

LX88A 涂层的耐磨性能及其应用

Wear resistance and application of LX88A coating

魏广存 (13910437003)

提 要: 针对 CFB 受热面严重磨损问题,热喷涂技术越来越显示独特的优势。迄今,在国外最被看好的是超音速火焰(HVOF)喷涂 NiCr-Cr₃C₂,该涂层已广泛应用于 CFB 耐磨工程。但其运作成本太高,在中国难以推广。

杭州联拓电力喷涂的 LX88A 超硬耐磨材料,只需电弧喷涂,成本很低,而涂层耐磨性却达到 HVOF 喷涂 NiCr-Cr₃C₂ 涂层水平。

本文介绍了 LX88A 的材质设计、加工特点、喷涂工艺、涂层物理性能及耐磨特点。指出:推入市场二年多来,该材料已实施喷涂工程 400 余项,总喷涂面积 7.2 万 M²,耐磨效果明显,用户普遍满意,专家鉴定认为,该涂层材料处于国际先进水平。

关键词: CFB 耐磨损 热喷涂 涂层

1 引言

LX88A 涂层材料,主要是针对循环流化床锅炉(CFB)严重的磨损而开发的,它同时也适用于其它类似的工况条件。

作为一种新型燃烧技术,循环流化床锅炉在环保性能、燃烧效率、燃烧适应性、高效脱硫及灰渣的综合利用等方面,对传统的煤粉锅炉发电构成强力竞争。近 20 年来,我国已投入力量积极研究与开发循环流化床燃烧技术,并取得显著成效。这项技术在未来数年内将会出现一个更加迅速的发展阶段。

循环流化床锅炉内的固体颗粒浓度是煤粉锅炉的数 10 倍以上，且以高速运行，对炉内受热面造成严重磨损。经验表明，磨损造成的事故占停炉总数的一半以上。运行 2000—4000h 约磨掉 2~3 mm，国外对卫燃带上部过渡区实测的磨损率高达 5.2 μ m/h，针对如此严重的磨损问题，国内外有关专家做了各方面努力，除在设计上选用最好的耐磨材料，进行种种炉型方面的改造，采用热处理、电镀、卦套、喷焊等多方面措施外，近年来令人瞩目的是采用热喷涂技术，其中最有效当属超音速火焰喷枪(HVOF)喷涂 NiCr-Cr₃C₂ 涂层，这一技术在某些国家得到了广泛应用。

然而，HVOF 喷涂 NiCr-Cr₃C₂ 运作成本太高，不适用于我国。必须寻求一种新工艺取而代之，LX88A 正是在这种需求下研制成功的。

2 循环流化床锅炉受热面磨损部位及诱因

除耐火材料分布区域外，循环流化床锅炉内金属部件的主要磨损部位及诱因列入下表：

炉内金属件主要磨损部位及诱因

磨损部位	磨损主导因素	严重程度
1、布风装置风帽、风帽孔	循环物料回料口附近的物料冲刷（磨粒磨损）	严重
2、炉膛水冷壁 炉膛下部卫燃带与水冷壁管的过渡区，炉膛角落区的管壁 水冷壁的常规区 不规则管壁（穿墙管、弯管、焊缝、元件套管）	物料上下流动产生涡流及下流物料的冲刷 高浓度的下流物料造成冲刷 固体物料的冲刷 浓相、流动产生扰动等	很严重，5~6mm/1000h 严重 轻微 局部严重
3、二次风喷嘴	浓相物料脉动	一般

4、炉内受热面 屏式翼行管 屏式过热管 水平过热管 埋管	与水冷壁管磨损类似 颗粒冲刷、气泡效应及射流	较轻微 严重, 5-6mm/1000h
5、炉顶受热面	高浓度、大粒物料的离心作用	较轻微
6、外置式流化床换热器	微振磨损	轻 微
7、对流烟道受热面（过热器、省煤器、预热器）	与煤粉炉相似。颗粒速 局部 严重度高, 飞灰硬度大。	局部严重

