

热轧钢板氧化铁皮与基体结合强度技术解析与测量方法探秘

Discussion on the Bonding Strength of Oxide Scales and Substrate on Hot Rolled Steel Plate

供稿|张猛¹, 郭立合¹, 王超², 王朝金¹, 李振忠¹ / ZHANG Meng¹, GUO Lihe¹, WANG Chao², WANG Chaojin¹, LI Zhenzhong¹

内容导读

在钢铁生产过程中, 高温加热会使热轧钢板表面形成一层氧化层(俗称“氧化铁皮”)。这层氧化铁皮在初轧前需采用高压水除去, 工业上称这一过程为“除鳞”, 准确测量氧化层与钢材基体的结合强度, 成为优化除磷水压的关键问题。本文系统解析了三种常用测量方法: 拉拔法: 像“拔河”一样测试氧化层与基体的分离力, 简单直观, 适合工业现场快速检测, 但仅适用于测试结合强度应不大于 90 MPa 的情况。划痕法: 用“金刚石笔”划刻氧化层, 通过声音信号和摩擦变化及显微分析共同判断其抗剥离能力, 适合科研精细分析。纳米压痕法: 通过微小压痕评估氧化层的“软硬程度”, 间接推测结合强度, 适合复杂多层结构研究。不同方法各有优劣, 需根据氧化层厚度和实际需求灵活选择。

热轧钢板在生产前需在加热炉中进行高温加热, 加热温度一般在 1150 °C 以上^[1]。使得铸坯出炉后表面生成一层氧化铁皮, 这层氧化铁皮在初轧前需采用高压水除去, 工业上称这一过程为“除鳞”, 除鳞水压力与氧化铁皮和基体的结合力密切相关^[2-4]。除鳞后铸坯表面质量直接影响到后续轧制, 为了保证除鳞效果, 氧化铁皮与基体的结合力必须很低^[5]。对于机械化及自动化高度发达的钢铁企业来讲, 由于生产现场节奏较快, 需要一种方便快捷测量氧化铁皮与基体结合力的方法, 工业现场需要根

据测量结果修正除鳞水压力以保证钢板表面质量。氧化铁皮是一种多层结构, 它与钢基体的结合性能是一个复杂的综合指标, 为了从微观上阐明影响结合力的根本机理, 选择适当的定量表征结合强度方法显得尤为重要^[6-8]。现如今对于氧化铁皮与钢基体结合强度的表征只停留在数值的高低, 并无明确的定性或者定量表征技术, 远未达到完善和规范的地步。另外由于氧化铁皮表面粗糙多孔且表面不平, 且氧化铁皮塑性较差很难制备, 因此需要开展更进一步的研究工作。

作者单位: 1. 鞍钢集团本钢北营钢铁股份有限公司轧钢厂, 辽宁 本溪 117017; 2. 辽宁科技大学材料与冶金学院, 辽宁 鞍山 114051

氧化铁皮结合强度影响因素

氧化铁皮附着在钢基体表面上的牢固程度为界面的结合强度。它既与氧化铁皮的弹性模量、硬度和厚度有关，又与界面合金元素析出情况密切相关^[9-10]。影响界面结合强度的因素很多，有些因素是具有共性的：

(1) 界面元素的扩散

界面元素的扩散发生在钢坯高温加热时，此时界面元素以固溶或金属间化合物的形式存在。图1为Q690钢在高温加热后氧化铁皮组织形态示意图^[11]。由图可知，Si、Ni等与Fe和O在基体界面形成尖晶石结构化合物，显著地提高了界面的结合强度。

