田宗军	博士生 教授 副教授	052	纳米TiO ₂ 在Al ₂ O ₃ 涂层中的特征及作用机理	材料工程	2009,(12)
185	高雪松 黄因慧 田宗军	博士生 教授 副教授	052	激光烧结镍基高温合金的深过冷定向凝固研究	红外与激光工程	2009,38(增刊)

Si_3N_4 陶瓷轴承 NCD 涂层制备中的温度场模拟

杨春^{1,2}, 卢文壮^{1,2}, 左敦稳¹, 徐锋¹, 任卫涛¹

(1. 南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016;

2. 南京航空航天大学 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘 要: 纳米金刚石 (NCD) 薄膜涂层由于优异的力学和摩擦学性能, 是一种理想的轴承涂层材料。在用 HFCVD 方法制备 NCD 涂层的过程中, 衬底温度是重要参数之一。首先设计了一种适合轴承内外圈 NCD 涂层制备的热丝夹持装置, 其次分析了 HFCVD 系统的热交换过程, 并建立了相应的衬底温度场的三维有限元模型。在此模型基础上具体讨论了热丝数目、温度、热丝到衬底距离等因素对衬底温度大小及均匀性的影响。结果表明, 由于衬底相对尺寸较小并且考虑了衬底内部的热传导, 各参数的变化对衬底温度大小有明显影响, 但对衬底温度均匀性影响不大。结果为轴承 NCD 涂层的制备提供了理论基础。

关键词: 陶瓷轴承; 热丝法; 纳米金刚石涂层; 温度场; 有限元分析

中图分类号: TH133.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1671-5276(2009)03-0016-03

FEA Simulation on Temperature Distribution during the NCD Film Deposition on Si_3N_4 Bearings

YANG Chun^{1,2}, LU Wen-zhuang^{1,2}, ZUO Dun-wen¹, XU Feng¹, REN Wei-tao¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Nano-crystalline diamond (NCD) film is an ideal kind of bearing coating, this is attributed to its preeminent mechanical and tribological properties. The substrate temperature is one of the most important factors during growing NCD film by using HFCVD method. A new kind of holding device for growing NCD film on bearings is designed firstly. Then three dimensions finite element models are built up. The effect on the hot filament temperature, the substrate-filament distance, the number of filaments is discussed. Because of the effect on three dimensions thermal conduction of substrate, the temperature is more uniform than those in pure heat radiation system and all of the deposition parameters have little effect on the uniformity of the substrate temperature. The results provide the basis for high quality NCD film preparation on bearings.

Key words: ceramic bearing; HFCVD; NCD film; temperature field; FEA

0 引言

轴承涂层材料有很多, 主要有陶瓷类和类金刚石等, 此外还有生物材料涂层、有机和无机材料的复合涂层。其中常用来改善基体摩擦学性能的有陶瓷类和类金刚石类。由于纳米金刚石 (nano-crystalline diamond, NCD) 膜有很强的抗腐蚀特性 (尤其在真空中), 并且有卓越的力学和摩擦学性能, 可以说是一种理想的涂层材料。尤其对氮化硅材料来说, 由于氮化硅和金刚石的热膨胀系数很接近, 在镀膜过程中产生的应力就比较少, 薄膜和基体结合力就比较好, 这对提高金刚石涂层轴承寿命很重要^[1-2]。

目前制备 NCD 膜的方法有很多种, 其中热丝法 (HFCVD) 由于其装置工艺简单, 易于沉积大面积高品质的金刚石膜并且适用于曲面衬底, 目前被广泛应用^[3-4]。大量研究表明, 衬底温度是影响 HFCVD 法制备的 CVD 金刚石

膜品质的关键因素, 因此国内外学者对金刚石薄膜制备过程中的温度场进行了大量实验和数值仿真研究。但前人的研究基本都集中于平面衬底, 并且进行了很多简化, 对曲面衬底温度分布的研究很少见^[5-6]。相对于平面衬底而言, 曲面衬底由于冷却和温度测量上的困难, 衬底温度场的数值研究更为重要。现使用有限元数值模拟方法, 建立了轴承内外圈制备 NCD 膜的三维有限元模型, 并在此基础上对衬底温度场进行了系统研究。

