

大直径“堆焊+喷涂”工艺辊技术研究

宝钢机械厂表面技术研究所 (上海 200900) 王树保 谭兴海 陈国喜

【摘要】 通过对该类辊制造难点的分析, 确定采用“堆焊+喷涂”工艺来开展该产品的国产化研发。首先通过小样落球试验, 测得最合适堆焊层硬度; 然后通过制作等效模拟辊, 对所开发的不同堆焊材料的硬度、显微组织、抗裂性能等进行了分析, 并优选出最佳的焊接材料。最后对优选的堆焊材料的喷涂试样进行了孔隙率、显微硬度和结合性能的分析。基于试验分析的结果, 本项目采用最佳工艺成功制造了一根实物辊。

一、概述

宝钢某冷轧热镀锌生产线主要以高质量的汽车板和家电板为主导产品, 随着产品质量要求以及产量的不断提高, 对机组上大量与带钢直接接触的工艺辊表面质量要求也越来越高。高硬度基体表面喷涂工艺辊的使用, 已经成为先进热镀锌生产线的发展趋势, 其中大直径工艺辊因其辊径过大, 超出了一般设备的制作能力, 制作难度很大。在国外, 该类辊子的制作一般是采用中碳钢表面感应淬火制作, 而国内各生产厂家受表面感应淬火设备额定功率、频率和机床尺寸的限制, 对该类大型辊子进行表面淬火处理的能力有限。

宝钢某冷轧热镀锌生产线的工艺辊规格为 $\phi 2000\text{mm} \times 1950\text{mm}$ 、 $\phi 1800\text{mm} \times 1950\text{mm}$ 等多种规格, 辊面表面喷涂前要求 48~53HRC, 有效厚度为 2~3mm。由于辊子壁厚一般只有 30mm, 使得辊子在堆焊过程中很容易发生变形; 再者, 堆焊层硬度均匀性、堆焊层裂纹都是难于解决的技术难题。本项目通过对该产品的分析, 确定采用“堆焊+喷涂”复合制造技术, 并重点研发堆焊材料、堆焊工艺, 以满足喷涂层对堆焊基体的要求。

二、试验分析

1. 堆焊层硬度需求分析

图1是宝钢某热镀锌生产线热喷涂顶辊使用后面面的缺陷形貌。

从中可以看出: 喷涂辊表面因锌渣的压入而形成了大量的凹坑, 凹坑形成后, 就会导致带钢表面出现划伤。

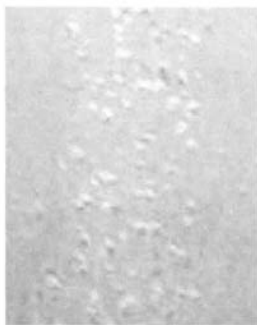


图1 顶辊表面凹坑缺陷

图2可以说明顶辊表面凹坑形成的基本过程: 即首先有锌渣 (Zn-Fe-Al 合金) 在辊面粘附, 锌渣的硬度一般要大于 500HV, 要比辊子基体 (通常是 Q235A 或 Q345A 材料) 高, 因此, 锌渣在带钢不断的压力作用下, 压溃了较薄的涂层, 使得涂层嵌入基体而形成凹坑。

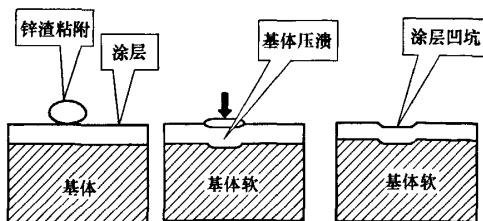


图2 凹坑形成过程

为了克服涂层被压溃, 可通过提高基体的硬度来解决。可基体硬度的提高, 是否会影响涂层与基体的结合强度呢? 为了正确回答这个问题, 可采用不同基体材料

和热处理条件下的试样，进行涂层的冲击试验。试验条件为：采用落球式冲击试验机，图3为试验机示意图。落球重为3.3g，冲击行程1000mm，冲击角度为60°，每组冲击球数为500，记录涂层出现裂纹的落球组数，以此来对比不同基体材料上涂层的抗冲击能力。试验的结果见图4。