3 循环流化床锅炉受热面的磨损机理

循环流化床锅炉内存在不同方向、不同速度、不同角度、不同颗粒浓度的气流、射流和气泡，以各种形式作用于工作表面，形成复杂的磨损过程。简单而言，这些过程可归结为磨粒磨损与冲蚀磨损 2 种类型。磨粒磨损是一种硬表面或含有硬质点的软表面，以滑动的形式作用于更软的表面上，其结果，硬面或硬质点的突出部分在软面上冲刷，“挖出”物料，而这些物料又充当磨粒，不断对软面进行磨损的过程。

夹带于气流或液流中的固体颗粒，以高于 1m/s 的速度撞击到固体表面时，即产生冲蚀磨损。但冲击角度偏低、甚至大致与受热面平行时，对表面产生切屑“效应”，造成所谓“冲刷”磨损，实质上，它是一种磨粒磨损，磨粒磨损是在外力作用下磨粒沿表面的移动，这种力是外力而且是恒定的。被磨面的硬度是抗磨的首要因素。当冲击角偏大、直至垂直于被磨面，其过程是一系列的颗粒对表面的冲击与反弹，作用于表面力量由于颗粒的减速，其结果使表面产生微小塑性变形或微裂纹，并最终使变形层整片脱落而使工作面减薄，这种所谓

“冲击磨损”是更典型的冲蚀磨损。在这种情况下，被磨面的韧性则更重要。

处于磨损状况下的流化床锅炉受热面，除上述磨损外，还会有微振磨损及高温、腐蚀气体等，实际过程更复杂。

4 热喷涂技术及方法的选择

对于循环流化床锅炉受热面的金属表面抗磨，热喷涂技术在近年来受到重视并取得很大成就。较之热处理、电镀、热浸等方法，它的优势在于：(1)热喷涂方法和材料有充分的选择余地；(2)生产速度快，施工成本低；(3)可在现场炉内施工。

热喷涂技术是一种工件表面强化和保护的工艺方法。它以气/液态燃料、电弧或等离子弧作热源，将喷涂材料加热到熔化或塑态，借助于压缩空气或火焰推力将之喷射到预处理工件表面上，形成各种性能的涂层。由于喷涂材料可以是金属、合金、陶瓷、金属陶瓷、塑料等各种工程材料，涂层可具有耐磨、抗蚀、抗高温、隔热、绝缘等多种功能。依热源的不同，热喷涂可分为火焰喷涂、电弧喷涂、等离子喷涂、高速火焰喷涂（HVOF）等。各种热喷涂方法的技术特点见下表：

各种热喷涂的技术特点

项目	粉末火焰喷涂	丝材火焰喷涂	电弧喷涂	等离子喷涂	高速火焰喷涂（HVOF）	真空等离子喷涂（VPS/LPPS）
火焰温度/℃	3100	3100	4100	5000~10000	2900	5000~12000
颗粒飞行速度 $m \cdot s^{-1}$	50~70	100~120	150~170	200~600	600~1000	400~800
结合强度/MPa	重熔>70 喷涂“14~28”	21~42	28~50	35~70	60~90	>80

空隙率%	7~12	3~8	3~6	0.5~3.0	0.5~2.0	0.1~1.0
生产效率 kg·h ⁻¹	5~6	5~8	5~20	5~10	4~6	5~10
生产成本	较低	较低	低	较高	高	高

表内列出的仅是各热喷涂方法所给出的最基本的特性，但由于喷涂材料种类繁多，对应于某一种喷涂方法，可有很多可供选择的材料，可生产出功能各异的涂层，涂层性能在很大程度上取决于喷涂材料的选择。原则上，表中列出的各种喷涂方法都能被用来制取循环流化床锅炉受热面的抗磨涂层，具体分析如下：(1)火焰粉末或线材喷涂：由于工艺自身的局限，可供选择的喷涂材料较少，涂层性能差，难以取得理想结果。但火焰喷涂 Ni 基自熔合金粉，涂层经重熔，能达到很好的耐磨效果，只是该法须加热至近 1000℃，工效低，工件易变形，除个别部位使用外，一般不采用。(2)等离子喷涂（包括真空等离子喷涂）：能获得很好的耐磨涂层，但成本高，不能现场施工，通常较少采用。(3)高速火焰喷涂（HVOF）：此法喷涂 NiCr-Cr₃C₂ 粉，能达到很好的耐磨效果，即使在卫燃带上部最严重的磨损部位，HVOF 喷涂的 NiCr-Cr₃C₂ 涂层的工作寿命可达一年以上。此法已在日本、韩国及美国等得到采用。其不足是：操作成本高，NiCr-Cr₃C₂ 粉昂贵，沉淀率仅 35%左右，在我国难以推广。(4)电弧喷涂：操作成本低，施工方便，生产速度较快，是我国目前对电厂锅炉进行喷涂的主要方法。