1 热丝夹持装置及理论建模

1.1 热丝夹持装置设计

由于现有设备只适合于平面衬底上生长金刚石涂层, 所以需设计一套适合于 $\varnothing 10\text{ mm}$ 轴承内外圈生长 NCD 膜的热丝夹持及衬底支撑装置 (图 1, 图 2)。支座由螺母固

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No: 50605032); 江苏省自然科学基金资助项目 (编号分别为: BK2006189 和 BK2007193)。

作者简介: 杨春 (1984—), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 研究方向为计算机智能加工。

定于水冷支架上,热丝由支座处的一对带槽锥面配合夹持,轴承内圈套于 $\varnothing 10\text{ mm}$ 的钼光杆上,外圈则由一对中空的钼块夹紧置于原先生长平面膜的水冷工作台上,除轴承为氮化硅外图中所有零件材料均为钼。

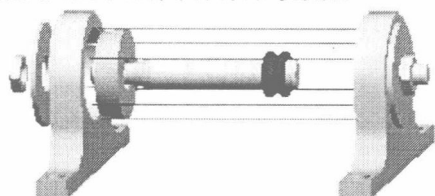


图 1 轴承内圈支撑及热丝夹持装置

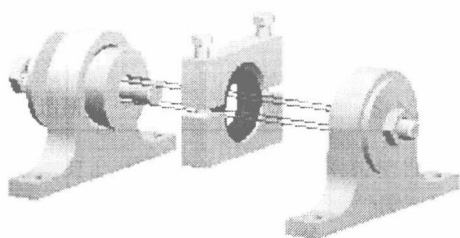


图 2 轴承外圈支撑及热丝夹持装置

1.2 理论建模

反应室内能量的传递十分复杂,主要传递方式有:1)热丝、衬底、炉壁三者之间的辐射换热;2)流动气体与热丝、衬底、炉壁之间的对流换热;3)气流内部的热传导作用;4)衬底与衬底支架的热传导;5)衬底工作台与冷却水的强制对流换热;6)化学反应产生的热量。通过前人对平面衬底温度场的研究可知:由于炉内气压很低,并且反应气体流速很慢,通过气体热传导传递给衬底的能量相对于热辐射对衬底的影响可以忽略,高温热丝的辐射,是衬底能量的主要来源。衬底的间接水冷及衬底和支撑体之间的接触热阻对衬底温度的影响也是不能忽略的。

热辐射是通过电磁波的方式传递能量的过程,由 Stefan-Boltzman 定律可得物体单位时间内发出的热辐射热量:

$$\phi = \epsilon S \sigma T^4 \quad (1)$$

式中:Stefan-Boltzman 恒量 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$;

S ——辐射表面积, m^2 ;

ϵ ——实际物体的辐射率,或称为黑度,它的数值在 0~1 之间;

T ——黑体的热力学温度, K 。

由式 (1) 可知辐射热量与热力学温度成四次方关系,是高度非线性的。

由于外圈轴承支撑装置直接置于水冷工作台上,因此需要考虑工作台的水冷换热及衬底、衬底夹持装置、工作台之间的接触热阻。水冷换热系数与接触热阻的计算取值参考文献,并适量修正^[7-8]。

在对系统理论分析的基础上,考虑热丝与衬底之间的热辐射,衬底内部及衬底与夹持装置的热传导,衬底水冷换热,使用 Ansys 进行有限元建模如图 3 和图 4 所示。轴承外圈夹持装置中两个螺纹孔进行了简化处理,按照实际

情况进行填充。

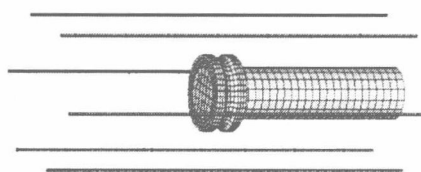


图 3 轴承内圈计算有限元模型

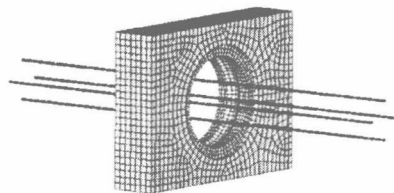


图 4 轴承外圈计算有限元模型

2 结果与讨论

2.1 轴承内圈温度场分析

轴承内圈的工作表面(与滚珠接触表面)为需生长 NCD 涂层面,主要分析此面的温度场分布。图 5 与图 6 分别为不考虑与考虑衬底热传导时计算得到的衬底上表面温度取值路径 1。