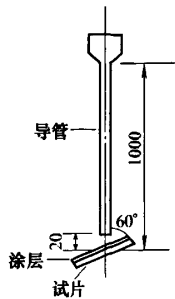


图3 落球试验机示意图

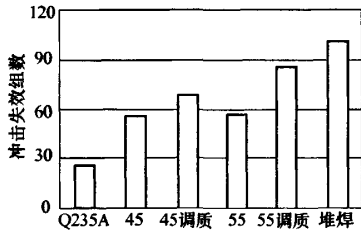


图4 不同基体材料的涂层抗冲击试验

上述试验的结果，基本上可以得出这样的结论：随着基体硬度的提高，涂层的抗冲击能力是提高了。当然，并不是基体的硬度越高，涂层的抗冲击能力都会得到加强；相反，当硬度超过一定值后，基体可能因为表面毛化程度不够充分，而导致涂层与基体的结合能力下降，

进而使得涂层抗冲击能力下降。由于此硬度值已经远远大于本文所设定的目标硬度（堆焊层硬度要求为50±4HRC），故在本试验中未作讨论。

2. 堆焊材料的选择和焊接试验

(1) 试验方法 本文设计了6种不同的堆焊材料，编号依次为DZJ01~DZJ06，堆焊制作模拟辊各一件，分别进行堆焊试验和测试分析，并通过对比优选出合适的材料和工艺，模拟辊的编号依次为BJM—01~BJM—06。材料编号和模拟辊编号一一对应。为了保证各焊接材料之间测试分析具有较好的对比性，各焊接材料采用了同样的焊接参数（注：该参数对每种材料都在最佳参数范围内），见表1。用于试验的模拟辊图样尺寸见图5。

表1 焊接参数

	预热温度 /℃	层间温度 /℃	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /mm·min ⁻¹
设定值	300	不控制	350~450	28~30	350~400
其他说明	不使用打底的焊接材料，直接使用硬面材料焊接5层				

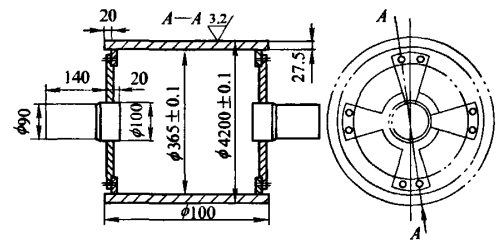


图5 模拟辊尺寸

(2) 模拟辊堆焊变形分析 为了测量本工艺过程所造成的辊子变形，以BJM—06辊为研究对象对辊子的变形情况进行了分析。表2为辊子内径的测试数据（同一处堆焊前、堆焊后测量值）。

表2 BJM—06 内孔直径测试数据

测量位置/mm	堆焊前内径/mm		堆焊后内径/mm		收缩变形量/mm	
	X—X	Y—Y	X—X	Y—Y	X—X	Y—Y
0	365.35	365.38	363.29	363.18	2.06	2.20
60	365.38	365.33	362.45	362.62	2.93	2.71
130	365.41	365.38	361.82	361.69	3.59	3.69
200	365.45	365.43	361.80	361.68	3.65	3.75
270	365.47	365.45	362.35	362.26	3.12	3.19
340	365.43	365.41	363.13	363.09	2.30	2.32

