

中图分类号: TG662

论文编号: 1028705 07-1040

学科分类号: 080201

博士学位论文

磨擦辅助精密电铸技术的 研究与应用

研究生姓名 朱 增 伟

学科、专业 机械制造及其自动化

研究 方 向 特种加工技术

指 导 教 师 朱 荻 教授

南京航空航天大学

研究生院 机电学院

二〇〇七年十一月

中图分类号: TG662
学科分类号: 080201

论文编号: 1028705 07-1040

博士学位论文

磨擦辅助精密电铸技术 的研究与应用

研究生姓名	朱 增 伟
学科、专业	机械制造及其自动化
研究 方 向	特种加工技术
指 导 教 师	朱 荻 教授

南京航空航天大学
研究生院 机电学院
二〇〇七年十一月

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

The Graduate School

College of Aeronautics and Astronautics

Research and Application of Abrasive-assisted Precision Electroforming

A Thesis in

Mechanical Engineering

by

Zhu Zeng-Wei

Advised by

Professor Zhu Di

Submitted in Partial Fulfillment

of the Requirements

for the Degree of

Doctor of Philosophy

Nov, 2007

承诺书

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

本人授权南京航空航天大学可以有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅，可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

(保密的学位论文在解密后适用本承诺书)

作者签名： 朱增伟

日 期： 2007 年 11 月

摘 要

电铸技术根据电化学沉积原理,通过尺度极其微小的金属离子在阴极表面还原结晶而成形零件,具有复制精度高、重复精度高、材料性能可控等优点,目前已经成为现代制造业,尤其高科技领域不可或缺的一种先进制造技术,在航天、航空、兵器、电子等领域有着重要应用。但是,在现有的电铸技术中仍然存在着一些关键问题难以解决,如针孔、麻点和结瘤等缺陷、晶粒粗大、生产周期长等。这些问题的存在会导致电铸零件性能下降、电铸生产率降低、甚至零件报废等后果,严重制约着电铸技术的发展。

本文提出磨擦辅助精密电铸技术,即在金属电沉积的同时,采用不导电的游离粒子对正在生长的沉积层表面进行微量磨削,同时影响电沉积过程,以提高电铸层质量和电铸速度。本文通过理论分析和试验研究,探索磨擦辅助电铸的机理,重点揭示游离粒子磨擦对电铸层表面质量、组织结构、材料性能及电铸速度的影响规律;研制磨擦辅助精密电铸机床,进行磨擦辅助电铸技术的应用研究。主要研究成果包括:

1. 在磨擦辅助电铸过程中,游离粒子对沉积层表面产生微量机械磨削作用,能有效去除表面结瘤,提高表面的平整性和光亮度;同时驱除吸附气泡,减少析氢量,消除阴极析氢反应带来的针孔和麻点等缺陷。试验表明,磨擦辅助电铸技术能显著改善电铸层的表面质量,降低表面粗糙度。所制备镍电铸层表面光亮平整、无孔隙,表面粗糙度低于 $Ra\ 0.02\mu m$ 。

2. 游离粒子在金属电沉积的同时磨擦沉积层表面,有助于提高阴极过电位,使沉积层晶粒细化;影响晶粒各晶面的生长速度,使沉积层的结晶形态发生变化。试验表明,用磨擦辅助精密电铸技术所制备的镍和铜的电铸层组织结构发生明显变化。以镍电铸层为例,各晶面的衍射强度降低,择优程度明显改变,晶粒尺寸显著减小,制备出晶粒小于 $80\ nm$ 的组织均匀致密的镍电铸层。

3. 与常规电铸技术相比,磨擦辅助电铸技术所制备电铸层的材料性能显著提高。电铸镍的显微硬度和抗拉强度分别提高 90% 和 130% 。电铸铜的显微硬度和抗腐蚀性能均明显提高。

4. 游离粒子贴近沉积层表面作复杂的随机运动,能有效减薄扩散层厚度,增大极限电流密度,从而提高电铸速度。在电铸镍试验中采用的电流密度比常规电铸高一倍以上,电铸速度大幅提高。

5. 研制出新型精密电铸机床。采用双立柱龙门Ⅱ型-C型复合结构布局,结合阴极运动机构和外置沉积单元的设计,实现零件的磨擦辅助精密电铸成形。提出象形阳极筐技术,建立有限元模型,对阳极轮廓进行优化设计,以提高阴极表面电场分布的一致性,使电铸层厚度和组织结构均匀。

