

# 湿热环境中汽车板表面腐蚀萌生与 表面轮廓特征的关系

方百友<sup>1</sup>, 陈恒<sup>2</sup>, 卢琳<sup>2</sup>

(1. 宝钢日铁汽车板有限公司, 上海 201900; 2. 北京科技大学 新材料技术研究院, 北京 100083)

**摘要:** **目的** 探究储运过程中深冲用汽车板表面轮廓对其耐蚀性能的影响。**方法** 在模拟的高温高湿腐蚀环境中研究两类无间隙原子钢在其腐蚀初期表面锈点的萌生规律, 并采用白光干涉轮廓仪对钢板的表面形貌特征进行表征, 探究影响储运过程中汽车板耐蚀性能的表面状态因素。**结果** 仅通过平均粗糙度  $S_a$  的差异无法区分具有不同表面轮廓特征的汽车板, 因此也无法使用平均粗糙度参数  $S_a$  预估汽车板的耐蚀性能。在锈点萌生初期, 汽车板表面轮廓的最大高度  $S_z$  和最大峰高  $S_p$  值的大小直接影响表面电化学活性。在锈点扩展阶段, 汽车板表面波峰聚集程度的作用对锈点扩展的影响更为显著。**结论**  $S_z$  和  $S_p$  越大, 锈点萌生的速度越快; 波峰聚集程度越高, 锈点扩展速度越快。该研究结果为提高钢板表面耐蚀性能提供了一条新的思路。

**关键词:** 无间隙原子钢; 锈点萌生; 高温高湿环境; 表面轮廓特征; 相对高度分布曲线

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2020.12.016

**中图分类号:** TG174 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2020)12-0101-08

## Relationship between Corrosion Initiation and Surface Morphology of Automotive Sheet in High Temperature and Humidity Environment

FANG Bai-you<sup>1</sup>, CHEN Heng<sup>2</sup>, LU Lin<sup>2</sup>

(1. Baosteel-NSC Automotive Steel Sheets Co., Ltd., Shanghai 200941, China; 2. Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**ABSTRACT:** The work aims to explore the influence of surface morphology on the corrosion resistance of automotive sheet in storage and transportation. The initiation laws of rust points of two kinds of interstitial free (IF) steel exposed to the simulated high-temperature and humidity environment were investigated in the early corrosion stage and the surface morphology of automotive steel sheet was characterized by white-light interferometer to explore the surface factors affecting the corrosion resistance of automotive sheet during storage and transportation. The automotive sheets with different surface morphology features could not be characterized solely by the average roughness parameter  $S_a$ . Thus, the corrosion resistance of automotive steel sheet could not be evaluated by  $S_a$ . Moreover, the surface electrochemical activity directly depended on the maximum peak height  $S_p$  and maximum valley depth  $S_v$  of IF steel surface in the initiation stage. In the stage of rust point expansion, the peak aggregation

收稿日期: 2020-04-24; 修订日期: 2020-05-18

Received: 2020-04-24; Revised: 2020-05-18

基金项目: 国家自然科学基金 (U1560104)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (U1560104)

作者简介: 方百友 (1972—), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向为汽车板表面质量控制。

Biography: FANG Bai-you (1972—), Male, Senior engineer, Research focus: surface quality control for auto sheet steels.

通讯作者: 卢琳 (1977—), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为腐蚀与防护。

Corresponding author: LU Lin (1977—), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: corrosion and protection.

degree on the surface of automotive sheet had a more significant effect on rust point expansion. The larger the values of  $S_p$  and  $S_v$  are, the greater the speed of rust point initiation is. The higher aggregation degree of peak is, the greater the speed of rust point propagation is. The results are anticipated to provide a new perspective and possibility for enhancing the corrosion resistance of automotive sheet.

**KEY WORDS:** interstitial free steel; rust point initiation; high-temperature and humidity environment; surface morphology feature; height distribution curve

近年来,无间隙原子钢(IF钢)因其具有优异的非时效性和深冲性能,大量用于生产各类汽车用深冲件<sup>[1-3]</sup>。IF钢根据冲压级别可分为普通深冲级(DQ)、深冲压级(DDQ)、特深冲压级(DDQ)等<sup>[4-5]</sup>。另外,超低碳烘烤硬化钢板与IF钢性能相结合生产的BH-IF钢更以其优异的成形性能和抗凹陷性能获得广泛应用<sup>[6]</sup>。与其他碳钢相比,IF钢的表面质量要求严格,其在储运过程中的耐蚀性能直接关系到后续加工中的表面状态,因此备受关注<sup>[7-8]</sup>。特别是在高温高湿的恶劣环境中,IF钢极易发生锈蚀,因此必须使用临时性防护措施加以保护<sup>[9-10]</sup>。目前,除了表面涂敷防锈油以外,有研究者发现钢板表面粗糙度的变化也可影响其耐蚀性能。Al-Khateeb等<sup>[11]</sup>发现,增加X65钢表面的粗糙度,会提高其腐蚀电流密度。这是由于粗糙的表面更有利于氧气的扩散,在阴极发生吸氧反应。Li等<sup>[12]</sup>认为,表面粗糙度的增加会提高其电化学活性,降低表面电位,腐蚀电流密度也会随之增加。另外,Evgeny等<sup>[13]</sup>发现腐蚀优先发生在低碳钢表面突起的位置,因此会提高其表面的平滑度。因此,钢板耐蚀性能的优化也可以通过改变表面粗糙度实现。

