

铝合金弹壳的发展歷程和研究现状

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2023.02.009

阳建君^{1,2,3} 王家虎¹
范才河^{1,3} 胡泽艺^{1,3}
欧玲^{1,3} 王博文¹

1. 湖南工业大学
材料与先进制造学院
湖南 株洲 412007
2. 中国人民解放军陆军
装甲兵学院
装备再制造技术国防科技
重点实验室
北京 100072
3. 安徽建业科技有限公司
技术中心
安徽 淮北 235000

摘要: 介绍了国内外铝合金弹壳的发展歷程和研究现状, 论述了铝合金弹壳的特点和优势, 重点介绍了目前铝合金弹壳的制备方法和工艺流程, 展望了铝合金弹壳的发展方向和應用前景。

关键词: 铝合金弹壳; 喷射成形; 表面陶瓷化处理; 微弧氧化

中图分类号: TG178.2 **文献标志码:** A

文章编号: 1674-7100(2023)02-0069-09

引文格式: 阳建君, 王家虎, 范才河, 等. 铝合金弹壳的发展歷程和研究现状[J]. 包装学报, 2023, 15(2): 69-77.

武器轻量化是单兵组合作战发展的趋势, 武器轻量化不仅可以提高军队整体的综合作战能力, 加快战场整体的作战节奏, 同时对单兵的作战能力与作战速度都有很大的提高。步兵和其他兵种主要利用轻武器在战场上进行作战, 即使在未来科技战场上, 仍将发挥其重要的作用。军用弹药装备减重对未来数字化战争有巨大的影响, 从而受到世界各国军方的广泛关注^[1-2]。

为提高单兵的携弹量, 可以从包装弹药的弹壳材质入手。传统弹壳的材质是以钢和铜为主, 而钢和铜的密度较大, 制备的弹壳较重, 且铜质弹壳的制备成本高。采用密度较小、成本较低的铝合金材料制备弹壳, 已成为各国军事领域研究的重点^[2-4]。由于传统铝合金强度较低、耐烧蚀性较差, 直接采用冷冲压和冷锻等传统成形方法制备的铝合金弹壳, 其强度、变形量、耐烧蚀性能等都无法满足要求。因此,

开发先进的铝合金材料和更加优良的弹壳制备方法, 从而获得高强度、耐烧蚀、抗爆炸冲击的铝合金弹壳, 具有重要的现实意义^[5]。

本文综述了国内外铝合金弹壳的发展歷程, 论述了铝合金弹壳的特点和制备方法, 以期能为铝合金弹壳的发展和應用提供有益参考。

1 铝合金弹壳的特点

铝合金作为新一代弹壳材料, 具有以下优点: 铝合金的塑性和韧性较好, 易于加工成形; 铝合金的密度小, 质量轻, 能大大减轻弹药的质量, 有利于武器装备轻量化发展; 铝合金表面陶瓷化处理, 形成致密的抗蚀性、抗氧化性、稳定性好的 Al_2O_3 陶瓷膜层, 使弹药的服役年限延长, 性价比高; 铝合金的弹性模量小, 有利于退壳, 对枪管的

收稿日期: 2022-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52271177); 湖南省科技创新领军人才基金资助项目(2021RC4036); 湖南省自然科学基金资助项目(2022JJ50080); 国防科技重点实验室基金资助项目(6142005200305)

作者简介: 阳建君(1985-), 男, 湖南衡阳人, 湖南工业大学讲师, 博士, 主要研究方向为铝合金表面陶瓷化处理、金属激光熔覆技术, E-mail: 125841540@qq.com

磨损较小; 铝合金主要成分铝的矿产资源丰富。因此, 铝合金弹壳在武器装备轻量化方面的应用和发展前景广阔^[3-6]。

2 国内外铝合金弹壳的发展历程

早期的弹壳一般采用黄铜为原材料, 因为铜具有较高的延展性, 容易成形, 但是铜资源匮乏, 价格昂贵。后来出现了价格便宜的钢质弹壳, 但是钢质弹壳较硬, 塑性和韧性较差, 在加工精度不够高和枪膛有沙、尘、污垢的情况下, 会与枪膛产生间隙, 造成漏气^[7]。由于弹壳的成形工艺繁琐, 需要材料具有良好的加工性能, 因此, 美国最先将目光转向轻质铝合金材料。一方面铝资源丰富, 另一方面铝合金材料的应用将大大减轻武器装备的质量, 是世界各国进行武器轻量化研究的一个重要方向^[8]。

2.1 国外的发展历程

19世纪90年代, 德国法兰克福兵工厂第一次试验了口径为7.62~10.16 mm的铝药筒, 与此同时, 德国也在试验7.9 mm口径铝弹壳。到1919年, 澳大利亚、英国和德国都对铝合金药筒进行了研究^[9-10]。