6. 结合液体火箭发动机和破甲弹的发展需求,开展其关键零部件的制造技术研究。

(1)采用磨擦辅助精密电铸技术成功制造出带冷却通道的火箭发动机推力室身部样件。所电铸的镍外壁厚度均匀、表面光亮平整,实现了大壁厚零件的一次性电铸成形,电铸周期大幅度缩短。

(2)采用磨擦辅助精密电铸技术成功制造出破甲弹镍药型罩和铜药型罩。性能测试表明,所制造镍药型罩的破甲性能优于目前我国武器装备中常用的铜药型罩。静破甲试验表明,所制造铜药型罩的破甲性能优于旋压制成的同型号破甲弹。

关键词: 精密电铸, 游离粒子, 微量磨削, 摩擦, 电铸机床, 应用

Abstract

Electroforming is a way of manufacturing components by electrodeposition, in which extremely minute metal ions are reduced and electrocrystallized as electroforming deposit on a cathode surface. It has many advantages, such as high fidelity of shape reproduction, high repetitive forming accuracy, controllable material property, etc. Now it has been successfully employed in the areas of aerospace, weapon, electronics and otherwise. However, in traditional electroforming process there are still some disadvantages that are difficult to overcome, such as pinholes, pits, nodules and other defects, coarse grain, long production cycle, and so on. These disadvantages can deteriorate the properties of electroformed part, decrease the productivity, and even lead to waste products. As a result, the development of electroforming is seriously restricted.

In this dissertation, a new electroforming technology, namely Abrasive-assisted Precision Electroforming (APEF), has been developed. In this new technology, non-conducting free abrasive particles are forced to polish the cathode surface while electrodepositing. The particle polishing can help to improve the quality of deposits and increase electroforming rate. The mechanism of APEF has been researched theoretically and experimentally. The research is focused on the influence mechanism of particle polishing on the deposit's surface, microstructure, properties and electroforming rate. An APEF machine has been developed, and the applications of APEF have been researched. The main conclusions in this dissertation include:

1. During APEF process, the polishing with particles can effectively remove the surface nodules by micro grinding, increase the surface smoothness and brightness. Simultaneously, the polishing can remove the adhered bubbles, reduce the volume of evolved hydrogen, and eliminate the pinholes and pits caused by hydrogen evolution. The experimental results showed that APEF could observably improve the surface quality, reduce the degree of roughness, and produce a compact, smooth and bright nickel deposit with surface roughness of less than $Ra\ 0.02\ \mu m$.

2. The polishing with particles can refine grains by increasing the cathodic polarization and change the structure of deposits by affecting the growth of crystallites. It was found that the microstructure of nickel and copper deposits produced by APEF significantly changed in contrast with the traditional electroforming technology. For

the nickel deposit, each diffraction peak' intensity reduced distinctly, the preferred orientation degree changed evidently, and the grains were substantially refined. Nanocrystalline nickel with grain size of less than 80nm was achieved.

3. Comparing with the deposits produced by traditional electroforming technology, the deposits produced by APEF exhibited better properties. For the nickel deposit, microhardness increased 90% and tensile strength increased 130%. The copper deposit also represented higher microhardness and better corrosion resistance.

4. The free particles that touch tightly the cathode surface move with random directions, and substantially diminish the thickness of diffusion layer, which will lead to the increase of the limiting current density and electroforming rate. For nickel electroforming, the current density used in APEF was at least one time higher than that one of traditional method, and the electroforming rate increased significantly.

5. A new precision electroforming machine was developed. A double vertical column Π style-C style hybrid structure was chosen as the main mechanical structure. A cathode movement device and a deposition unit were designed to guarantee the implement of APEF technology. A unique anode unit was built, which profile was optimized by using Finite Element Method (FEM), to effectively uniform the distribution of current density on cathode surface and improve the quality of deposits.

6. Based on the requirments for development of liquid propellant rocket engine and shaped charge warhead, the manufacturing technique of their key parts was researched.

(1) Samples of rocket engine thrust chamber with cooling channels was successfully manufactured by APEF. The thick nickel outer wall of the samples was electroformed without interruption. The wall surface was smooth, mirror-like and the wall thickness presented excellent uniformity. The electroforming cycle was significantly shortened.

