

冷喷涂 304 不锈钢涂层的弯曲力学行为研究

Study of Bending Behavior of 304 Stainless Steel
Coating by Cold Gas Dynamic Spraying

韩 玮¹, 孟宪明¹, 赵 杰¹, 张俊宝²

(1 大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116085;

2 宝山钢铁股份有限公司 宝钢研究院前沿技术研究所, 上海 201900)

HAN Wei¹, MENG Xian-ming¹, ZHAO Jie¹, ZHANG Jun-bao²

(1 School of Material Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116085, Liaoning, China; 2 Advanced Technology Institute, Baosteel Research Institute, Baoshan Iron and Steel Company Limited, Shanghai 201900, China)

摘要: 采用冷喷涂 (CGDS) 技术在 IF 钢基体上制备 304 不锈钢涂层。用 SHIMADZU 液压伺服疲劳试验机对 304 不锈钢涂层样品进行三点弯曲实验, 用扫描电子显微镜来研究冷喷涂 304 不锈钢涂层的断裂行为。结果表明: 冷喷涂 304 不锈钢涂层的断裂行为为脆性断裂; 裂纹萌生于涂层表面, 随着载荷和力矩的增加, 裂纹向涂层内部扩展, 裂纹在涂层中是 V 字型的; 当裂纹扩展到涂层和基体的结合界面处时, 裂纹向两侧横向扩展, 相邻裂纹扩展相互贯通后, 涂层和基体发生开裂或脱落。

关键词: 冷喷涂; 304 不锈钢涂层; 三点弯曲实验; 断裂行为

中图分类号: TG115.5+4 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2011)04-0049-05

Abstract: 304 stainless steel coating was deposited on the IF steel substrate by cold gas dynamic spraying (CGDS). The three-point bend test of the cold sprayed 304 stainless steel coating was tested by SHIMADZU electro-hydraulic servo-controlled fatigue testing machine and the fracture behavior of the cold sprayed 304 stainless steel coating was examined by scanning electron microscopy. The results showed that the fracture behavior of the cold sprayed 304 stainless steel coating was brittleness fracture. The first crack initiation was happened in the coating's surface, then the crack extended to the internal of the coating with the increased of the load and the shape of the crack in the coating was V-shaped; when the crack got to the combination interface of coating and substrate, the crack extend to the two sides along the interface; interface cracking and coating spalling were observed in the combination interface of coating and substrate when the adjacent crack interconnected.

Key words: cold gas dynamic spraying (CGDS); 304 stainless steel coating; three-point bend test; fracture behavior

冷喷涂 (Cold Gas Dynamic Spraying, CGDS) 是通过高速固态颗粒依次与固态基体碰撞后, 经过适当的变形牢固结合在基体表面而依次沉积形成沉积层的方法^[1], 它是基于空气动力学原理的一种喷涂技术^[2,3], 冷喷涂由于低温避免了氧化、晶粒生长和相变的发生, 无热影响区, 对涂层和基体的热影响小^[4], 此外, 还具有诱发残余应力小、涂层致密、硬度高和空隙率低等优点, 因此其具有很广泛的应用前景。

近年, 冷喷涂技术得到了飞速的发展, 得到了人们的广泛关注。目前, 随着冷喷涂工艺、技术和设备的发展和完善, 此技术已被广泛地应用在制取耐磨耐蚀防护涂层、耐高温涂层以及功能性涂层等诸多方面^[5-10], 特别是在汽车工业、电子信息工业、航空航天、海洋防腐以及复杂结构部件的制备和修复等领域有着广阔的应用前景和空间。例如, 我国采用冷喷涂镍包铝 F501 代替目前的渗铝管, 在电站水冷壁管抗

高温腐蚀中得到应用^[11];美国利用冷喷涂技术制备的高纯铜涂层已被用于一级火箭发动机集束管, 锌铝涂层被应用于汽车底盘的防腐^[12];日本将冷喷涂的高性能导电涂层用于电子工业^[12]等。