铝合金弹壳在制备过程中形成的缺陷(小孔和裂纹)使得在射击时从弹壳侧壁的小孔、裂纹泄漏出发射药气体, 造成弹壳严重烧穿破坏。针对这类问题, 美国深入研究了铝合金弹壳烧穿机制, 研发了具有优良综合性能的铝合金及其加工工艺。在20世纪70年代中期, 美国研制出了满足弹壳和药筒要求的两类铝合金: 一类是将高纯度母体铝材熔炼后进行一定加工处理, 得到高度均匀化的Al-Zn-Mg-Cu系列铝合金, 它具有良好的强度和韧性综合性能; 另一类是通过粉末冶金法得到析出相弥散分布的铝合金, 经过表面处理, 它具有弹壳要求的耐高温性能和优良的抗烧蚀能力^[11]。

直到20世纪末, 国外已经有多种子弹使用了铝合金弹壳。如CTS公司研发的37/38 mm烟雾弹、重型穿障弹和刺痛弹, 40 mm的榴弹、烟雾弹、液体和粉末穿障弹等^[12]。

2.2 国内的发展历程

我国对铝合金弹壳的研究较晚, 直到1981年才开始研究铝质弹壳材料。

刘晓霞等^[13]对某铝合金药筒在挤压过程中等效应力、应变等参数进行了分析, 结果表明随炉冷却后的坯料在挤压过程中等效应变分布更加均匀, 等

效应力峰值更小; 挤压温度越小, 应力差值越大, 其所需的挤压载荷更小。吴臣武^[14]利用非线性有限元法对弹壳发射中的结构、热动态响应进行分析, 对弹药系统及枪械结构的设计具有一定的参考作用。车浩召^[15]在有限元模型的基础上加入了封锁机构, 为铝合金子弹壳结构的进一步优化提供了理论参考。王玉松^[16]利用有限元数值模拟对7050铝合金弹壳进行了研究, 优化了塑性成形工艺, 消除了7050铝合金塑性成形过程中产生的缺陷。江长友等^[17]对不同状态的7XXX高强度铝合金弹壳的残余应力进行了系统分析, 结果表明弹壳经过退火处理后, 残余应力减少, 固溶/时效处理后, 残余应力增大。鞠治刚等^[18]对7050铝质弹壳复合涂层耐冲刷抗烧蚀性能进行了研究, 结果表明复合涂层可使整体的导热系数降低50%以上。范才河等^[19]研发出新型轻武器用高强韧耐烧蚀铝合金弹壳, 能承受瞬时膛压达400 MPa、耐瞬时高温3000℃以上, 子弹发射后弹壳内壁仍然没有发生烧蚀现象, 整个铝弹壳没有变形、开裂, 通过了高低温等多种环境下实弹射击测试。

国内现有多个团队对铝合金弹壳进行研究, 如重庆嘉陵特种装备有限公司、南京理工大学和湖南工业大学等, 对铝合金弹壳的成分设计、成形工艺、结构设计、涂层研究等都有了实际性进展。目前, 湖南工业大学范才河教授团队已成功研发出铝弹壳系列产品, 并通过某军方权威机构实弹测试验收^[13-19]。

3 铝合金弹壳制备方法

3.1 铝合金弹壳的制备流程

国内外铝合金弹壳制备流程大体分为高强韧铝合金坯料的制备、弹壳成形过程和表面处理3大部分, 如图1所示。

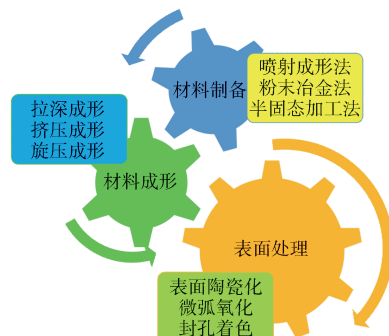


图1 铝合金弹壳制备流程

Fig. 1 The preparation process of aluminum alloy cartridge case

首先利用喷射成形法、粉末冶金法和半固态加工方法等方法获得表面质量优良、晶粒均匀、高强韧的铝合金材料；然后通过拉深成形法、旋压成形法、挤压成形法等制得铝合金弹壳；再采取表面陶瓷化处理或微弧氧化表面处理，在铝合金表面获得一层陶瓷膜层；最后进行封孔着色处理，得到综合性能优良的铝合金弹壳^[20-21]。

3.2 高强韧铝合金材料的制备方法

3.2.1 粉末冶金法

随着雾化法和还原法粉末制备技术的大力发展，可以获得大量粉体材料，从而推动了粉末冶金法制备高性能铝合金的发展。1980年前后，美国最早将粉末冶金技术用于铝合金弹壳的制造^[11]，其粉末冶金的流程如图2所示。采用还原法、雾化法和电解法等方法制备铝合金金属粉末；再将铝合金粉末经压制成形后，选择适当的烧结方法进行烧结；将烧结后的铝合金材料，根据不同的要求进行后处理，得到铝合金材料成品^[22-23]。

由于传统加工工艺具有一定的局限性，铝合金内部往往存在着各向异性。采用粉末冶金法所制得的铝合金材料，其各向异性远低于传统工艺加工的铝合金材料，这对于铝合金材料的发展具有非常重大的意义；而且粉末冶金法无需进行时效处理，工艺简单。用粉末冶金法制备的铝合金显微组织均匀、晶粒细小、机械性能良好，铝合金弹性模量得到显著提高，抗拉强度也大幅增加^[24-25]。

