# 磁参数法用于评估 NiCr 基合金热喷涂层结合强度的研究

国俊丰 [1]，崔崇 [2]，夏春阳 [1]

（1. 矿冶科技集团有限公司，北京 100160；
2. 国家能源集团科学技术研究院有限公司，北京 102209）

**摘要：**本文提出了一种基于饱和磁滞回线特征参数的热喷涂层与基材结合强度的无损测试方法。采用 MA-WF-05 型磁滞多参数评估系统，对在 #45 碳钢基材上制备的系列 NiCr 基合金涂层进行了测试，同时对上述样品采用拉伸试验方法测试了结合强度。并通过多元回归分析方法建立了涂层结合强度的预测方程。结果表明预测值与拉伸试验测试值的平均偏差为 3.25%，该方法有望推广应用于其他热喷涂层样品。

**关键词：**热喷涂涂层结合强度；无损检测；磁滞回线

**中图分类号：**TG174.4 文献标识码：A 文章编号：1674-7127(2020)12-0007-4
DOI 10.3969/j.issn.1674-7127.2020.04.007

# Study on the Evaluation of Bonding Strength of Thermal Sprayed NiCr-based Alloy coatings by Magnetic Method

Junfeng Guo [1], Chong Cui [2], Chunyang Xia [1]

(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160;
2. CHN Energy Group science and Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing102209)

**Abstract:** In this paper, a non-destructive testing method of bonding strength between thermal spraying coatings and substrate based on the characteristic parameters of saturation hysteresis loop is proposed. A series of NiCr-based alloy coatings on #45 carbon steel substrates were tested by MA-WF-05 hysteresis multi-parameter evaluation system, and the bonding strength of the above samples was tested by tensile test method. The prediction equation of coating bonding strength was established by multiple regression analysis. The results show that the average deviation between the predicted values and the tensile test values is 3.25%. This method is expected to be applied to other samples of thermal spraying coatings.

**Keywords:** Thermal sprayed coating; Bonding strength; Non-destructive test; Hysteresis loop

## 0 引 言

热喷涂工艺制备的涂层通常采用粘结剂拉伸的方法测量热喷涂层与基材的结合强度 [1]，按照 GB/T 8642 需要采用规定尺寸的专用基材，不能直接对实际工件的涂层结合强度进行测试。有学者研究了采用无损或者微损检测技术在尽量少破坏涂层的前提下对其结合强度进行评估检测的技术。宋亚南 [2] 研究表明可以通过压头破坏性压入涂层过程中，对声发射能量的突变值进行测量，从而粗略地计算出涂层的结合强度。侯振德 [3] 提出了利用应力波 ( 应力脉冲 ) 来测定涂层与基体

**第一作者：**国俊丰 (1979-)，男，高级工程师，E-mail: guo_junfeng@bgrimm.com。

的结合强度的新方法。已有的此类研究成果较少，且都存在结果的分散性大的问题。磁参数法较多的用于对部件的应力集中、疲劳损伤等进行无损检测。孙晓、许欣 [4,5] 等人研制了磁滞回线检测装置，研究发现矫顽力数值会随拉力的加大而升高，剩磁随拉力的加大呈阶段性变化。沈正祥 [6] 等人介绍了磁性法以独特的优势可用于材料性能的无损评估。任尚坤 [7]，沈小丹 [8] 等研究表明磁参数法可以对材料的应力状态和疲劳损伤进行评估，并建立了磁滞参量与热处理工艺参数和材料显微组织的对应关系。目前已有的报道中未见有采用磁参数法对热喷涂层结合强度进行评估的相关研究成果。

热喷涂层与基材结合机制以机械嵌合为主，从微观角度看涂层与基材之间的结合力以范德华力为主，因此涂层与基材在微观尺度上的接近程度决定了涂层与基材之间的机械嵌合力的大小。此外，当涂层受外力作用时，涂层内部的残余应力能够与外力发生耦合作用，从而影响涂层与基材之间的结合强度。因此，从上述分析来看，影响涂层结合强度的因素可分为两大类，一类是主要影响涂层与基材在界面上机械嵌合紧密程度的因素 [9-11]，例如基材清洁度和粗糙度、高速射流的粒子温度和速度等；另一类是主要影响涂层内部残余应力的因素 [12-18]，包括基材温度、过渡涂层、涂层厚度、热处理等。