事实上,IF钢等汽车板的表面轮廓是通过平整工序控制的,平整过程中轧制力的大小以及轧辊类型等对IF钢的表面质量有决定性的影响。一般而言,平整轧制力和轧辊粗糙度的增大将使得IF钢表面波峰和波谷的高度差增大,从而增加其表面粗糙度,而轧辊本身轮廓的均匀性则直接影响平整后IF钢表面波峰和波谷的分布<sup>[14-15]</sup>。因此,可以通过改变平整工艺参数来控制IF的表面质量,进而改善其耐蚀性能。本研究通过湿热实验,对两类IF钢表面轮廓特征与其锈点萌生的关系进行了研究。希望通过本研究,能为提高钢板表面耐蚀性能提供一个新的解决思路。

## 1 试验

### 1.1 材料

试验所选用的材料为冷轧平整后的IF钢,选取普通深冲压级(DQ)和烘烤硬化板(BH-IF)两类作为研究对象,其微观组织均为铁素体。根据表面轮廓特征的差异,每类分别取四组(编号依次为DQ-1、

DQ-2、DQ-3、DQ-4以及BH-1、BH-2、BH-3、BH-4)进行对比研究,每组3个平行样,试样大小均为60 cm×80 cm。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 湿热环境模拟方法

湿热试验法是目前室内大气腐蚀加速试验广泛使用的一种,采用恒定湿热试验来模拟高湿热环境对钢板产品贮存以及运输过程中的影响。将上述8组试样在丙酮中超声清洗后,放入湿热箱中。湿热箱设定温度为45℃,相对湿度为95%。取样间隔为2、4、8、24、48、72 h,并使用相机对试样腐蚀前后的宏观形貌变化进行观察记录。参照GB/T 2423.3评定湿热试验试样的锈蚀度,其原理如图1所示。

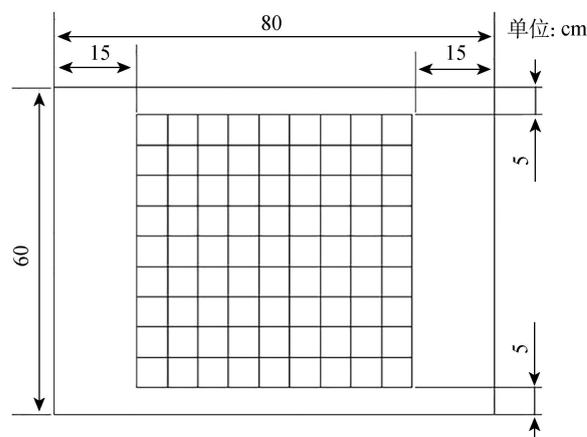


图1 数格法评定湿热试验

Fig.1 Evaluation of damp heat test by counting-lattice method

#### 1.2.2 表面轮廓表征

本研究采用非接触式白光干涉显微镜(Zygo, USA)对试样的表面轮廓形貌进行测量及分析,获得不同试样表面三维形貌、轮廓参数以及相对高度分布曲线等信息。非接触表面轮廓测试中显微镜镜头选择2.75倍,对应的取样面积为3.0 mm×3.0 mm。其中每片试样随机取3个点进行测量。使用原子力显微镜(Bruker Nanoscope Multimode 8)对试样表面微观区域内的轮廓以及电位进行表征,所使用的探针为PFQNE-AL型氮化硅/硅探针。扫描完成后,使用Nanoscope Analysis 1.8软件进行数据处理。

## 2 结果及分析

### 2.1 DQ 钢板

#### 2.1.1 DQ 钢板的表面轮廓参数

使用三维白光干涉表面形貌仪对四组 DQ 钢板表面轮廓进行了测量，获得了表面二维轮廓图，如图 2 所示。可以发现，DQ-1 和 DQ-2 钢板表面凸峰分布相对集中，并且连成了一片，凹谷不连续地分布在峰的四周。这些凸峰的相对高度差值相差不大，重叠在一起使峰尖形成一个相对平的表面。DQ-3 和 DQ-4 钢板表面波峰高低起伏相对分散，凸峰比较均匀地分布在凹谷之间。与此相反，从表 1 中所列出的平均粗糙度 ( $S_a$ ) 及均方粗糙度 ( $S_q$ ) 来看，

四组的结果非常接近，没有明显的差异。因此，需要借助最大峰高 ( $S_p$ )、最大谷深 ( $S_v$ ) 以及最大高度 ( $S_z$ ) 等粗糙度参数来对四组试样的形貌差异进行表征<sup>[16]</sup>。

将四组 DQ 钢板表面凸峰和凹谷的分布情况绘制成分布曲线，并计算波谷所占的比例，见表 1、2 和图 3。从图 3 中可以清晰地看出，四组钢板表面相对于平均面的相对高度分布均符合负偏态分布，其中 DQ-1 和 DQ-3 相对高度值分布范围较小，从测得的  $S_v$  和  $S_p$  值来看，峰谷的相对高度相似，表面起伏状态较为均匀，因此  $S_z$  相似。DQ-2、DQ-4 试样组的相对高度值范围较大，DQ-2 试样最大谷深较大，DQ-4 试样最大峰高较高，因此造成二者  $S_z$  比 DQ-1 和 DQ-3 更大，表面轮廓中波峰和波谷起伏不均匀。