然而, 涂层材料在服役过程中产生裂纹, 发生断裂和剥落是其主要破坏和失效形式, 这不仅会造成重大的经济损失, 还存在严重的安全隐患, 也是制约涂层材料能否被广泛应用的关键因素之一。因此, 对其断裂行为的研究具有重要的现实意义和经济效益。近年来, 对涂层断裂方面的研究主要集中在裂纹的萌生机制^[13, 14]、涂层断裂力学行为^[15-17]等方面, 但关于冷喷涂涂层断裂行为的研究报道较少。本工作采用三点弯曲实验方法, 研究冷喷涂 304 不锈钢涂层在弯曲载荷下的力学性能及其断裂行为, 以期冷喷涂 304 不锈钢涂层的实际应用提供理论依据。

1 实验

1.1 实验材料

采用冷喷涂(CGDS)技术在 IF 钢基体上制备 304 不锈钢涂层, 基板厚度为 4mm, 涂层的平均厚度为 145 μ m。实验所用三点弯曲样品尺寸为 55mm \times 5mm 的条状样品。

1.2 实验方法

1.2.1 组织分析

为得到 304 不锈钢涂层的组织形貌, 用 SiC 砂纸打磨金相样品, 至 1500 $\#$ 后抛光、腐蚀, 用 MEF-3 金相显微镜和 JSM-5600LV 型扫描电镜(SEM)观察冷喷涂涂层的组织形貌。

1.2.2 三点弯曲实验

三点弯曲实验在 SHIMADZU 液压伺服疲劳试验机上进行。固定加载速率, 连续增加载荷, 跨度为 40mm, 加载速率为 0.01mm/s, 涂层面向下, 如图 1 所示。对于三点弯曲试样而言, 试样中心附近的涂层受力最大, 变形最大, 因此裂纹最先在该部位的涂层中生成。所以这部分涂层也是加载过程中需要特别观察的区域^[15], 因此本工作采用了 DVE(光学引伸计, 其利用基于数字图像跟踪技术将大标距转换成小标距, 可以在测量应变时保持跟踪目标在视场范围内移动, 并动态了解应变变化规律)来监控整个实验过程中的位移变化量。

为了分析冷喷涂 304 不锈钢涂层的断裂行为, 采用 JSM-5600LV 型扫描电镜对 304 不锈钢涂层的断裂形貌和裂纹进行分析。

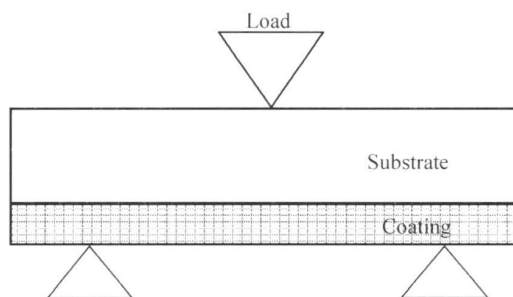


图 1 三点弯曲实验示意图

Fig. 1 Diagram of three-point bend test

2 结果与讨论

2.1 组织形貌

图 2 为冷喷涂 304 不锈钢涂层的截面金相图。由图 2 可知, 粉末粒子在冷喷涂过程中发生塑性变形而得到沉积形成冷喷涂涂层, 但是在涂层中不同区域的塑性变形量、致密程度和空隙率等存在较大的差异。冷喷涂涂层是由大量的变形粒子机械咬合形成, 涂层致密, 涂层中分布微小空隙, 空隙大小分布与其位于涂层中的位置相关。

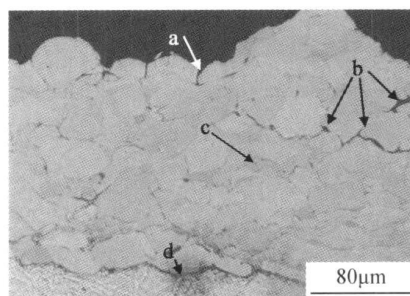


图 2 冷喷涂 304 不锈钢涂层的截面金相图

Fig. 2 Metallographic image of cold sprayed 304 stainless steel coating's cross section

