DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.03.102　　文章编号：1000-128X(2023)03-0097-07

基于表面织构的转向架节点拆装减损试验研究

吕松江[1]，江　宏[1]，徐　意[2,3]，周　丹[2,3]

（1.中车南京浦镇车辆有限公司，江苏 南京　210031；
2.合肥工业大学 机械工程学院，安徽 合肥　230009；
3.合肥工业大学 机械工业绿色设计与制造重点实验室，安徽 合肥　230009）

摘　要：在轨道车辆的整个服役周期内，转向架中的定位转臂与橡胶节点间的过盈配合因检修要求，需经历多次压装/拆卸，由此造成的配合面损伤给零件服役性能与检修成本带来不利影响。配合面压装/拆卸损伤本质上属于一种高接触压力作用下的摩擦损伤，鉴于表面织构具有良好的摩擦减损特性，文章将一种减损性能较优的圆凹坑型矩阵织构（面密度为30%，直径为100 μm，深度为40 μm）引入橡胶节点的配合表面，通过试验对比发现该织构能有效降低配合面的压装/拆卸损伤，保留熔融层的织构表现更为优异，在减损的同时还能大幅提升配合面的承载能力、有效降低压装/拆卸过程中的压力冲击幅度。保留熔融层的织构能获得优异的拆解减损性能，主要原因是排布在配合表面上的织构凹坑具备良好的游离磨粒收纳作用，降低了三体磨损的发生概率。此外，由激光加工形成的熔融层的硬度较零件本体材料高，而配合界面间的接触大多发生在熔融层所在位置，这使得界面间的真实接触面积被减少的同时，也降低了界面间发生粘着、材料微粒剥离的可能性。这一发现对于运维过程中需要多次拆卸、装配的过盈配合组件来说，具有积极意义。

关键词：过盈配合；压装/拆卸损伤；表面织构；熔融层；列车转向架

中图分类号：U270.331　　**文献标识码：**A

Damage-reduction experimental research of bogie node assembly and disassembly based on surface texture

LYU Songjiang[1], JIANG Hong[1], XU Yi[2,3], ZHOU Dan[2,3]

(1. CRRC Nanjing Puzhen Vehicle Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210031, China; 2. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China; 3. Key Laboratory of Green Design and Manufacturing of Mechanical Industry, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract: During the whole service life of a rail vehicle, the interference fit of positioning arm and rubber node in the bogie has to undergo several times of assembly and disassembly as required by maintenance. The resulting damage on the matching surface has a negative impact on the service performance of the parts and maintenance cost. The assembly and disassembly damage of matching surface is essentially a kind of friction damage under the action of high contact pressure. As the surface texture has good friction reduction characteristics, a kind of round pit matrix texture (surface density 30%, diameter 100 μm, depth 40 μm) with better damage reduction performance was machined onto the interference fit surface of rubber node. The experimental results show that the surface texture can effectively reduce the assembly and disassembly damage of fit surface. Especially the surface texture with melted layer is more excellent, which can greatly reduce the surface damage, improve the bearing capacity of the interference fit and effectively reduce the amplitude of pres-

基金项目：国家自然科学基金资助项目（51635010）
通信作者：周　丹（1980—），女，博士，副教授，从事过盈配合研究；E-mail: zhoudan80@126.com
引用格式：吕松江, 江宏, 徐意, 等. 基于表面织构的转向架节点拆装减损试验研究[J]. 机车电传动, 2023(3): 97-103.
Citation: YU Songjiang, JIANG Hong, XU Yi, et al. Damage-reduction experimental research of bogie node assembly and disassembly based on surface texture[J]. Electric Drive for Locomotives,2023(3): 97-103.

sure impact during the assembly and disassembly process. The main reason for the improvement of damage reduction performance is that the texture pits on the mating surface have a good grain storage ability, which reduces the occurrence probability of three-body wear. In addition, the hardness of the melted layer formed by laser processing is higher than that of the substrate, and the contact on the matching surface mostly occurs at the location of the melting layer, which reduces the real contact area and the possibility of adhesion. This finding is of positive significance for the interference fits that need to be disassembled and assembled for multiple times during their service lives.