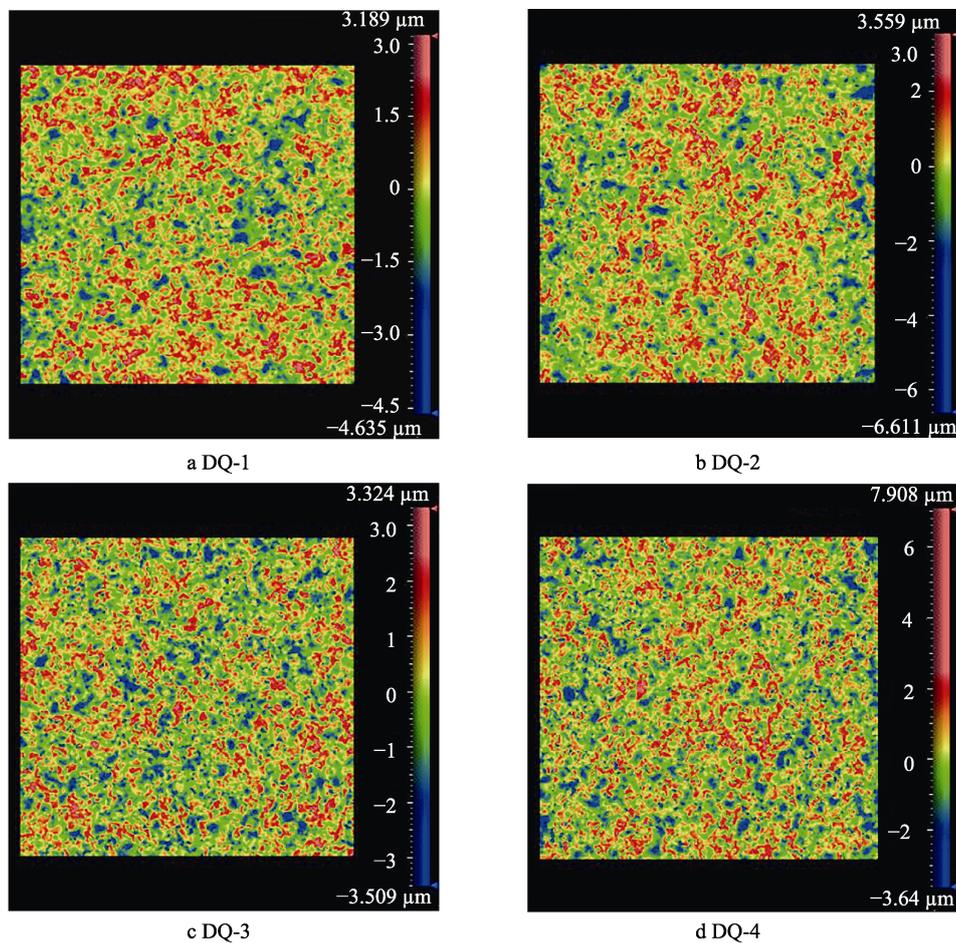


图 2 DQ 钢板表面二维轮廓图

Fig.2 Two-dimensional surface morphology of DQ steel

表 1 DQ 钢板三维轮廓参数

Tab.1 Three-dimensional roughness parameter of DQ steel

Sample No	$S_a/\mu\text{m}$	$S_q/\mu\text{m}$	$S_z/\mu\text{m}$	$S_v/\mu\text{m}$	$S_p/\mu\text{m}$
DQ-1	0.879 70	1.073 17	7.824 71	-4.635 22	3.189 49
DQ-2	0.879 43	1.082 94	10.170 31	-6.610 10	3.559 31
DQ-3	0.892 08	1.081 49	6.833 28	-3.509 22	3.324 056
DQ-4	0.886 94	1.073 92	10.737 57	-3.6397	7.0979

表 2 不同种类 DQ 钢板凹谷所占比例  
Tab.2 Valley proportion of various DQ steels

Sample No	DQ-1	DQ-2	DQ-3	DQ-4
Valley proportion/%	49.82156	51.10278	52.26675	51.55796

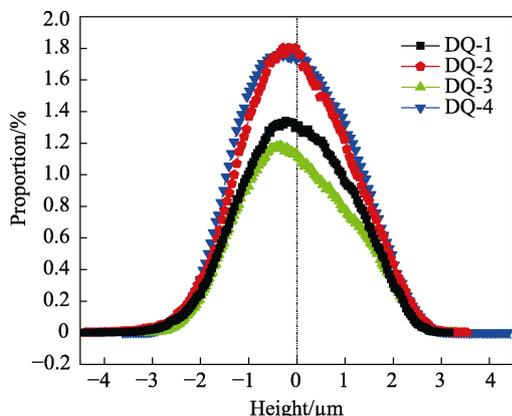


图 3 DQ 钢板表面相对高度分布曲线  
Fig.3 Relative height distribution curve of DQ steel sheet surface

