

文章编号:1007-9629(2022)09-0931-07

# 钢结构涂层冲击损伤特性及弹塑性特征分析

郝贞洪<sup>1,2,3,\*</sup>, 王 亭<sup>1</sup>, 宣姣羽<sup>1</sup>, 刘艳晨<sup>1</sup>

(1. 内蒙古工业大学 土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古工业大学 内蒙古自治区  
土木工程结构与力学重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010051; 3. 内蒙古工业大学 内蒙古自治区  
建筑检测鉴定与安全评估工程技术研究中心, 内蒙古 呼和浩特 010051)

**摘要:**采用自动球压冲击仪对钢结构聚氨酯涂层进行冲击试验,研究不同冲击高度下钢结构涂层冲击损伤区压痕的扩展规律,并通过计算动态硬度和恢复性系数来分析钢结构涂层的弹塑性特征.结果表明:随着冲击高度的增加,压痕尺寸不断增大;压痕应力随着压痕应变的增大先降低后再略有回增,此时涂层基本失去了防护效果;压痕内部及边缘产生环向裂纹、径向微裂纹及长裂纹,涂层在径向长裂纹末端 2~3 mm 范围内发生凸起;动态硬度和恢复性系数随着冲击高度的增加逐渐下降,涂层抗变形能力降低.

**关键词:**冲击荷载;压痕;动态硬度;恢复系数

中图分类号:TU561.02

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.09.007

## Analysis of Impact Damage Characteristics and Elastoplastic Characteristics of Steel Structure Coating

HAO Yunhong<sup>1,2,3,\*</sup>, WANG Ting<sup>1</sup>, XUAN Jiaoyu<sup>1</sup>, LIU Yanchen<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2. The Inner Mongolia Key Laboratory of Civil Engineering Structure and Mechanics, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 3. Inner Mongolia Autonomous Region Engineering Research Center of Structure Inspection, Appraisal and Safety Assessment, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

**Abstract:** In order to study the indentation expansion law of the impact damage zone of the steel structure coatings under different impact heights and to analyze the elastoplastic characteristics of the steel structure coatings by calculating dynamic hardness and recovery coefficient the impact test of polyurethane coatings on steel structures was carried out with an automatic ball pressure impact meter. The results show that the size of the indentation increases with the increase of the impact height. The indentation stress decreases first and then increases slightly with the increase of the indentation strain. The increase in the indentation stress indicates that the coating has basically lost its protective effect. The inside and edges of the indentation circumferential cracks, radial micro-cracks and long cracks are produced. The coating bulges within 2-3 mm from the end of the radial long crack. The dynamic hardness and recovery coefficient gradually decrease with the increase of impact height, and the coating's anti-deformation ability decreases.

**Key words:** impact loading; indentation; dynamic hardness; coefficient of restitution

内蒙古中西部属于沙尘暴多发地区<sup>[1]</sup>,在强风天气下钢结构设施易受砂石等硬质颗粒的冲击,造成

表面涂层材料的破损以及剥落,进而导致钢结构基体外露并发生腐蚀,影响钢结构设施的耐久性和安

收稿日期:2021-08-10; 修订日期:2021-10-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11862022,11162011,51468049,11662012);内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2018MS05047);内蒙古自治区青年科技英才支持计划项目(NJYT-17-A09);内蒙古自治区草原英才资助项目

第一作者(通讯作者):郝贞洪(1977—),男,内蒙古乌兰察布人,内蒙古工业大学教授,博士生导师,博士. E-mail:13947133205@163.com

全性.表面涂层材料作为钢结构设施防腐蚀的有效措施及重要保障,起到隔离钢结构与空气中有害介质的作用.聚氨酯面漆因其附着力强、耐磨性好等优点<sup>[2-3]</sup>,常作为一种钢结构表面防腐涂层材料被应用到工程实践当中.

关于钢结构涂层的研究,一方面集中于涂层材料本身的制备和改性研究<sup>[4-5]</sup>,以制备出防腐性能、力学性能等更优的新型功能型涂层材料<sup>[6-8]</sup>,满足不同工况的使用需求;另一方面是从理论分析、试验研究和有限元模拟<sup>[9-10]</sup>角度对涂层抗冲蚀性能进行研究,通过改变冲蚀条件来分析涂层的冲蚀磨损机理<sup>[11-12]</sup>.然而,研究大颗粒砂石冲击钢结构涂层损伤特性方面的文章目前还比较少.通过形貌分析法对钢结构涂层的冲击损伤进行评价,有助于钢结构涂层研究的进一步发展.