Keywords: interference fit; assembly and disassembly damage; surface texture; melted layer; train bogie

0 引言

轨道车辆定位转臂的设计使用寿命一般为30年。因列车维护保养需要，在一个寿命周期内转向架定位转臂与橡胶节点压装/拆卸的次数最多可达30次。在使用压力设备进行橡胶节点压装/拆卸的过程中，常会在过盈配合表面上形成诸如划痕、犁沟、材料堆积及撕裂型拆解损伤[1]，从而对转向架的服役性能造成不利影响[2]。过盈配合压装/拆卸损伤本质上属于一种高接触压力作用下的干摩擦损伤[3]，其损伤程度与配对副材料性质、配合面接触压力、拆解滑移距离、配合面轮廓状态等因素密切相关[4]。对成熟产品来说，前3项因素可调整的空间极为有限，而配合面轮廓状态这一因素的改变不会对产品其他零件造成显著影响，也不需要对其做出适应性改型设计，是降低压装/拆卸损伤最为可行的一条途径。

研究发现，表面织构作为一种新型表面处理技术，具有良好的抗磨、减磨效应[5]。例如在干摩擦状态下，表面织构具有良好的磨粒收集作用[6-7]，且能降低摩擦表面间的真实接触面积[8-10]，从而获得了良好的减损效果。在过盈配合拆卸减损方面，表面织构技术同样具有积极作用，尤其是直径100 μm、面密度30%的圆形凹坑阵列织构表现更为优异[11]。在数值分析的基础上，对压装/拆卸损伤进行了检测，并将具有良好减损效果的圆形凹坑织构引入橡胶节点的配合表面，进行了3组“定位转臂–橡胶节点”的压装/拆卸对比试验，探讨了该织构的压装/拆卸减损性能及其对过盈配合承载能力的影响。

1 定位转臂–橡胶节点过盈配合

转向架作为轨道交通车辆结构中最重要的部件之一，其作用是支撑车体，承受并传递车体与车轮之间的载荷及作用力，使轴重均匀分配[12]。轴箱悬挂装置大多采用转臂式定位结构来保证纵向和横向刚度稳定[13]，其中用于转臂定位的橡胶节点是保证轴箱纵向与横向定位的重要橡胶弹性元件。橡胶节点与定位转臂之间大多采用过盈配合的方式进行连接，以满足车辆行驶过程中所需的纵向、横向、偏转和扭转刚度，确保转向架运行稳定。

1.1 定位转臂–橡胶节点

如图1所示为某型转向架的定位转臂–橡胶节点模型。图1中，定位转臂为杠杆型异构铸钢件，结构复杂。与橡胶节点相配合的部分为一圆柱形套筒，孔径 $\varnothing185^{+0.072}_{0}$ mm，配合面长 $158^{+0.2}_{+0.1}$ mm。配合面两端均设置有弹簧卡圈安装环槽与倒角，参与装配的圆柱形套筒通过带加强筋的幅板与零件其他部分相连。每个定位转臂孔内安装2个橡胶节点，橡胶节点由钢制骨架（含外钢套与内钢套）与橡胶锥套组成，参与过盈配合的是节点外表面，配合面直径尺寸 $\varnothing185^{+0.123}_{+0.077}$ mm，配合面长度为 $75^{0}_{-0.1}$ mm。零件的材料性能及配合面情况如表1所示。

