经验交流

电弧喷涂金属涂层常见缺陷与防治探析

王延东[1]，杨笑宇[2]，晁宇[1]，孙寅[1]，倪雅[1]，谢谦[1]
（1.江苏中矿大正表面工程技术有限公司，徐州 221008；2.中国矿业大学，徐州 221008）

[摘 要] 通过从施工质量控制层面分析，总结了电弧喷涂金属涂层常见缺陷产生的原因，从根本上对这些缺陷进行防治，以提高电弧喷涂涂层外观、附着力等性能，达到预期防腐蚀效果，增加钢结构使用寿命，降低因腐蚀造成的经济损失。

[关键词] 电弧喷涂；建造物；使用寿命；常见缺陷；防治
[中图分类号]TG178 [文献标识码]B [文章编号]1001-3660(2010)02-0096-04

Arc Spraying Metal Coating Defects and Prevention

WANG Yan-dong[1], *YANG Xiao-yu*[2], *CHAO Yu*[1], *SUN Yin*[1], *NI Ya*[1], *XIE Qian*[1]
(1. Jiangsu Mine Taisho Surface Engineering Technology Co Ltd, Xuzhou 221008, China;
2. China University of Mining Materials Science and Engineering, Xuzhou 221008, China)

[**Abstract**] It the level of construction quality control analysis of arc-sprayed metal coating, the causes of common defects were summarized , fundamentally on the prevention and treatment of these defects in order to improve the appearance of arc-sprayed coating, adhesion and other properties, to achieve the desired anti-corrosion effect, increase steel service life, and reduce economic losses due to corrosion.

[**Key words**] arc spraying; construction materials; life; common defects; prevention

1967 年，美国东部快乐岬与诺加之间的一座铁桥，在使用 40 年后塌落于俄亥俄河中，使 46 人丧生，调查表明，倒塌原因系大气腐蚀造成的应力腐蚀开裂。经济参考报 2006 年 9 月 11 日报道：统计表明，2000 年，我国钢结构年腐蚀损失达 5 000 亿元，约占国民生产总值的 5%，目前仍有加大的趋势。而腐蚀、应力腐蚀和腐蚀疲劳是使这些钢结构建造物退出工作、寿命降低的重要原因之一。从发达国家的经验和数据看，1/4 以上的锈蚀损失可通过防腐蚀手段进行控制。而电弧喷涂工艺已广泛应用到矿井、电厂、桥梁、场馆、电视塔等钢结构防腐的各个领域。

1 电弧喷涂层长效防腐性能与常见的缺陷及危害

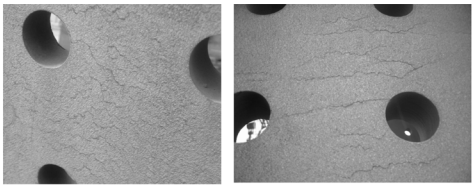
1.1 电弧喷涂金属涂层防腐蚀长效性

电弧喷涂涂层与钢铁结合为机械热相嵌（镶嵌）和微冶金结合，涂层结合力高，涂层厚度可以从几十 μm 到几 mm 的大范围内变化，涂层质量优良。电弧喷涂层的阳极与阴极面积比远大于 1，阴极保护效果充分。锌、铝、铝镁合金及镍铬合金等为常用的金属喷涂材料，其中，铝涂层在大气环境下的腐蚀速率仅为 2.3～6.5 μm /a，涂层耐腐蚀寿命可以由涂层厚度任意选取，如 180～300 μm 厚度的铝涂层，可以提供钢铁 28～64 a 的腐蚀保护。因此，采用电弧喷涂工艺，钢结构防腐效果显著，在 20 a 内无需维护，可节约大量的修补维护费用[1]。在实际施工和应用中笔者发现，如果不严格控制电弧喷涂工艺技术参数，将导致电弧喷涂层存在众多的缺陷，不仅难以发挥长效防腐效能，还会给施工工程造成严重安全隐患和重大经济损失。

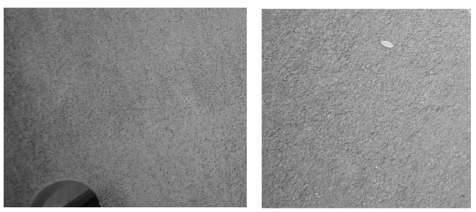
1.2 电弧喷涂层常见的缺陷及危害

电弧喷涂层常见的缺陷有起皮、鼓泡、大熔滴、溜缀、松散粒子、裂纹、孔隙率大、表面粗糙、返锈等，涂层表面溜缀、粗糙和返锈[3-4]见图 1。

[收稿日期]2010-01-07；[修订日期]2010-02-28
[作者简介] 王延东(1972－)，男，吉林永吉人，工程师，主要从事桥梁钢结构防腐蚀施工管理。