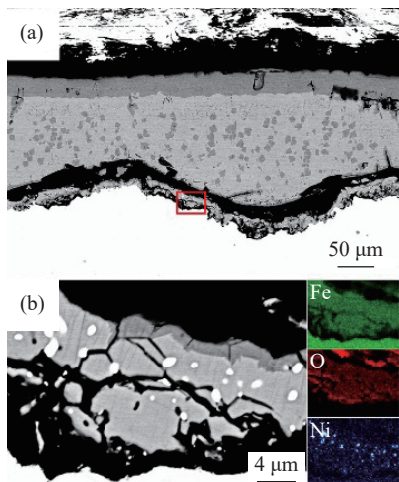


图1 氧化铁皮横截面的微观组织图^[11]：(a) 背散射图像；(b) 能量色散X射线光谱分析

(2) 钢基体表面状态

钢板在加热氧化前须保持板面清洁，否则影响结合强度的测量。同时要使用同一号砂纸打磨保证表面具有相同的粗糙度。

(3) 氧化铁皮的应力状态

氧化铁皮界面处的应力状态对结合强度有着重要影响，拉应力及压应力都会在界面处产生剪切应力。当剪切应力大于界面结合强度时，氧化层就会开裂或脱落^[12]。

氧化铁皮与基体结合强度的表征方式

氧化铁皮与金属材料界面力学性能的表征通常可采用2种形式^[12]，第1种用氧化铁皮从钢基体表

面脱离时单位面积上所需的力进行表征，第2种用氧化铁皮从基体表面脱离时单位面积上所需的能量进行表征。力学的实验方法更直观，应用性更强，具体操作为在氧化铁皮表面施加一定的作用力直至其完全脱离基体表面，以此测定施加力的大小即可表征结合强度大小。

在实际中，准确测定氧化层与基体的结合强度有着多方面的重要意义：其一，它是表征除鳞工程技术的重要指标；其二，它是改良各种技术指标、加热工艺参数的重要依据。因氧化铁皮与基体间属于脆性材料附于韧性基体，现只考虑氧化铁皮开裂前的弹性变形情况，忽略其韧性变形。对于这样一个关键性问题，目前，国内外研究主要采用以下几种定性及定量的表征方法。

拉拔法

拉拔法因操作简单且测量结果直观、容易分析，因而得到了广泛的应用^[13]。郑小玲等^[14]指出，垂直拉拔法仅适用于测定弹性模量大于金属基体的脆性材料。拉拔法的实验过程为将带有氧化铁皮试样的一面通过粘结胶与拉伸杆粘结，试样下表面打磨平整后也与拉伸杆进行粘结，如图2所示。此方法测量时要求粘结胶与拉伸杆的结合力要大于氧化铁皮与基体的结合强度，否则测量结果无效。随后在拉伸疲劳机上进行拉伸试验，拉伸加载速率不易过大，建议小于45 N/min，以氧化铁皮与钢基体断开时的拉力 F 与氧化铁皮截面 A 的比值作为结合强度 σ ，即 $\sigma=F/A$ 。拉拔法的优点在于能够较准确及定量地测量出氧化铁皮与基体结合强度，在实际工业生产中，除鳞水压力在23 MPa时可将钢板表面氧化铁皮除净，即氧化铁皮的结合强度不大于23 MPa。

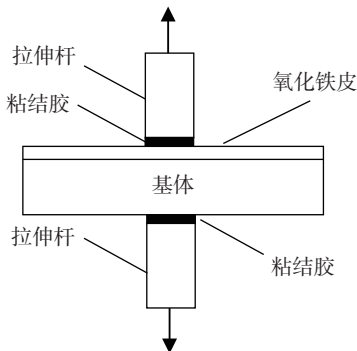


图2 拉拔法测试示意图

而此拉拔法测量的结合强度应小于 90 MPa^[15]，故拉拔法满足氧化铁皮结合强度的测量要求。

拉拔法类似于简单的胶带法^[16]，拉拔法测量氧化铁皮与基体结合强度时要求粘结胶的粘结强度要大于氧化铁皮与基体结合力。另一种比较直观地快速测量氧化铁皮与钢基体结合强度的方式为采用美国 DeFelsko 公司 PosiTest 拉拔式测试仪测量。参考国标 GB/T 5210-2006，其中压头直径为 20 mm，此测量方法要求多次重复性实验消除误差，样本不少于 5 组，以实验结果的均值作为评判标准，每组试样的力学值与均值的误差不超过±16% 则确认为结果可信。表 1 为 Q690 钢在 1050~1200 °C 加热及不同保温时间下氧化铁皮与基体的结合强度。