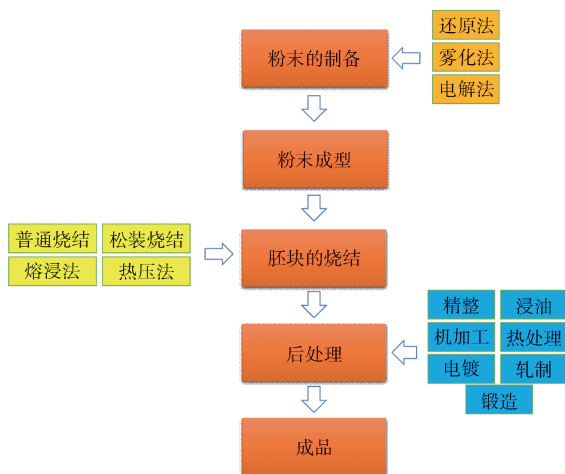


图2 粉末冶金流程图

Fig. 2 Flow chart of powder metallurgy

3.2.2 半固态加工法

半固态加工法是金属在未完全结晶时，对其进行

搅拌、激冷，得到一种液态金属母液中均匀地悬浮着一定固相组分的固液混合浆料，再根据具体的产品形状要求进行加工的方法。该方法制备的零件质量好、精度高^[26-27]。

半固态成形方式主要可分为流变成形和触变成形^[28]。流变成形是直接利用形成的半固态浆料进行加工；而触变成形则是将浆料二次加热后，再将混合浆料进行加工。在实际应用中，主要采用触变成形技术。近年来，触变成形技术在高性能锻造铝合金领域的研究和应用变得越来越深入和广泛^[29]。

目前，意大利、法国、美国和日本已经将半固态触变成形技术大量应用在 A356、A357 和其他铸造铝合金领域。但是铝合金半固态触变成形的研究尚未引起广泛关注^[30-31]。

3.2.3 喷射成形法

喷射成形快速凝固技术是利用高速激冷气流，将金属液雾化为液滴高速喷出，有的液滴在喷出过程中冷却凝固，进而形成固-液两相的雾滴，然后沉积到温度较低的基体之上，使其互相黏结、凝固，而后形成沉积坯。所制备的材料具有组织均匀、晶粒细小、成分均一和力学性能优良等特点。铝合金材料经过挤压成形后，致密性和强韧性高，显微组织为等轴晶粒，消除了宏观偏析，综合性能优良^[32-35]。因此，该方法被广泛用来制备高强韧轻质铝合金材料。

范才河等^[36]采用自行研制的 SF380 大型喷射成形设备，制备了如图3所示的 Al-Cu-Mg 合金锭，并对大应变热轧喷射成形铝合金的微观结构及力学性能进行了研究。



图3 喷射沉积铝合金锭

Fig. 3 Aluminum alloy ingot prepared by spray deposition

实验结果表明，当热轧变形 80% 时，高位错密度晶粒中的小角度晶界转变为大角度晶界，形成大

量的亚微米级动态再结晶晶粒，显著细化了晶粒组织，合金的室温拉伸强度和伸长率分别为 619 MPa 和 19.8%。

3.3 铝合金弹壳的成形工艺

3.3.1 拉深成形

拉深成形是一种利用拉深模具对平板毛坯施加外力，制备各种开口空心件的工艺。该工艺被广泛应用于铜质弹壳和钢质弹壳的制备，具有易加工、操作简单、成本低等优点^[37]。例如子弹壳、高压容器等底厚与侧壁厚不等，并且具有一定高度的工件，可采用拉深成形工艺。

一般来说，弹壳很难只通过一次拉伸就直接成形，因为这会导致侧壁变薄而发生断裂。为了保证弹壳拉伸时不发生断裂以及弹壳的质量，经过一次拉伸后需要进行退火处理，使其恢复原来的塑性，然后再进行拉伸步骤。拉伸完成后，需要进行翻边处理，去除余料；利用夹具进行车削加工，对底部进行开孔处理。完成车削加工步骤后即可进行下一步去毛刺以及倒角等工序。再进行翻边处理，翻边处理需要根据弹壳来确定模型的合理性。翻边处理之后，整个弹壳的形状尺寸都已经确定，之后只需再进行高度尺寸的确定以及去毛刺的步骤，弹壳加工完成^[38-39]。

3.3.2 挤压成形

挤压成形分为冷挤压和热挤压成形，是铝合金弹壳成形的重要方法。

挤压成形就是对金属容器中金属坯的一端施加外力，使金属材料从特定的模孔中流出，得到具有一定断面形状的零部件的成形工艺。挤压成形具有很多优点：生产范围广并且生产的灵活性较大，不管是大批量或者小批量生产皆可；生产出的产品不仅尺寸精度高，而且表面质量好。挤压成形也存在一定的局限性，挤压过程中速度比较低，金属流动不均匀；工具的耗损比较大，加工成本过高^[40]。

3.3.3 旋压成形

旋压成形是一种利用旋压工具，对套在芯模上的毛坯施加压力，使其随着主轴连续旋转，在旋轮的壓力作用下产生塑性变形，并逐渐成形为空心回转零件的塑性成形工艺^[33]。旋压成形的适用范围广，并且能大大改善材料的力学性能；生产周期比较短，能够降低生产成本；但生产过程所耗费的人力比较大。旋压成形工艺在化工、冶金、电子和机械等方面应用较广^[41-42]。