本文采用自动球压冲击仪对钢结构聚氨酯涂层进行冲击试验,获取不同冲击高度下涂层的冲击荷载值;通过激光共聚焦显微镜(LSCM)获取涂层冲击损伤区压痕形貌,分析钢结构聚氨酯涂层的冲击损伤过程,并计算分析其弹塑性特征.通过研究钢结构聚氨酯涂层的冲击损伤扩展规律,为钢结构涂层的冲击防护设计提供一定的理论参考.

## 1 试验

### 1.1 试验材料

钢结构基体材料选用Q235B型普通低碳薄钢板,化学组成符合GB/T 3274—2007《碳素结构钢和低合金结构钢热轧厚钢板和钢带》,弹性模量为200 GPa,泊松比为0.25,尺寸为80 mm×80 mm×3 mm.钢结构涂层材料选用钢结构环氧富锌底漆和钢结构双组分聚氨酯(PU)防腐面漆,弹性模量为905 MPa,泊松比为0.49.

### 1.2 涂层制备及性能

涂层制备:选用400<sup>#</sup>砂纸进行钢结构基体表面的除锈工作,并用无水乙醇清洗钢结构基体表面.根据GB 50205—2020《钢结构工程施工质量验收规范》中“钢结构涂装工程”相关工艺要求,制备钢结构聚氨酯涂层试件.采用空气压缩机和雾化油漆喷枪,喷涂底漆2道,面漆6道,涂层总厚度约800 μm,采用涂层测厚仪对钢结构涂层的厚度进行控制.将制备好的试件室温养护7 d备用.

基本力学性能测试:涂层的硬度和弹性模量采用微米压痕仪进行测试,通过分析加卸载曲线计算得到硬度和弹性模量;柔韧性根据GB/T 1731—93

《漆膜柔韧性测定法》规定使用的轴棒法,采用QTX漆膜弹性测试仪进行测试;涂层与基材的结合强度根据GB/T 5210—2006《色漆与清漆拉开法附着力试验》,采用GTJTC-10S型涂层附着力测试仪进行测试.涂层材料的基本力学性能如表1所示.

表1 涂层材料的基本力学性能  
Table 1 Basic mechanical properties of coating material

Property	Test value
Hardness/MPa	16.4
Elastic modulus/MPa	905
Flexibility/mm	0.5
Bond strength/MPa	1.8

### 1.3 试验方法

采用自制自动球压冲击仪对钢结构聚氨酯涂层试件进行冲击试验,冲击高度( $h$ )为20~38 cm,每隔2 cm设置1个高度,共设置10个冲击高度.通过自动球压冲击仪上的刻度尺调节冲击球头到底座支撑的距离.每个试件设置3个冲击点,冲击点与试件边缘距离大于2 cm,相邻冲击点之间的距离根据前1个冲击点的损伤情况适当进行调整,旋转手轮可改变冲击点位置.冲击球头为直径10 mm的碳化钨球,弹性模量为 $6 \times 10^5$  MPa,泊松比为0.15.

冲击试验后采用LEXTOLS4100型LSCM分别对不同冲击高度作用下钢结构聚氨酯涂层的冲击损伤区形貌进行采集,测量冲击损伤区的压痕直径、压痕深度和压痕体积.

### 1.4 试验原理

依据赫兹接触理论<sup>[13]</sup>,将球头冲击钢结构涂层看作刚性球体和弹性半空间体的接触问题.刚性球体的质量为 $m$ ,半径为 $R$ ,弹性模量为 $E_1$ ,泊松比为 $\mu_1$ ;弹性半空间体的弹性模量为 $E_2$ ,泊松比为 $\mu_2$ ;冲击荷载值为 $P$ ,形成的压痕半径为 $a$ .冲击球压模型如图1所示.

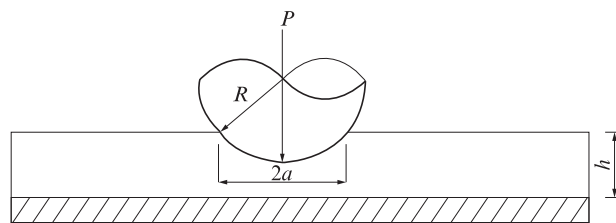


图1 冲击球压模型

Fig. 1 Impact spherical pressure model

## 2 结果与讨论

### 2.1 压痕尺寸-冲击高度曲线

通过冲击球压试验,得到钢结构聚氨酯涂层在

不同冲击高度作用下的表面损伤情况.表2为不同冲击高度下涂层的冲击荷载值.图2为冲击作用下

聚氨酯涂层压痕直径及压痕深度与冲击高度的关系曲线.

