零部件机械镀锌工艺的工业生产现状及展望

昆明理工大学材料保护研究所 (云南 650093) 章全奎 何明奕 王胜民 谭 蓉

【摘要】钢铁零部件采用电镀锌和热浸镀锌存在许多问题，机械镀锌是一种清洁生产工艺，机械镀锌工艺不仅能满足零部件的防腐蚀功能，而且克服了电镀和热浸镀中的不足，箱体内壁的机械镀锌拓宽了机械镀锌的应用领域。

一、引言

在世界范围内，以热浸镀和电镀的方法在钢铁件上获得防腐性金属涂层仍然是钢铁防腐的主体技术。采用锌及锌－铝合金镀层进行表面防护的钢铁产品，在发达国家已经达到钢铁年产量的30%～40%，我国虽然目前仅为10%，但却以6%的年增长量递增。

近年来，由于环境保护法规的强化，热浸镀和电镀因工艺过程由于产生一定的污染，因此在许多国家和地区受到了严格的限制。按近年提出“绿色加工”或“清洁生产”的概念，一些传统的工艺必将面临改进或淘汰，钢铁零部件的表面处理工艺正在面临一场革命，无污染的“绿色表面处理技术”因此应运而生。由于机械镀锌具有能耗低、有色金属用量少和生产过程无污染等特点，加之政策的提倡和鼓励，市场前景广阔，投资效益好，已成为表面处理界大力推行的清洁生产技术之一。

机械镀锌以钢铁基体的零散小件为主要加工对象，目前这些产品已被国内市场逐渐认可，主要在国际市场流行，成为我国金属表面处理行业对外加工的一种新兴品种，常年出口美国、澳大利亚等国家，并用于建筑工程、高速公路等领域。

二、机械镀锌

1. 机械镀锌工艺

国内典型机械镀锌工艺流程如图1所示，即把经过镀前处理的零件放入机械镀滚筒中，加入水和玻璃珠，转动滚筒形成一个具有碰撞和搓碾作用的流态环境，根据预定的镀锌厚度加入锌粉和药剂（保持性活化剂A、复合沉积剂B），在化学沉积和机械碰撞的共同作用下使零件表面形成镀锌层。前处理包括脱脂、除蜡和除锈，可采用热碱法、电解法、高温化学法、氧化法除油及除蜡；酸洗或其他方式除锈，目的是去除被镀工件表面的油污、氧化皮等杂质，暴露出被镀件的基体表面，以保证将形成的镀层牢固地结合在基体表面上。后处理的方法为150℃保温1～1.5h，目的是为了烘干工件表面的水分，强化镀锌层和消除氢脆。

前处理 → 加料（水、玻璃珠、工件） → 基层建立

镀层增厚 → 水抛光 → 出料 → 后处理

图1 机械镀锌工艺流程

2. 机械镀锌的特点

(1)镀层特性 镀层的耐腐蚀性在锌层厚度相同的情况下与电镀和热镀锌相当，含铝的合金镀层耐腐蚀性更好。同时机械镀过程中无电解效应，氢原子不易在基体中析出，零件不发生氢脆，适合于高强度和弹性零件的表面镀覆。

(2)镀层厚度易控制 机械镀锌层厚度可依零件的防腐蚀要求决定，可在5～110μm范围内通过调节加料量予以控制，能较好地实现产品的防腐蚀功能与生产成本的合理控制。一般5～20μm为薄层，30～60μm为中厚层，60μm以上为厚层。薄层镀锌的功能与传统的电镀锌相当，中厚镀层用于防腐蚀期为5～10年的地方，厚镀层与热浸镀锌相当。

(3)与环境的共存性好 经环保部门测定，生产车间和作业场所的工作地点噪声均未超过85dB（A），符合《工作企业卫生标准》（试行）中的有关规定；镀锌废水处理后可以达到1级和2级水质标准，循环使用或外排都符合GB8978—1988《污水综合排放标准》和GB4913—1985