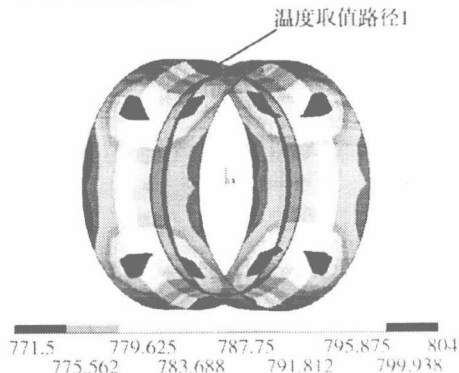


图 5 不考虑热传导时的衬底温度场

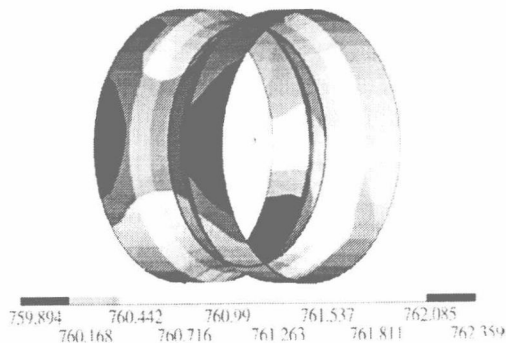


图 6 考虑热传导时的衬底温度场

的温度场分布图,参数为:热丝数目 $n=6$,热丝温度 $t_f=2400\text{ }^{\circ}\text{C}$,热丝到衬底外侧圆柱面距离 $H_s=8\text{ mm}$ 。由图 5 可以看出,不考虑衬底内部热传导时,衬底温度变化范围为 $771.5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 804\text{ }^{\circ}\text{C}$,温差达到 $32.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。衬底温度最大值出现在热丝正下方轴承内圈槽边缘处,因为此处的离热丝距离最近且居中,辐射角系数比较大。而在考虑了衬底的热传导之后,衬底温度变化范围为 $759.9\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 762.36\text{ }^{\circ}\text{C}$,温差仅 $2.46\text{ }^{\circ}\text{C}$,可以说衬底温度是均匀的。这主要因为一方面热丝阵列面与分析表面是同轴回旋面(图 3)且热丝长度(80 mm)比轴承内圈宽度(8 mm)大得多,衬底各处接受热丝的辐射能量相差不多,另一方面衬底的热传导也进一步使温度趋于均匀。因此可以看出,用本装置制备 NCD 涂层时衬底温度均匀性完全满足要求,主要考虑采

用不同参数时衬底温度的大小。因此在沟槽底部设置环形取值路径 1(图 5)来查看衬底表面周向温度。

图 7 为不同沉积参数下的路径 1(图 5)上的温度计算值。结果显示不同参数下路径 1 上的温度都很均匀,一周温差在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。图 7(a)为 $r=0.3\text{ mm}$, $t_f=2400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $n=6$ 时,热丝到衬底的距离对衬底温度影响的计算结果。热丝到衬底距离 H_s 每增加 1 mm ,衬底温度减少约 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。图 7(b)则显示 $r=0.3\text{ mm}$, $t_f=2400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $H_s=8\text{ mm}$ 时衬底温度随着热丝数目的增加有显著上升。衬底温度上升幅度随着热丝基数的增加而略有减小, $n=4$ 到 $n=5$ 时衬底温度 t_s 上升 $48\text{ }^{\circ}\text{C}$,而 $n=6$ 到 $n=7$ 时, t_s 上升约 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。 $r=0.3\text{ mm}$, $H_s=8\text{ mm}$, $n=6$ 时,热丝温度每上升 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$,衬底温度相应上升约 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ [图 7(c)]。