3.4 铝合金弹壳表面处理

3.4.1 表面陶瓷化

铝合金弹壳表面陶瓷化处理过程是一种电化学氧化过程。其流程为：打磨抛光→除油除锈→表面陶瓷化处理。以铝合金为阳极，酸性溶液（ H_2SO_4 ）为电解液，在外加电流的作用下，表层铝合金氧化，生成一层氧化物陶瓷膜层（ Al_2O_3 ），膜层厚度约为 20~60 μm ^[43-44]。陶瓷膜层的生长过程包含氧化膜的电化学溶解和氧化铝膜的生成。图 4 为表面陶瓷化处理示意图。

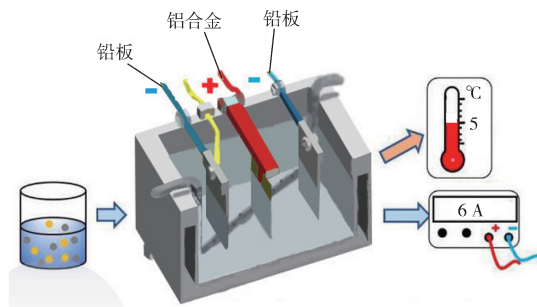


图 4 表面陶瓷化处理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of ceramic treatment on surface

在自然环境下，铝合金材料在室内长时间使用，不会发生变色、腐蚀、氧化和生锈等现象，在室外长时间暴露于阳光下也不会引起变色^[45-46]；但铝合金的耐磨和耐腐蚀性能还有待提升。

表面陶瓷化处理技术在铝合金表面制备一层致密的陶瓷膜层，可以显著提高铝合金的耐磨性、耐烧蚀性和耐腐蚀性能等，大大延长了铝合金的使用寿命^[47-48]。预计 10 年之内，表面陶瓷化技术仍然是处理铝合金弹壳表面的主要方法，其工艺技术将不断完善并长期占据主导地位^[49]。

3.4.2 微弧氧化

微弧氧化也被称为微弧放电氧化和等离子体电解氧化，它是表面陶瓷化处理技术的一种。该方法所形成的陶瓷膜层厚度和硬度明显高于传统表面陶瓷化形成的氧化陶瓷膜层，但表面光洁度较差^[50]。

微弧氧化工艺大都是利用电参数与弱碱性电解液之间的匹配调节，利用弧光放电时对阳极氧化反应的激活与增强，使金属材料或者是其合金表面迅速氧化生成一层陶瓷膜层。陶瓷膜层较厚，其耐磨性和耐蚀性能都明显比传统表面陶瓷膜层更加优异^[51-52]。初期的微弧氧化工艺，电解液多为酸性

溶液, 主要为浓硫酸与磷酸, 但由于酸性电解液导电性差, 不利于膜层的快速生长, 所形成的膜层较薄, 同时酸性电解液反应后会放出有毒气体, 对环境污染较大, 不符合现代绿色工业发展要求^[53]。研究改进后的微弧氧化工艺, 电解液为弱碱性, 一般是由一定金属或者非金属化合物组成的碱性盐溶液, pH 值为 9~13, 其电解过程中产生的气体无毒, 污染较小, 电解出的阳离子也可作为胶体粒子反复利用^[54-55]。

采用微弧氧化制备的陶瓷膜层为蜂窝状的多孔结构, 这使得膜层自身的耐腐蚀能力大打折扣, 且膜层中含有很多的机体金属和氢氧化物, 易与酸性介质发生反应。微弧氧化要在高电压、大电流条件下才能进行, 耗能比较大, 影响了生产的效益^[56-57]。

3.4.3 封孔着色

铝合金经表面陶瓷化处理, 需要及时封孔处理。通常采用热水封孔法: Al_2O_3 和水反应生成 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 或 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, 氧化膜表面及孔壁的 Al_2O_3 水化后体积增大而达到封孔的效果。封孔着色把染料固定在微孔中防止渗出, 同时提高膜的耐磨性、耐晒性、耐蚀性和绝缘性^[58]。

范才河教授团队将自行研制的铝合金弹壳表面陶瓷化处理后进行封孔着色, 最终得到军绿色的铝合金弹壳, 如图 5 所示。



图 5 铝合金弹壳

Fig. 5 Aluminum alloy cartridge case

4 结语

本文简述了铝合金弹壳的发展历史和国内外研究现状, 重点综述了高强韧铝合金材料的制备方法, 包括喷射成形法、粉末冶金法和半固态加工法等; 铝合金弹壳的成形方法, 包括拉深成形、旋压成形和挤压成形等; 表面处理方法, 包括表面陶瓷化、微弧氧化和封孔着色等。

随着铝合金加工设备的发展和完善以及工艺流

程的改进, 高强韧铝合金材料将拥有更好的综合性能, 铝合金弹壳将拥有更佳的成形工艺, 表面制备的膜层将拥有更强的耐腐蚀、抗爆炸冲击能力; 且铝合金材料质量轻, 能够完美地替代传统的铜质、钢质弹壳。在当代推进武器轻量化的进程中, 铝合金弹壳将迎来越来越广阔应用前景。