(2) A nickel shaped charge liner and a copper one was electroformed by APEF. The results of performance tests showed that the nickel liner manufactured by APEF appeared more excellent penetration performance than the copper one in the weapons equipped for the military in our country. The results of penetration tests showed that the penetration performance of the copper liner manufactured by APEF was better than the one manufactured by spin forming.

Keywords: Precision electroforming, Free particle, Micro grinding, Polishing, Electroforming machine, Application

符号注释表

R	:	圆柱形阴极半径
r	:	游离粒子半径
n	:	阴极转速
S_N	:	游离粒子与阴极碰撞时瞬时法向反力冲量
S_F	:	游离粒子与阴极碰撞时瞬时摩擦力冲量
m	:	游离粒子质量
v	:	碰撞前游离粒子的速度
α	:	碰撞前游离粒子的速度与平面法线夹角
ω	:	碰撞前游离粒子的自转角速度
u	:	碰撞后游离粒子的速度
α'	:	碰撞后游离粒子的速度与平面法线夹角
ω'	:	碰撞后游离粒子的自转角速度
I	:	游离粒子的转动惯量
τ_p	:	游离粒子与阴极的碰撞时间
N	:	游离粒子对阴极表面的法向压力
β	:	组成沉积层表面的假定的球面微凸体半径
δ_w	:	游离粒子与沉积层表面接触时的法向接近量
E	:	弹性模量
ν	:	泊松比
δ	:	扩散层厚度
V	:	电铸速度
K	:	电铸层的电化学当量
ρ	:	电铸层密度
i	:	阴极电流密度
i_d	:	阴极极限电流密度
I_c	:	阴极电流
M	:	扩散的克离子数
t	:	扩散时间
S	:	阴极面积
D	:	离子的扩散系数
z	:	离子的价数
F	:	法拉第常数
C	:	电铸液中的反应离子浓度

C_0	:	平衡状态下反应离子的浓度
C_s	:	阴极表面反应离子浓度
C_m	:	主体溶液反应离子浓度
Y	:	沉积层表面优势生长的突出点高度
V_m	:	摩尔体积
τ	:	突出点生长过程的诱导时间
X_{on}	:	阴极表面没有被贴近的游离粒子遮挡的区域
X_{off}	:	阴极表面被贴近的游离粒子遮挡的区域
φ	:	电极电位
φ_0	:	平衡电极电位
η_c	:	阴极过电位
η_{cj}	:	结晶过电位
V_i	:	离子反应速度
W_c	:	阴极反应活化能
W_0	:	平衡电位时的阴极反应活化能
R	:	气体常数
T	:	温度常数
C_{ad}	:	吸附原子的表面浓度
W_n	:	晶核生成速度
ΔG	:	形成晶核的活化能
γ	:	表面自由能
φ_d	:	阴极过电位
D_T	:	溶液中指定离子的扩散系数
σ	:	电铸层的强度
d	:	电铸层的平均晶粒尺寸
η	:	电流效率
ω	:	电铸层的体积电化学当量
κ	:	电铸液电导率
E_{target}	:	阳极优化设计的目标函数

目 录

第一章 绪论	1
1.1 电铸技术的基本原理与特点	1
1.2 电铸技术的发展与应用	4
1.2.1 电铸技术的发展	4
1.2.2 电铸技术的应用	7
1.3 电铸技术的研究现状	10
1.3.1 消除针孔和结瘤, 提高电铸层质量	10
1.3.2 细化晶粒, 提高电铸层材料性能	12
1.3.3 提高电铸速度, 缩短电铸周期	13
1.4 本文研究的主要内容	15
第二章 磨擦辅助精密电铸技术的实现	16
2.1 磨擦辅助精密电铸技术的基本原理	16
2.2 试验装置与试验过程	18
2.3 电铸层测试分析的仪器与方法	19
2.4 本章小结	21
第三章 游离粒子磨擦的驱氢作用	22
3.1 电铸过程的析氢效应	22
3.1.1 析氢机理分析	22
3.1.2 析氢过程分析	22
3.1.3 析氢对电铸过程的影响	23
3.2 游离粒子磨擦的驱氢原理	24
3.2.1 机械驱除吸附氢气泡	24
3.2.2 提高析氢过电位	25
3.3 磨擦辅助电铸的驱氢效果	26
3.4 本章小结	28
第四章 游离粒子磨擦的整平作用	29
4.1 磨擦辅助电铸的机械磨削过程	29
4.2 游离粒子磨擦的表面整平原理	33
4.2.1 除瘤作用	33
4.2.2 微观整平	33