5 电弧喷涂材料简评

热喷涂材料可多达数百种，但适用于电弧喷涂的丝材(线材)并不很多。以金属和合金为主要构成元素的丝材，其涂层功能多是抗大气、

盐雾、海水或化学介质腐蚀，以及恢复尺寸或抗 磨损等，后来发展了一些特殊合金材料，用于抗高温及气体腐蚀等工作环境，但能够抵抗强烈磨损的涂层材料，仍不如意。

幸好在上世纪八十年代前后，出现了复合丝、粉芯丝等制丝技术，尤其是粉芯丝的出现，为电弧喷涂技术的应用拓展了领域。

粉芯丝是外层为金属、内芯装有粉粒的丝材，由于粉芯的材质可选用陶瓷、金属陶瓷或特殊金属与合金元素，并且在喷涂时构成它们的元素之间，以及这些元素与外皮金属之间产生一系列反应，使涂层性能得到复合与叠加，可衍生出许多优异的特性。

LX88A 正是在这种大背境下开发而成的。

6 LX88A 的材质设计与加工特点

LX88A 由硬质陶瓷相与塑性相两大组分构成，并加入放热性成份。在喷涂过程中，发生放热反应，强化涂层与基体、以及涂层间颗粒的结合。涂层由硬质相与包裹在外围的塑性相组成。坚固的硬质相具有特殊的晶形，其分布必须符合一定的体积密度要求，当外界的颗粒以一定的速度冲击到这些硬质相时，能有效地抵御外来粒子所造成的磨损效应，而塑性相则保护硬质点不会因工作的疲劳等因素被剥离。同时，LX88A 涂层的微观结构与冲蚀颗粒之间有一定的配比关系，使冲蚀颗粒不对涂层产生“伤害”，保证了涂层具有优异的耐冲蚀及磨粒磨损性能。

LX88A 的内芯包含有多种元素或组份，它们的大小和比重差异

较大，在制丝前的处理中(尽管有混料工序)往往产生涂层的不均质，只待涂层很小局部在组成上与原设计有差异，涂层极易失效。而这种失效源很快波及其它部位，最终影响全局。为此，在制取 LX88A 过程中，先将各组份进行团聚，其中每一颗粒都包含大体相同比例的全部元素，从而保证了涂层的成份，结构与性能不并生偏析。

7 LX88A 涂层的基本特性

考虑到 CFB 或类似的工况条件，在 LX88A 材质设计上及其所形成的涂层，具有以下重要特性：

(1)具有足够高的涂层硬度及与之相配合的韧性。磨损机理的分析表明，硬度不够高的涂层不具备经受磨损所必需的条件，但仅有硬度容易产生疲劳而失效。涂层系统中应具备硬度和韧性两种特性，而且它们之间的搭配形式与组合，以及构成涂层的晶型与结构，是构成 LX88A 具有抗磨性最重要的特征。在某种程度上说，构成涂层(或喷涂材料)的化学成份并不足以提供耐磨性能，而涂层的相、晶型及微观结构则是更重要的要素。