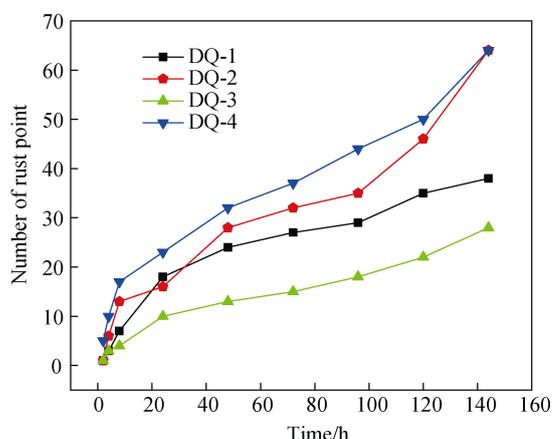


图 4 不同 DQ 试样锈点数随时间变化曲线  
Fig.4 Number of rust points of different DQ steels versus time

由上述表面轮廓图和表面粗糙度参数可知，DQ-1 和 DQ-2 钢板表面凸峰连续集中分布；DQ-3 和 DQ-4 钢板表面凸峰和凹谷相对均匀分布，且凹谷面积所占比例较大。其中，DQ-1 和 DQ-3 的表面起伏状态较为均匀，另外两种试样表面高低起伏的差异性较大。

### 2.1.2 DQ 钢表面锈点萌生规律

四组 DQ 试样表面锈点萌生情况随时间的变化如图 4 所示。可以看出，随时间的增加，各组试样锈点数均有所增长，特别是在前 8 h，增长速度最快。相比之下，DQ-1 和 DQ-3 试样随时间的延长，锈点萌生速度趋缓；而 DQ-2 和 DQ-4 试样的锈点增长速度在 120 h 后又再次提高。从最终结果来看，DQ-1 与 DQ-3 的试样腐蚀程度接近，而 DQ-2 与 DQ-4 的试样腐蚀程度接近。相比较而言，DQ-3 试样在湿热条件下比其他三组试样具有更好的耐蚀性能。

### 2.1.3 $S_z$ 对锈点萌生的影响

从 DQ 钢在湿热环境中放置 144 h 后的锈点数变化规律可以看出，四组试样的试验结果表现出两个趋势：即 DQ-1 和 DQ-3 为一组，锈点的萌生相对较慢，24 h 后其增长速度较为稳定；而 DQ-2 和 DQ-4 试样的锈点萌生较快，且萌生速度波动起伏，表现出更大的活性。DQ 钢的锈点萌生规律与表 1 中等轮廓参数  $S_z$  的大小相对应，这是因为  $S_z$  的大小直接反映了表面波峰和波谷相对高度差的大小，进而直接决定了 DQ 钢的腐蚀驱动力。如图 5 所示，表面波峰处由于电子的逸出功较小，电位较低；而波谷处电子逸出功较大，电位较高，进而造成表面波峰和波谷之间的电位差<sup>[17]</sup>。这种表面相对位置高低造成的电位差可以作为腐蚀萌生的驱动力，使之成为腐蚀原电池中的阳极和阴极，参与腐蚀电化学反应。由此可知，在腐蚀介质中，表面波峰处往往会优先腐蚀，成为锈点萌

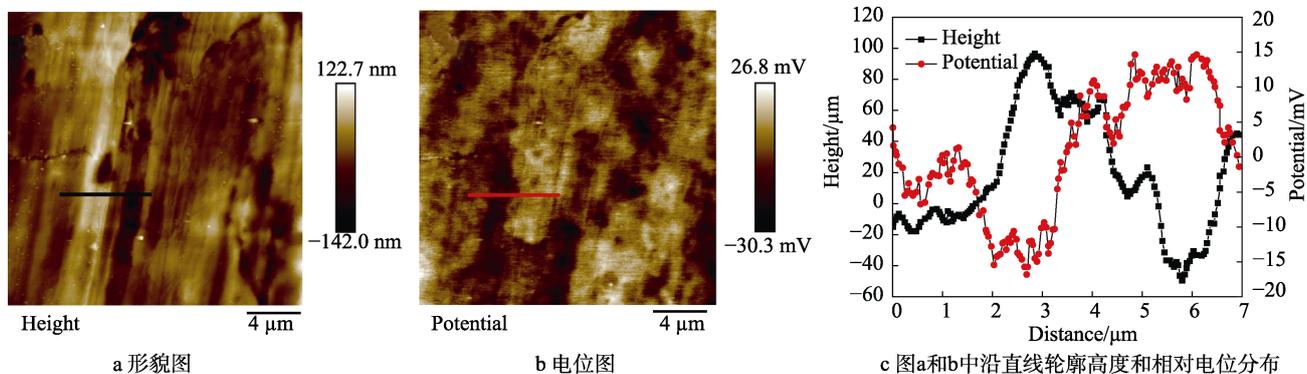


图 5 DQ 钢试样表面形貌和电位

Fig.5 Surface morphology and potential of DQ steel sample: a) AFM topography image; b) AFM potential image; c) topography profile and the corresponding potential profile in Fig.a and Fig.b along the line