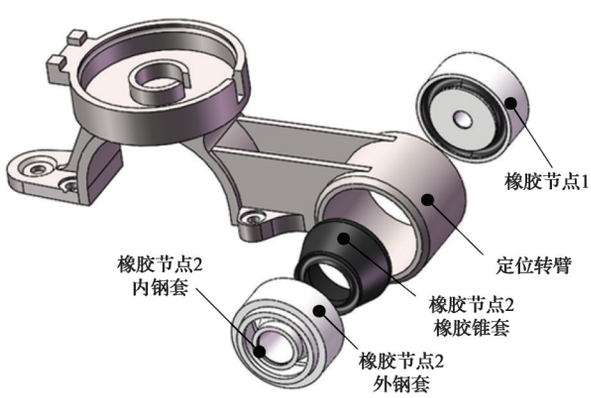


图1 定位转臂及橡胶节点三维模型

Fig. 1 3D model of positioning arm and rubber node

1.2 过盈配合接触压力分析

由于定位转臂仅有圆柱套筒部分参与过盈配合，其他部分对过盈配合接触压力影响不大，为提高分析计算效率，分析用的定位转臂三维模型仅保留配合套

表1 定位转臂–橡胶节点零件信息

Table 1 Part information of positioning arm-rubber node

零件	材料参数						配合面尺寸/mm
	牌号	强度/MPa	硬度/$HV_{1/15}$	弹性模量/Pa	泊松比	密度/(kg·m^{-3})	
定位转臂	E260-450-MS	≥260（屈服强度）	195.45	2.09E+11	0.269	7.89E+03	$\varnothing185^{+0.072}_{0}$
橡胶节点	钢制骨架：S275J0	≥275（屈服强度）	223.35	2.10E+11	0.274	7.83E+03	$\varnothing185^{+0.123}_{+0.077}$
	橡胶锥套：天然橡胶	≥20（抗拉强度）		6.10E+06	0.490	1.00E+03	

筒部位，并按照表 1 所列数据进行材料性能设置。其中，节点钢套（包括外钢套与内钢套）材料采用了与 S275J0 材料性能相当的 Q275 材料数据。采用六面体单元（Hex Dominant）方式进行网格划分，网格尺寸为 5 mm。在转臂套筒的两端环面、橡胶节点两端环面添加远程位移边界条件（Remote Displacement）约束。图 2 为不同过盈量状态下的配合表面接触压力情况，整体呈现两端大、中间小的分布态势。随着过盈量的增加，各位置点处的接触压力也随之上升，且两端的接触压力增加量更为显著。

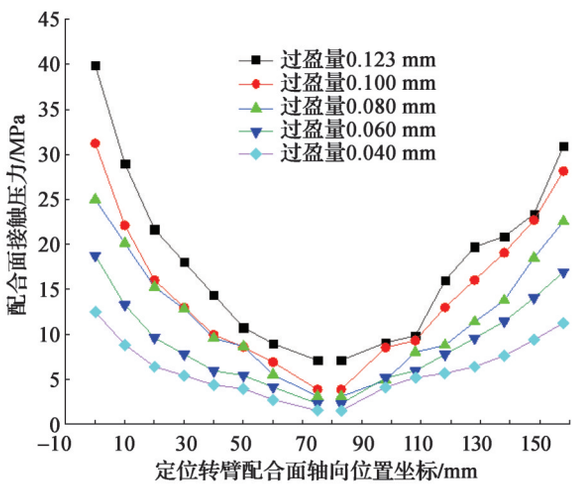


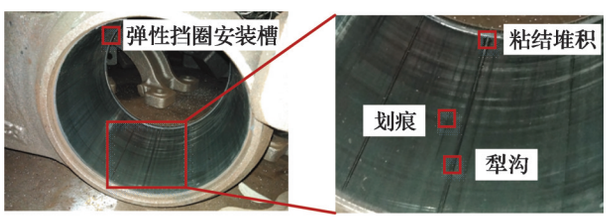
图 2　不同过盈状态下的配合面接触压力

Fig. 2　Contact pressure on the mating surface under different interference states