表 1 加热温度及保温时间与结合强度的关系

时间/s	1200 °C	1150 °C	1100 °C	1050 °C
30	10.03	10.97	10.20	10.28
1800	4.62	3.06	3.93	3.81
3600	2.03	1.95	3.80	2.76
14400	1.22	0.80	1.25	1.35
21600	1.20	0.89	1.54	1.28

实验钢加热温度分别为 1050、1100、1150、1200 °C。保温时间为 30、1800、3600、14400 及 21600 s。氧化铁皮与基体结合强度数据经过 origin 处理如图 3 所示。

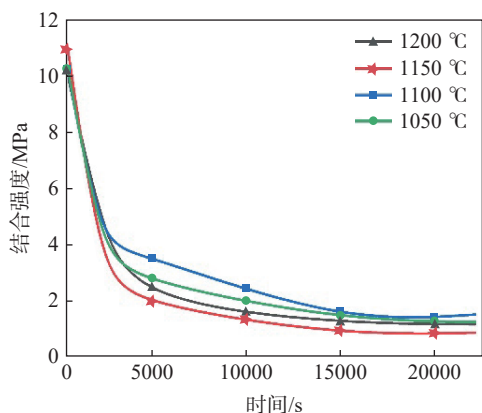


图 3 不同加热温度下氧化铁皮与基体的结合强度保温时间变化关系曲线

划痕法

现如今科研院所及高校普遍采用划痕法研究氧

化铁皮与基体结合力，划痕法的优点为可以通过电脑记录加载过程中载荷与划痕距离的变化，该方法直观且操作方便，可完成如弹性模量、硬度、结合力和粗糙度等性能的测量，并且已有商品化实验仪器^[17]和行业标准（JB/T 8554-1997）。

划痕法^[18-29]的原理为使用曲率半径为 0.2 mm 的金刚石探针在氧化铁皮表面进行划痕实验，通过不断的施加法向载荷 F_n 和切向载荷 F_t 直至氧化铁皮发生开裂，以临界载荷 L_c 作为氧化铁皮与基体结合强度的度量，其示意图如图 4 所示。

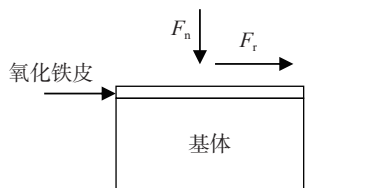


图 4 划痕法示意图

根据行业标准，临界载荷与界面处失效应力具有一定的对应关系，为了方便表征，在实际测量过程中将 L_c 值作为评价氧化铁皮与钢基体结合力的主要参数。 L_c 值的确定主要依靠有声发射法及摩擦力法等，对于划痕法，并不能单一的通过声发射的信号或摩擦力的突变确定临界载荷 L_c 。需要通过在声发射信号突变或者在划痕过程中载荷曲线的突变并结合显微镜的观察，综合判定临界载荷值。氧化铁皮内部酥松多孔，氧化铁皮属于多层结构，主要结构为金属/氧化物界面处生成的 FeO，表面生成的 Fe_2O_3 和中间层 Fe_3O_4 ，其多层结构如图 5 所示（图中黄色表示 Fe_2O_3 相，蓝色表示 Fe_3O_4 相，红色表示 FeO 相，绿色表示 Fe 相，其中 FeO 层中还有少量不规则 Fe_3O_4 相析出）。在高温热处理过程中，氧化铁皮的形成是铁氧原子在两个相反方向扩散的结果^[30-34]，3 种不同结构的氧化物在刻划时其硬度、弹性模量及粗糙度并不相同，所以单一的通过声发射法和摩擦力法并不能准确表征结合力大小，要同时结合显微方法综合判定临界载荷。

目前在划痕实验中，横向加载力出现波动处的载荷被定义为氧化铁皮失效的临界载荷^[35]，代表着氧化层的承载能力。现将 Q690 钢加工成 10 mm×10 mm×5 mm 试样，经 1100 °C 加热保温 30 min