表2 不同冲击高度下涂层的冲击荷载值  
Table 2 Impact load values of the coating under different impact heights

<i>h/cm</i>	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
<i>P/N</i>	1 226	1 492	1 835	2 193	2 518	2 717	2 985	3 616	4 657	5 358

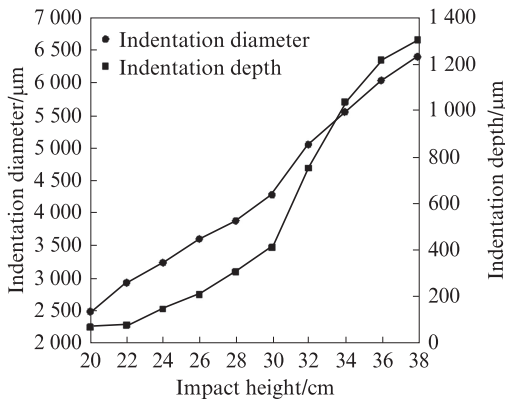


图2 冲击作用下聚氨酯涂层压痕直径及压痕深度与冲击高度的关系曲线

Fig. 2 Indentation diameter, indentation depth-impact height curve of PU coating under impact

在整个冲击过程中,可以将冲击损伤区的扩展划分为3个阶段:

(1)第1阶段为钢结构涂层弹性变形阶段,从冲击球头接触涂层表面开始到涂层压缩深度达到材料屈服压缩深度为止.钢结构聚氨酯涂层屈服强度比较小,弹性变形阶段范围较小,不易通过试验将其划分出来.由图2可见,在冲击高度为20 cm时,涂层已经发生塑性变形.

(2)第2阶段为钢结构涂层塑性变形阶段,当冲击荷载值超出材料屈服强度时,涂层进入塑性变形扩展阶段,冲击损伤区尺寸随着球头的冲击作用不断增大,产生不可恢复的永久变形.聚氨酯是一种由氨基甲酸酯键、脲键、酯键、醚键以及油脂的不饱和键等组成的高分子材料,由于聚酯或聚醚的分子链较长,在冲击荷载作用时,聚氨酯材料易发生塑性变形<sup>[14]</sup>.随着冲击高度的不断增加,涂层表面压痕直径和深度不断加速扩展.从图2可以看出,当冲击高度达到34 cm后,压痕尺寸增加的趋势明显降低,该现象是钢基体的承压作用造成的.

(3)第3阶段为钢结构涂层回弹卸荷阶段,当冲击球头速度减小到零,此时冲击荷载值达到最大,冲击损伤区尺寸随即达到最大值,随后球头受钢结构涂层材料中储存的弹性势能作用发生回弹,冲击损伤区压痕尺寸也产生一定程度恢复,最终在涂层表

面产生残余塑性变形损伤区.在冲击高度不断增加的过程中,冲击损伤区涂层受冲击产生挤压变形,在冲击坑周围形成突出于涂层平面的冲击唇.当冲击压痕达到一定深度时,球头下方涂层受挤压变形作用向四周扩展,此时球头与钢基体之间产生接触作用.在冲击荷载作用下产生的冲击唇不断隆起,使压痕深度超出钢结构涂层厚度,并由于钢基体的承压作用导致钢结构涂层变形被限制,使得压痕尺寸扩展速率最终趋于平缓.此时涂层已完全破坏,钢基体发生外露,周围部分涂层在冲击荷载作用下发生脱落.

2.2 压痕应力-应变关系曲线

冲击压痕应力-应变关系主要反映了材料在冲击接触区域上受力状态与局部变形之间的变化关系.利用等效压痕应力( $\sigma = P/\pi a^2$ )和等效压痕应变( $\epsilon = a/R$ )得到PU涂层冲击压痕应力-应变的关系<sup>[15]</sup>,如图3所示.