本文采用基于磁参数的无损检测方法对热喷涂层与基材之间的结合强度进行评估。为了更加深入的理解涂层与基材的结合情况，本文对热喷涂层结合强度的影响因素进行了分类研究，分析了饱和磁滞回线特征参数与两类因素之间的关联关系，并采用磁参数法对 Ni 基合金涂层的结合强度进行了试验评估。

## 1 试验方案

### 1.1 涂层样品

在相同规格材质及喷砂预处理工艺参数的基材上，采用相同的合金粉末，仅通过控制和改变喷涂距离，制备一系列具有相同厚度和不同结合强度的涂层样品。基材选择 #45 碳钢，涂层材料选用北矿新材科技有限公司研发的牌号为 KF-306 的 NiCr 基合金粉末，粒度分布 15~45μm。喷涂系统为 GTV GLC 燃气超音速火焰喷涂系统，共完成 10 个批次的试验，同批次制备出 2 个抗拉强度试验样品和 2 片饱和磁滞回线测试样品。其中抗拉强度试样规格为 φ25×50 mm 饱和磁滞回线试样规格尺寸为 80×60×8mm，所有样品的涂层厚度控制在 380 ± 20μm。

### 1.2 结合强度测量与评估

对各批次试验样品分别采用拉伸法和无损磁参数法进行测试，并将每批次 2 个样品的测试值取平均值作为该批次样品的试验值。按照 GB/T 8642 规范进行拉伸试验测定涂层结合强度。采用乌克兰巴顿研究所研发的 MA-WF-05 型磁滞多参数评估系统进行无损检测研究，试验装置见图 1 所示，测试时将探头放在样品涂层表面。仪器自动完成测试并输出样品的饱和磁滞回线图像及其特征参数测试值。

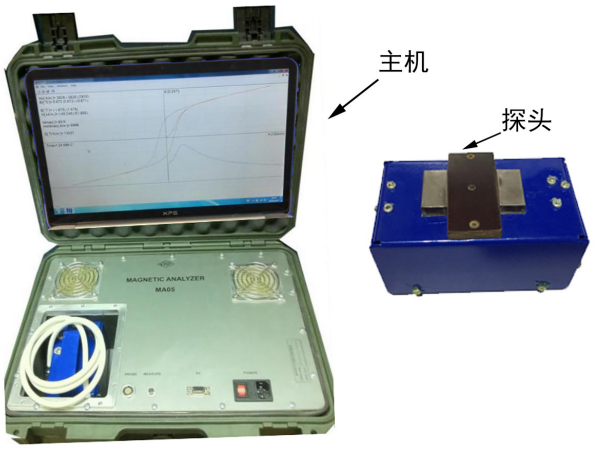


图 1 MA-WF-05 型磁滞多参数评估系统

Fig.1 MA-WF-05 hysteresis multi-parameter evaluation system

## 2 结果与讨论

### 2.1 涂层抗拉强度及特征磁参数

实验获得典型的饱和磁滞回线如图 2 所示。本文主要提取的特征磁参数为磁矫顽力 Hc 和剩余磁感应强度 Br。涂层通过拉伸实验测定的抗拉强度及测试获得的特征磁参数见表 1 所示。

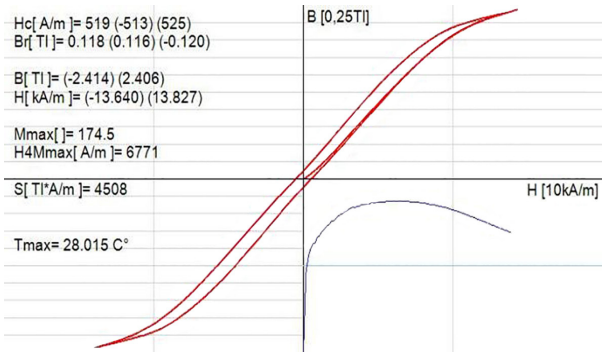


图 2 HVOF 喷涂 KF-306 涂层样品典型的饱和磁滞回线测试输出结果

Fig.2 Typical saturation hysteresis loop test output results of HVOF sprayed KF-306 coating samples

## 2.2 数据统计分析

采用多元线性回归分析方法对磁参数检测结果进行统计学分析，以表 1 中的抗拉强度 Q 为因变量，磁矫顽力 Hc 和剩余磁感应强度 Br 以及各自的平方项为自变量，回归获得的公式见式 (1)，Hc 和 Br 是无损检测的特征参数。取显著性水平 p=0.05，对回归分析结果进行假设检验，见表 2 所示。