生的活性位置<sup>[16,18]</sup>。波峰和波谷处的相对高度差越大,则意味着电位差越大,对应的腐蚀萌生驱动力也越大。因此,从表面轮廓中  $S_z$  的大小可以推断出腐蚀萌生的快慢,这也是 DQ-2 和 DQ-4 试样组中锈点较多的原因。需要注意的是,尽管二者  $S_z$  相近,但是 DQ-4 试样组在湿热实验的最初 2 h 表现出最多的锈点数,这与其  $S_p$  较高有关,因为锈点最初发生在活性较高的位置<sup>[19-21]</sup>。另外,由于 DQ-1 和 DQ-3 试样组表面起伏相对均匀,且  $S_z$  较小,因此在湿热环境中表现出相对较低的活性。相较而言,DQ-1 的锈点数略多,这是由于其波谷占比比较少带来的影响。对于整个试样表面而言,波谷的占比越少,其表面活性越大。

DQ 钢的表面轮廓是通过平整工序得到的,平整过程中轧制力的大小以及轧辊的粗糙度直接决定了 DQ 钢的表面轮廓分布。较大的平整轧制力和轧辊粗糙度都会使得 DQ 钢具有更大的表面轮廓起伏。因此,为增加储运过程中 DQ 钢的耐蚀性能,可以在工艺参数允许的范围内适当减小平整轧制力或轧辊的粗糙度,以减小表面波峰和波谷的相对高度差,进而减小 DQ 钢的腐蚀萌生驱动力。

## 2.2 BH 钢板

### 2.2.1 BH 钢表面轮廓特征

对 BH 钢板表面轮廓进行测量,选取了比较有代

表性的表面二维轮廓,如图 6 所示。可以发现,与 DQ 钢相比,BH 钢表面整体波峰和波谷的分布较为细密。其中,BH-4 试样组表面轮廓与其他三种试样相比差别明显,表面波峰较少,但波峰的相对高度较高,均匀地分布于试样的水平面上。相对来说,浅谷较多,波谷所占的面积较大。其他三组试样表面凸峰较多,且某些波峰相连后聚集分布于试样表面。同时,还可以观察到这三组试样表面少数凸峰较高或凹谷较深,但表面总体还是比较平整。这些特点从四组试样轮廓参数  $S_v$ 、 $S_p$  和  $S_z$  的差异也能得到验证,即 BH-1、BH-2 和 BH-3 试样组表面高低起伏较为一致,BH-4 试样组表面峰谷的高低差较大。

四组 BH 钢板的表面轮廓参数见表 3。通过对轮廓参数  $S_a$ 、 $S_q$  以及  $S_z$  等进行分析可知,前三组钢板表面较光滑,且粗糙度参数较为接近,并无明显差别。BH-4 试样组钢板表面粗糙度明显要比前三种大,这是由于其表面存在少数较尖锐的波峰导致的。为进一步验证四组 BH 钢板表面凸峰和凹谷分布情况,将相对高度分布数据绘制成分布曲线,如图 7 所示。可以看出,前三组试样的相对高度分布曲线存在些许差异,但是都比较服从正偏态或正态分布,其表面凸峰较多;BH-4 组试样与前三种存在差异,相对高度分布曲线表现为负偏态分布,其表面凹谷较多。对波谷位置所占面积进行计算,结果见表 4。BH-1 波谷比