说明：①测量位置表示距模拟辊某端面的距离。②X—X、Y—Y表示的是互相垂直的两个方向。

从表2中可以看出,本项目中设计的模拟辊,在堆焊时发生了较大的焊接变形,尤其是辊子的中间部位,最大变形量(直径)达到3.75mm,而在辊子两端的变形量最小,最小变形量(直径)为2.06mm。在大直径辊的制作中,焊接过程造成的最大变形量约为3mm。对比分析模拟辊和实物辊:首先分析沿焊缝方向,对于一条单一的焊缝,沿焊缝方向的变形比率分别为(模拟辊以最大值计算,大直径辊按 $\phi 1500\text{mm}$ 直径、收缩变形量3mm计算):模拟辊0.92%,大直径辊0.2%;再比较垂直于焊缝方向,模拟辊两支撑间距400mm,最大变形量3.85mm;大直径辊两支撑间距约为400mm,最大变形量约为3mm,因此变形率分别为:模拟辊0.96%,大

直径辊0.75%,二者变形量相当。可以看出,在平行焊缝方向,模拟辊的变形率约为大直径辊的4.5倍;而在垂直于焊缝方向,模拟辊的变形率与大直径辊相当。

辊身变形情况可以反映焊接残余应力的分布状况。对于塑性较好的焊接材料,通过变形可以释放一部分应力;但是对于脆硬性材料,由于其屈强比高,材料塑性变形空间小,因此当残余应力很高时,直接导致焊接材料开裂。

据此说明,模拟辊的辊面情况,可以有效地反映实物辊的真实情况。

(3) 模拟辊堆焊层测试分析 模拟辊堆焊层硬度分析和抗裂性能分析汇总见表3。

表3 模拟辊堆焊层测试分析结果

测试项目	BJM—01 DZJ01	BJM—02 DZJ02	BJM—03 DZJ03	BJM—04 DZJ04	BJM—05 DZJ05	BJM—06 DZJ06
堆焊后裂纹	严重	微裂纹	微裂纹	微裂纹	较严重	微裂纹
车削后裂纹	未车削	无	无	无	严重	无
车前硬度 HRC	48.5	45.7	44.9	44.3	57.5	50
车后硬度 HRC	—	51	46.8	47.4	56.9	49.8
磨床磨削后 HRC	—	53.1	51.4	51	—	52.7

从表3中可以看出,辊面磨削后,除DZJ05号材料外,其他几种材料的硬度都可以达到或接近48~53HRC的要求硬度范围,但是DZJ01、DZJ05两种材料裂纹严重,无法应用。图6为BJM—01辊的辊面着色探伤照片,图7为BJM—06辊的辊面着色探伤照片,图8为对模拟辊辊面以下不同深度位置进行硬度测试的结果。可以看出,在DZJ03、DZJ04、DZJ06三种材料中,DZJ06的硬度均匀性明显优于其他两种焊接材料。



图6 BJM—01 辊面



图7 BJM—06 辊面

(4) 堆焊层显微组织分析 根据金相分析的结果,所选择的几种焊接材料,焊缝的微观组织均为马氏体组织,本文以DZJ01、DZJ06材料为例示意其组织形貌。图9为DZJ01的裂纹位置组织结构,从图中可以看出,存在典型的柱状晶结构,而且裂纹沿柱状晶晶界处开裂。