可见本文采用的涂层结合强度预测方法具有以下两个特点。其一，测试方法快速、无损，以涂层 + 基材复合材料的饱和磁滞回线特征参数为测试方法，以数学统计分析为方法，首先建立回归预测方程，然后即可应用该测试方法和方程，对其他相同材质的涂层 + 基材样品进行检测；其二，预测值与实际测试值之间的标准方差小于 5%（约 3.25%）。在某些测试值处的预测偏差较大，如拉伸试验测试值 27.91MPa 时，预测值为 30.41MPa，偏差为 8.9%，如图 3 所示。

$$Q = 512.5833 + 24.4213 \times B_r - 0.1061 \times B_r^2 - 7.7219 \times H_C + 0.0079 \times H_C^2 \quad (1)$$

表 1 HVOF 喷涂 KF-306 涂层样品特征磁参数

Table 1 Characteristic magnetic parameters of HVOF sprayed KF-306 coating samples

| 序号 | 抗拉强度 Q(MPa) | 磁矫顽力 Hc(A/m) | 剩余磁感应强度 Br(T) |
|---|---|---|---|
| S1 | 23.32 | 497 | 0.1110 |
| S2 | 26.17 | 416 | 0.0937 |
| S3 | 26.32 | 514 | 0.1183 |
| S4 | 27.77 | 496 | 0.1090 |
| S5 | 27.91 | 458 | 0.1046 |
| S6 | 34.19 | 508 | 0.1123 |
| S7 | 34.79 | 529 | 0.1123 |
| S8 | 34.79 | 502 | 0.1100 |
| S9 | 40.28 | 520 | 0.1180 |
| S10 | 45.54 | 531 | 0.1217 |

表 2 KF-306 涂层特征磁参数的多元线性回归方差分析表 (α=0.05)

Table 2 Multiple linear regression analysis of variance of KF-306 coating characteristic magnetic parameters (α=0.05)

| 变异来源 | 自由度 | SS | MS | F | P |
|---|---|---|---|---|---|
| 模型 | 4 | 432.27 | 108.07 | 33.59 | 0.0008 |
| 误差 | 5 | 16.09 | 3.21 | - | - |
| 总计 | 9 | 448.35 | - | - | - |

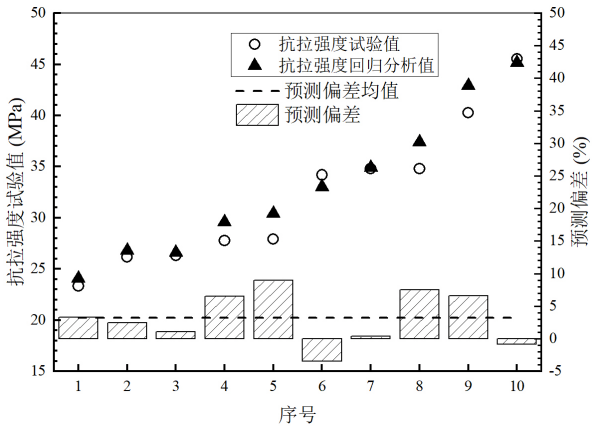


图 3 KF-306 涂层结合强度的实验值与多元线性回归计算值对比

Fig.3 Comparison of the test value of KF-306 coating bond strength and the calculated value of multiple linear regression

### 2.3 测试机制

由回归分析及 F 检验结果可知，饱和磁滞回线特征参数 Br 和 Hc 能够与涂层结合强度 Q 之间建立有效的预测方程关系。而 Br 和 Hc 实际上与涂层和基材之间的嵌合紧密程度以及涂层内部的残余应力有关。当涂层机械嵌合不良时，涂层材料与基材之间产生空隙，空隙内部的磁导率不同于涂层和基体材料。因此，涂层与基体机械嵌合的紧密程度不同，导致结合面附近材料的磁导率发生改变。磁导率的定义为式 (2)：

$$\mu = B/H \quad (2)$$

式中：μ—磁导率；

B—材料的磁感应强度；

H—外加磁场强度。

而测定样品磁滞回线的过程，也就是对样品施加已知大小的磁场（以磁场强度 H 表示），在通过样品（具有阻碍磁场导通的效果，以磁导率 μ 表示）之后，测到的磁感应强度 B 的大小，绘制成的 B-H 曲线即为磁滞回线。因此该磁滞回线的剩余磁感应强度 Br 反映了材料磁导率 μ 的信息，即公式 (2) 中的参数 Br 代表了涂层与基材嵌合的紧密程度。