参考文献:

- [1] 刘卓月. 铝合金在弹壳上的应用[J]. 轻兵器, 1997(5): 18.
LIU Zhuoyue. Application of Aluminum Alloy Shell Casing[J]. Small Arms, 1997(5): 18.
- [2] 刘晓霞. 铝合金药筒热挤压成形工艺研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
LIU Xiaoxia. Study on Hot Extrusion Forming Technology of Aluminum Alloy Cartridge[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [3] 范才河, 沈 彤, 胡泽艺. 铝合金弹壳成形及失效分析[J]. 包装学报, 2019, 11(1): 87-93.
FAN Caihe, SHEN Tong, HU Zeyi. Forming and Failure Analysis of Aluminum Alloy Cartridge Case[J]. Packaging Journal, 2019, 11(1): 87-93.
- [4] 管仁国, 娄花芬, 黄 晖, 等. 铝合金材料发展现状、趋势及展望[J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 68-75.
GUAN Renguo, LOU Huaifen, HUANG Hui, et al. Development of Aluminum Alloy Materials: Current Status, Trend, and Prospects[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 68-75.
- [5] 郭拉凤. 铜/钢双金属弹壳成形工艺[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(6): 45-49.
GUO Lafeng. Study on Forming Technology of Cartridge Case Made of Bimetal Cu/Fe[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16(6): 45-49.
- [6] 蒲 辉. 某枪械击发动力学特性的影响因素研究[D]. 太原: 中北大学, 2021.
PU Hui. The Study of Factors Affecting the Firing Dynamics of a Firearm[D]. Taiyuan: North University of China, 2021.
- [7] 朱伟俊. 枪械自动机装配精度分析与优化[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
ZHU Weijun. Analysis and Optimization of Assembly Accuracy of Gun Automaton[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.
- [8] CAI S, FENG J, XU H, et al. Strain Concentration Caused by the Closed End Contributes to Cartridge Case Failure at the Bottom[J]. Defence Technology, 2020,

- 16(6): 1151-1159.
- [9] MATTIJSEN E J A T, WITTEMAN C L M, BERGER C E H, et al. Cognitive Biases in the Peer Review of Bullet and Cartridge Case Comparison Casework: A Field Study[J]. *Science & Justice*, 2020, 60(4): 337-346.
- [10] SHARMA R, VIJAYALAKSHMI E, REDDY R, et al. Failure Investigation of Cartridge Case[J]. *Procedia Structural Integrity*, 2019, 14: 738-745.
- [11] 赵创业. 美国铝合金弹壳的研究和应用[J]. *现代兵器*, 1981(12): 42-47, 36.
ZHAO Chuangye. Research and Application of Aluminum Alloy Shell Case in USA[J]. *Modern Weaponry*, 1981(12): 42-47, 36.
- [12] 金云凤. 细数美国非致命武器(二)[J]. *轻兵器*, 2006(2): 11-14.
JIN Yunfeng. Counting American Non-Lethal Weapons (2) [J]. *Small Arms*, 2006(2): 11-14.
- [13] 刘晓霞, 蔡松, 吴志林. 热处理对铝合金药筒热挤压成形影响的模拟分析[J]. *特种铸造及有色合金*, 2016, 36(12): 1270-1274.
LIU Xiaoxia, CAI Song, WU Zhilin. Simulation Analysis of Influence of Heat Treatment on the Aluminum Cartridge During Hot Extrusion Process[J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys*, 2016, 36(12): 1270-1274.
- [14] 吴臣武. 枪械发射过程中弹壳动态响应分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
WU Chenwu. Dynamic Response Analysis of Gun Shell During Firing[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004.
- [15] 车浩召. 轻量化弹壳在发射过程中的动态响应分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
CHE Haozhao. Dynamic Response Analysis of Lightweight Shell Case in Launching Process[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [16] 王玉松. 7050 铝合金弹壳成形工艺优化及热处理工艺的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
WANG Yusong. Research on the Heat Treatment Process and Optimization of Forming Process of 7050 Aluminum Alloy Cartridge[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [17] 江长友, 金辉, 陈露. 7XXX 铝合金弹壳外表面残余应力分析[J]. *热加工工艺*, 2021, 50(12): 132-134, 142.
JIANG Changyou, JIN Hui, CHEN Lu. Analysis on Residual Stress on External Surface of 7XXX Aluminum Alloy Shell Case[J]. *Hot Working Technology*, 2021, 50(12): 132-134, 142.
- [18] 鞠治刚, 王法灵, 江长友, 等. 7050 铝质弹壳涂层耐冲刷抗烧蚀性研究[J]. *中国表面工程*, 2021, 34(4): 46-52.
JU Zhigang, WANG Faling, JIANG Changyou, et al. Scouring and Ablation Resistance of 7050 Aluminum Cartridge Case Coating[J]. *China Surface Engineering*, 2021, 34(4): 46-52.
- [19] [佚名]. 湖工大研发出 12.7 mm 口径铝合金弹壳并通过测试验收[EB/OL]. [2022-04-21]. <https://news.ccmn.cn/news/ZX018/202108/f8d87ff67f9d4851a1cb4f565cfd8965.html>.
[Anon]. Hunan University of Technology Developed 12.7 mm Diameter Aluminum Alloy Cartridge and Passed the Test Acceptance[EB/OL]. [2022-04-21]. <https://news.ccmn.cn/news/ZX018/202108/f8d87ff67f9d4851a1cb4f565cfd8965.html>.
- [20] RADOVIC L M, MARINKOVIC J, STANIC M. Effects of Initial Microstructure on the Earring of Aluminium Alloys Cartridge Case[J]. *Metallurgical and Materials Engineering*, 2019, 25(1): 11-22.
- [21] 范才河, 范语楠. 一种铝合金弹壳制造方法及弹壳: CN109158604A[P]. 2019-01-08.
FAN Caihe, FAN Yunan. Manufacturing Method of Aluminum Alloy Cartridge Shell and Cartridge Shell: CN109158604A[P]. 2019-01-08.
- [22] 曲华, 汤华国, 袁迅道, 等. 粉末冶金技术制备的系列高性能铝合金[J]. *家电科技*, 2016(增1): 223-226.
QU Hua, TANG Huaguo, YUAN Xundao, et al. A Series of High Performance Aluminium Alloys Prepared by Powder Metallurgy[J]. *China Appliance Technology*, 2016(S1): 223-226.
- [23] WANG T, TANG Z F, YANG L, et al. A Novel Technique for Preparing Al/Mg Alloy by the Combined Method of Powder Metallurgy and Rolling[J]. *Materials Letters*, 2022, 314: 131793.
- [24] 陈峰, 闫志巧, 蔡一湘. 粉末冶金铝合金及复合材料的研究现状与发展趋势[J]. *材料研究与应用*, 2014, 8(1): 1-5.
CHEN Feng, YAN Zhiqiao, CAI Yixiang. Research Status and Development Tendency of Aluminum-Based Alloys and Composites Fabricated by Powder Metallurgy[J]. *Materials Research and Application*, 2014, 8(1): 1-5.
- [25] 杨伏良, 甘卫平, 陈招科. 粉末粒度对高硅铝合金材料组织及性能的影响[J]. *材料科学与工艺*, 2006, 14(3): 268-271.