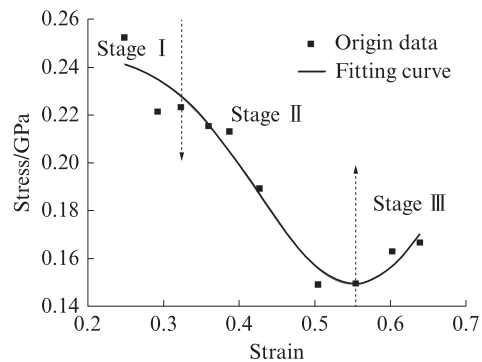


图3 聚氨酯涂层冲击压痕应力-应变的关系曲线  
Fig. 3 Stress-strain relationship curve of PU coating impact indentation

钢结构聚氨酯涂层材料屈服强度较小,球头以较低冲击高度作用在材料表面时,会导致冲击接触区发生局部塑性变形,并且塑性变形程度随着冲击高度的变化发生明显改变.由图3可见,涂层冲击压痕应力-应变曲线可大致分为3个阶段:

(1)第1阶段为冲击荷载值较低阶段,反映在应力-应变曲线下降段的初始阶段,压痕应力随压痕应变增大开始缓慢降低.聚氨酯涂层在低冲击荷载作用下,其冲击接触区域从弹性变形到塑性变形

的过渡区域,材料在该区域抵御冲击能力较强,压痕应力随压痕应变增加而降低的趋势相对比较平缓.

(2)当冲击高度继续增大,冲击荷载值达到某一临界值后进入第2阶段,此时压痕应力随压痕应变增大而迅速降低,说明材料已经完全进入塑性变形阶段,冲击区变形损伤程度不断加大.

(3)在曲线后半段,压痕应力随压痕应变增大又出现逐渐升高的趋势,此处为第3阶段.出现压痕应力升高是因为当冲击荷载达到一定值时,冲击接触区涂层材料被冲击力挤压到球头周围形成冲击唇,冲击深度已经达到涂层最大厚度.此后,当继续增大冲击高度,涂层已经失去防护效果,冲击荷载由钢基体承担,产生的压痕应力因此出现增加趋势.

### 2.3 冲击损伤区形貌分析

图4为冲击损伤区压痕的二维形貌变化图.在冲击荷载作用下,钢结构聚氨酯涂层表面产生球冠型压痕,压痕内部发生明显塑性变形.在钢结构涂层受冲击过程中,涂层表面最大接触半径范围内为压应力,在最大接触半径范围外则产生拉应力<sup>[16]</sup>.接触区内部的主要破坏形式为冲击球头的挤压破坏,在球

冠型压痕内部会产生环向裂纹;接触区外部受拉应力作用绕压痕边缘产生1圈径向微裂纹,同时,产生几条均匀分布的呈放射状的径向长裂纹.由于径向长裂纹的扩展,导致被裂纹分割区域的涂层开始与基体发生分离.由图4可见:在裂纹末端2~3 mm范围内,涂层表面可以看到轻微的凸起印迹,表明该区域涂层与基体之间在拉应力作用下发生了一定程度的分离,该区域也可作为一次冲击对涂层造成损伤及影响的最大区域;相比20 cm冲击高度,在30 cm冲击高度下的损伤区压痕尺寸明显增大,径向长裂纹发生拓展延伸.由于冲击荷载的增大,导致在球冠型压痕边缘处的部分涂层发生脱落.

现对冲击高度为30 cm试件的损伤程度进行评估.自动球压冲击仪的冲击过程即自由落体运动,忽略空气阻力和摩擦力等做功,根据能量守恒定律  $m_1gh = m_2v^2/2$ ,可以将不同冲击高度转换为相应的冲击速度,对实际中的冲击情况进行等效.对冲击高度30 cm的条件进行速度转换,经计算半径10 mm的砂石颗粒以25 m/s的速度垂直冲击涂层表面时,冲击坑形貌如图4(b)所示,此时涂层已发生明显塑性变形,冲击坑深度达到涂层总厚度的一半.

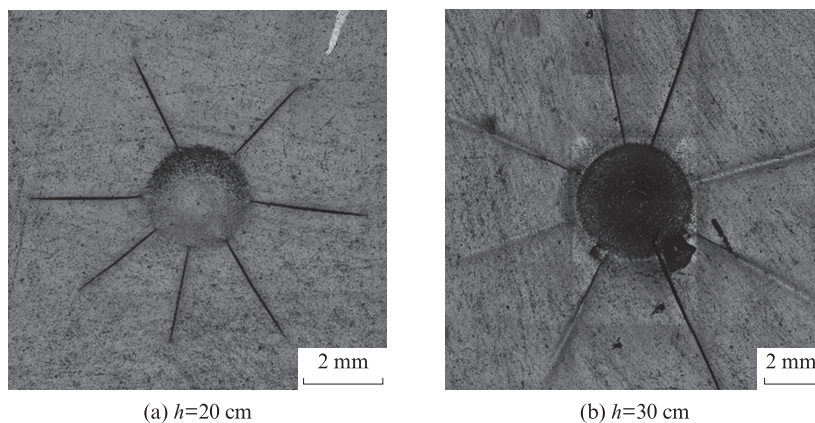


图4 冲击损伤区压痕的二维形貌变化图

Fig. 4 Two-dimensional morphology change diagram of indentation in impact damage zone