后,在自动划痕机上进行划痕实验,实验中采用的金刚石球形压头半径为 200 μm ,加载力与声信号和摩擦力的关系如图 6 所示。

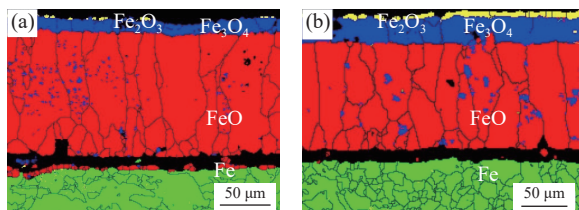


图 5 1000 °C 经不同氧化时间后 Q690 钢表面氧化铁皮截面的电子背散射衍射图像: (a) 5 min; (b) 10 min

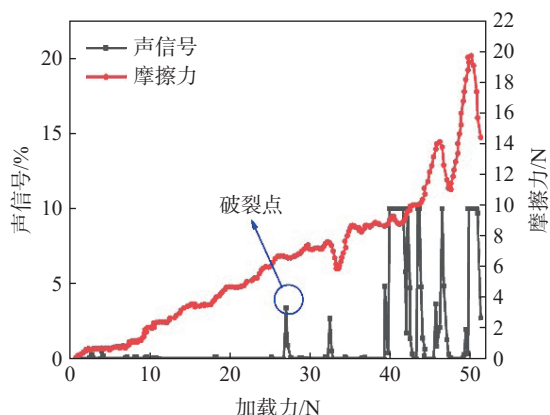


图 6 划痕实验的声信号及摩擦力信号随载荷变化的关系曲线

从图 6 中可以看出,在加载初期,摩擦力出现多个拐点,分析发现,拐点的出现与氧化铁皮的多层、内部多孔结构及厚度有关。首先,随着划针的滑动,探针压头与氧化层接触并向前运动,在氧化铁皮表面产生摩擦力,氧化铁皮在其作用下产生弹性形变,此阶段摩擦力斜率较小。其次,在弹性变形阶段后,随着加载力增大,摩擦力同时增加,当加载力与摩擦力的合力超过氧化层弹性极限后发生塑性变形,此时摩擦力曲线斜率增大,同时金刚石压头将氧化层划穿后,触碰到钢基体出现较大声信号突变,并产生如图 7 所示破裂点。最后,随着加载力的持续增大,划痕深度继续增加,此时氧化铁皮出现大面积剥离,划痕变深变宽至氧化层完全破碎。

氧化铁皮划痕微观形貌如图 7 所示,结合图 6 声发射信号及摩擦力变化,对氧化铁皮与基体的结合强度进行综合判定。首先根据声信号确定结合力的可能区间,再根据摩擦力的变化确定是否在氧化

层失效载荷区间内^[36],最后根据划痕形貌确定开裂处所对应的临界载荷为氧化铁皮与基体的结合力。

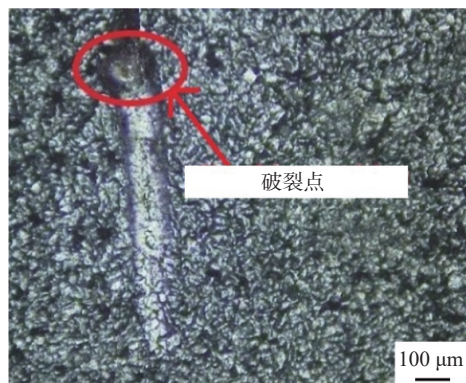


图 7 光学显微镜下氧化铁皮划痕宏观形貌

以上实验结果说明,划痕法较准确地定量表征了氧化铁皮与基体的结合力,对于厚度小于 200 μm 及厚度大于 500 μm 的氧化铁皮,较适合采用划痕法分析界面结合力。由图 2 拉拔法可知,当氧化层厚度在 (200~500 μm) 时,氧化层与基体结合强度急剧降低。使用划痕法测量时,测量初期随着划针的压入,氧化铁皮整体性脱落,给理论分析带来了很大难度。通过划痕法表征和评价氧化铁皮与基体材料的结合力,需要明确界面与氧化层内的应力分布情况,但由于氧化层复杂的载荷情况、划头与氧化层的磨损、划头的几何形状和尺寸、氧化层内塑性及弹性性能等因素共同作用,使划痕法成为一个较复杂的测量方法。

纳米压痕法

纳米压痕法是通过一定尺寸的压头对金属材料表面施加压力,当卸掉载荷后,对压痕区域进行测量、辅助力学知识进行综合评价的一种方法。硬度与弹性模量是材料结合强度的度量,通过计算实验得到的载荷与位移曲线的斜率得出弹性模量,根据压痕深度计算出硬度。