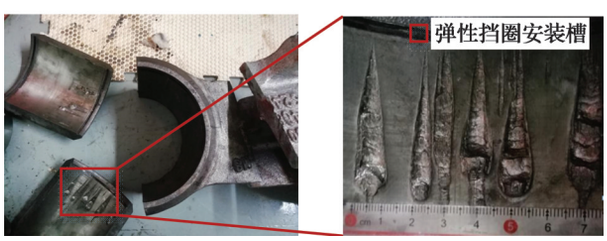
1.3　压装/拆卸损伤及分析

因车辆检修维护需要，转臂–橡胶节点过盈配合副会面临多次拆装。检修中一般采用对橡胶节点钢制骨架进行轴向施压的方式[2]来实现“定位转臂–橡胶节点”的压装与拆卸。在每次拆卸后，需要对定位转臂做出判断：无损伤转臂将与新节点零件压装后进入下一服役里程周期；轻微损伤转臂经抛磨去除损伤周围的材料凸起后，在满足配合面尺寸公差的前提下，与新橡胶节点再次装配；若抛磨后出现尺寸超差，则需采用较大配合面尺寸的橡胶节点零件，来满足服役承载需求；具有较大损伤的转臂（配合面存在因拉伤、啃伤形成的材料缺失）则需要进行焊接修复，经抛磨、检测合格后，再装配；一旦损伤过大，无法修复，则需做报废处理；甚至有些“定位转臂–橡胶节点”因上一检修过程中的压装损伤，出现咬死无法分离的现象，也只能做报废处理。某企业检修中，典型转向架过盈连接结构定位转臂节点孔常见的损伤形式如图 3 所示。

以图 3(b)所示无法拆卸状态下的转臂孔损伤为例，这些损伤属于严重的材料撕裂与粘结堆积型摩擦损伤。损伤大多从配合面靠近弹性挡圈安装槽的位置开始发生，并朝转臂孔的孔深方向呈流星状扩展，在约 50 mm 的孔深处，损伤的宽度及深度逐渐达到最大值。另外，在撕裂及堆积型损伤之间夹杂着若干平行于轴线方向的划痕，这些损伤呈现典型的扩展特性，形成于上一次检修过程中的压装环节，如此大的损伤很可能会造成上一检修阶段中压装阻力的剧增，也导致了此次检修过程中无法顺利拆卸分离。从图 3 所示的损伤形式可知，压装/拆解损伤有从弹性挡圈安装槽附近萌生的趋势，这与该处的过盈配合接触压力值激增有密切关系。



(a) 拆卸后转臂孔损伤



(b) 无法拆卸状态下的转臂孔损伤

图 3　定位转臂孔过盈配合拆解损伤

Fig. 3　Damage on the mating surface of positioning arm hole caused by disassembly of interference fit

2　压装–拆卸减损试验

2.1　试验设计及数据检测

前期研究发现直径 100 μm、面密度为 30% 的圆形凹坑织构对于合金钢类材料的方块试样具有良好的过盈配合拆解减损效果，且织构周边因激光加工形成的熔融层有提升减损效果、增大静摩擦因数的作用[11]。在此，将该类型表面织构应用于橡胶节点实物零件的配合表面，通过对比试验来研究该织构在定位转臂–橡胶节点过盈配合压装/拆卸环节中的损伤减损效果。

对比试验由压装与拆卸 2 个环节组成，试验环境、设备、定位夹具、工艺流程与检修企业正常作业过程一致。压力设备配备 RD-5013 型油缸，压装前遵照工艺需求，试验节点的过盈配合面作 MoS_2 润滑剂涂覆处理。试验过程中，对压力设备的油缸压力进行数据监测；试验结束后，通过 Optika XDS-3MET 型三目倒置金相显微镜、TR-Scan-P 型光学表面形貌测量仪对节点表面损伤进行观测。

2.2　试验用零件及分析试样制备

试验用的定位转臂及橡胶节点零件情况如表 2 所示，所有零件均为供应商提供的新零件。2#试验组和

3#试验组橡胶节点配合面上的表面织构由 HGTECH LSF20D 型光纤激光打标机制备，织构制备参数如表 3 所示。因该设备不具备弧面加工功能，试验采用分区加工+手动挪移的方式进行表面织构加工，设定的单次加工区域范围为 20 mm（圆周方向）×75 mm（轴向）。故此，零件表面存在若干织构加工不当的问题，如织构分区衔接错位、每个分区两侧边织构深度未达到预定加工深度、织构形状不规则等。