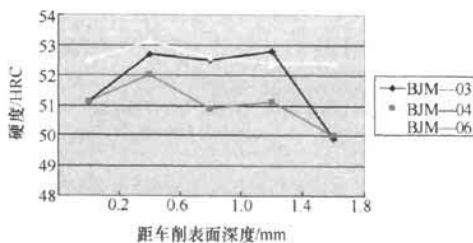


图8 不同深度处辊面硬度

从金相照片可以看出,柱状晶晶界处存在少量、线性分布的残余奥氏体。图10为DZJ06材料的金相组织。

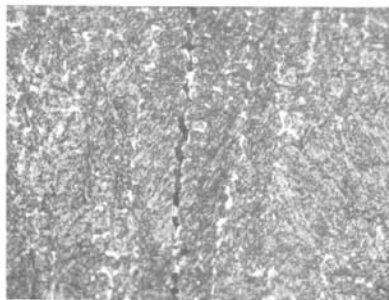


图9 DZJ01 裂纹处金相 250×



图10 DZJ06金相组织 500×

(5) 辊身喷涂层组织和结合性能分析 HVOF 超音速喷涂制备的涂层组织非常致密, 孔隙率 < 1% (见图 11); 与堆焊过渡层有很好的结合能力, 结合强度超过了 70MPa (粘接胶断裂, 故实际数据无法测出); 同时, 具有更高的硬度: 1100 ~ 1300HV; 并具有更好的耐冲击性能, 耐冲击性能超过 25 组。APS 等离子喷涂制备的涂层组织则较为疏松, 孔隙率约 10% (见图 12); 与堆焊过渡层的结合强度为 52MPa; 同时, 涂层硬度仅为 700 ~ 900HV; 冲击性能也仅为 16 组。综合各实践结果, 优选 HVOF 超音速方法制备 WC 金属陶瓷涂层。

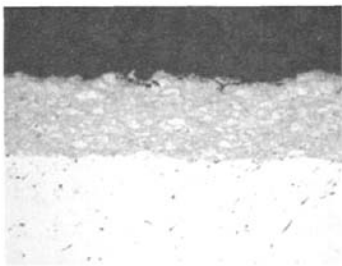


图11 HVOF 方法制备的涂层组织照片

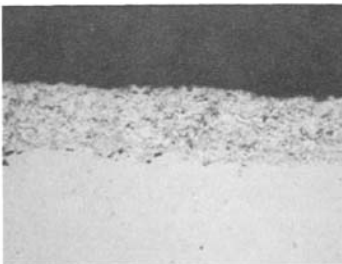


图12 APS 方法制备的涂层组织照片

辊身喷涂层结合性能的测试是通过落球试验进行测试的。在 BJM-06 模拟辊辊身喷涂后取样, 进行落球试验, 落球前后照片如图 13、14。

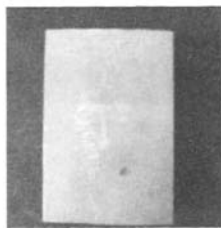


图13 喷涂件落球前

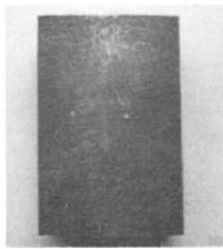


图14 喷涂件落球后

从图中可以看出, 喷涂层在经过 25 组落球后 (落球试验条件同前), 表面没有发生任何起皮和剥落现象, 可见喷涂层的结合强度是比较好的。

图 15 为直径 1800mm 的大直径实物辊喷涂后的照片。

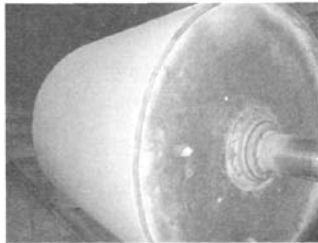


图15 喷涂后的 φ1800mm 大直径辊

三、结语

通过本项目的研究, 成功解决了大直径辊制作的技术难题, 并得出结论。

(1) 通过落球冲击试验得知, 堆焊层硬度在 48 ~ 53HRC 时, 最有利于提高“堆焊 + 喷涂”层的使用寿命。

(2) 模拟辊的设计方案, 可以很好地反映实物辊的使用效果。通过模拟辊堆焊试验测试, 优选出了最佳的堆焊材料和堆焊工艺。

(3) 堆焊层主要为马氏体和少量残余奥氏体组织, 堆焊层开裂主要表现为沿柱状晶界开裂。

(4) 超音速喷涂 WC 金属涂层, 具有良好的结合强度、高的显微硬度及低的孔隙率, 为较优的喷涂工艺。

大直径辊的成功制造, 为企业创造了良好的经济效益。仅 2008 年, 为宝钢创造直接经济效益近 600 万元。相信随着钢铁企业的进一步发展, “堆焊 + 喷涂”技术必将做出更大的贡献。MW (20091009)