用纳米压痕仪从氧化层表面经界面至基体施加载荷,获得界面层的硬度及弹性模量。研究表明^[37],材料的硬度值与屈服强度密切相关,因而可以借助硬度和屈服强度关系模型获得近界面处的强度数值,若借助于有限元模拟,则能更方便的获取界面层的自身结合力数值^[38],该方法尤其适用于氧化铁皮多层膜结构。

通过纳米压痕实验记录连续的加载、卸载-位移曲线,可以获得材料的硬度、弹性模量等技术指标^[39-40]。为了保证数据的可靠性,试样取至少10个点进行压痕实验,对Q690钢取点示意图如图8所示,靠近基体的为第10点,最外层 Fe_3O_4 附近为第1点,沿着红线位置随机选取。结果取压痕实验硬度平均值:加载力为25 mN,加载速率为45 mN/min。图9为Q690钢表面氧化铁皮的加载、卸载-位移曲线。

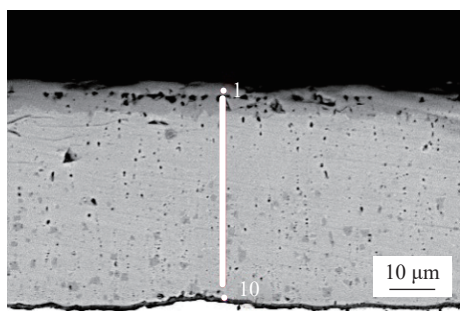


图8 Q690钢在1050 °C保温5 min后扫描电镜截面示意图

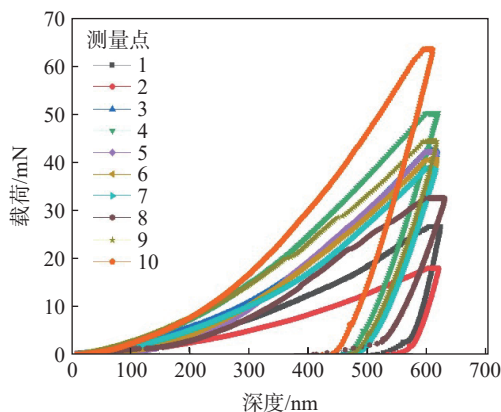


图9 试样加载、卸载-位移曲线

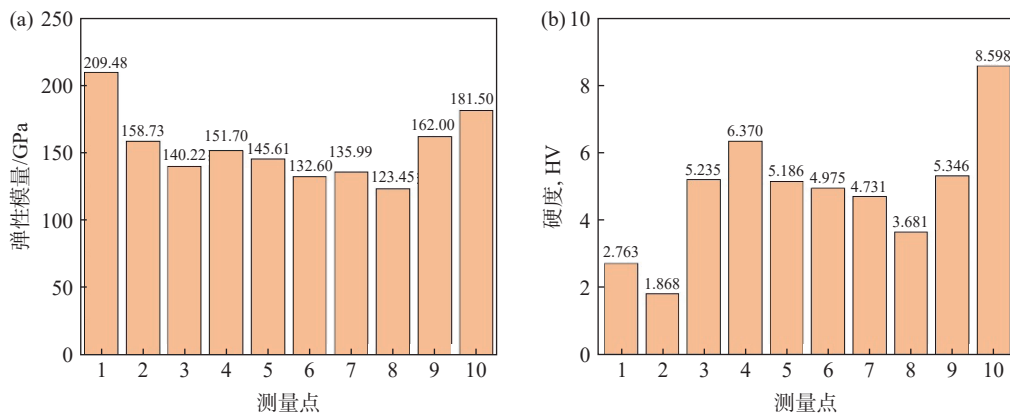


图10 试样截面不同位置氧化铁皮力学性能: (a) 弹性模量; (b) 纳米硬度

随着载荷及压头深度的不断增加,氧化铁皮首先发生弹性变形,然后发生塑性变形。第8点和第9点在压痕曲线上存在着不连续台阶,说明在压入过程中,氧化铁皮发生破裂。相同载荷作用下,靠近基体处第10点压入最浅,此点的硬度均值最大接近基体硬度。