4.2.3 提高电铸层的光亮度	34
4.3 磨擦辅助电铸的表面整平效果	36
4.3.1 表面粗糙度	36
4.3.2 微观形貌	37
4.4 本章小结	40
第五章 游离粒子磨擦对电铸层组织结构的影响	41
5.1 磨擦辅助电铸的电结晶过程	41
5.1.1 沉积过电位	41
5.1.2 晶粒大小	44
5.1.3 结晶形态	44
5.2 磨擦辅助电铸层的组织结构	45
5.2.1 TEM 分析	45
5.2.2 断面分析	48
5.2.3 XRD 分析	49
5.3 本章小结	54
第六章 游离粒子磨擦对电铸层材料性能的影响	55
6.1 显微硬度	55
6.2 强度	57
6.3 内应力	59
6.4 磁性能	60
6.5 抗腐蚀性	61
6.6 电铸层材料性能与组织结构的关系	63
6.6.1 力学性能与组织结构	63
6.6.2 内应力与组织结构	64
6.6.3 磁性能与组织结构	65
6.7 本章小结	67
第七章 游离粒子磨擦对电铸速度的影响	69
7.1 磨擦辅助电铸的传质过程分析	69
7.1.1 球状游离粒子的堆积与空隙	69
7.1.2 磨擦辅助电铸的传质过程	71
7.2 游离粒子磨擦对电铸速度的影响	72
7.3 大电流磨擦辅助电铸镍试验	74
7.4 本章小结	76

第八章 磨擦辅助精密电铸机床的研制	77
8.1 电铸机床的总体设计	77
8.2 电铸机床的关键结构设计	79
8.2.1 机床支撑结构与工作台设计	79
8.2.2 运动系统设计	80
8.2.3 电铸液循环系统设计	80
8.2.4 控制系统设计	81
8.3 象形阳极筐技术	82
8.3.1 电铸过程中阴极和阳极间的电场分析	82
8.3.2 基于有限元法的电铸电场求解	83
8.3.3 在 ANSYS 平台上实现的阳极优化设计	86
8.4 电铸机床的技术规格	90
8.5 本章小结	91
第九章 磨擦辅助精密电铸技术的应用研究	92
9.1 应用一：液体火箭发动机推力室	92
9.1.1 研究背景	92
9.1.2 推力室身部样件的磨擦辅助电铸	94
9.2 应用二：破甲弹药型罩	101
9.2.1 研究背景	101
9.2.2 单锥镍药型罩的磨擦辅助电铸	102
9.2.3 双锥铜药型罩的磨擦辅助电铸	104
9.3 本章小结	106
第十章 总结和展望	107
10.1 总结	107
10.2 本文的主要创新点	108
10.3 后续研究展望	108
参考文献	110
致谢	117
在学期间的研究成果及发表的学术论文	118
(一) 学术论文	118
(二) 发明专利	119
(三) 获奖情况	119
(四) 荣誉与表彰	119

图表索引

图 1.1 电铸技术的基本原理.....	2
图 1.2 电铸技术的工艺过程.....	3
图 1.3 RHEDCO 公司的槽式电铸车间	6
图 1.4 ACSES 公司生产的电铸机床和装置	7
图 1.5 精密异型的电铸零件和用于压气机转子熔模铸造的电铸铜质主模	8
图 1.6 电铸制造的反射镜和光盘原版.....	8
图 1.7 飞机天线屏蔽器的电铸镍质成型模具和电铸铜质微波波导管	9
图 1.8 LIGA 工艺制作的电火花加工电极阵列和镍微齿轮群电极腔	9
图 1.9 LIGA 工艺制作的微型马达和 EFAB 制作的自组装齿轮链.....	9
图 1.10 电铸制造的 3D 微型机械机构和由 LECD 方法加工的镍微弹簧.....	9
图 1.11 常规电铸零件表面容易产生的针孔和麻点	10
图 1.12 常规电铸零件表面常见的结瘤.....	11
图 2.1 磨擦辅助精密电铸技术的原理示意图.....	16
图 2.2 磨擦辅助精密电铸技术的实现方式示意图	17
图 2.3 试验装置示意图	18
图 2.4 试验装置实景照片	19
图 3.1 电铸层针孔的形成过程示意图.....	23
图 3.2 电铸层表面凹坑的形成过程示意图.....	23
图 3.3 游离粒子磨擦的驱氢原理示意图.....	25
图 3.4 两种镍电铸层的外观照片	26
图 3.5 延长电铸时间后两种镍电铸层的外观照片	26
图 3.6 两种铜电铸层表面状况的对比照片	27
图 3.7 磨擦辅助电铸镍层的孔隙率随电流密度和芯模表面速度的变化曲线	27
图 4.1 单个游离粒子的运动分析示意图.....	30
图 4.2 游离粒子集合体的运动分析示意图	30
图 4.3 游离粒子与阴极碰撞的运动分析	31
图 4.4 游离粒子与阴极表面的接触.....	32
图 4.5 游离粒子磨擦的除瘤原理示意图.....	33
图 4.6 游离粒子磨擦的微观整平原理示意图.....	34
图 4.7 游离粒子磨擦提高电铸层光亮度的原理示意图	35

