热镀锌机组碳化钨喷涂工艺辊表面涂层失效分析

张春青，王鲁

（宝日汽车板公司，上海 201900）

摘要：本文主要研究了热镀锌机组喷涂碳化钨的工艺辊在使用过程中发生表面喷涂层发生剥落的原因。工艺辊基体材质为 45 号钢，表面采用超音速喷涂碳化钨涂层，该工艺辊服役不到一年时间，发现辊面中部喷涂层剥落。针对辊面喷涂层剥落问题，进行了喷涂材料的成分分析、涂层的微观分析等。研究发现喷涂前的喷砂工艺非常关键，在喷涂层剥落之处可以发现残留的砂粒。通过涂层断面分析，进一步的证明了在喷涂前的喷砂毛化工序中，没有完全清除残留的砂粒会导致在使用过程中喷涂层的剥落。

关键词：工艺辊；碳化钨涂层；失效分析；喷砂

中图分类号：TG174.4 文献标识码：A **文章编号**：1674-7127(2020)09-0011-05
DOI 10.3969/j.issn.1674-7127.2020.03.011

Failure Analysis of the WC-coating on CGL Process Roll

Chunqing Zhang, Lu Wang

(Baosteel and NSC Automotive Steel Sheets Co., Ltd., Shanghai 201900)

Abstract：The spalling reason of the sprayed WC coating on the roller in the continuous hot-dip galvanizing line (CGL) was studied. The base material of the process roller is 45 steel, and the surface is sprayed with tungsten carbide coatings by High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) spraying. After less than one year service, it is found that the spraying layer in the middle of the roller surface peels off. Aiming at the spalling of spray coating on roller surface layer on the roller surface, the composition analysis of the spraying material and the micro analysis of the coating are carried out. The analysis shows that the sandblasting process before spraying is very important. The residual sand particles can be found at the spalling places of the spraying layer. Through the analysis of coating cross section, it is further proved that in the process of sand blasting before spraying, the residual sand particles are not completely removed, which will lead to the peeling off of the spraying layer during the service.

Keywords: Process roller; WC-Co coating; Failure analysis; Sandblasting

0 引言

镀锌工艺分为热镀锌和电镀锌。其中，热镀锌工艺以其低成本、方法易行、产品质量提高明显等特点，成为广泛应用的金属防锈方法之一[1]。热镀锌板已广泛应用于汽车、家电等行业。热镀锌板的生产工艺主要包括原板准备、镀前处理、退火、热浸镀、镀后处理等。在镀锌池中的沉没辊、稳定辊，及连退炉中的高低温炉辊、转向辊、纠偏辊等与带钢紧密接触的辊子均被称为“工艺辊”。带钢在退火炉的基本工作状态是充氢保护气氛中加热到再结晶温度以上，而浸镀设备则涉

第一作者：张春青 (1977-)，男，高级工程师，E-mail: zhangchunqing@baosteel.com。

及到 450℃~480℃的液态锌环境。工艺辊在实际应用时发生蠕变、腐蚀 [1-4] 等失效形式。如在连续退火炉中服役十几年后的辊子，由于高温长时服役导致材料内部出现σ相和蠕变孔洞，辊面发生变形，进而导致轧制出的钢带不平 [5-6]。沉没辊在使用过程中，沉浸在熔融锌液中，受到活性强的锌液的腐蚀，辊面易于产生点蚀而变得粗糙 [1-3]，从而造成镀锌板出现表面麻点缺陷 [4]。

为解决工艺辊的腐蚀和磨损等问题，在不改变基体材料成分的前提下进行表面处理是目前常用的工艺措施。如通过渗镀法 [7]、热喷焊、热喷涂技术 [8-9] 等在工艺辊表面形成涂层。涉及涂层材料包括 W-Mo 合金、铁铝金属间化合物、WC-Co 系列金属陶瓷等，其中以超音速火焰喷涂 (HVOF) 碳化钨为代表的喷涂材料已广泛应用于热镀锌汽车板生产线。工艺辊表面采用碳化钨喷涂后，可以大大提高带钢表面质量。HVOF 制备的碳化钨涂层具有较好的结合力，对基体材料起到较好的保护。但是如果喷涂层失效剥落，则辊体母材将直接暴露在外面导致其很快失效。因此为了确保喷涂层能较好的保护辊系获得较好的带钢表面质量，有必要研究喷涂层发生失效的原因及影响因素。