在界面附近,氧化铁皮和基体的性质接近使氧化铁皮界面约束协调变形,从而提高界面的结合力,这种变形协调能力越好,越不易在界面处产生裂纹。图10所示为氧化铁皮试样表面不同位置的力学性能,越靠近基体处的硬度及弹性模量越高,说明结合力越大。界面性能协调性概念的提出对于定性表征结合力大小具有重要参考价值。

其他方法

前面介绍了一些定性或定量评价氧化铁皮与基体结合力的常用方法。除了上述方法外,还有剥离法、激光层裂法^[41]等等。剥离法虽然操作比较简单,但使用范围非常有限。激光层裂法由于设备昂贵、计算方法和操作程序较复杂而受到限制。剥离法的原理为在氧化层的表面粘结一定宽度的胶带,然后以一定的角度对胶带施加拉力,根据氧化铁皮剥离情况定性判断结合力大小,当氧化铁皮从基体上剥离时利用此法也可定量计算结合强度,如图11所示。氧化铁皮单位面积的结合能为 γ ,长度为 a 、宽度为 b 的氧化铁皮总结合能为 $E=ab\gamma$ 。则剥离该氧化铁皮所做的功为

$$W_p = (F \cos \theta)' 2a \cos \theta' = Fa(1 - \sin \theta) \quad (1)$$

认定剥离为静态并忽略氧化铁皮弯曲时产生的

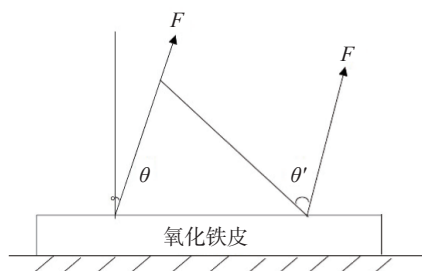


图 11 剥离法示意图

弹性能，则 F 所做的功近似等于氧化铁皮总结合能^[40-41]，即 $W_p = E$ ，于是

$$aby = Fa(1 - \sin\theta) \quad (2)$$

$$\text{即 } F = by / (1 - \sin\theta) \quad (3)$$

当所加剥离力与氧化铁皮垂直，即 $\theta=0$ 时，式(3)简化为

$$F = by \quad (4)$$

根据 F 便可计算氧化铁皮单位面积结合能 $\gamma = F/b$ 。若需要计算单位长度的结合力 f ，可根据定义采用上述方法 ($\theta=0$) 进行剥离，可得 $f = \gamma$ ，可见结合力大小和结合能相同。

结束语

界面的结合强度是氧化铁皮与基体材料的一项重要力学指标，不同于其他类薄膜，氧化铁皮的种类复杂多样，至今没有形成一套完整的表征界面结合强度的标准方法。在众多测试方法中，本文只讨论了一些比较直观常用的测量方法，从中可以得出以下几点：

(1) 采用临界载荷表征结合力只在划痕法中出现，其他方法未见相关报道。对于氧化铁皮与钢基体这种类似于脆性涂层/韧性基体的材料，多用拉拔法、划痕法及纳米压痕法进行结合力的表征。

(2) 拉拔法表征界面结合强度时，仅适用于结合强度小于 90 MPa 的情况。拉拔法因操作简便直观，多用于工业化生产中。

(3) 划痕法多用于科研院所，对于厚度小于 200 μm 及大于 500 μm 的氧化铁皮较适用。划痕法分析界面结合力，需要结合声发射信号曲线、摩擦力曲线及显微组织分析共同判断临界载荷，以氧化铁皮开裂时对应的临界载荷作为界面的结合力。但

划痕法也有自身的不足，有学者认为其为半定量方法，依据划头与氧化层的磨损、划头的几何形状和尺寸、氧化层内塑性及弹性性能等进行临界载荷的判定，这些因素使划痕法成为一个复杂的过程，至今还未有比较合理的力学模型进行求解。

(4) 纳米压痕法现已成为一种定性或半定量的测量方法检测氧化铁皮与基体的结合力，测试过程中在氧化铁皮界面处压入纳米压痕点（不少于 10 点），通过位移-加载卸载曲线结合弹性模量及硬度，定性地表征结合力的强弱。