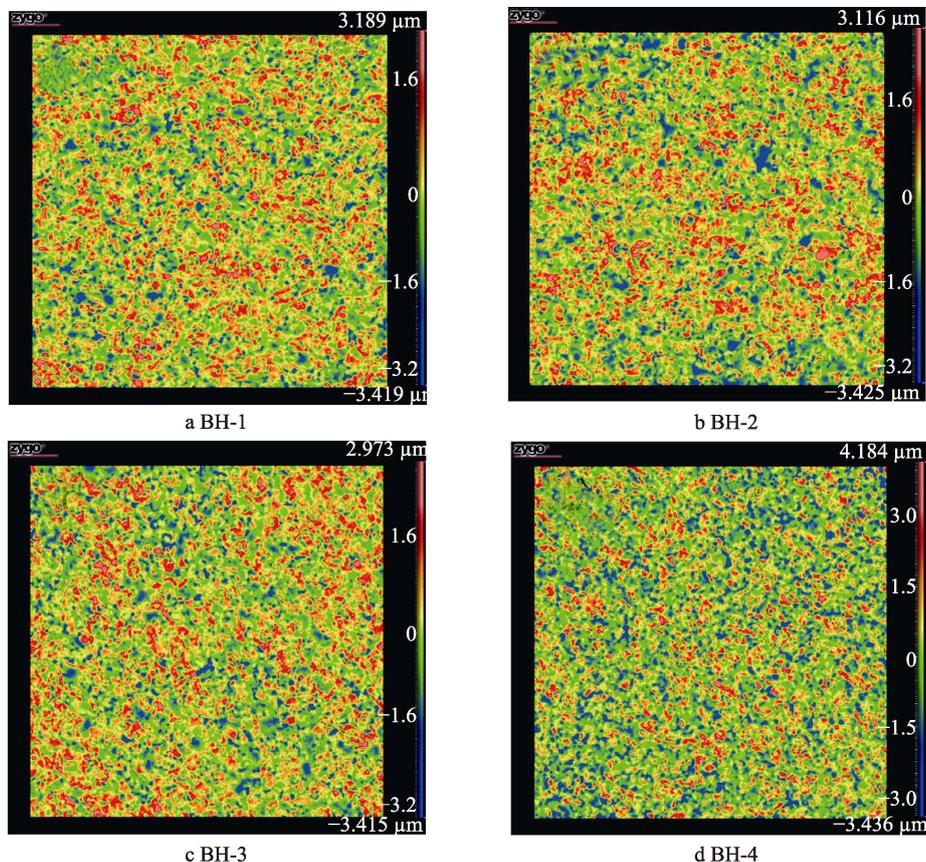


图 6 BH 钢板表面二维轮廓

Fig.6 Two-dimensional surface morphology of BH steel sheet

表3 BH 钢板三维轮廓参数

Tab.3 Three-dimensional roughness parameters of BH steel sheet

Sample No	$S_a/\mu\text{m}$	$S_q/\mu\text{m}$	$S_z/\mu\text{m}$	$S_v/\mu\text{m}$	$S_p/\mu\text{m}$
BH-1	0.756 25	0.934 29	6.364 23	-3.419 35	2.944 88
BH-2	0.778 21	0.952 54	6.540 91	-3.424 60	3.116 31
BH-3	0.756 32	0.931 89	6.388 55	-3.415 44	2.973 11
BH-4	0.942 12	1.164 09	7.620 69	-3.436 23	4.184 45

表4 不同种类 BH 钢板凹谷面积所占比例

Tab.4 Valley proportion of various BH steel sheets

Sample No.	BH-1	BH-2	BH-3	BH-4
Valley Proportion/%	48.69438	50.06671	49.86991	51.66764

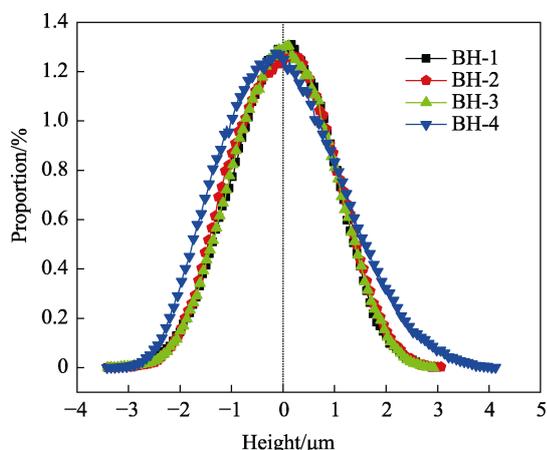


图7 BH 钢板表面相对高度分布曲线图

Fig.7 Relative height distribution curve of BH steel sheet

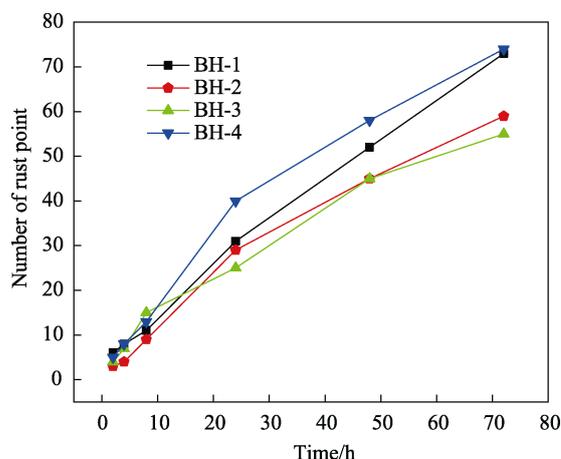


图8 不同 BH 钢试样锈点数随时间变化曲线

Fig.8 Number of rust points of different BH steel samples versus time

例最小, BH-2 和 BH-3 试样组差别不大, BH-4 试样组的波谷比例最大。

### 2.2.2 BH 钢的锈点萌生规律

四组 BH 钢试样在湿热条件中的锈点萌生情况如图 8 所示。在试验的前 2 h, 所有试样均有锈点萌生。随时间的增加, 各试样锈点数都稳定增长。湿热试验 24 h 之前, BH-4 试样组的 BH 钢板表面锈点的增长速度最快; 24~72 h 之间, BH-1 试样锈点数的增长速度最快。

BH 钢试样在湿热试验 72 h 后的宏观形貌如图 9 所示。由宏观照片可知, 经过 72 h 的湿热试验后, 各 BH 钢试样表面出现了面积大小不等的锈点, 特别是 BH-1 和 BH-2 试样, 其表面出现的大锈点数量较多。

由于锈点的大小不同, 锈点的萌生速度不能准确反映试样的锈蚀程度, 故通过软件对锈蚀面积进行统计计算, 结果见表 5。可以发现, 尽管 BH-4 的锈点数最多, 但是其总面积最小。总体说来, 随轧制力增加, 锈蚀面积呈现出减小的趋势。