WC-Co 系涂层在使用过程中发生腐蚀、磨损等失效。如在颗粒冲蚀作用下发生空蚀、磨损 [10]，磨损状态与涂层成分、结构特性等相关 [11]。在腐蚀介质作用下，WC 相和 Co 基粘结相发生微观电化学腐蚀 [12]。而在熔融锌液中，WC 相与锌液不发生反应，Co 与锌液反应生成脆性化合物，进而可能导致涂层开裂与剥落失效。Co 基碳化钨的喷涂层在锌液中会随着时间延长导致表面腐蚀，氯离子的存在也会导致碳化钨喷涂层的失效，大气环境及温度也会对磨损程度有很大的影响 [13]。本文研究的是热镀锌生产线上上机使用仅半年的工艺辊表面发生了碳化钨喷涂层的剥落。通过对比不同的喷砂工艺并进行了微观分析，证实碳化钨涂层的剥落与喷涂前的喷砂工序没有将砂粒完全清除有关。

1 试验方法

对上机使用仅半年就发生涂层剥落的工艺辊进行失效分析。该工艺辊表面 WC-12Co 涂层为 Praxair 的 JP5000 超音速火焰喷枪制备，涂层厚度约 150μm。喷涂过程中，喷涂距离 380mm，氧气流量 2000scfh，煤油流量 6.0gph，送粉速率 80g/min。现场收集该工艺辊表面喷涂层已发生剥落失效部分和未失效部分的样品进行实验室测试。并采用电感耦合等离子体原子发射光谱仪 (ICP, Agilent 725ES) 检测工艺辊的辊体材料成分，使用扫描电子显微镜 (SEM)、能谱仪 (EDS) 分析涂层的形貌和元素组成。为了研究喷砂后处理对界面微观结构的影响，对喷涂试验片喷砂后分别进行空气吹扫、空气吹扫耦合钢刷，并对不同喷砂处理后的试验片的涂层 / 基体界面进行微观分析。

2 辊面检查

现场观察到的炉外辊形貌如图 1 所示。从炉外辊的表面上可见涂层的锈蚀痕迹，锈蚀呈斑点析出状态，宏观呈现部分云纹状。在工艺辊中部可见涂层的剥落区域。工艺辊边缘处表面没有明

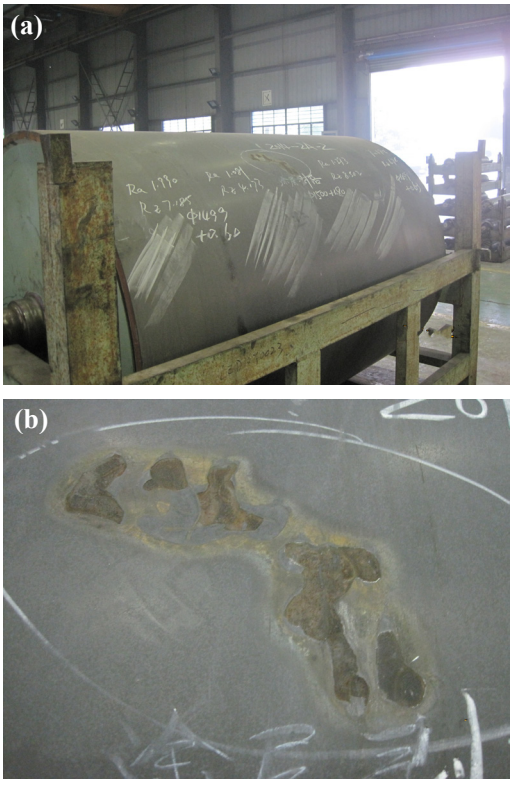

图 1 工艺辊宏观形貌：(a) 整体；(b) 中部剥落涂层

Fig.1 Macromorphology of process roll: (a) the overall; (b) the peeling coating in middle part

显的锈蚀痕迹，本研究中作为未失效部位。在本研究过程中，对剥落下来的涂层进行结构和成分分析。

2.1 涂层微观结构检测

剥落涂层的内表面形貌和横截面形貌如图 2 所示。剥落涂层的内表面比较光滑，没有明显的磨损迹象，这表明机械力不是涂层的失效原因。在涂层的截面可以发现一些孔洞，其数量高于未剥落涂层和相关文献报道的[14-15]，其形成机制需要进一步研究。

观察涂层与基体之间的结合界面（图 3），结果表明，界面附近的和远离界面处的涂层形态没有显著差异。然而，基体和涂层之间有许多黑色的区域，分析其成分为氧化铝，推测是喷砂后残留的砂粒。这可能是造成涂层剥落的主要原因。