当涂层内部残余应力变化时，铁磁体的磁特性参数也会改变，反之，铁磁体在磁场作用下也会发生形变，这种磁力相互密切关联的现象（效应）一般称为磁致伸缩效应。已有文献的研究表明残余应力的存在使矫顽力 Hc 的值增大，残余应力越大，Hc 的值越大。

通过上述分析可知材料磁滞回线的特征参数之一剩余磁感应强度 Br 与涂层和基体机械嵌合的紧密程度相关，而特征参数之二磁矫顽力 Hc 与涂层内部的残余应力大小相关。因此通过测定涂层样品的磁滞回线，提取该曲线的特征参数磁导率 Br 和磁矫顽力 Hc，通过数学方法建立两个参数的数学组合，可实现对涂层结合强度的评估。

## 3 结论

(1) 本文提出了一种基于饱和磁滞回线特征参数法的涂层与基材结合强度的无损测试方法。以 NiCr 基合金涂层为例，该方法预测的平均偏差为 3.25%。

(2) 预测方程的主要参数包括涂层样品的饱和磁滞回线剩余磁感应强度 Br 和磁矫顽力 Hc，分别与涂层与基材之间嵌合紧密程度和涂层内部残余应力有关。

(3) 本文提出的方法有应用于其他种类涂层与基材的潜力，但需要更多、更加全面的研究。

## 参考文献

[1] 王军 , 田春英 , 武淑艳 , 等 . 涂层结合强度研究现状与发展 [J]. 焊接 , 2010, (10): 19-23.

[2] 宋亚南 , 徐滨士 , 王海斗 , 等 . 基于回归分析的喷涂层结合强度检测分析 [C]. 第十一届全国摩擦学大会 ,2013, 中国甘肃 .

[3] 侯振德 , 汤灵霞 , 富东慧 , 等 . 利用应力波测量涂层的结合强度 [J]. 兵工学报 , 2006, 27(2): 306-309.

[4] 孙晓 . 基于矫顽力的铁磁性材料应力测量技术研究 [D]. 中国石油大学 ( 华东 ),2018.

[5] 许欣 , 冯阳 . 基于矫顽力的钢板应力测量装置 [J]. 现代工业经济和信息化 , 2020, 10(06): 94-96.

[6] 沈正祥 , 陈虎 , 曹建 , 等 . 铁磁材料性能无损评估方法研究进展 [J]. 化工机械 , 2019, 46(06): 615-620.

[7] 沈小丹 , 周月明 , 高丽 , 等 . 热处理工艺对冷轧双相钢显微组织与磁性能的影响 [J]. 金属热处理 , 2010, 35(01): 89-93.