图5为不同冲击高度下损伤区压痕三维形貌变化图.由图5可见:随着冲击高度的增加,损伤区压痕三维尺寸呈现逐渐增大的趋势;随着冲击高度的增加,冲击荷载值增大,压痕边缘冲击唇高度也表现出增高趋势,整个损伤区压痕呈现为类似火山型凸起,压痕周围产生的径向长裂纹不断扩展,同时裂纹两侧也出现凸起现象;当冲击高度达到34 cm后,压痕边缘处涂层已完全凸起,更有部分涂层在冲击力作用下发生大面积剥落,造成钢基体外露现象发生.

### 2.4 弹塑性特征分析

钢结构涂层在冲击过程中会发生弹塑性变形,

采用能量转换法对冲击过程进行分析.动态硬度( $H_d$ )和恢复性系数( $e$ )作为材料在冲击过程中的2项弹塑性特征指标,可以反映材料抵抗冲击变形和恢复的能力.

冲击过程中球头携带的部分能量与被冲击材料表面所产生压痕体积的比值被看作动态硬度.根据Tabor理论<sup>[17]</sup>,材料的动态硬度表示为:

$$H_d = \frac{W}{V} \quad (1)$$

式中: $W$ 为粒子在冲击过程中消耗的总能量,J; $V$ 为粒子冲击对材料表面造成损伤的体积, $\text{mm}^3$ .

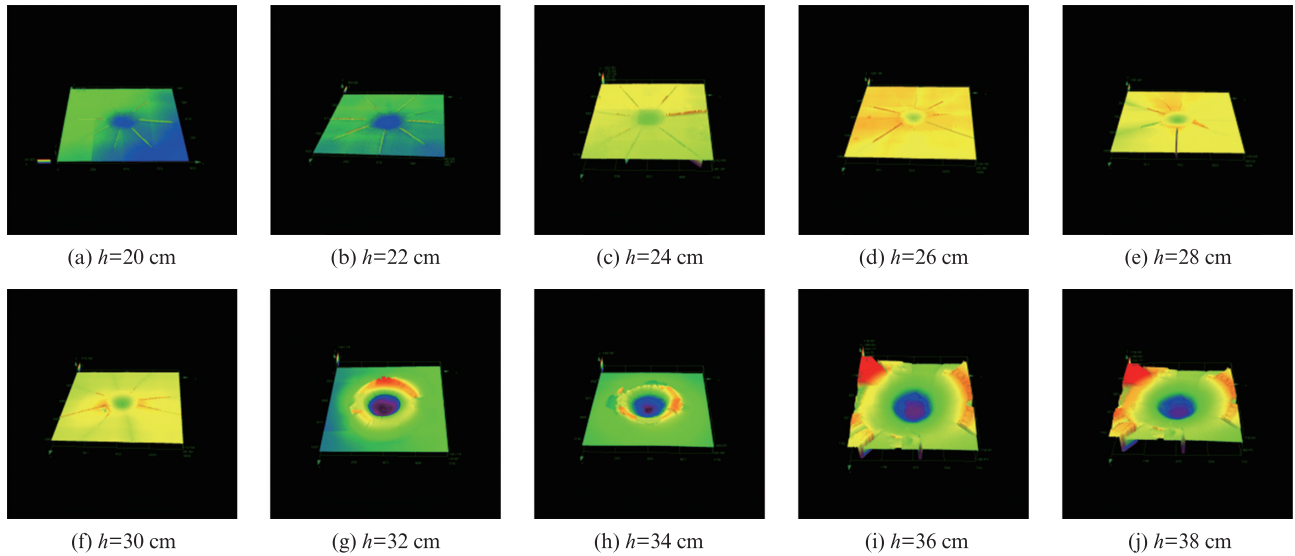


图5 不同冲击高度下损伤区压痕三维形貌变化图

Fig. 5 Three-dimensional morphological changes of indentation in the damage zone under different impact heights