氧化铁皮对基体的附着是物理、化学、电学和机械综合作用的结果，涉及复杂的表面现象，因此单一的测量手段并不严谨，在评价指标相同的情况下，可将不同测量方法综合比较分析，当结果在误差范围内时，即认为测量结果有效。

参考文献

- [1] Wang C, Li Z C, Wu H B. Analysis of the microstructural transformation and oxidation behavior of Fe-0.9Cr alloy steel at 900~1150 °C. *Trans Indian Inst Met*, 2022, 75(1): 281
- [2] Chandra-Ambhorn S, Phadungwong T, Sirivedin K. Effects of carbon and coiling temperature on the adhesion of thermal oxide scales to hot-rolled carbon steels. *Corros Sci*, 2017, 115: 30
- [3] Oskay C, Galetz M C, Murakami H. Oxide scale formation and microstructural degradation of conventional, Pt- and Pt/Ir-modified NiAl diffusion coatings during thermocyclic exposure at 1100 °C. *Corros Sci*, 2018, 144: 313
- [4] Yang C W, Cho S M, Kang Y H, et al. The effect of alloy compositions on the microstructure and the mechanical strength of oxide scales on four selected steels. *Mater Sci Eng A*, 2012, 556: 246
- [5] Sun W H, Tieu A K, Jiang Z Y, et al. High temperature oxide scale characteristics of low carbon steel in hot rolling. *J Mater Process Technol*, 2004, 156(1/3): 1307
- [6] 杨瑞, 齐哲, 杨金华, 等. 氧化物/氧化物陶瓷基复合材料及其制备工艺研究进展. *材料工程*, 2018, 46(12): 1
- [7] 柳建, 孟凡军, 殷凤良, 等. 热喷涂涂层与基体结合界面研究进展. *材料工程*, 2017, 45(1): 101
- [8] 何宗倍, 张瑞谦, 付道贵, 等. 不同界面 SiC 纤维束复合材料的拉伸力学行为. *材料工程*, 2019, 47(4): 25
- [9] 刘胜. X70 管线钢表面氧化铁皮形成和演变机制 [学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2014
- [10] 杨金霞. 基体拉伸法测试膜基界面结合力的研究 [学位论文]. 天津: 天津大学, 2007
- [11] Wang Y S, Li W Y, Yang X W, et al. Research status on interface bonding mechanisms and strength of cold pressing welding. *J Mater*