[8] 任尚坤 , 林天华 , 杨雅玲 , 等 . 拉应力对 45 冷轧钢磁性特征的影响 [J]. 沈阳师范大学学报 ( 自然科学版 ),

（下转 44 页）

Transactions A, 2016, 47(5): 2217-2222.
[14]Atar E, Kayali E S, Cimenoglu H. Characteristics and wear performance of borided Ti6Al4V alloy[J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202(19): 4583-4590.
[15]Anthymidis K G, Tsipas D N, Stergioudis E. Boriding of titanium alloys in a fluidized bed reactor[J]. Journal of Materials Science Letters, 2001, 20(22): 2067-2069.
[16]Prytula A O, Pohrelyuk I M, Yas'kiv O I. Investigation of the Surface Layers of Titanium after Thermodiffusive Saturation in a Boron-Containing Medium[J]. Materials Science, 2004, 40(1): 60-64.
[17]Li F, Yi X, Zhang J. Growth kinetics of titanium boride layers on the surface of Ti6Al4V[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 23(4): 293-300.
[18]Nakasa K, Kato M, Tao S I. Boronizing of Titanium and Titanium Alloys[J]. 热处理 , 1997, 37: 243-249.
[19]Jelis E, Suwattananont N, Petrova R S. Boronizing of Ti-6Al-4V Eli by powder pack method for biomedical[C]. Bioengineering Conference, 2005, Proceedings of the IEEE 31st Annual Northeast, Hoboken, New Jersey, USA.
[20] 牛田青 . 钛合金表面 B-Al 共渗关键技术及组织性能研究 [D]. 江苏大学 , 2020.
[21] 杜万学 . FeB+$KBF_4$ 渗硼工艺及渗硼层高温环境下腐蚀行为研究 [D]. 中国矿业大学 , 2015.
[22] 雷丽 , 李凤华 , 李金生 , 等 . TC4 钛合金低温固体稀土 - 硼共渗 [J]. 金属热处理 , 2012, 37(2): 101-105.
[23] 刘云辉 . 钛合金 (Ti6A14V) 固体渗硼剂、渗硼工艺及组织与性能研究 [D]. 江苏大学 , 2013.
[24]Cao X, Jiang X, Wen M. Rare Earth-Boronizing and Its Applications[J]. Journal of Rare Earths, 1998(4): 42-45.
[25] 马立世 . 稀土元素影响 $TiB_2$ 钛合金渗硼层性能的研究 [D]. 昆明理工大学 .
[26] 黄有国 , 张晓辉 , 陈家荣 , 等 . $La_2O_3$ 对 TA2 钛电解渗硼的影响 [J]. 矿冶工程 , 2018, 38(6): 131-133+138.
[27]Li J S, Li F H, Lei L, et al. RE-Boronizing below Beta Transus Temperature on TC4 Titanium Alloy Surface[J]. Advanced Materials Research, 2013, 750-752: 651-654.
[28]Song Z, Ge X, Xu X, et al. Catalysts of solid boronizing of TC4 titanium alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2014, 38, 548-553.
[29] 衣晓红 , 李凤华 , 袁建鹏 . 渗硼剂粒径对钛合金渗硼层组织和性能的影响 [J]. 热喷涂技术 , 2018, 10(4): 75-79+86.
[30] 黄波 . 钛及钛合金熔盐渗硼工艺及渗硼层性能研究 [D]. 昆明理工大学 , 2016.
[31]Li P, Liu D, Bao W, et al. Surface characterization and diffusion model of pack borided $TB_2$ titanium alloy[J]. Ceramics International, 2018, 44 (15): 18429-18437.
[32]He X, Xiao H, Fevzi Ozaydin M, et al. Low-temperature boriding of high-carbon steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 263: 21-26.
[33] 张毅 , 缪强 , 梁文萍 . TC4 钛合金硼碳共渗层的组织和性能研究 [J]. 热处理 , 2017, 6: 13-18.
[34] 白新房 , 赵永庆 , 郑翠萍 , 等 . 不同组织形态 TC4 钛合金力学性能研究 [J]. 钛工业进展 , 2011, 28(3): 26-29.

（上接 56 页）

2008(01): 57-60.
[9] 杨晖 , 潘少明 . 基体表面粗糙度对涂层结合强度的影响 [J]. 金属铸锻焊技术 , 2008, 37(15): 118-121.
[10] 宋斌 , 陈铭 , 陈利修 . 喷砂预处理工艺对涂层结合强度的影响 [J]. 机械设计与研究 , 2013, 29(3): 70-72.
[11] 张鹏 , 周正 , 贺定勇 , 等 . 喷涂工艺及其粒子状态对涂层结合强度的影响 [J]. 热喷涂技术 , 2015, 7(1): 27-31.
[12] 聂璞林 , 沈耀 , 蔡殉 . 残余应力对涂层与基体结合强度的影响 [C]. 第七届全国表面工程学术会议 , 127-130.
[13] 王德朋 , 李庆会 , 王旭东 . 基体预热温度对 ZrO2 涂层结合强度的影响 [J]. 宇航材料工艺 , 2010, (3): 70-72.
[14] 卞达 , 王永光 , 倪自丰 , 等 . 涂层厚度对硬脆涂层结合强度的影响 [J]. 计算力学学报 , 2016, 33(1): 102-105.
[15] 王华仁 . 等离子喷钼涂层结合强度与厚度的关系 [C]. 第十七届国际热喷涂研讨会论文 , 2014: 31-34.
[16] 王聪瑜 , 夏洋 , 贾成厂 , 等 . 等离子喷涂 8wt.%YSZ 耐刻蚀涂层厚度对结合强度的影响 [C]. 第十七届国际热喷涂研讨会论文 , 2014, 42-47.
[17] 徐娜 , 张甲 , 侯万良 . 热处理对高温固体自润滑涂层组织结构及结合强度的影响 [J]. 金属学报 , 2009, 45(8): 943-948.
[18] 王强 , 兰冬云 , 宣兆志 , 等 . 渗铝及扩散处理对电弧喷涂层结合强度的影响 [J]. 焊接学报 , 2007, 28(10): 61-64.