304 不锈钢涂层的底部区域, 基体和涂层界面处的形状为波纹状(见图 2 中 d 位置), 这说明 304 不锈钢粒子在喷涂过程中在压力作用下产生塑性流动, 粒子碰撞部分发生严重的塑性变形, 使得涂层和基体之间呈现出机械咬合作用, 从而产生机械结合, 这与 Grujicic^[18]报道的纳米/微米尺度下的机械结合机制是一致的。304 不锈钢涂层的中部区域, 涂层中的空隙数量较少而且较小, 涂层致密, 粒子发生了严重的塑性变形, 喷涂粒子变小且形状不规则(见图 2 中 c 位置)。这是由于粒子发生碰撞和塑性变形后沉积形成涂层, 后续的喷涂粒子对其的夯实、冷锻作用及其内部的压应力导致该区域内粒子塑性变形加剧所造成的。

304 不锈钢涂层的顶部区域, 空隙数量较多而且较大 (如图 2 中 b 位置)。喷涂粒子的塑性变形量小, 且涂层表面有缺陷和微裂纹存在 (如图 2 中 a 位置), 这说明表层区粒子间结合较差, 这主要是由于没有后续喷涂粒子的夯实和冷锻作用造成的。

2.2 弯曲力学行为及断裂形貌

图 3 为不同载荷下 304 不锈钢涂层和基体 IF 钢的载荷-位移曲线。在三点弯曲实验过程中, 固定加载速率, 连续增加载荷, 图 3 中的 a~ d 曲线分别表示加载到 425, 450, 575N 和 610N 时, 立刻终止实验所对应的载荷-位移曲线。载荷小于 425N 时, 各条曲线是重合的; 当载荷高于 425N 时, 曲线发生分离, 304 不锈钢

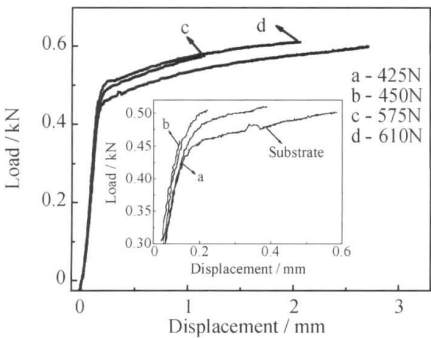


图 3 不同载荷下冷喷涂 304 不锈钢涂层和基体的载荷-位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curves of cold sprayed 304 stainless steel coating and substrate under different loads

涂层在各载荷下的曲线均高于基体。基体 IF 钢在 450N 时发生了弹性塑性转变, 而 304 不锈钢涂层在 500N 时才发生弹性塑性转变。

三点弯曲实验后, 对加载到不同载荷条件下的样品进行表面和截面的形貌观察, 如图 4 和图 5 所示。可以看出, 载荷为 425N 时, 涂层中没有发现裂纹, 而当载荷为 450N 时, 涂层中发现有裂纹存在且只有一条, 并且这条裂纹并没有完全开裂, 这说明 304 不锈钢涂层内部开裂的临界载荷为 450N 左右。基体 IF 钢的弹性-塑性转变点对应的载荷为 450N, 这就给出了涂层内部开裂的临界值为 450N 一个合理的解释。在三点弯曲实验过程中, 外加载荷直接压向基体 IF 钢, 经过 IF 钢传向 304 不锈钢涂层。虽然载荷为 450N 时, 基体已经开始发生了塑性变形, 但 304 不锈钢涂层仍处于弹性变形阶段, 此时载荷主要作用在 304 不锈钢涂层中。由于 304 不锈钢涂层的表层区域的空隙和缺陷较多, 所以基体由弹性变形过渡到塑性变形时产生的变形量将会导致在涂层的表层区域萌生裂纹, 开始发生开裂。

外加载荷为 500N 时, 304 不锈钢涂层开始发生塑性变形, 当载荷超过 500N, 达到 575N (图 4 (c)) 时, 涂层和基体间没有发生开裂, 仅存在贯穿于涂层的纵向裂纹; 当载荷为 610N (图 4 (d)) 时, 涂层和基体发生明显开裂, 且纵向裂纹沿涂层与基体界面发生扩展, 导致涂层剥落。