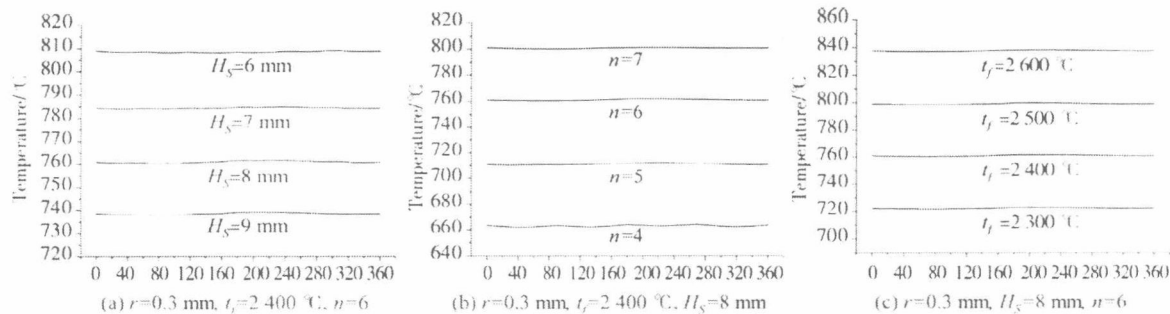


图 7 不同沉积参数对衬底温度的影响

2.2 轴承外圈温度场分析

图 8 与图 9 分别为不考虑与考虑衬底热传导时计算得到的轴承外圈内侧带内槽表面的温度场分布图,参数为热丝数目 $n=3$,热丝温度 $t_f=2300\text{ }^{\circ}\text{C}$,热丝到衬底外侧圆柱面距

离 $H_s=6\text{ mm}$ 。由图可以看出两种情况下衬底温度场的分布趋势一致,不过单纯考虑热辐射时温度变化范围为 $707.57\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 852.81\text{ }^{\circ}\text{C}$,在考虑了衬底热传导之后温度变化范围为 $764.34\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 765.73\text{ }^{\circ}\text{C}$,衬底温度均匀性大大提高。在内圈沟槽底部设置环形取值路径 2(图 8)来查看周向温度。

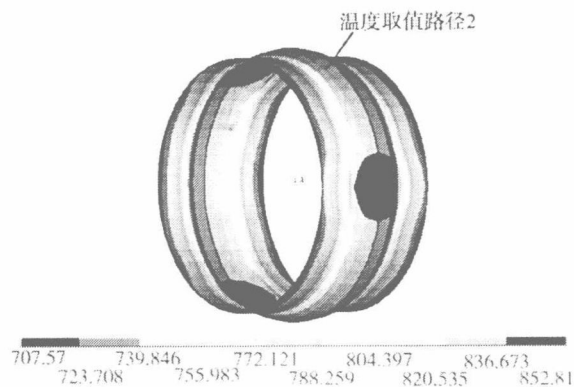


图 8 不考虑热传导时的衬底温度场

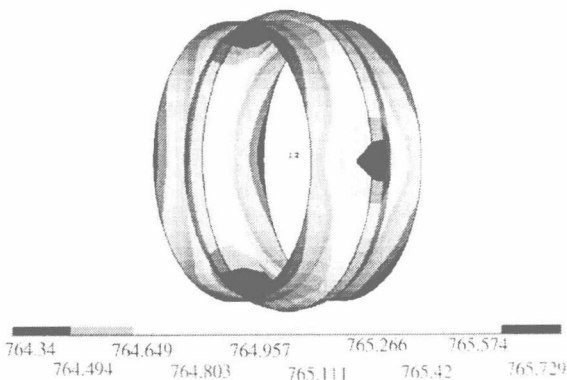


图 9 考虑热传导时的衬底温度场

图 10 为不同沉积参数下路径 2 上的温度计算值。可以看出不同参数下路径 2 上的温度都很均匀,一周温差在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。图 10(a)为 $r=0.3\text{ mm}$, $t_f=2200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $n=3$ 时,热丝到衬底的距离对衬底温度影响的计算结果,与图 7(a)对比可以看出此处热丝到衬底距离 H_s 对衬底温度的影响很小,主要是因为热丝穿过轴承外圈的内径(图 4),改变热丝到衬底的距离对辐射角系数的影响很小。热丝数目对衬底温度的影响则和内圈一致,热丝数目 $n=2$ 到 $n=3$ 时衬底温度 t_s 上升

$90\text{ }^{\circ}\text{C}$,而 $n=4$ 到 $n=5$ 时 t_s 上升约 $57\text{ }^{\circ}\text{C}$ [图 10(b)]。当 $r=0.3\text{ mm}$, $H_s=6\text{ mm}$, $n=3$ 时,热丝温度每上升 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 衬底温度相应上升约 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ [图 10(c)],基本与外圈一致。

3 结论

a) 本文的三维有限元模型更接近实际沉积系统。(下转第 36 页)