对球压冲击过程中的能量转换进行分析:球头冲击至材料表面,在其发生变形之前的总能量为  $U$ ,被冲击材料表面发生弹塑性变形,其中的弹性变形能为  $U_e$ ,塑性变形能为  $U_p$ .冲击过程中弹性波在材料内部传播的能量  $U_w$ 仅占总能量的1%~3%,以及少量的局部热能和声音振动产生的能量,这些能量相比于整个能量转换系统是及其微弱的,所以在分析时将其忽略<sup>[18-19]</sup>.因此,冲击过程中的总能量、弹性变形能和塑性变形能可以表示为:

$$U = \frac{1}{2} m V_{in}^2 \quad (2)$$

$$U_e = \int_0^a \frac{3P^2}{2a^6 E} \delta^4 d\delta = \frac{3P^2}{10aE} \quad (3)$$

$$U_p = U - U_e = \frac{1}{2} m V_{in}^2 - \frac{3P^2}{10aE} \quad (4)$$

则式(1)可表示为:

$$H_d = \frac{U - U_e}{V} = \frac{\frac{1}{2} m V_{in}^2 - \frac{3P^2}{10aE}}{V} = \frac{5aEmV_{in}^2 - 3P^2}{10aEV} \quad (5)$$

式中:  $V_{in}$ 为冲击粒子速度, m/s;  $E$ 为接触系统的有效弹性模量, MPa.

球头冲击至材料表面,使其完成压缩变形后,材料内部产生的弹性变形会发生恢复,使冲击球头发生回跳.岳汉威等<sup>[20]</sup>依据牛顿建立的恢复性系数概念,提出用球头回跳的能量  $U_r$ 占总能量的比值来表示材料在冲击荷载作用下的弹塑性恢复能力.球头回跳的能量  $U_r$ 源自冲击过程中材料的弹性变形能  $U_e$ .因此,恢复性系数  $e$ 可表示为:

$$e = \sqrt{\frac{V_{out}}{V_{in}}} = \sqrt{\frac{U_r}{U}} = \sqrt{\frac{U_e}{U}} = \sqrt{\frac{3P^2}{5aEmV_{in}^2}} \quad (6)$$

恢复性系数  $e$ 越大,表明材料的弹性恢复能力越强.当材料仅处于弹性变形阶段时,其恢复性系数  $e=1$ .根据上式可以对受冲击材料表面的弹性特征进行评价.

动态硬度和恢复性系数不是材料的固有属性,会随环境因素及外界条件的变化而发生变化.采用自动球压冲击仪采集钢结构聚氨酯涂层在不同冲击高度作用下的冲击荷载值,并利用LSCM测量冲击后试件表面损伤区的压痕尺寸.根据式(5)、(6)计算涂层在不同冲击高度下的动态硬度和恢复性系数,分析钢结构聚氨酯涂层的弹塑性特征.表3为聚氨酯涂层在不同冲击高度下的压痕尺寸.

图6为不同冲击高度下聚氨酯涂层的动态硬度

表3 聚氨酯涂层在不同冲击高度下涂层的压痕尺寸  
Table 3 Indentation size of PU coating under different impact heights

$h/cm$	Diameter/ $\mu m$	Depth/ $\mu m$	Volume/ $mm^3$
20	2 486.9	69.1	$5.61 \times 10^0$
22	2 929.2	77.6	$1.54 \times 10^1$
24	3 235.0	146.9	$2.59 \times 10^1$
26	3 600.5	209.6	$3.85 \times 10^1$
28	3 879.0	306.8	$5.32 \times 10^1$
30	4 275.6	412.2	$7.27 \times 10^1$
32	5 049.2	752.2	$9.23 \times 10^1$
34	5 548.8	1 036.2	$1.35 \times 10^2$
36	6 032.5	1 216.3	$1.79 \times 10^2$
38	6 397.3	1 304.5	$2.40 \times 10^2$

和恢复性系数.由图6可见,随着冲击高度的增大,聚氨酯涂层的动态硬度值表现为逐渐降低的趋势.由于聚氨酯涂层属于一种弹塑性材料,且弹性变形较小,随冲击能量的增加,材料很快进入塑性变形阶段,其抵抗冲击变形的能力逐渐降低,表现为涂层塑性变形不断加大,涂层动态硬度值逐渐降低.同时,当冲击高度较低时,由于涂层还没有达到完全塑性变形阶

段,仍然具有一定的抗冲击变形能力和恢复能力,所以其恢复性系数在低冲击高度时较大,并随冲击高度的增加而降低.聚氨酯涂层的动态硬度和恢复性系数随冲击高度的变化趋势基本一致,但由于冲击高度较高时,聚氨酯涂层在冲击荷载作用下会发生严重塑性变形,冲击能量部分作用在钢基体上,导致冲击荷载值增大,从而影响恢复性系数的回增.