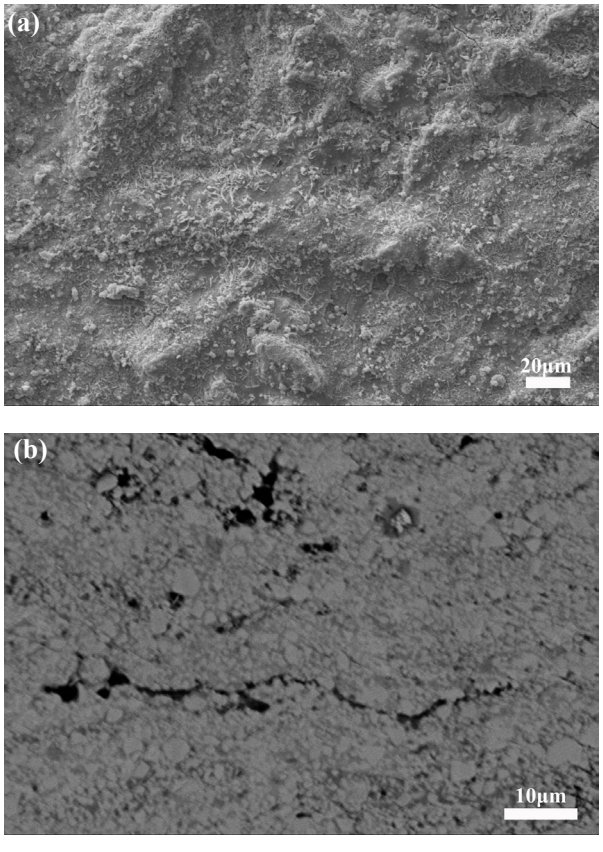

图 2 剥落涂层的微观形貌：(a) 内表面；(b) 横截面
Fig.2 Micromorphology of peeling coating: (a) internal surface; (b) cross section

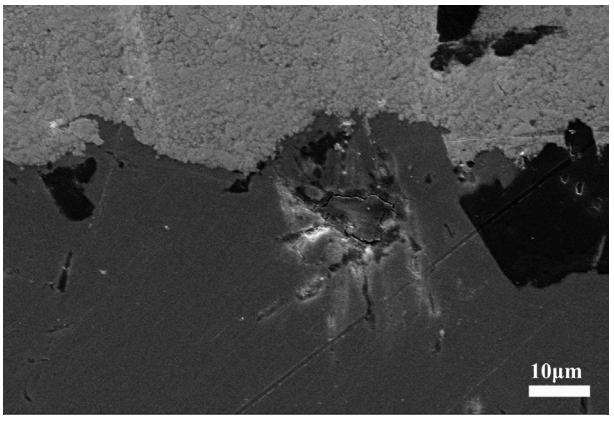

图 3 涂层和基体界面处的微观形貌
Fig.3 Micromorphology of the coating and substrate at the interface

2.2 涂层的化学成分分析

剥落涂层的化学组成通过 EDS 分析，该涂层成分为 WC-Co、氧和铁。氧、铁元素的 EDS 面分布图如图 4 所示，氧和铁均匀分布在涂层中。与从辊表面正常喷涂层处取下的试样作对比（如图 5 所示），剥落涂层的氧、铁元素的信号强度更高。可能是喷涂层剥落后，基体失去了保护层，与外界大气的接触后生成了氧化铁。

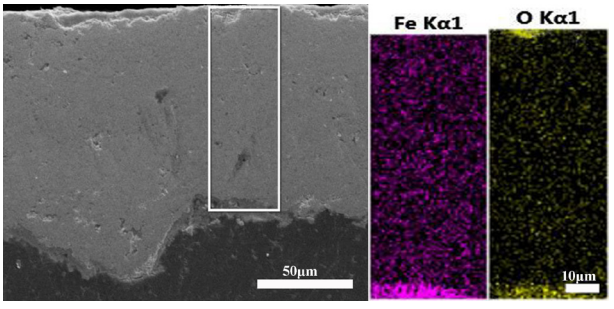

图 4 辊面剥落处涂层的 EDS 分析
Fig.4 EDS analysis of coating on peeling roller surface

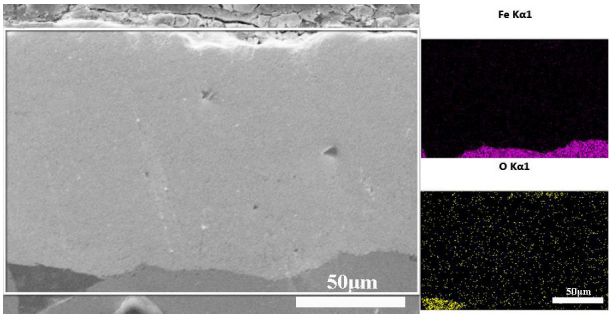

图 5 辊面正常处涂层的 EDS 分析
Fig.5 EDS analysis of coating on normal roller surface

失效涂层的分布位置聚集在工艺辊中部，而供货态辊子的中部呈现轻微外凸的形态。在炉辊存放和使用过程中，介质易于聚集从而导致腐蚀的发生。而涂层在使用过程中的受力状态是造成辊子中部涂层剥落的另一个原因。