(2)LX88A 对炉管基体有很高的结合强度，不会在工作中经物理或化学的作用而脱落，即使出现意外情况，例如出现漏水而骤然冷却也不会。

(3)对基体材料有大体一致的热膨胀系数，不会由于热冲等工况导致涂层因热胀系数差异产生应力而脱落。

(4)涂层的导热性良好，不会给炉管的热传导产生不良影响。

(5)涂层不会损害炉管基体，因为喷涂时基体温度不会超过一定界线(通常 $<200^{\circ}\text{C}$)。

(6)涂层和基体投入工作后，在二者之间不会出现有害的物质扩散，也不会产生裂纹扩延至基体。

(7)最重要之点，还在于 LX88A 涂层本身性能具有非常高的耐磨性、耐热冲性及抗高温氧化能力。使其能胜任工况的要求。

8 电弧喷涂工艺条件

由于各电弧喷涂设备的性能不尽相同，仅给出下列工艺参数供参考。操作人员可据焰流状况、丝材的熔化情况做必要的调整，直到得出满意的涂层。需要指出的是，粉芯丝材要比实芯丝材难喷一些，工艺及操作要求较严，LX88A 涂层表面有明显的硬质点，平整度不够高，但这是正常现象。

电弧电压：28-36V

工作电流：200-300A

喷涂移运速度：10-15 cm/秒

喷涂角度： $45-90^{\circ}$

喷涂距离：100-150 mm

风压： $>5 \text{ kg/cm}^2$

喷涂时采用分片多遍喷涂原则(1 mm厚涂层应至少喷 8 遍)。

9 涂层性能检测

采用电弧喷涂 LX88A 所得涂层的主要性能，经相关权威部门检测，结果如下：

- 涂层厚度：可喷涂较厚涂层，即使达 2 mm，其结合强度并无显著变化。
- 结合强度：经北京 625 研究所测定，平行 6 组数据，依次为：61.5、60.7、59.2、61.3、60.7(MPa) 平均为 60.5MPa。
- 孔隙率：<2%(北京矿冶研究院测试)
- 抗高温性能：在 800℃ 抗氧化性能是 10 号钢的 20 倍。在冲击角为 90 ° 时，只有在 >800℃ 时抗冲蚀性开始下降，当冲击角为 25 ° 时，即使 >1000℃，抗冲蚀性亦不减退。(国外提供数据)
- 硬度：经北京 625 所测定，平行 10 组数据，依次为 HV_{0.3} 1031、1027、984、870、1168、1192、880、844、1210、945，平均值 HV_{0.3} 1015(相当于 HRc70)。
- 耐冲蚀磨损性：冲蚀角 90°，温度为 25℃ 时，是高铬镍合金(21Cr8Ni3.2Mn2.5B)的 12 倍，温度为 315℃ 时，是镍铬合金(15Cr5Ni)的 17 倍。
- 涂层的热胀系数：涂层的热胀系数为 $12.27 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ (20-100℃) 国外提供数据)，与锅炉钢管相类似。

10 涂层的耐磨损性能

LX88A 涂层的耐磨损性能，是该材料的最重要价值的体现，其功能就是要解决 CFB 及类似工况条件的磨损问题。针对 CFB 存在的严重的冲蚀磨损及某种程度的磨粒磨损，选择了国外当前对 CFB 采用最普遍最有效的 HVOF 喷 NiCr-Cr₃Cr₂ 涂层作为对比，以考察 LX88A 涂层的耐磨效应。

(1)西安交通大学测试结果(详见测试报告)

● 对比试样：

采用国外生产的超音速火喷涂设备及 NiCr-Cr₃C₂(20/80)粉，制取涂层，以做对比试件。

● 冲蚀磨损试验机：西安交大自制，类似于日本 ACT-JP 试验机。以单位重量(克)磨料冲蚀的涂层失重(mg)来表示冲蚀值，此值越大，表明该涂层耐磨性越差。

● 磨粒磨损试验机：西安交大自制，依据美国 ASTM-CT65-71 标准设计。以一定时间(15 分钟)涂层失重表示磨粒磨损值(mg)，此值越高，表明该涂层耐磨性越差。

两种磨损测定的结果列入下表：

喷涂材料	喷涂方法	冲蚀磨损(mg/g)		磨粒磨损 (失重 mg)
		30°	90°	
NiCr-Cr ₃ C ₂ 粉	HVOF	0.57	0.57	87.7±0.8
LX88A 丝	电弧喷涂	0.52	0.57	<44.4±4.7