a 表面“流缀”现象



b 铝面返锈　　c 表面粗糙

图 1　常见缺陷

Fig. 1 Common defects

电弧喷涂层常见缺陷的危害是：金属防腐涂层不能对钢材基体形成有效保护，易在起皮、鼓泡、孔隙率大和裂缝处锈蚀，并会从锈蚀处蔓延，导致局部或全部失去防腐作用；表面粗糙、孔隙率大不仅会影响涂装后的外观效果，还会致使封闭油漆消耗增加，同时降低金属涂层与封闭油漆涂层的协同效应；返锈则直接使防腐涂层失效。防腐涂层起不到防腐效果，势必造成钢材迅速腐蚀，直接威胁到钢结构建造物的使用安全和寿命，同时失去了钢结构建造物防腐的经济意义。

2　电弧喷涂层常见的缺陷原因分析与防治

2.1　缺陷产生原因分析

涂层缺陷产生原因可采用统计分析方法，常见且实用的有因果分析图法、列表法，因果分析图通常从人、机、料、法、环 5 个因素着手，层层分析，具有简便、易行、直观的优点。以涂层起皮为例绘制的因果分析图见图 2。

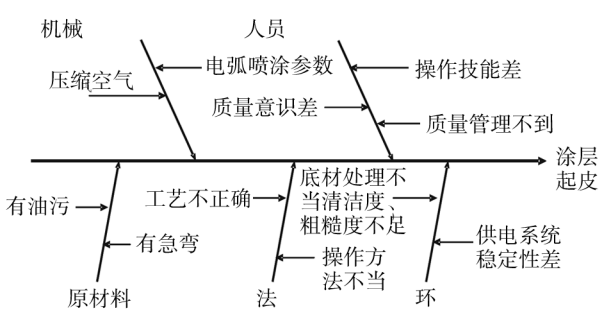


图 2　对于涂层起皮的因果分析图示例

Fig. 2 Sample causal analysis diagram for the wating from the skin

图 2 仅为因果分析图示例，实际分析中还要对第 2 层次原因进一步分解，可细化到 5，6 个层次，如操作技能差可分解为培训考核不到位和操作人员素质低 2 个第 3 层次，培训考核不到位又可分解为负责培训人员未尽责、考核内容与实际脱节及培训监督不到位等第 4 个层面原因，如此层层分解直至找到产生该缺陷的每个细节。

2.2　电弧喷涂层常见的缺陷分析与防治措施

电弧喷涂层缺陷的预防措施则可根据因果分析图得出的结果进行相应处理，采取组织措施、技术（工艺）措施、管理措施和经济措施进行有效防范，同时运用事前控制、事中（过程）控制及事后控制方法从根本上减少或杜绝各种缺陷的产生。电弧喷涂层常见缺陷产生的原因、处理方法和预防措施见表 1。

对于电弧喷涂层常见缺陷，首先根据实际情况采取因果分析法确定影响涂层质量的因素，其次针对各因素采取预防措施，对出现的质量问题则根据产生原因进行纠正，杜绝再次发生。仍以电弧喷涂层出现起皮为例，对应 2.1 章节起皮原因中人员操作技能差的分析结果，采取的措施有招聘操作工时强调有工作经验者优先、新员工培训考核合格后方可上岗、采用与实际施工相符的内容作为教材及强化培训监管等，以此为预防措施。同时制定切实可行的质量奖惩制度，对各工序操作工技能较高的给予奖励、对出现质量问题责任人予以严惩，激励操作工、质检员、项目质量负责人的积极性，形成良好的创优质工程的氛围，促进员工操作技能和质量意识的提高，保证涂层质量。

3　电弧喷涂金属涂层质量控制效果实例

采用电弧喷涂长效防护技术的武汉军山长江公路大桥[2]于 2000 年投入使用，其由江苏中矿大正公司防腐施工的钢箱梁外表面至 2009 年 12 月防腐涂层体系十分完好，未出现锈点；该桥钢箱梁外表面采用了电弧喷涂层与封闭油漆涂装相结合的复合涂层防腐体系，并在防腐蚀施工过程中采取了严格的过程控制方法，结合预防纠正措施，坚持上道工序为下道工序服务的理念，严把质量关。为确保涂装体系的防腐效能，在表面处理、喷砂除锈工序完成后得到无油、无水、干燥而清洁的粗糙表面，保证了电弧喷涂金属层与钢材基体的结合性能；在电弧喷涂工序严格控制喷涂电压、电流、气压、枪距等工艺参数，确保了金属涂层外观、厚度达到设计要求；随后的封闭、油漆涂装每道工序仍坚持本道涂层质量检验合格方可进行下道工序的原则，采用自检、互检、专检和报检结合的检测手段，严格控制各道涂层质量，为实现涂装体系的设计防腐寿命打下

