

镁合金在航天器上的应用分析与实践

赵长喜

(北京卫星制造厂, 北京 100190)

摘要: 镁合金具有比强度、比刚度高, 阻尼性好, 电磁屏蔽能力、抗辐照能力强等优点, 是特别适合航天器选用的轻质金属材料。文章针对航天器结构轻量化发展需求, 结合镁合金在航天器中的不同应用情况, 分析了镁合金存在的耐腐蚀性、焊接和加工成型等工艺问题, 给出了具体工艺方法和措施建议。

关键词: 镁合金; 航天器; 材料工艺; 应用研究

中图分类号: V252.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2012)03-0259-04

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2012.03.004

0 引言

随着现代航天技术的不断提高, 航天器一方面朝大型化、长寿命、高可靠、高性能方向发展, 另一方面朝小型化、高精度和高集成化方向发展。这对航天器的减重增容、抗恶劣空间环境等提出了更高的要求, 尤其以载人航天工程、探月工程为代表的重大航天工程对航天器轻量化提出了明确而迫切的需求。

镁合金材料具有比强度、比刚度高, 阻尼性好等优点, 是有效解决航天器轻量化需求的轻质金属材料。但镁合金迄今没有在航天器中得到广泛应用, 主要原因是其耐腐蚀和焊接成型等问题未能得到很好地解决。

因此, 应加强镁合金在航天器上的应用研究, 重点突破镁合金的表面防护、焊接和加工成型等工艺关键技术。

1 镁合金的表面防护

镁的标准电极电位为-2.37 V (铝为-1.71 V, 铁为-0.44 V), 是电负性很强的金属, 因此耐蚀性差。另外, 镁合金在室温空气中很容易生成一层薄薄的氧化膜。由于该膜多孔疏松, 远不如铝合金的氧化膜坚实致密, 在潮湿环境中会加速镁合金腐蚀^[1], 而腐蚀极大地限制了镁合金的工程应用。

镁合金的腐蚀类型很多, 其中电偶腐蚀、应力腐蚀和疲劳腐蚀是其应用中最为常见和危害较大

的腐蚀类型。因此, 应根据镁合金在航天器上的使用部位、环境、载荷等情况进行分析, 制定相应的表面防护措施。

1.1 镁合金在生产过程中的防护处理

由于镁合金材料表面易氧化腐蚀, 因此, 镁合金在铸造、加工、热处理过程中须进行表面防护处理。

1) 镁合金铸造后, 需进行毛刺清除、喷砂和化学氧化处理。一般而言, 铸件铸造后 4d 内必须进行表面化学氧化处理, 经处理后的铸件可放置 1 个月; 超过期限后, 铸件须重新进行表面化学氧化处理。

2) 镁合金切削加工性能和散热性能很好, 加工表面很容易实现较好的冷却, 因此加工时一般可以不用冷却润滑液。如果需要采用冷却润滑液, 考虑到镁合金容易腐蚀的特性, 一般采用矿物油或油基乳化的冷却液 (不能使用水基冷却液)。在加工过程中, 为了防止镁合金加工后的新表面被腐蚀, 可以在材料表面添加防护处理剂或在加工工序间增加一道表面化学氧化处理的工序。

3) 为了提高镁合金零件的机械性能和消除零件加工后的残余应力, 需对零件进行热处理。为了防止零件在热处理中被氧化, 可以采用真空炉或惰性气体保护炉; 还可以采用更经济的做法, 即随炉加入一些黄铁矿 (FeS_2), 当加热时黄铁矿分解放出 SO_2 气体以形成保护。镁合金热处理后必须马上进行表面氧化处理。

收稿日期: 2011-12-05; 修回日期: 2012-02-15

作者简介: 赵长喜 (1970—), 男, 研究员, 研究方向为空间飞行器制造工艺。E-mail: zhaoyz529@126.com。

1.2 镁合金零件的防护处理

加工后的镁合金零部件需要进行最终防护。防护工艺方法主要有化学氧化、阳极氧化、有机涂层、金属涂层等。

1) 化学氧化工艺

化学氧化处理是目前镁合金最常用的表面处理工艺。由于化学氧化处理生成的氧化膜层是表面微孔结构(远不及铝合金氧化膜致密),因此,仍不能作为产品的最终防护措施。化学氧化处理主要用于涂层工艺的前处理,也可用于镁合金加工过程中或短时间存放时的临时表面防护处理。