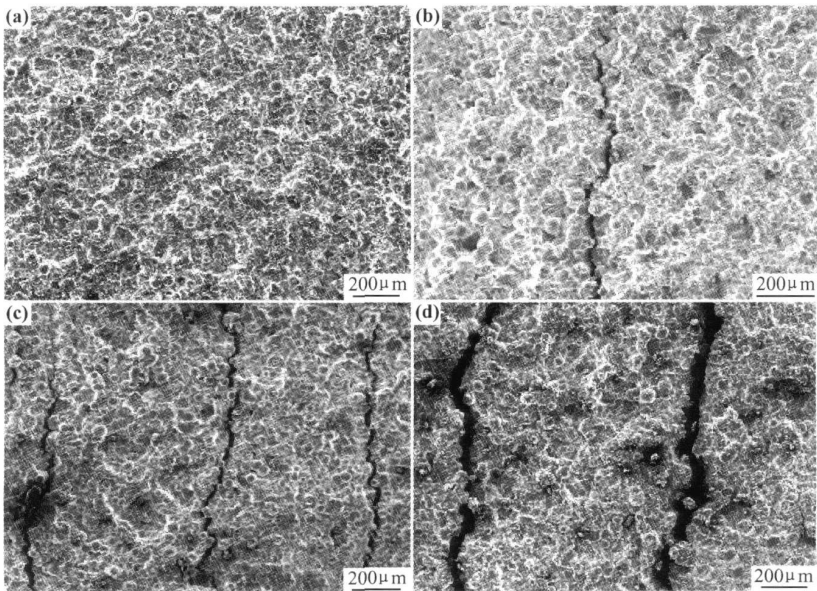


图 4 三点弯曲实验后冷喷涂 304 不锈钢涂层表面的 SEM 图 (a) 425N; (b) 450N; (c) 575N; (d) 610N

Fig. 4 SEM images of cold sprayed 304 stainless steel coating's surface after three point bend test (a) 425N; (b) 450N; (c) 575N; (d) 610N

比较在不同载荷条件下的涂层裂纹表面形貌(见图 4)可以看出: 裂纹的宽度和深度从试样中心向试样的两侧递减, 而且裂纹方向是相互平行的, 相邻的两条较大裂纹间距相当; 随着载荷的增加, 裂纹条数增多、加宽、加深, 相邻的小的裂纹扩展成一条大的裂纹, 相邻裂纹间的宽度有变宽的趋势。

图 5 所示为载荷为 575N 和 610N 时, 涂层裂纹的截面形貌。由图 5(a) 可知, 当载荷为 575N 时, 裂纹已经扩展到基体与涂层的界面处, 但裂纹并未在界面处发生扩展; 而载荷为 610N(图 5(b)) 时, 裂纹已经在基体与涂层的界面处发生扩展, 涂层部分发生剥落。

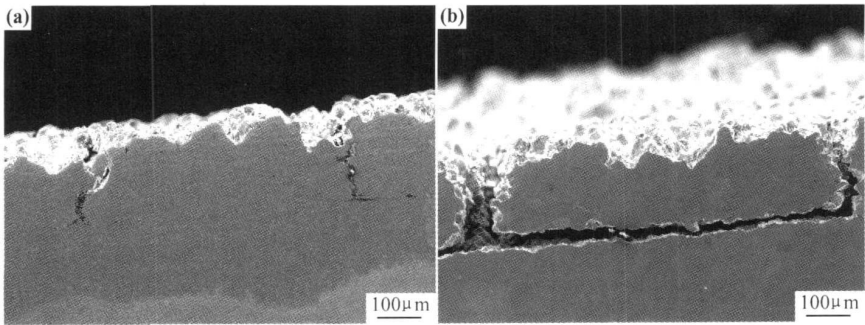


图 5 三点弯曲实验后冷喷涂 304 不锈钢涂层截面的 SEM 图 (a) 575N; (b) 610N
Fig. 5 SEM images of cold sprayed 304 stainless steel coating's cross section after three-point bend test (a) 575N; (b) 610N

3 断裂机制

图 6 所示, 涂层的断裂发生在粒子结合处, 这与脆性陶瓷热障涂层的断裂行为是相同的^[16, 17], 这主要是由于冷喷涂 304 不锈钢涂层的结合机制为机械结合所造起的。