了坚实的基础。笔者现场调研时发现，由另外一家公司同样采用电弧喷涂长效防腐技术防护的桥面系栏杆（防撞栏、维修道护栏），则由于没能严格控制电弧喷涂工艺参数，导致电弧喷涂层存在各类缺陷，10 年后即普遍出现了锈蚀现象，甚至出现喷铝涂层起皮、脱落的严重锈蚀问题。安徽宿县桃园煤矿主井井筒装备于 1990 年完成投入生产，至今近 20 年，仍保持良好的防腐效果，钢材没有受到腐蚀；上海磁悬浮列车于 2002 年建成通车，轨道功能件的电弧喷涂和封闭油漆复合防腐涂层时至今日防腐层保持良好。桃园煤矿主井井筒装备、上海磁悬浮列车轨道功能件在防腐施工过程中都采取了严格的质量控制措施，因此能够达到长效防腐的效果。

表 1 电弧喷涂层常见的缺陷产生的原因及防治

Tab.1 The common cause and prevention of arc sprayed coating

缺陷	现 象	产生原因	处理方法	预防措施
鼓泡	涂层表面不平滑，形成形似气泡状涂层表面。	基体表面处理不合格，有油。 空气系统不符合要求，压缩空气中有油。 电压、电流等工艺参数不合适。	喷砂打掉鼓泡，重新喷涂。	严格控制压缩空气质量，压缩空气中不得存在杂质、油水。 严格控制电压、电流等参数。
起皮	金属涂层局部与钢材基体脱离翘起。	基材处理不当，如基材上除油不彻底或粗糙度不足。 压缩空气中有油、有水。 喷涂枪与钢材表面距离太大等。	除掉起皮的金属涂层，按设计要求处理基体得到无油、无水且粗糙的钢材表面后，采用干燥、无油的压缩空气重新喷涂。	严格控制钢材表面处理的清洁度和粗糙度两大质量指标。 严格控制压缩空气质量。 加强操作工培训考核、提高操作技能。
溜缀	类似涂料涂装中流挂现象，表面呈不规则的条型流动状凸痕。	喷涂电流或电压过大、压缩空气压力太高。 喷涂枪与钢材表面距离不当等。	严重时采用砂纸打磨平整，缺陷面积较小时可不进行处理。	严格控制电弧喷涂电流、电压及压缩空气压力等工艺参数。 加强操作工培训考核、提高操作技能。
孔隙率大	采用 JB/T 7509 进行试验，蓝色斑点密度＞3/cm^2，即为不合格	喷涂电流过大、电压低。 喷涂枪与钢材表面距离不当。 压缩空气压力不足。	严重时应喷砂除掉涂层重新喷涂，面积较小时可采用火焰喷涂方式覆盖一层相对较薄的金属涂层。	严格控制电弧喷涂电流、电压及压缩空气压力等工艺参数。 加强操作工培训考核、提高操作技能。
大熔滴	喷涂层表面有肉眼可见较大金属颗粒。	导电嘴或导电管磨损。 喷涂电压、电流过大。 喷涂使用的压缩空气气压过低。	铲掉大熔滴，必要时重新喷涂。	及时检查导电嘴、导电管磨损情况，定期更换或调整安装位置。 适当调低电压和电流。 调整好空气系统压力和流量。
裂纹	涂层有不规则裂纹，未形成连续、均匀的外观	喷涂电压、电流过大。 喷涂使用的压缩空气气压过低。	重新喷涂。	适当调低电压和电流。 调整好空气系统压力和流量。
松散粒子	喷涂粒子粒度大，涂层疏松。	喷涂时两次走枪未重叠。 喷涂电压、电流参数不当。 喷涂使用的压缩空气气压过低。	重新喷涂。	强化操作工培训，提高操作技能。 适当调整电压和电流。 调整好空气系统压力和流量。
表面粗糙	金属涂层表面不平整，肉眼可见凹凸不平。	喷涂电压、电流参数不当。 喷涂使用的压缩空气气压过低。 喷涂时枪速、枪距不当。	可不必进行处理。	适当调整电压和电流。 调整好空气系统压力和流量。 强化操作工培训，提高操作技能。
返锈	金属涂层上出现铁锈。	基体处理不当。 涂层厚度过低。 孔隙率大。	将返锈部分喷砂除掉，重新喷涂。	基材预处理不合格不得进行电弧喷涂作业。 保证涂层厚度。 见表中“孔隙率大”的内容。