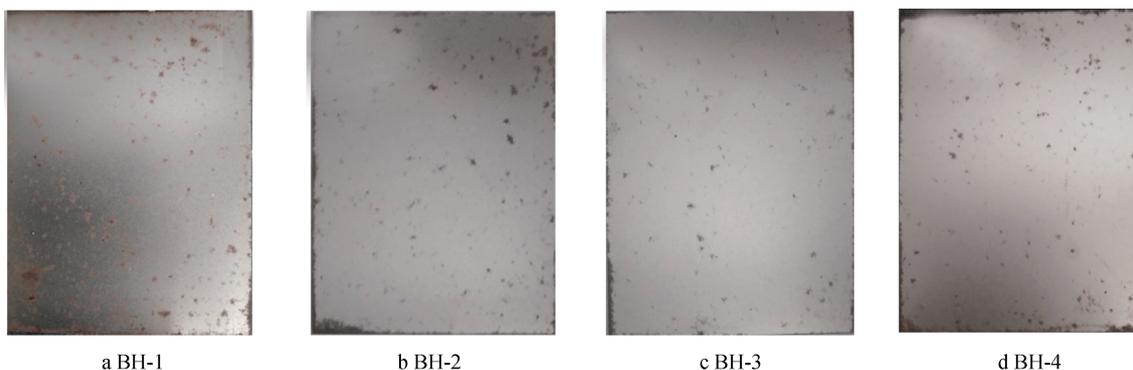


图9 BH 钢 72 h 湿热实验后的宏观照片

Fig.9 Macro pictures of BH steel after damp heat test for 72 hours

表 5 BH 钢各试样锈点面积所占百分比  
Tab.5 Proportion of rusty area on various BH steel samples

Sample No.	BH-1	BH-2	BH-3	BH-4
Proportion of rusty area/%	7.324	2.962	3.265	1.865

### 2.2.3 波峰波谷分布状态对锈点扩展的影响

从以上结果中可以看出, BH-4 试样组与其他三组试样相比, 波峰相对高度最大, 但占比较小, 且均匀分布。这种表面分布规律使得湿热实验中 BH-4 试样组在最初锈点萌生阶段(24 h 内)表现出较高的活性。这主要是因为 BH-4 表面的高低落差比其他试样大, 形成较大的电位差, 驱动锈点的快速萌生<sup>[22-23]</sup>。但是, 由于其波峰占比较小, 分布比较分散, 不利于锈点的扩展, 因此其在湿热试验中锈点虽多, 但是单个锈点的扩展不如其他试样快, 这也是造成锈蚀面积与锈点数量排序不同的原因。相比之下, BH-1、BH-2 和 BH-3 三组 BH 钢板表面波峰面积更大, 且集中连片分布, 在腐蚀发展的过程中, 腐蚀原电池一旦形成, 极易向周围活性位置扩展。这也是造成湿热实验中波峰分散度相对较大的 BH-4 试样锈点相对小而多, 但锈蚀面相对最小, 而波峰连成一片的其他三个试样, 锈点的尺寸相对较大, 锈蚀面积比例较高的原因。

BH 钢的耐蚀性能与波峰的相对高度及其聚集程度有关, 较大的波峰相对高度以及波峰的密集分布均使得 BH 钢的腐蚀活性更大。为提高 BH 钢在储运过程中的耐蚀性能, 可以适当减小轧制力或换用表面粗糙度更加均匀的轧辊, 以得到表面波峰分布更加均匀的 BH 钢。

## 3 结论

根据 DQ 钢与 BH 钢的表面形貌特征与其在湿热环境中的锈点萌生规律, 可以得出以下结论:

1) 汽车用 IF 钢在湿热环境中的锈点萌生速度与其表面的最大高度差  $S_z$  有关。  $S_z$  越大, 带来的腐蚀驱动力越大, 锈点萌生越快。

2) 对于锈点萌生后的扩展速度, IF 钢表面波峰波谷的富集程度具有决定性的影响。当表面波谷聚集, 更易造成锈点面积的增加, 整体锈蚀程度的提升。

3) IF 钢表面波谷占比在锈点萌生过程中也起到一定的作用, 但是在本研究中, 其作用的显著性不如以上两个因素。

### 参考文献:

[1] LI Wei, VITTORIETTI Martina, JONGBLOED Geurt, et al. The Combined Influence of Grain Size Distribution and Dislocation Density on Hardness of Interstitial Free Steel[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 45: 35-43.

[2] 李守华, 李俊. 汽车用高强度 IF 钢的研究进展[J]. 上海金属, 2007, 29(5): 66-70.  
LI Shou-hua, LI Jun. Progress in Research of High Strength IF Steel for Automotive Applications[J]. Shanghai Metals, 2007, 29(5): 66-70.

[3] LIU P B, YANG J, WU Y, et al. Investigation of Massive Ferrite in an Interstitial-free Steel[J]. Materials Characterization, 2019, 157: 109920.

[4] ASENSIO J, ROMANO G, MARTINEZ V J, et al. Ferritic Steels: Optimization of Hot-rolled Textures Through Cold Rolling and Annealing[J]. Materials Characterization, 2001, 47(2): 119-127.

[5] 马衍伟, 王先进. 超深冲 IF 钢研究的最新进展[J]. 钢铁, 1998, 33(4): 65-69.  
MA Yan-wei, WANG Xian-jin. Advances in Interstitial Free (IF) Steel[J]. Iron and Steel, 1998, 33(4): 65-69.