冷喷涂 304 不锈钢涂层的断裂行为是脆性断裂, 如

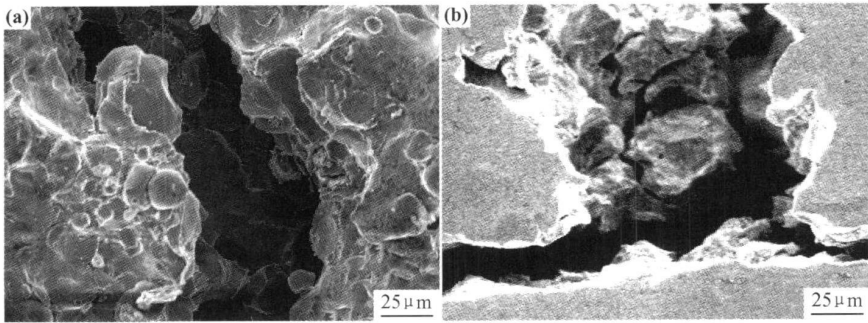


图 6 三点弯曲实验后冷喷涂 304 不锈钢涂层的 SEM 图(载荷为 610N) (a) 表面; (b) 截面
Fig. 6 SEM images of cold sprayed 304 stainless steel coating after three-point bend test (at the load of 610N)
(a) surface; (b) cross section

冷喷涂涂层是由于在喷涂过程中发生塑性变形而沉积, 后续粒子对涂层的夯实, 使其粒子涂层内部的结合力增加, 所以涂层内部(靠近基体一侧)的粒子间的结合性能好与涂层表面, 由于 304 不锈钢涂层的表面不够平整, 表面的缺陷和微裂纹较多, 空隙率较高, 而裂纹的萌生和涂层本身的缺陷是有关的^[13], 因此涂层表面在受到外力的情况下更容易形成裂纹核, 萌生裂纹。图 7 为裂纹在涂层表面萌生后的扩展示意图, 黑色尖头的指示方向即裂纹扩展的方向。冷喷涂 304 不锈钢涂层在三点弯曲实验过程中, 裂纹是在 304 不锈

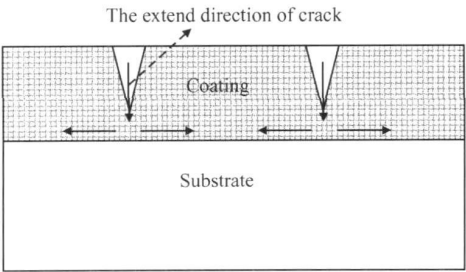


图 7 裂纹扩展示意图
Fig. 7 Diagram of the crack extend

钢涂层表面萌生的。随着载荷和力矩的增加,裂纹向涂层内部扩展,扩展的路径为粒子的结合处,裂纹在涂层中呈 V 字型;当裂纹扩展到涂层和基体的结合界面处时,裂纹沿界面向两侧横向扩展,相邻裂纹扩展相互贯通后,涂层和基体发生开裂或脱落。

4 结论

(1) 冷喷涂 304 不锈钢涂层和基体的结合机制为机械结合;冷喷涂 304 不锈钢涂层表面缺陷和微裂纹较多,空隙率较高,因此在受到外加载荷的情况下,涂层表面容易形成裂纹核,萌生裂纹。

(2) 基体 IF 钢在 450N 时发生弹性塑性转变,而 304 不锈钢涂层在 500N 时发生弹性塑性转变。304 不锈钢涂层内部开裂的临界载荷为 450N,这是由于基体 IF 钢由弹性变形过渡到塑性变形时产生的变形量所导致的,而 304 不锈钢涂层和基体发生开裂的临界载荷为 600N 左右。

(3) 裂纹的宽度和深度从试样中心向试样的两侧递减,而且裂纹方向是相互平行的,相邻的两条较大裂纹间距相当;随着载荷的增加,裂纹条数增多,加宽、加深,相邻的小的裂纹扩展成一条大的裂纹,相邻裂纹间的宽度有变宽的趋势。