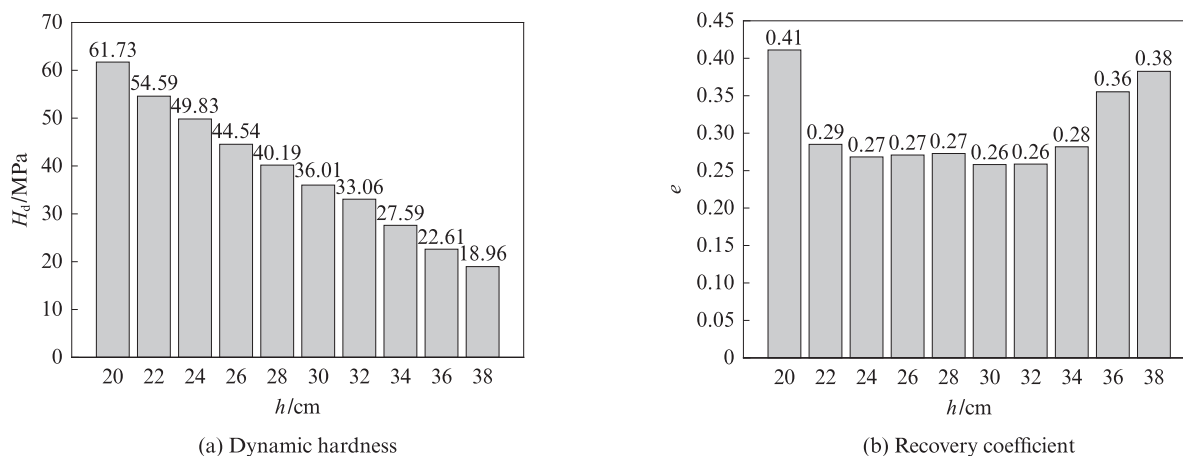


图6 不同冲击高度下聚氨酯涂层的动态硬度和恢复性系数

Fig. 6 Dynamic hardness and recovery coefficient of PU coating under different impact heights

### 3 结论

(1) 钢结构聚氨酯涂层冲击损伤区压痕尺寸随着冲击高度的增加不断增大,当冲击高度达到34 cm后,涂层开始发生脱落,涂层基本失效.压痕尺寸扩展表现为稳定扩展、加速扩展和趋于平缓3个阶段.

(2) 随着冲击高度的不断增加,钢结构聚氨酯涂层冲击损伤区压痕应力随压痕应变增大先减小后略有回增,同样表现为平稳降低、加速降低和略有回增3个阶段.当压痕应力开始回增时,涂层已基本失去防护效果.

(3) 冲击荷载作用下,钢结构聚氨酯涂层表面产生球冠型压痕,压痕内部及边缘产生环向裂纹和径向微裂纹及径向长裂纹.径向长裂纹末端2~3 mm范围内,涂层发生轻微凸起.随着冲击高度的增大,径向长裂纹不断扩展,压痕边缘冲击唇不断隆起,最终导致压痕边缘涂层发生脱落.

(4) 涂层材料动态硬度值随冲击高度的不断增大逐渐下降,抵抗变形能力不断降低;恢复性系数同样表现出类似的变化趋势.动态硬度和恢复性系数用来表征钢结构聚氨酯涂层在冲击过程中的弹塑性特征.

### 参考文献:

- [1] 袁国波. 21世纪以来内蒙古沙尘暴特征及成因[J]. 中国沙漠, 2017, 37(6):1204-1209.  
YUAN Guobo. Characteristics and cause of the sandstorm in Inner Mongolia in 2001-2015[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(6):1204-1209. (in Chinese)
- [2] 李晓明, 张义新, 冯辉霞, 等. 聚氨酯涂料研究现状及发展[J]. 应用化工, 2010, 39(7):1091-1095.  
LI Xiaoming, ZHANG Yixin, FENG Huixia, et al. Research current situation and development of polyurethane coatings[J]. Applied Chemical Industry, 2010, 39(7): 1091-1095. (in Chinese)
- [3] 李沛欣, 袁凌, 潘磊, 等. MW级风电叶片用聚氨酯涂料的研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(增刊2):594-597.  
LI Peixin, YUAN Ling, PAN Lei, et al. Research progress of polyurethane coating for MW-level wind turbine blade [J]. Materials Reports, 2020, 34(Suppl 2):594-597. (in Chinese)
- [4] AYESHA K. Polyurethane nanocomposite coatings: State of the art and perspectives[J]. Polymer International, 2018, 11(67): 1470-1477.
- [5] SANTOS L D, LIGABUE R, DUMAS A, et al. Waterborne polyurethane/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-synthetic talc composites: Synthesis, characterization, and magnetic properties[J]. Polymer Bulletin, 2018, 75(5):1915-1930.
- [6] 张月, 黄微波, 吕平, 等. 提高聚氨酯涂料防腐性能的改性研究进展[J]. 聚氨酯工业, 2020, 35(3):5-7, 35.  
ZHANG Yue, HUANG Weibo, LÜ Ping, et al. Research