2) 阳极氧化工艺

镁合金阳极氧化处理生成的氧化膜层与化学氧化处理的膜层类似,其致密性很差,也不能作为产品的最终防护措施。而应用近年新发展起来的等离子体微弧阳极氧化技术可以在镁合金表面生成致密的氧化镁膜,因其硬度和致密性的提高而使耐磨性和耐腐蚀性有显著改善,是镁合金产品理想的最终防护措施。由于镁合金微弧氧化膜不导电,对需要导电的应用场合还必须进行导电化处理。等离子体微弧阳极氧化处理的镁合金零件如图1所示。

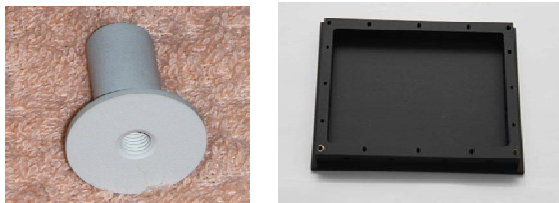


图1 镁合金微弧阳极氧化处理的零件
Fig. 1 Mg alloy part after surface treatment

3) 有机涂层工艺

有机涂层工艺是目前提高镁合金耐腐蚀性能的很成熟的工艺方法。在实施有机涂层工艺前,须进行表面化学氧化前处理;为了防止氧化膜表面被污染,化学氧化处理后的表面必须马上进行有机涂层工艺。涂层的基底一般选用环氧树脂以提高与镁合金基体的结合力,涂层的层数和材料应根据热控性能要求和颜色需要选定。

4) 金属涂层工艺

利用电镀或真空镀膜技术在镁合金零件表面镀制一层铝膜,是提高镁合金耐腐蚀性的有效方法。由于镁合金十分活泼,通常在镁合金表面进行电镀是很困难的,所以目前还没有成熟的镁合金电镀工艺。离子注入、离子沉积等工艺技术可以实现

镁合金表面的金属涂层,但成本比较高,而且零件的结构形状和大小也受到很多约束。

1.3 航天器镁合金主结构的防护处理

镁合金重量轻、阻尼性好,是很适合用作航天器主结构的金属材料,如航天器主承力结构、仪器设备安装支架等。航天器镁合金主结构的防腐蚀依然是难点,尤其需要关注镁合金零件与其他材料零件的连接腐蚀问题。

1) 镁合金基体的螺纹部位处理

由于镁合金强度低、耐蚀性差,一般不在镁合金零件基体上直接加工螺纹,而是在基体上镶嵌强度较高的过渡金属,在过渡金属上加工出需要的螺纹。过渡金属的选择主要考虑与镁合金的电化学相容性。相对镁合金而言,所有的结构金属都是阴极,电化学相容性相对较好的金属有铝、锌等。考虑到航天使用要求,可以作为过渡材料的合金材料有铝合金、钛合金和不锈钢。具体结构使用形式为不锈钢钢丝螺套、铝合金过渡螺套和钛合金过渡螺套,如图2和图3所示。



图2 钢丝螺套外观

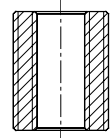


图3 过渡螺套示意图

Fig. 2 Wire thread insert part Fig. 3 Thread insert part

为了对镁合金基体进行防护,在镁合金和过渡金属配合间隙处进行隔离和密封处理,如图4所示。一般在安装钢丝螺套、铝合金过渡螺套和钛合金过渡螺套时,在镁合金基体螺套底孔内涂一层618环氧树脂以防止腐蚀,同时又可以保证螺套连接牢固。

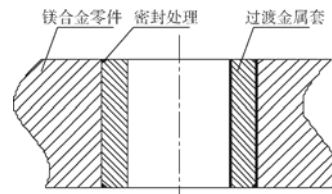


图4 过渡金属螺套安装示意图

Fig. 4 Thread insert part installation

2) 镁合金表面与不同金属贴合面的处理

合理的结构设计可以在很大程度上减轻电偶腐蚀。在结构设计时要尽量减少异种金属与镁合金的接触面积;在材料选择上,要尽量减少异种

金属与镁合金的电化学差异; 装配时, 在镁合金表面与异种金属贴合面处要采取必要的保护膜措施, 避免镁合金和异种金属直接接触发生电偶腐蚀; 同时, 要在镁合金与异种金属贴合后的轮廓缝隙处进行密封处理, 可以选用环氧树脂、硅橡胶等密封材料。