- Eng, 2016, 44(4): 119
- [12] 李河清, 蔡珣, 马峰. 压痕法测定薄膜(涂层)的界面结合强度. 机械工程材料, 2002, 26(4): 11
- [13] 徐滨士. 表面工程的理论与技术. 北京: 国防工业出版社, 1999
- [14] 郑小玲, 游敏. 拉伸法测定涂层界面强度的适用性研究. 粘接, 2003, 24(2): 7.
- [15] Fan Q H, Fernandes A, Pereira E, et al. Adhesion of diamond coatings on steel and copper with a titanium interlayer. *Diamond Relat Mater*, 1999, 8(8/9): 1549
- [16] Chalker P R, Bull S J, Rickerby D S. Review of methods for the evaluation of coating-substrate adhesion. *Mater Sci Eng A*, 1991, 140: 583
- [17] Bull S J, Berasetegui E G. An overview of the potential of quantitative coating adhesion measurement by scratch testing. *Tribol Int*, 2006, 39(2): 99
- [18] Steinmann P A, Tardy Y, Hintermann H E. Adhesion testing by the scratch test method: the influence of intrinsic and extrinsic parameters on the critical load. *Thin Solid Films*, 1987, 154(1/2): 333
- [19] Bull S J. Failure modes in scratch adhesion testing. *Surf Coat Technol*. 1991, 50(1): 25
- [20] Bull S J. Failure mode maps in the thin film scratch adhesion test. *Tribol Int*, 1997, 30(7): 491
- [21] Stallard J, Poulat S, Teer D G. The study of the adhesion of a TiN coating on steel and titanium alloy substrates using a multi-mode scratch tester. *Tribol Int*, 2006, 39(2): 159
- [22] 蔡珣, 顾剑锋, 周平南. 离子束增强沉积 TiN 薄膜界面结合强度的研究. 金属热处理学报, 1997, 18(2): 30
- [23] Perry A J. Scratch adhesion testing of hard coatings. *Thin Solid Films*, 1983, 107(2): 167
- [24] Buijnsters J G, Shankar P, Van Enckevort W J P, et al. Adhesion analysis of polycrystalline diamond films on molybdenum by means of scratch, indentation and sand abrasion testing. *Thin Solid Films*, 2005, 474(1/2): 186
- [25] Ichimura H, Ishii Y. Effects of indenter radius on the critical load in scratch testing. *Surf Coat Technol*, 2003, 165(3): 1
- [26] Vasinonta A, Beuth J L. Measurement of interfacial toughness in thermal barrier coating systems by indentation. *Eng Fract Mech*, 2001, 68(7): 843
- [27] Perry A J. The adhesion of chemically vapor-deposited hard coatings to steel-the scratch test. *Thin Solid Films*, 1981, 78(1): 77
- [28] Kikuchi A, Baba S, Kinbara A. Measurement of the adhesion of silver films to glass substrates. *Thin Solid Films*, 1985, 124(3/4): 343
- [29] Zaidi H, Djamai A, Chin K J, et al. Characterisation of DLC coating adherence by scratch testing. *Tribol Int*, 2006, 39(2): 124
- [30] Riedel R, Kleebe H J, Schönfelder H, et al. A covalent micro/nano-composite resistant to high-temperature oxidation. *Nature*, 1995, 374(6522): 526
- [31] Shemet V Z, Pomytkin A P, Neshpor V S. High-temperature oxidation behaviour of carbon materials in air. *Carbon*, 1993, 31(1): 1
- [32] Wang C, Wu H B, Li Z C, et al. Microtexture and rolling deformation behavior analysis of the formation mechanism Fe_3O_4 at the interface formed on hot-rolled high-strength steel. *Metals*, 2021, 11(2): Art No. 312
- [33] Li Z F, Cao G M, Lin F, et al. Phase transformation behavior of oxide scale on plain carbon steel containing 0.4wt.% Cr during continuous cooling. *ISIJ Int*, 2018, (58)12: 2338
- [34] Bhushan B. Handbook of Micro/Nanotribology. 2nd Ed. Boca Raton: CRC Press, 1999
- [35] Johnson K L, Contact Mechanics. Cambridge: Cambridge Press, 1985
- [36] Oliver W C, Pharr G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *J Mater Res*, 1992, 7(6): 1564
- [37] 黎明, 温诗铸. 纳米压痕技术理论基础. 机械工程学报, 2003, 39(3): 142
- [38] Ikeda R, Cho H, Sawabe A, et al. Laser spallation method to measure strength against Mode-I decohesion of CVD diamond films. *Diamond Relat Mater*, 2005, 14(3/7): 631
- [39] Kobayashi A, Jain A, Gupta V, et al. Study on the interface strength of zirconia coatings by a laser spallation technique. *Vacuum*, 2004, 73(3/4): 533
- [40] Wang J L, Sottos N R, Weaver R L. Tensile and mixed-mode strength of a thin film-substrate interface under laser induced pulse loading. *J Mech Phys Solids*, 2004, 52(5): 999
- [41] 龙东平, 薛建荣. 纳米压痕和划痕法测定 TiO_2 纳米薄膜的力学性能. 表面技术, 2015, 44(6): 115

基金项目: 辽宁省钢铁产业产学研创新联盟资助项目 (BG-BYGT-TE23-000020-0)。

作者简介: 张猛 (1981—), 男, 高级工程师, 材料科学与工程专业。主要研究方向: 钢铁控制轧制及控制冷却。特钢事业部高级工程师。通信地址: 辽宁省本溪市平山区鞍钢集团本钢特钢厂; E-mail: bx-226@163.com。

通信作者: 王超 (1985—), 男, 博士, 副教授, 《金属世界》第一届青年编委, 主要从事材料加工新工艺新技术, 通信地址: 辽宁省鞍山市辽宁科技大学材料与冶金学院, E-mail: wcustl@126.com。