[6] KIM H, KIM C, BARLAT F, et al. Nonlinear Elastic Behaviors of Low and High Strength Steels in Unloading and Reloading[J]. Materials Science and Engineering, 2013, 56(2): 161-171.

[7] 张宝正, 崔文兵, 宋艳岭. 汽车零部件耐候性技术要求设定思路[J]. 装备环境工程, 2015, 12(4): 150-153.  
ZHANG Bao-zheng, CUI Wen-bing, SONG Yan-ling. Ideas of Weatherability Technology Requirements with Automobile Parts[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(4): 150-153.

[8] 刘东俭, 沈玥, 朱淮烽. 整车强化腐蚀试验转场判定的方法[J]. 装备环境工程, 2019, 16(8): 21-27.  
LIU Dong-jian, SHEN Yue, ZHU Huai-feng. Evaluation Method for Test Ground Transferring of Vehicle Corrosion Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(8): 21-27.

[9] 方百友, 贺泽邦, 范士洋, 等. 带油状态下不同冷轧汽车板的腐蚀行为[J]. 钢铁研究学报, 2018, 30(2): 113-119.  
FANG Bai-you, HE Ze-bang, FAN Shi-yang, et al. Corrosion Behaviors of Cold Rolling Automotive Sheets Coated with Anti-rust Oil[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2018, 30(2): 113-119.

[10] 方百友, 丁敏贞, 卢琳, 等. 防锈油不同涂油量对冷轧钢板腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2015, 27(1): 37-42.  
FANG Bai-you, DING Min-zhen, LU Lin, et al. Effect of Different Amounts of Antirust Oil on Corrosion Behavior of Cold-rolled Steel[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2015, 27(1): 37-42.

[11] AL-KHATEEB M, BARKER R, NEVILLE A, et al. The Effect of Surface Roughness on Diffusion and Chemical Reaction Controlled Limiting Currents on a Rotating Cylinder Electrode in Deaerated Solutions with and

- Without CO<sub>2</sub>[J]. Corrosion, 2018, 74(9): 971-983.
- [12] LI W, LI D Y. Influence of Surface Morphology on Corrosion and Electronic Behavior[J]. Acta Materialia, 2006, 54(2): 445-452.
- [13] EVGENY B, HUGHES T, ESKIN D. Effect of Surface Roughness on Corrosion Behaviour of Low Carbon Steel in Inhibited 4M Hydrochloric Acid under Laminar and Turbulent Flow Conditions[J]. Corrosion Science, 2016, 103: 196-205.
- [14] 张云涛, 周建军, 曹永杰. 冷轧汽车板表面粗糙度控制研究[J]. 轧钢, 2020, 37(2): 46-49.  
ZHANG Yun-tao, ZHOU Jian-jun, CAO Yong-jie. Research on Surface Roughness Control of Cold Rolled Strip for Automobile[J]. Steel Rolling, 2020, 37(2): 46-49.
- [15] 马兵智, 齐春雨, 娄德诚, 等. 镀锌板光整过程表面粗糙度控制技术[J]. 钢铁, 2019, 54(10): 91-95.  
MA Bing-zhi, QI Chun-yu, LOU De-cheng, et al. Surface Roughness Control Technology of Galvanized Sheet Skin-pass Rolling Process[J]. Iron and Steel, 2019, 54(10): 91-95.
- [16] CHEN H, HE Z, LU L, Correlation of Surface Features with Corrosion Behaviors of Interstitial Free Steel Processed by Temper Rolling[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 36: 37-44.
- [17] LI W, LI D Y. On the Correlation between Surface Roughness and Work Function in Copper[J]. Journal of Chemical Physics, 2005, 122(6): 064708.
- [18] LI Y, CHENG Y F. Effect of Surface Finishing on Early-stage Corrosion of a Carbon Steel Studied by Electrochemical and Atomic Force Microscope Characterizations[J]. Applied Surface Science, 2016, 366: 95-103.
- [19] 陈恒, 卢琳. 残余应力对金属材料局部腐蚀行为的影响[J]. 工程科学学报, 2019, 41(7): 929-939.  
CHEN Heng, LU Lin. Effect of Residual Stress on Localized Corrosion Behavior of Metallic Materials[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(7): 929-939.
- [20] VIGNAL V, MARY N, OLTRA R, et al. A Mechanical-electrochemical Approach for the Determination of Precursor Sites for Pitting Corrosion at the Microscale[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2006, 153(9): B352-B357.
- [21] MARTIN F A, BATAILLON C, COUSTY J. In Situ AFM Detection of Pit Onset Location on a 304L Stainless Steel[J]. Corrosion science, 2008, 50(1): 84-92.
- [22] HUANG X C, LU H, LI D Y. Understanding the Corrosion Behavior Of Isomorphous Cu-Ni Alloy from Its Electron Work Function[J]. Materials Chemistry & Physics, 2016, 173: 238-245.
- [23] IQBAL A M, FEDEL M. The effect of the Surface Morphologies on the Corrosion Resistance of in Situ Growth MgAl-LDH Based Conversion Film on AA6082[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 352: 166-174.