图 4.8 磨擦辅助电铸镍层的表面粗糙度随电流密度和芯模表面速度的变化曲线	36
图 4.9 两种镍电铸层的 SEM 照片	37
图 4.10 两种铜电铸层的 SEM 照片	37
图 4.11 磨擦辅助电铸镍层的 SEM 照片	38
图 4.12 磨擦辅助电铸铜层的 SEM 照片	39
图 4.13 脉冲条件下用磨擦辅助电铸技术所制备镍电铸层的 SEM 照片	39
图 5.1 阴极表面与游离粒子形成夹缝示意图	42
图 5.2 游离粒子磨擦条件下阴极表面的电流分布示意图	42
图 5.3 电结晶过程示意图	43
图 5.4 电结晶晶体的不同晶面生长示意图	45
图 5.5 两种镍电铸层的 TEM 暗场照片	46
图 5.6 两种铜电铸层的 TEM 暗场照片	47
图 5.7 磨擦辅助电铸镍层的 TEM 照片	47
图 5.8 磨擦辅助电铸镍层的晶粒平均尺寸随芯模表面速度和电流密度的变化趋势	48
图 5.9 两种镍电铸层的断面金相照片	49
图 5.10 两种铜电铸层的断面金相照片	49
图 5.11 镍电铸层的 XRD 图 常规电铸	51
图 5.12 磨擦辅助电铸镍层各晶面的织构系数 随电流密度和芯模表面速度的变化趋势	51
图 5.13 两种铜电铸层的 XRD 图	52
图 5.14 磨擦辅助电铸铜层的 XRD 图	53
图 5.15 磨擦辅助电铸铜层各晶面的织构系数随芯模速度的变化趋势	53
图 5.16 磨擦辅助电铸镍层各晶面的织构系数随脉冲占空比的变化趋势	54
图 6.1 镍电铸层的显微硬度随电流密度的变化趋势	56
图 6.2 镍电铸层的显微硬度随芯模表面速度的变化趋势	56
图 6.3 磨擦辅助电铸镍层的显微硬度随占空比的变化趋势	57
图 6.4 磨擦辅助电铸铜层的显微硬度随芯模表面速度的变化趋势	57
图 6.5 两种镍电铸层的拉伸性能	57
图 6.6 磨擦辅助电铸镍层的强度随电流密度的变化趋势	58
图 6.7 磨擦辅助电铸镍层的强度随芯模表面速度的变化趋势	58
图 6.8 磨擦辅助电铸镍层的内应力与电流密度的关系	59
图 6.9 磨擦辅助电铸镍层的内应力与芯模表面速度的关系	60
图 6.10 两种镍电铸层的磁滞回线	60
图 6.11 在不同电流密度下用磨擦辅助电铸技术所制备镍电铸层磁滞回线的比较	61