3 喷砂处理对涂层界面形貌的影响

涂层和基体之间界面处的砂粒会影响涂层的结合强度。因此，有必要找到最佳的喷砂方法以满足喷涂层结合力的要求。本文设计了三个试验片，喷砂后对试验片基体的残留砂粒采用三种处理方法，包括无处理、空气吹扫和空气吹扫耦合钢刷，在不同处理方法的基体上进行喷涂，分别观察不同试验片界面的微观结构如图 6 所示，空气吹扫耦合钢刷的处理使界面处残留的砂砾更少。随机选取 10 个 SEM 图片，利用专业图像处理软件计算残余砂砾的总面积和平均距离，计算结果如图 7 所示。结果表明，残余砂粒的含量经空气吹扫耦合钢刷后明显减少。空气吹扫和无处理后，界面处残留的砂砾含量是接近的。残余砂粒是机械载荷作用下涂层开裂的初始点，可能会导致涂层的剥落。相应地，应采用在涂层与基体界面处残留砂砾较小的工艺进行喷砂处理，据文献报道，基体也可以通过干冰喷射进行清洁 [16]。

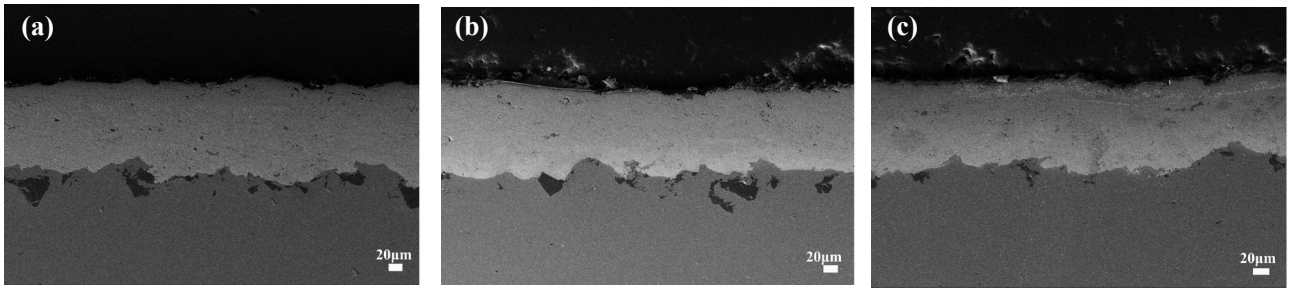

图 6 不同喷砂处理后的涂层 / 基体界面的横截面微观图： (a) 无处理；(b) 空气吹扫；(c) 空气吹扫耦合钢刷

Fig.6 Cross section micromorphology of coating/matrix interface after different sandblasting treatments

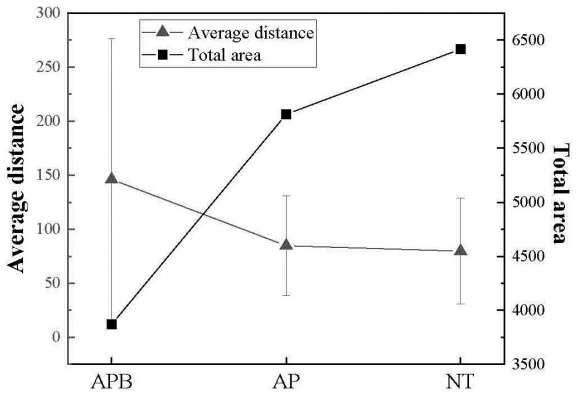

图 7 不同喷砂后处理的砂粒总面积和平均距离：APB，AP，NT 分别代表空气吹扫耦合钢刷，空气吹扫，无处理

Fig.7 The total area and average distance of sand grains after different sandblasting treatments: air purge coupled steel brush (APB); air purge (AP); none treatment (NT)