《重有色金属工业污染物排放标准》中的有关规定。

(4) 生产安全　机械镀的全过程完全在室温下完成，生产安全性好，且工艺十分便于机械化和自动化生产，劳动强度低，生产环境好。

三、机械镀的专用设备和成套设备

机械镀设备可以分为专用设备、机械化成套设备和智能化成套设备三种。

1. 专用设备

专用设备的功能主要是完成机械镀的镀层形成（形成锌层或其他合金镀层），提供机械碰撞力和使混合料液形成合理的流态。如把工件、玻璃丸、水、金属粉和添加剂视为一个流体，则设备应满足以下功能：

(1) 造成工件与玻璃丸的碰撞和搓碾运动。

(2) 流体处于被搅拌的浑沌状态，避免金属粉、添加剂和工件形成按质量和粒度的偏聚分布。

(3) 具有装卸料的功能或便于装卸料。

昆明理工大学针对国内的工厂情况，研制出的通用型机械镀锌专用设备(如图2所示)，具有无级调速的滚筒，可360°正反向翻转以满足不同位置装卸料，并能在20°～60°之间循环摇摆匀料，功能完全满足机械镀锌工艺的动作要求。

图2　机械镀锌专用设备(JDX100－3)

2. 机械化成套设备

机械镀专用设备和辅助设备（重物加料系统、镀件/玻丸自动分离清洗机、镀件干燥/强化炉等）配套组合，组成实现工艺全过程的机械化成套设备。

3. 智能化成套设备

在机械化成套设备的基础上采用工业PC和PLC进行智能化程序控制，实现可按被镀零件类型、被镀面积、镀层厚度和镀层外观色泽等要求输入参数，自动完成工件机械镀锌的全部工艺动作和原料的自动定量加入。

四、零部件机械镀锌的应用现状

目前机械镀锌主要适用于小零件的表面镀锌，主要产品为射钉、垫片、紧固件、铰链和环链等。机械镀锌产品如图3所示。

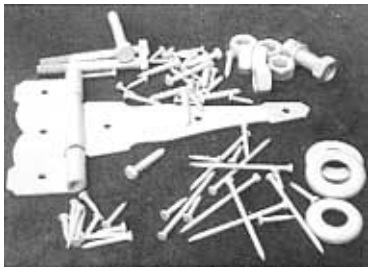

图3　机械镀锌产品

1. 射钉的机械镀锌

国内射钉产品最突出的问题是电镀后氢脆严重，影响产品的质量，电镀后经150℃、2h去氢处理的射钉仍约有50%的废品率。采用机械镀锌工艺后，此问题得到了良好解决。

射钉机械镀时滚筒宜采用橡胶作为衬里，不宜采用PVC等材料，否则将造成钉尖和钉头锌层脱落。

2. 垫片、紧固件机械镀锌

几乎所有的铁基垫片、紧固件都可采用机械镀锌来进行表面防腐处理。螺栓和螺母等紧固件，规格品种很多，如汽车用带有弹簧垫片的高强度螺栓。机械镀锌时应注意以下几点：

(1) 应采用ϕ0.1～0.3mm的细玻璃珠，以保证螺栓及垫片均能得到很好的镀锌层。

(2) 计算表面积时应计入螺纹面积。

(3) 滚桶转速不宜过高，以防螺纹段过冲击而被损坏，或者无螺纹段的镀锌层出现划痕或损伤。

3. 环链机械镀锌

环链一般在户外或海洋气候中使用，表面防护以镀锌为主。电镀锌环链的镀层较薄，不能满足海洋潮湿环境的要求，热浸镀锌操作困难，容易产生粘团、结疤等缺陷，且镀层厚度不易控制。用机械镀锌则可较好地实现环链的表面防护处理，且镀层均匀、耐腐蚀性能优良。由于环链重量大、尺寸长，所以为了防止链条在滚筒中绞成一团影响镀层质量，在施镀前需进行排链。