图 6.12 在不同芯模表面速度下用磨擦辅助电铸技术所制备镍电铸层磁滞回线的比较	61
图 6.13 两种铜电铸层在 NaCl 溶液中的腐蚀速率与时间的关系曲线	62
图 6.14 两种铜电铸层在 NaCl 溶液中腐蚀 250h 后的断面照片	62
图 6.15 不同阴极表面速度下磨擦辅助电铸镍层的力学性能与组织结构的关系	64
图 6.16 不同电流密度下磨擦辅助电铸镍层的力学性能与组织结构的关系	64
图 6.17 不同阴极表面速度下磨擦辅助电铸镍层的内应力与组织结构的关系	66
图 6.18 不同电流密度下磨擦辅助电铸镍层的内应力及饱和磁化强度与组织结构的关系	66
图 6.19 不同阴极表面速度下磨擦辅助电铸镍层的饱和磁化强度与组织结构的关系	67
图 6.20 不同电流密度下磨擦辅助电铸镍层的饱和磁化强度与组织结构的关系	67
图 7.1 等径球体最紧密堆积方式及空隙	69
图 7.2 等径球体六方紧密堆积的晶胞结构示意图	70
图 7.3 磨擦辅助电铸中游离粒子的堆积形态	71
图 7.4 大电流密度下用磨擦辅助电铸技术所制备镍电铸层的实物照片	75
图 7.5 大电流密度下磨擦辅助电铸镍层的烧焦区域随电流密度和芯模表面速度的变化趋势	75
图 7.6 电铸过程中阴极表面电流密度分布的等值线图	75
图 7.7 采用高电流密度所制备镍电铸层的实物照片	76
图 8.1 磨擦辅助精密电铸机床的总体结构示意图	78
图 8.2 立式机床的支撑结构简图	79
图 8.3 转动和平动的转换机构示意图	80
图 8.4 电铸液循环过滤系统	81
图 8.5 电铸过程阴阳极间的求解区域示意图	84
图 8.6 阴阳极间区域 Ω 内有限元网格划分示意图	84
图 8.7 阳极优化设计的原理框图	86
图 8.8 火箭发动机推力室身部外壁的轮廓示意图	87
图 8.9 阳极优化前推力室身部外壁电铸阴极表面电场分布的矢量图	88
图 8.10 推力室身部外壁电铸电场的求解区域	88
图 8.11 推力室身部外壁电铸电场的求解区域 Ω 内有限元网格划分图	88
图 8.12 优化后推力室身部外壁电铸阳极轮廓示意图和对应阴极表面电场分布的矢量图	89
图 8.13 推力室身部外壁电铸阳极筐结构示意图和阳极围栏实物照片	90
图 8.14 磨擦辅助精密电铸机床实景照片	90
图 9.1 液体火箭发动机推力室简图	92
图 9.2 液体火箭发动机推力室身部的三维造型	93
图 9.3 推力室身部电铸场景照片	95

图 9.4 推力室身部外壁模拟件的电铸芯模示意图	96
图 9.5 磨擦辅助电铸推力室身部外壁模拟件的实物照片	96
图 9.6 已加工出矩形槽的推力室身部样件的不锈钢内壁	97
图 9.7 以不锈钢为内壁的推力室身部样件的电铸芯模示意图	98
图 9.8 以不锈钢为内壁的推力室身部样件的电铸芯模实物照片	98
图 9.9 电铸后以不锈钢为内壁的推力室身部样件实物照片	98
图 9.10 已加工出矩形槽的推力室身部样件的铅铜内壁	99
图 9.11 以铅铜为内壁的推力室身部样件的电铸芯模示意图	100
图 9.12 以铅铜为内壁的推力室身部样件的电铸芯模实物照片	100
图 9.13 用磨擦辅助电铸技术制造的推力室身部样件的外观图和欧洲 EADS 集团用常规电铸技术 制造的某型火箭发动机推力室身部的外观照片	100
图 9.14 电铸后以铅铜为内壁的推力室身部样件的实物照片	101
图 9.15 研制过程中部分推力室身部样件的电铸样品	101
图 9.16 某型破甲弹的结构示意图	101
图 9.17 单锥镍药型罩电铸芯模的实物照片	103
图 9.18 单锥镍药型罩的电铸场景照片	103
图 9.19 电铸单锥镍药型罩的实物对比照片	103
图 9.20 磨擦辅助电铸单锥镍药型罩的成品照片	104
图 9.21 电铸镍药型罩聚能装药结构的实物照片以及终点效果实物照片和起爆 30 μ s 时射流形态的 X 光照片	104
图 9.22 双锥铜药型罩电铸芯模的实物照片	105
图 9.23 电铸双锥铜药型罩的实物对比照片	105
图 9.24 电铸双锥铜药型罩聚能装药结构实物照片与静破甲效果实物照片	105
表 2.1 电铸液的成分和电沉积条件	19
表 5.1 两种铜电铸层各晶面的织构系数	52
表 8.1 电铸推力室身部外壁辅助电极的优化结果列表	89