此外，如果工艺辊基体的化学成份有异常，也会影响喷涂层与基体之间的结合。利用等离子体发射光谱仪 (Agilent 725 ES) 分析碳钢元素含量，测得的结果见表 1 所示，基体材料满足 45# 钢的基本成分要求 (GB/T699-1999)。因此排除了基体化学成份异常引起的喷涂层剥落的原因。

4 结论

为了分析工艺辊表面涂层的失效原因，研究了辊面上的剥落涂层和正常涂层部位。在剥落涂层和基体之间的界面处发现了残余的砂粒。推测是辊面喷涂前的喷砂处理工艺中残余砂粒清理不充分造成的辊面涂层易于剥落。通过实验室模拟喷砂后辊面清洁的三种处理方法并进行喷涂实验，验证这一推断。同时通过实验分析证明喷砂后采用空气吹扫耦合钢刷处理，可以有效地减少残余砂砾，提高喷涂层与工艺辊基体的结合力。在失

表 1 基体和标准规范的化学组成 (wt.%)

Table 1 Chemical composition of matrix and standard specifications(wt.%)

	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
基体	0.21	0.6	0.016	0.013	0.048	0.023
45# 钢	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.035	≤0.035	≤0.25	≤0.25

效的涂层化学成份中虽然发现了氧化铁的存在，推测是喷涂层剥落后，基体失去了保护层，与外界大气的接触后生成了氧化铁，不是造成喷涂层剥落的根本原因。

参考文献

[1] 佘俊 , 任先京 , 于月光 , 等 . 镀锌沉没辊表面防腐研究 [J]. 材料导报 , 2006, 20: 429-435.

[2] 史浩 , 郭天旭 , 吕佳慧 , 等 . 沉没辊轴头的失效分析 [J]. 机械工程材料 , 2017, 41: 407-410.

[3] 吕佳慧 , 刘少武 , 王卫泽 . 稳定辊被动轴的失效分析 [J]. 机械工程材料 , 2017, 41(1): 210-212.

[4] 陈立章 , 史军锋 , 张国堂 . 辊面粗糙度对热镀锌产品表面质量的影响 [J]. 物理测试 , 2011, 5: 56-59.

[5] Huang J B , Wang L, Wang W Z , et al. Failure analysis of the furnace roller in continuous annealing line after long-term service at high temperature[J]. Engineering Failure Analysis, 2020,107,10457.

[6] Dini G, Bina M H, Monir S M, et al. Failure of a continuous-annealing furnace roller at Mobarakeh Steel Company[J]. Engineering Failure Analysis, 2008, 15(7): 852-862.

[7] 曹晓明 , 姜信昌 , 温鸣等 . 耐液态锌腐蚀材料的研究和应用 [J]. 金属热处理学报 , 1997, 18: 25-29.

[8] Seong B G, Hwang S Y, Kim M C, et al. Reaction of WC/Co coating with molten zinc in a zinc pot of a continuous galvanizing line [J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 138(1): 101-110.

[9] Jiang Z H, Tan X H, Zhang Y G, et al. Investigation of the corrosion behaviors of HVOF-sprayed carbide cermets coatings in molten Al-Zn-Si alloy bath [J]. Materials Protection, 2004, 37 (z2): 194-199.

[10] Ou G, Ouyang P, Zheng Z, et al. Investigation on failure process and structural improvement of a high-pressure coal water slurry valve [J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 96: 1-17.

[11] 丁彰雄 , 万文晨 , 赵辉等 . 热喷涂 WC-Co 复合涂层的研究现状及展望 [J]. 热喷涂技术 , 2012, 4(2): 1-5+16.

[12] Zhou Y K, Liu X B, Kang J J, et al. Corrosion behavior of HVOF sprayed WC-10Co4Cr coatings in the simulated seawater drilling fluid under the high pressure[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 109: 104338.

[13] Klünsner T, Zielbauer F, Marsoner S, et al. Influence of surface topography on early stages on steel galling of coated WC-Co hard metals[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2016, 57: 24-30.

[14] Sunny Z, Apurbba K. Dry sliding wear performance of nanostructured WC–12Co deposited through microwave cladding [J]. Tribology International, 2015, 91: 14-22.

[15] Lekatoua A, Sioulasa D, Karantzalisa A E, et al. A comparative study on the microstructure and surface property evaluation of coatings produced from nanostructured and conventional WC-Co powders HVOF-sprayed on Al7075 [J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 276: 539-556.

[16] Spur G, Uhlmann E, Elbing F. Dry-ice blasting for cleaning: process, optimization and application[J]. Wear, 1999, (233-235): 402-411.