- progress on modification of anticorrosive properties of polyurethane coatings[J]. Polyurethane Industry, 2020, 35(3): 5-7, 35. (in Chinese)
- [ 7 ] DUONG N T, AN T B, THAO P T, et al. Corrosion protection of carbon steel by polyurethane coatings containing graphene oxide [J]. Vietnam Journal of Chemistry, 2020, 58(1):108-112.
- [ 8 ] 郝负洪, 马思晗, 李洁, 等. 功能化氧化石墨烯/聚氨酯涂层抗风沙冲蚀性能[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(3):590-596.  
HAO Yunhong, MA Sihan, LI Jie, et al. Wind-sand erosion resistance of functional graphene oxide/polyurethane coatings[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(3):590-596. (in Chinese)
- [ 9 ] 董旭旭. 风力发电机关键部件冲蚀磨损数值模拟研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2017.  
DONG Xuxu. Study on numerical simulation of wind turbine erosion[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2017. (in Chinese)
- [10] ZENG L Q, LIU M W, WU L J, et al. Erosion characteristics of viscoelastic anticorrosive coatings for steel structures under sand flow[J]. Construction and Building Materials, 2020, 258(6): 120360-120373.
- [11] 郝负洪, 段国龙, 任莹, 等. 风沙对钢结构涂层的冲蚀磨损性能研究[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(4):596-600, 607.  
HAO Yunhong, DUAN Guolong, REN Ying, et al. Flush erosion wear resistant properties of steel-structure coating eroded by sandstorm[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(4): 596-600, 607. (in Chinese)
- [12] 张永, 黄超, 刘召, 等. 挟沙风作用下风力机叶片涂层冲蚀特性研究[J]. 材料导报, 2016, 30(10):95-99.  
ZHANG Yong, HUANG Chao, LIU Zhao, et al. Research on erosion properties of wind turbine blade coating under the wind-carrying action[J]. Materials Reports, 2016, 30(10):95-99. (in Chinese)
- [13] JOHNSON K L. 接触力学[M]. 北京:高等教育出版社, 1992.  
JOHNSON K L. Contact mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1992. (in Chinese)
- [14] 徐培林, 张淑琴. 聚氨酯材料手册[M]. 北京:化学工业出版社, 2011.  
XU Peilin, ZAHNG Shuqin. Polyurethane material handbook [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [15] 陈志城. 混凝土材料的接触损伤及球压法无损评价研究[D]. 北京:中国建筑材料科学研究总院, 2001.  
CHEN Zhicheng. Contact damage and nondestructive test of concrete materials by using sphere indentation[D]. Beijing: China Building Materials Research Institute, 2001. (in Chinese)
- [16] 郝负洪, 邢永明, 杨诗婷, 等. 风沙环境下钢结构涂层的冲蚀磨损力学性能研究[J]. 应用力学学报, 2013, 30(3):350-355.  
HAO Yunhong, XING Yongming, YANG Shiting, et al. Research on erosion and wear mechanical properties of steel structure coatings in wind and sand environment[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2013, 30(3): 350-355. (in Chinese)
- [17] TABOR D. The hardness of metals[M]. Oxford: Clarendon Press, 1951.
- [18] FU J, ADAMS M J, REYNOLDS G K, et al. Impact deformation and rebound of wet granules [J]. Powder Technology, 2004, 140(3):248-257.
- [19] HUTCHINGS I M. Energy absorbed by elastic waves during plastic impact[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1979, 12(11):1819-1825.
- [20] 岳汉威. 岩石、混凝土材料的接触损伤及冲击球压法评价研究[D]. 北京:中国建筑材料科学研究总院, 2010.  
YUE Hanwei. Research on contact damage of concrete by sphere impact method[D]. Beijing: China Building Materials Research Institute, 2010. (in Chinese)