4. 铰链的机械镀锌

处于室外暴露或半暴露的铰链（用于车库、

仓库等），要求表面有较好的耐腐蚀性能和稳定的外观。采用机械镀锌较热浸镀和电镀锌在防腐功能、生产成本和效率等方面具有综合优势。

铰链机械镀锌需要注意的是：铰链表面非常光滑，边、棱上存在的刃口和尖角，在镀锌过程中将不断划伤镀锌层，影响镀层的耐蚀性和外观。最有效的方法是镀前用有磨料的振动磨光机处理1～1.5h，去除边、角上的刃口，使铰链的两个大平面毛化，有利于锌粉的沉积。

5．箱体的机械镀锌

机械镀锌工艺多年来一直被用于加工结构简单、尺寸小的五金件，箱体内腔机械镀锌的成功应用，是对机械镀锌工艺的一次突破。挖掘机用油箱属于尺寸较大的箱体结构件（结构见图4，尺寸为：723mm×688mm×777mm），采用钢板焊接而成，内壁要求镀锌防腐。如采用电镀锌钢板焊接成形，焊接过程将造成焊缝区及热影响区钢板表面镀锌层气化、钢板表面氧化，油箱在使用前即发生严重腐蚀；若采用钢板焊接成形后进行电镀锌，需要在箱体中灌入镀液，插入阳极，由于仅有一个 ϕ150mm 的孔可以利用，阳极的放置和分布均存在问题，此外箱体内充满镀液，反应生成的气体难以逸出；采用热浸镀则由于油箱尺寸和结构的原因，箱体浸入锌池后锌液的进入与倒出都很困难，并可能会发生爆炸（按热浸镀的工艺要求，工件不能是封闭或近似于封闭体）；如果采用热喷涂，也会因箱体结构的原因使得操作十分不便，使镀层质量难以保证。

针对以上情况，现采用钢板焊接成油箱再进行机械镀锌的工艺方法，成功解决了采用镀锌板制作的箱体在焊缝及热影响区易发生锈蚀的问题。

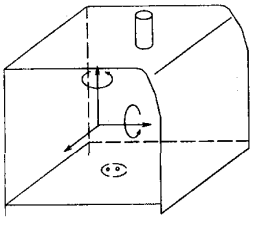

图4　挖掘机油箱结构

（1）油箱内壁机械镀锌设备　针对挖掘机油箱的结构，在机械镀锌专用设备上设置一个能嵌入油箱的矩形框架，使油箱既作为镀桶又作为被镀件。为了保证油箱的6个内表面都能完整施镀，设备在运转过程中需使油箱内的混合浆液的流态呈三维旋转运动。设备如图5所示。

（2）油箱内壁机械镀锌镀层质量　机械镀锌镀层无起皮、无夹杂、无结瘤、无气孔、无漏镀及其他影响镀层外观和性能的缺陷。油箱内壁整体镀层均匀（经涂层测厚仪测试6个内表面的厚度在10～13μm之间）。

图5　油箱镀锌设备实图

经过试验和生产验证，机械镀锌工艺可以在挖掘机油箱体内表面形成完整的镀锌层，因而克服了传统的热浸镀、电镀和喷涂方法不易在箱体内表面形成无缺陷镀层的障碍，解决了焊接件箱体内表面的防腐问题，同时也拓宽了机械镀工艺的应用范围。

五、零部件机械镀锌的发展展望

由于机械镀锌设备和工艺的局限，使得机械镀锌的产品种类在一定程度上受到了限制，比如钢结构件、长线材和管材等在目前均无法施镀，而对于小尺寸的零部件，机械镀锌则具有其他镀种无法比拟的优越性。

据统计，国内适合于机械镀锌的产品有交通、机械、建筑用的紧固件及各种垫片、水暖管件、射钉、环链和铰链等，每年约100万t。目前实际应用机械镀锌的仅有1.5万t左右的年产量，然而采用机械镀锌的工件的种类正在不断增多，镀层的质量也在不断完善。1999年国内颁布了机械镀锌的行业标准，使产品的性能和质检标准与国际接轨。2003年1月清洁生产促进法的实施，以及我国工业走可持续发展的方向等都为机械镀锌技术的广泛推广提供了良好的发展机遇。相信该技术的应用会有越来越美好的发展前景。

（20040928）