- YANG Fuliang, GAN Weiping, CHEN Zhaoke. Effect of Particle Size on Microstructure and Property of High-Silicon Aluminum Alloy[J]. *Materials Science and Technology*, 2006, 14(3): 268-271.
- [26] 印红羽, 张华诚. 粉末冶金模具设计手册 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2013: 2-8.
- YIN Hongyu, ZHANG Huacheng. Handbook of Powder Metallurgy Mold Design[M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2013: 2-8.
- [27] LI G, QU W Y, LUO M, et al. Semi-Solid Processing of Aluminum and Magnesium Alloys: Status, Opportunity, and Challenge in China[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2021, 31(11): 3255-3280.
- [28] 张奎, 刘国钧, 徐骏, 等. 电磁搅拌法连铸半固态铝合金及其凝固组织分析 [J]. *中国有色金属学报*, 2000, 10(1): 47-50.
- ZHANG Kui, LIU Guojun, XU Jun, et al. Semi-Solid Al-7%Si Alloy Prepared by Electromagnetic Stirring Continuous Casting Technology and Its Solidification Microstructures[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2000, 10(1): 47-50.
- [29] 徐骏, 田战峰, 石力开, 等. 半固态铝合金设计与试验研究 [J]. *稀有金属*, 2004, 28(2): 358-361.
- XU Jun, TIAN Zhanfeng, SHI Likai, et al. Design and Experimental Investigations of Semisolid Aluminum Alloys[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2004, 28(2): 358-361.
- [30] VIEIRA E A, Kliauga A M, Ferrante M. On the Formation of Spheroidal Microstructures in a Semi-Solid Al-Si Alloy by Thermomechanical Processing[J]. *Scripta Materialia*, 2007, 57(12): 1165-1168.
- [31] 庞国星, 赵东方. 铝合金半固态加工技术的现状与趋势 [J]. *现代制造工程*, 2002(6): 56-57.
- PANG Guoxing, ZHAO Dongfang. The Present and Developing Trends of Semi-Solid Processing of Aluminum Alloys[J]. *Machinery Manufacturing Engineer*, 2002(6): 56-57.
- [32] 贺毅强, 陈志钢. 多层喷射沉积颗粒增强铝基复合材料的研究现状与发展趋势 [J]. *材料科学与工程学报*, 2012, 30(6): 943-949.
- HE Yiqiang, CHEN Zhigang. Current State and Developing Trends of Multi-Layer Spray Deposited Aluminium Matrix Composites Reinforced with Particles[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2012, 30(6): 943-949.
- [33] SCHNEIDER A, SRIVASTAVA V C, UHLENWINKEL V, et al. Spray Forming of 2014-Al Alloy Based Composites with Injection of SiC Particulates[J]. *International Journal of Materials Research*, 2022, 95(9): 763-768.
- [34] SHEN T, FAN C H, HU Z Y, et al. Effect of Strain Rate on Microstructure and Mechanical Properties of Spray-Formed Al-Cu-Mg Alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2022, 32(4): 1096-1104.
- [35] 单忠德, 杨立宁, 刘丰, 等. 金属材料喷射沉积 3D 打印工艺 [J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2016, 47(11): 3642-3647.
- SHAN Zhongde, YANG Lining, LIU Feng, et al. Three-Dimensional Printing Technology Based on Metal Spray and Deposition[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016, 47(11): 3642-3647.
- [36] 范才河, 严红革, 彭英彪, 等. 大应变热轧喷射成形高镁铝合金的微观结构及力学性能 [J]. *中国有色金属学报*, 2017, 27(1): 64-71.
- FAN Caihe, YAN Hongge, PENG Yingbiao, et al. Microstructures and Mechanical Properties of Spray-Forming High Magnesium Aluminum Alloy During Large Strain Hot Rolling[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(1): 64-71.
- [37] 秋艳. AA6016 铝合金热处理及拉深成形工艺研究 [J]. *塑性工程学报*, 2017, 24(6): 43-47.
- QIU Yan. Study of Heat Treatment and Deep Drawing Process for AA6016 Aluminum Alloy[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2017, 24(6): 43-47.
- [38] 张继祥, 张克龙, 文辉, 等. 6016 铝合金挤压成形规律及工艺优化研究 [J]. *上海金属*, 2013, 35(4): 35-39.
- ZHANG Jixiang, ZHANG Kelong, WEN Hui, et al. Research on the Extrusion Forming Rule and Process Plan Optimization of 6016 Aluminum[J]. *Shanghai Metals*, 2013, 35(4): 35-39.
- [39] CHEN J S, CHAO L, QIU M Bo, et al. Al₂O₃ Ceramic Paste 3D Printing Extrusion Molding Rheology[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2020, 38(2): 220-225.
- [40] 贾林. 铝合金挤压成形模具技术及研究 [J]. *工程技术研究*, 2018(8): 8-9.
- JIA Lin. Technology and Research of Aluminum Alloy Extrusion Mould[J]. *Engineering and Technological Research*, 2018(8): 8-9.
- [41] 林忠英. 旋压成形技术的研究与发展 [J]. *科技经济导刊*, 2018(19): 42-43.
- LIN Zhongying. Research and Development of Spinning Forming Technology[J]. *Journal of Science & Technology*