实践表明，钢结构防腐蚀最佳方案为采用电弧喷涂金属层与封闭油漆涂装的复合涂层防腐体系。只有在设计和建造的同时，对其进行卓有成效的防腐，严格控制防腐涂层质量形成，尤其是电弧喷涂层的质量，才能确保钢结构建造物的安全使用和预期的寿命。

4 结论

通过对各种常见的金属涂层缺陷产生的原因及防治方法的分析总结，采取相应的防治措施，确保有效控制电弧喷涂层的质量，即保证了涂层的外观和防腐蚀效果，又可以提高防腐施工的效率、减少不必要的返工及维护费用，增加钢结构建造物使用寿命和经济效益。

[参 考 文 献]

[1] 易春龙. 电弧喷涂技术[M]. 北京：化学工业出版社，2006.
[2] 任必年. 公路桥梁腐蚀与防护[M]. 北京：人民交通出版社，2002.

(上接第 82 页)

[参 考 文 献]

[1] 钟卫佳. 高品质无氧铜的生产[J]. 世界有色金属，2003，(9)：8－11.
[2] 于清秀. 无氧铜的制备及电子铜的发展趋势[J]. 电工材料，2006，(1)：10－13.
[3] 王艳辉. 国外无氧铜管材组织与性能分析[J]. 湖南有色金属，2002，18(4)：29－32.
[4] 岩石. Cu/Nb-Ti 超导线材常温抗拉试验方法[J]. 等离子体应用技术快报，1999，(11)：18－20.
[5] Stuartv W. 超导体对铜市场的影响[J]. 有色金属技术经济研究，1989，(5)：12－18.
[6] 宁兴龙. 磁体用超导材料[J]. 稀有金属快报，2003，(3)：3－4.
[7] 雷光勇. 铜及铜合金酸洗工艺探讨[J]. 表面技术，1991，20(1)：40－43.
[8] 钟卫佳. 铜与铜合金加工实用手册[M]. 北京：冶金工业出版社，2007.
[9] 曾祥德. 铜制件光亮酸洗钝化无污染工艺[J]. 中国表面工程，1996，(3)：39－42.
[10] 吴祖昌. 铜及铜合金零件无黄烟光亮酸洗工艺研究与应用[J]. 表面技术，2001，30(3)：9－11.
[11] 曾祥德. 铜及铜合金的无黄烟光亮酸洗工艺[J]. 材料保护，2003，36(8)：20－23.
[12] 杨飏. 氮氧化物减排技术及烟气脱硝工程[M]. 北京：冶金工业出版社，2006.
[13] 张卯均. 三废治理与利用[M]. 北京：冶金工业出版社，2001.
[14] 苏彦勋. 流量计量与测试[M]. 北京：中国计量出版社，1982.
[15] 谭天恩. 化工原理[M]. 3 版. 北京：化学工业出版社，2006.
[16] Ahmed Syed Younus, Asan Grandhid P, AI_farayedhi A A. Pipeline Drying Using Dehumidi-fied Air with Low Dew Point Temperature[J]. Applied Thermal Engineering，1998，18(5)：231－244.
[17] Battarra Viliam，SANDRO Selandari, Ardo Ugobil. Mathematieal Model Predicts Performance of Pipeline Drying with Air[J]. Oil& Gas Journal，1984，82 (24)：114－116.
[18] 于国琮. 化工机械工程手册[K]. 北京：化学工业出版社，2003.
[19] 黄虎. 压缩空气冷冻干燥系统工作过程热力计算及实验验证[J]. 南京师范大学学报，2004，4(1)：5－7.
[20] 邹家庆. 工业废水处理技术[M]. 北京：化学工业出版社，2003.

(上接第 92 页)

[4] 傅戈雁，石世宏，欧阳八生，等. 覆层零件多冲碰撞试验与失效特征[J]. 材料科学与工程学报，2004，22(2)：216－219.
[5] 高镇同，蒋新桐，熊峻江. 疲劳性能试验设计和数据处理：直升机金属材料疲劳性能可靠性手册[K]. 北京：北京航空航天大学出版社，1999.
[6] 何仁斌. MATLAB6 工程计算及应用[M]. 重庆：重庆大学出版社，2001.
[7] 韩於羹. 应用数理统计[M]. 北京：北京航空航天大学出版社. 2002.
[8] 金星，洪延姬. 可靠性数据计算及应用[M]. 北京：国防工业出版社，2003.
[9] 邓勃. 分析测试数据的统计处理方法[M]. 北京：清华大学出版社，1995.
[10] 《数学手册》编写组. 数学手册[M]. 1 版. 北京：高等教育出版社，1979.