3) 镁合金结构的连接紧固件的选择

常用的连接紧固件包括螺钉、螺栓、螺母、垫圈、铆钉等。当强度满足要求时, 选用铝合金紧固件可以有效地限制电化学腐蚀; 强度不够时, 优选钛合金紧固件。采用非金属绝缘垫圈(如尼龙、玻璃钢等)可以完全避免电化学腐蚀。在选择钛合金或钢质垫圈时, 可以在垫圈与镁合金接触的一侧加装聚酰亚胺绝缘膜垫。可以选用表面经过氧化的或表面镀镍的钢质紧固件, 而不要选择表面镀锌或镉处理的钢质紧固件, 因为锌和镉在真空中有升华现象。镁合金连接结构如图5所示。

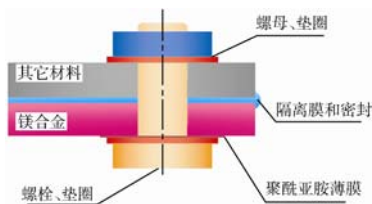


图5 镁合金连接结构示意图
Fig. 5 Mg alloy joint structure

1.4 航天器电子产品中镁合金的防护处理

镁合金不但质量密度低, 而且具有很强的电磁屏蔽和抗辐照的能力, 因此, 很适合用作航天器电子产品的机箱材料, 以替换目前应用广泛的铝合金材料, 达到电子产品减重的目的。

对于电子产品的镁合金机箱结构, 除了要求其表面进行耐腐蚀性防护外, 还要考虑其导电性, 以满足电子产品接地电阻的要求(一般小于 $10\text{ m}\Omega$); 此外须考虑其热传导性和热辐射性, 以满足电子产品空间热控性能要求(一般电子产品外表面的半球发射率 >0.85)。

在选择镁合金的表面处理工艺时, 防腐蚀性、导电性和热控性能要综合考虑, 统筹兼顾。可以选择的工艺方法如下:

1) 利用电镀工艺或离子沉积工艺在镁合金表面先镀一层纯铝膜^[2], 满足镁合金的耐腐蚀性和导电性; 再对纯铝膜层进行高发射率阳极氧化处理,

满足镁合金表面的热控指标要求。

2) 利用电镀工艺或离子沉积工艺在镁合金表面镀一层纯铝膜, 再在纯铝膜层上喷涂一层环氧树脂基热控涂层, 满足镁合金表面的热控要求。

3) 利用等离子体微弧阳极氧化技术在镁合金表面先生成一层致密氧化膜, 满足镁合金的耐腐蚀性要求; 再对镁合金表面膜层进行着色封闭处理, 满足镁合金表面的热控指标要求; 最后在电子产品机箱上适当位置镶嵌铝合金接地桩, 满足电子产品接地电阻要求。

4) 先利用等离子体微弧阳极氧化技术在镁合金表面生成致密氧化膜; 再在电子产品机箱上适当位置镶嵌铝合金接地桩, 满足电子产品接地电阻要求; 最后在镁合金膜层上喷涂一层满足热控要求的环氧树脂基热控涂层。

2 镁合金的焊接

由于镁非常活泼, 所以镁合金焊接性能比较差。因此, 在航天器结构中应尽量避免镁合金的对焊。

综合考虑各种焊接技术的焊接质量和工程化程度, 目前比较适用于航天镁合金产品的焊接方法为搅拌摩擦焊(FSW)和电子束焊(EBW)。

搅拌摩擦焊是一种新型的固相连接工艺, 用于镁合金焊接可以获得较好的焊接质量, 焊缝抗拉强度可达母材的 76% ^[3]。另外, 搅拌摩擦焊系统利用数控技术易于实现焊接过程的自动控制, 可确保焊接质量稳定。由于搅拌摩擦焊对焊接工装及装配精度要求高, 所以不适用于弱刚性复杂结构镁合金零件的焊接。但这种焊接工艺比较适合于航天器大型镁合金复杂结构件的毛坯料的焊接, 如卫星镁合金承力底盘、安装肼瓶用的镁合金支架、镁合金大梁等。真空电子束焊接方法是在真空环境下完成镁合金的焊接, 可以得到优质的焊缝, 焊缝强度近似于母材。高的电子束能量密度可实现较大的深宽比和较窄的焊缝, 焊接应力和变形均较小, 比较适合于满足航天器高精度、高质量要求的中小尺寸镁合金零部件的焊接。由于受真空室空间尺寸的限制, 真空电子束焊接技术难以用于航天器大型镁合金零部件。然而, 目前比较热门的局部真空电子束焊接技术却可以很好地解决这个问题。