(4) 冷喷涂 304 不锈钢涂层的断裂行为是脆性断裂,断裂发生在粒子结合处。冷喷涂 304 不锈钢涂层在三点弯曲实验过程中,裂纹是在涂层表面萌生的,随着载荷和力矩的增加,裂纹向涂层内部扩展,扩展的路径为粒子的结合处,裂纹在涂层中呈 V 字型。当裂纹扩展到涂层和基体的结合界面处时,裂纹沿界面向两侧横向扩展,相邻裂纹扩展相互贯通后,涂层和基体发生开裂或脱落。

参考文献

- [1] 李长久. 中国冷喷涂研究进展[J]. 中国表面工程, 2009, 22(4): 5– 14.
- [2] ALKIMOV A P, KOSAREV V F, PAPYRIN A N. A method of cold gas dynamic deposition[J]. Doklady Akademii Nauk SSSR, 1990, 315(4– 6): 1062– 1065.
- [3] GILMORE D L, DYKHUIZEN R C, NEISER R A, et al. Particle velocity and deposition efficiency in the cold spray process[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1999, 8(4): 576– 582.
- [4] NOVOSELOVA T, FOX P, MORGAN R, et al. Experimental study of titanium/aluminium deposits produced by cold gas dynamic spray[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200(8): 2775– 2783.

- [5] LI C J, LI W Y, WANG Y Y. Formation of metastable phases in cold-sprayed soft metallic deposit[J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 198(1– 3): 469– 473.
- [6] LI C J, LI W Y. Deposition characteristics of titanium coating in cold spraying[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 167(2– 3): 278– 283.
- [7] AJDELSZT AJN L, ZUNIGA A, JODOIN B, et al. Cold gas dynamic spraying of a high temperature Al alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 202(6): 2109– 2116.
- [8] LIMA R S, KARTHIKEYAN J, KAY C M, et al. Microstructural characteristics of cold-sprayed nanostructured WC-Co coatings[J]. Thin Solid Films, 2002, 416(1– 2): 129– 135.
- [9] KIM H J, LEE C H, HWANG S Y. Fabrication of WC-Co coatings by cold spray deposition[J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 191(2– 3): 335– 340.
- [10] KIM H J, LEE C H, HWANG S Y. Super hard nano WC-12% Co coating by cold spray deposition[J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 391(1– 2): 243– 248.
- [11] 孙裕昌, 王庆. 冷喷涂工艺在电站水冷壁管抗高温腐蚀中的应用[J]. 河北电力技术, 1997, 16(2): 15– 17.
- [12] 熊天英. 国内外冷喷涂领域的最新进展[J]. 机械工人, 2003, (9): 10– 12.
- [13] MICHLER J, BLANK E. Analysis of coating fracture and substrate plasticity induced by spherical indentors: diamond and diamond-like carbon layers on steel substrates[J]. Thin Solid Films, 2001, 381(1): 119– 134.
- [14] DIAO D F, KATO K, HOKKIRIGAWA K. Fracture mechanisms of ceramic coatings in indentation[J]. ASME Journal of Triology, 1994, 116(4): 860– 869.
- [15] 马崇, 荆洪阳, 徐连勇, 等. 弯曲载荷下涂层断裂行为[J]. 焊接, 2008, (4): 34– 38.
- [16] CHEN Z X, WANG Z G, YUAN F H, et al. Interfacial fracture behavior of a thermal barrier coating system under four-point bend loading[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 483– 484: 629– 632.
- [17] ZHOU Y C, TONOMORI T, YOSHIDA A, et al. Fracture characteristics of thermal barrier coatings after tensile and bending tests[J]. Surface and Coatings Technology, 2002, 157(2– 3): 118– 127.
- [18] GRUJICIC M, SAYLOR J R, BEASLEY D E, et al. Computational analysis of the interfacial bonding between feed-powder particles and the substrate in the cold-gas dynamic spray process[J]. Applied Surface Science, 2003, 219(3– 4): 211– 227.

收稿日期: 2010-05-17; 修订日期: 2010-12-17

作者简介: 韩玮(1984—), 男, 硕士研究生, 研究方向为冷喷涂涂层的制备、组织与性能, 联系地址: 辽宁省大连市甘井子区凌工路2号大连理工大学材料科学与工程学院 329 室(116085), E-mail: hanwei@mail.dlut.edu.cn