- Economics, 2018(19): 42-43.
- [42] 黑爱卿, 李 钰, 邓全得, 等. 大尺寸薄壁 LF6 铝合金筒体旋压成形技术 [J]. 精密成形工程, 2020, 12(2): 43-47.
HEI Aiqing, LI Yu, DENG Quande, et al. Spinning Forming Technology of Large Size Thin-Wall LF6 Aluminum Alloy Cylinder[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(2): 43-47.
- [43] 陈 亮, 陈 松, 冒爱荣. 铝合金阳极氧化工艺条件的优化 [J]. 广州化工, 2015, 43(23): 128-129.
CHEN Liang, CHEN Song, MAO Airong. Optimization of Process Conditions of Aluminum Alloy Anodic Oxidation[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2015, 43(23): 128-129.
- [44] 杨 笠, 周培山. 铝及其合金阳极氧化膜形成机理研究 [J]. 信息记录材料, 2016, 17(4): 146-148.
YANG Li, ZHOU Peishan. Study on the Formation Mechanism of Anodic Oxide Films on Aluminum and Its Alloys[J]. Information Recording Materials, 2016, 17(4): 146-148.
- [45] KORZEKWA J, BARA M, KAPTACZ S. Al₂O₃/WS₂ Surface Layers Produced on the Basis of Aluminum Alloys for Applications in Oil-Free Kinematic Systems[J]. Materials, 2021, 14(24): 7738.
- [46] 戴一帆, 沈士泰, 卢洁琴, 等. 2024 铝合金混合酸阳极氧化 [J]. 表面技术, 2018, 47(1): 198-202.
DAI Yifan, SHEN Shitai, LU Jieqin, et al. 2024 Aluminum Alloy Anodic Oxidation in Mixed Acid[J]. Surface Technology, 2018, 47(1): 198-202.
- [47] 莫伟言. 铝和铝合金常温脉冲硬质阳极氧化工艺研究 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2010.
MO Weiyang. Study on Pulse Hard Anodizing Processing for Aluminum and Aluminum Alloy[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2010.
- [48] SUNDARARAJAN G, KRISHNA L R. Mechanisms Underlying the Formation of Thick Alumina Coatings through the MAO Coating Technology[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 167(2/3): 269-277.
- [49] 薛笑莉, 宋政伟. 铝合金阳极氧化后处理工艺及涂层耐蚀性研究 [J]. 山东化工, 2018, 47(19): 36-37, 41.
XUE Xiaoli, SONG Zhengwei. The Study of Post-Treatment Process for Anodic Oxidation of Al Alloy and Coating Corrosion Resistance[J]. Shandong Chemical Industry, 2018, 47(19): 36-37, 41.
- [50] 王亚伟, 廉继英, 张柳丽, 等. 微弧氧化技术较阳极氧化的发展优势 [J]. 现代商贸工业, 2011, 23(21): 333-334.
WANG Yawei, LIAN Jiying, ZHANG Liuli, et al. Development Advantages of Micro-Arc Oxidation Technology over Anodic Oxidation[J]. Modern Business Trade Industry, 2011, 23(21): 333-334.
- [51] ZHAI D J, LI X P, SHEN J, et al. Mechanism of Microarc Oxidation Treated Ti6Al4V Alloy in a Magnetic Field[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2022, 53(4): 1200-1207.
- [52] 雷 欣, 林乃明, 邹娇娟, 等. 铝合金微弧氧化的研究进展 [J]. 表面技术, 2019, 48(12): 10-22.
LEI Xin, LIN Naiming, ZOU Jiaojuan, et al. Research Progress of Micro-Arc Oxidation on Aluminum Alloys[J]. Surface Technology, 2019, 48(12): 10-22.
- [53] 段关文, 李金富, 王拥军, 等. 铝合金的微弧氧化研究 [J]. 表面技术, 2007, 36(3): 30-33.
DUAN Guanwen, LI Jinfu, WANG Yongjun, et al. Research of Micro-Arc Oxidation of Aluminum Alloy[J]. Surface Technology, 2007, 36(3): 30-33.
- [54] ZHU B W, WANG L, WU Y Z, et al. Improving Corrosion Resistance and Biocompatibility of AZ31 Magnesium Alloy by Ultrasonic Cold Forging and Micro-Arc Oxidation[J]. Journal of Biomaterials Applications, 2022, 36(9): 1664-1675.
- [55] LI J, SONG R G, QI X, et al. Effects of Polyvinylidene Fluoride Sealing on Micro-Arc Oxidation Coating of 7075 Aluminum Alloy[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2022, 69(1): 1-8.
- [56] SLOBODOV A A, MARKOV M A, KRASIKOV A V, et al. Thermodynamic Simulation of Microarc Oxidation of Aluminum and Its Alloys in Aqueous Borate Electrolytes[J]. Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2021, 50(8): 743-753.
- [57] 魏向禹, 惠鑫刚, 梁智国. 铝合金表面微弧氧化与阳极氧化工艺介绍 [J]. 中国金属通报, 2017(9): 69-70.
WEI Xiangyu, HUI Xingang, LIANG Zhiguo. Introduction of Micro-Arc Oxidation and Anodic Oxidation Process of Aluminum Alloy Surface[J]. China Metal Bulletin, 2017(9): 69-70.
- [58] 薛 莹. 铝合金阳极氧化封孔工艺的探析 [J]. 冶金与材料, 2021, 41(6): 129-130.
XUE Ying. Analysis of Anodizing Hole Sealing Technology of Aluminum Alloy[J]. Metallurgy and Materials, 2021, 41(6): 129-130.