3 镁合金的成型

由于镁合金为致密排布的六方晶体结构,塑性变形能力差,致使其成型困难。只有很少的镁合金可以在室温下成型,而其余绝大多数镁合金需要在高温下成型。这是由于室温下镁合金的塑性很差,冷成型容易发生断裂,因此冷成型仅限于中等变形(一般在室温下的冷变形约为10%~20%)。

但有的研究表明:镁合金在一定条件下可具有很高的塑性,甚至出现明显的超塑性。当晶粒细化到一定程度时,镁合金可获得相对的超塑性^[4]。镁合金超塑热成型方法适合用于航天器产品的成型研制。需要注意的是镁合金热膨胀系数大,在热成型时必须考虑模具与零件材料之间的热膨胀差异以及热膨胀的补偿。

4 镁合金应用实践

针对镁合金应用存在的瓶颈问题,北京卫星制造厂近年开展了大量的技术攻关和设备改造,突破了大型镁合金表面的防腐处理、机械加工、焊接技术,实现了大型镁合金结构件在多个航天器上的应用。图6所示为正在整体加工的大型镁合金结构件。



图6 实现整体加工的大型镁合金结构件
Fig. 6 Large-scale Mg alloy structure part made by machining as a whole

针对镁合金电子产品机箱的应用瓶颈,开展了镁合金表面涂覆、微弧氧化、高发射率表面阳极化处理等技术研究,突破了镁合金表面防腐、导电性和高发射率热控要求的综合表面处理技术,实现了

镁合金在航天器电子产品机箱中的应用,达到了产品轻量化的目标。图7所示是镁合金电子产品机箱。



图7 镁合金电子产品机箱
Fig. 7 Mg alloy electronic device box

5 结束语

针对航天器的轻量化发展需求,镁合金具有极大的优势。随着镁合金在航天器应用中的工艺问题相继得到解决,镁合金在航天器上的推广应用具有广泛的前景。

参考文献 (References)

- [1] 陈振华, 严红革, 陈吉华, 等. 镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004
- [2] 张津, 杨栋华, 王东亚, 等. 镁合金表面磁控溅射沉积铝膜的力学性能[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(12)
Zhang Jin, Yang Donghua, Wang Dongya, et al. Mechanical properties of aluminum films on magnesium alloys by magnetron sputtering[J]. Journal of Beijing University of Science and Technology, 2008, 30(12)
- [3] 张彦军, 丁成钢, 权高峰, 等. AZ31 镁合金搅拌摩擦焊接头组织和冲击性能分析[J]. 热加工工艺, 2009, 38(3)
Zhang Yanjun, Ding Chenggang, Quan Gaofeng, et al. Microstructure and impact properties of AZ31 magnesium alloy FSW joint[J]. Hot Working Technology, 2009, 38(3)
- [4] 周全, 陈乐平. 半固态 AZ91D 镁合金制备工艺的研究[J]. 热加工工艺, 2009, 38(2)
Zhou Quan, Chen Leping. Preparing process of semi-solid magnesium alloy AZ91D[J]. Hot Working Technology, 2009, 38(2)

Application study of magnesium alloy in spacecrafts

Zhao Changxi

(Beijing Spacecrafts, Beijing 100190, China)

Abstract: Magnesium alloy is a kind of light metallic material, which excels in high specific strength and specific stiffness, good damping property, good properties in electromagnetic screening, and anti-irradiation performance, so it is widely used in spacecrafts. This paper analyzes the bottlenecks in processing magnesium alloy, such as the corrosion resistance, the welding, the machining and shaping. The problems and risks of the magnesium alloy applications in spacecrafts at different conditions are discussed, together with related process methods and proposals.

Key words: magnesium alloy; spacecraft; material processing; application research