(2)国外测试结果

针对国外一些著名的耐磨涂层材料，采用不同的工艺方法

(HVOF、电弧喷涂、喷焊、激光熔敷导), 以及不同温度(25℃、315℃)和不同角度(25°、90°), 对 LX88A 涂层做了对比试验(详见另文), 从中可得出:

- 耐冲蚀性能: LX88A 涂层大体是 45 号钢、Fe21Cr8Ni3.2Mo 合金钢, Fe29Cr 高铬钢, Fe14Cr4.5Ni 不锈钢等涂层材料的 10-17 倍, 与 HVOF 喷 WC-Ni 涂层、激光熔敷 WC-NiCr 焊层相当。
- 耐磨粒磨损性能: 胶轮干砂磨损大体是不锈钢涂层的 24 倍, 是 21Cr8Ni 合金钢涂层的 21 倍, 与 HVOF 喷 WC-Ni 相当。

11 实用与效果

LX88A 耐磨涂层材料推向市场以来, 在两年多的时间内, 全国已有 200 余家电厂、钢铁厂和水泥厂等行业, 进行了 400 多项施工应用, 总喷涂面积达 72000 m², 取得了良好的应用成效。(见 LX88A 用户报告)

(1) CFB 受热面

大量 LX88A 涂层被用于 CFB 受热面的喷涂。实践表明, 由于煤质组成及炉型的差异, 以及炉子运转制度及部位的不同, 磨损情况不尽相同。就部位而言, 以卫燃带上部的过渡区域、炉膛四角、省煤器局部及高低过热器某些部位, 处于严重磨损状态。

经过对近百项工程的跟踪观察, 总体而言, LX88A 涂层可延长喷涂工件工作寿命 2-3 倍。典型实例如下:

- 大连海兴热电有限公司于 1990 年前后安置我国首批 75T/h 的

CFB，该炉型因设计不太合理，磨损问题尤其突出，水冷壁管运行周期甚至不足 1 个月即发生爆管。为解决此问题，该厂采用多种措施及喷涂不同材料，效果均不理想。采用 LX88A 进行电弧喷涂，涂层厚 0.8mm，能使该炉的运行周期延至半年以上。

●山东潍坊金时机械公司采用 LX88A，对山东海化集团 6#、7#、8#和 9#CFB 水冷壁进行喷涂，涂层厚 0.8-1.0mm，原先运行不足一年即磨损爆管，喷涂后可安全运行二年多，至今仍使用中(2005 年 8 月)。

●山东寿光晨鸣纸业、齐河板纸厂、临清银河纸业、四川广元东河电厂、乐山海虹电厂、山东华金电厂、安阳林州电厂等众多用户，都采用 LX88A 实施喷涂，取得类似效果(详见 LX88A 用户报告)。

(2) 钢铁厂高炉的荒煤气管，因含有高浓度的铁矿石粉，对导出管道，特别是弯头及 S 弯处，造成严重磨损。通常 8 mm 厚的无缝钢管只坚持 40 天，20 mm 厚的 16Mn 钢板厚补只用 4 个月，喷涂 LX88A 涂层可使用 8 个月左右。

(3) 冶金团矿车间强力风机叶片，喷涂 LX88A 涂层 0.5 mm 厚，可延长风机工作成寿命 2 倍。

(4) 电厂风机叶片

喷涂 LX88A 涂层 0.5-0.8 mm 厚，可延长引风机工作寿命 3-4 年，排风机可达 1.5 年以上。

(5) 煤粉炉省煤器

煤粉炉通常因交变温度热冲、氧化及气体腐蚀导致炉管失效，但对省煤器，因煤粉到达此处已呈烧焦状态，质地坚硬、且夹带气流飞速高，致使该部位磨损严重。在这种情况下，喷涂 LX88A 0.8 mm 厚，可延长工作寿命 3 倍上下。

以上是近三年内各用户的部份应用情况，可供相关行业参考借鉴与实际应用。