(责任编辑: 邓光辉)

Development Process and Research Status of Aluminum Alloy Cartridge Case

YANG Jianjun^{1,2,3}, WANG Jiahu¹, FAN Caihe^{1,3}, HU Zeyi^{1,3}, OU Ling^{1,3}, WANG Bowen¹

(1. College of Materials and Advanced Manufacturing, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China; 2. Key Laboratory of National Defense Science and Technology for Equipment Remanufacturing, PLA Army Armored Force Academy, Beijing 100072, China; 3. Technology Center, Anhui Jianye Technology Co., Ltd., Huaibei Anhui 235000, China)

Abstract: The development process and research status of aluminum alloy cartridge case at home and abroad are mainly introduced, and the characteristics and advantages of aluminum alloy cartridge case is discussed. The preparation method and process flow of aluminum case is introduced emphatically, with the development trend and application outlook of aluminum alloy cartridge cases prospected.

Keywords: aluminum alloy cartridge case; spray forming; ceramic treatment of aluminum alloy surface; micro arc oxidation

.....

(上接第 68 页)

Magnetic Field Effects on Surface Micro-Morphology in Electrochemical Machining of Two-Phase Ti-48Al-2Cr-2Nb Alloy

SUI Haonan, LIN Ronglian, MA Xinzhou, HU Chunrong, LIAO Cuijiao

(College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: To reveal the surface forming law of electrochemical machining (ECM), an electric-magnetic-heat-flow multi-physical field coupling micro-material simulation model was established to dynamically track the forming process of anode micro surface from several aspects, such as current density distribution, roughness and micro-morphology. The dynamic evolution law and influencing mechanism of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy under different magnetic field conditions were revealed, and the simulation results were verified by electrochemical machining experiments. The simulation show that the forming of ECM surface is a complex competitive process of the formation and dissolution of surface film, and the micro-surface repeatedly goes through coarsening and polishing stages during the machining process. Surface roughness is 0.121 μm and spectrum area of multifractal spectrum is 0.0030 without magnetic field, while the surface roughness is 0.118 μm and the spectrum area is 0.0023 with magnetic field. The experimental results of ECM confirm that the surface roughness is 1.16 μm , the spectrum width of multifractal spectrum is 0.87 and the spectrum area is 1.468 without magnetic field, while the surface roughness is 0.93 μm , the spectrum width is 0.84 and the spectrum area is 1.388 with magnetic field. The simulation results agree well with the experimental results, the magnetic field reduces the machined surface roughness, makes the microstructure simpler and more uniform, and improves processing stability.

Keywords: magnetic field; Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy; electrochemical machining; micro-morphology; dynamic evolution