表 2　对比试验零件情况

Table 2　Parts status in the comparative experiments

试验组编号	定位转臂零件状态	橡胶节点	
		零件状态	分析试样编号
1#	新零件	新零件（常规状态，无织构）	JD-YS-NT-**
2#	新零件	新零件（表面织构+去除熔融层）	JD-YS-TP-**
3#	新零件	新零件（表面织构+保留熔融层）	JD-YS-TR-**

表 3　织构加工参数

Table 3　Parameters of texture processing

织构参数	参数值或说明	织构参数	参数值或说明
形状	圆形	阵列方式	矩形行列
尺寸	∅100 μm	面密度	30%
行距	162 μm	列距	162 μm
深度	40 μm		

试验结束后，从橡胶节点零件外钢套表面的基本无损、轻微损伤、严重损伤部位，以线切割方式分别制取尺寸为 15 mm×75 mm×5 mm 的分析试样，用于后续的损伤检测。试样编号的命名方式如表 2 所示，编号最后两位“**”为试样序号。

2.3　试验结果及分析

2.3.1　压装/拆卸压力

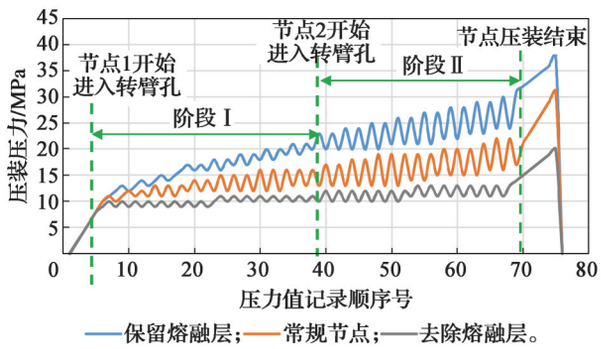
对压装/拆卸对比试验过程中的压装/拆卸压力数值进行监测，其数据变化情况如图 4 所示。

从图 4 可以看出，3 种节点零件在压装/拆卸过程中的压力变化趋势具有一定的相似性，每个过程均可分为 2 个阶段。总体来说，呈现以下规律：

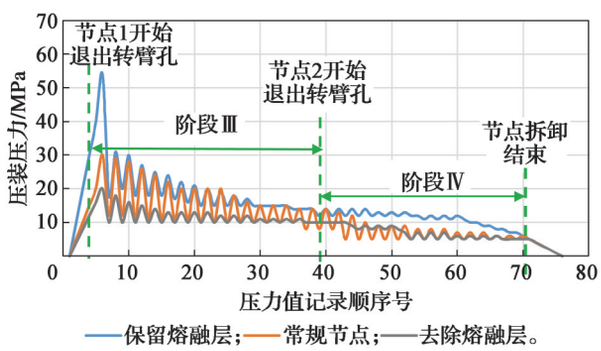
① 当转臂孔中仅有 1 个节点零件移动时（即图 4 所示的阶段Ⅰ和阶段Ⅳ），压力机输出压力的中值水平、波动幅度均小于 2 个节点零件同时移动时（即图 4 所示的阶段Ⅱ和阶段Ⅲ）的输出压力状态；

② 阶段Ⅰ和阶段Ⅳ中，有织构的节点（包括 2#组“去除熔融层”与 3#组“保留熔融层”）压力的波动幅度均小于常规节点（1#组），代表这 2 个阶段的压装/拆卸过程更为平稳；

③阶段Ⅱ中，3#组保留熔融层节点的压装压力中值大于 2#组去除熔融层节点与 1#组常规节点，但波动幅度与 1#组常规节点相当，代表此阶段两者具有类似的压装冲击；



(a) 不同类型节点零件的压装压力



(b) 不同类型节点零件拆卸压力

图 4　节点压装/拆卸过程中压力机压力表的数值变化状态

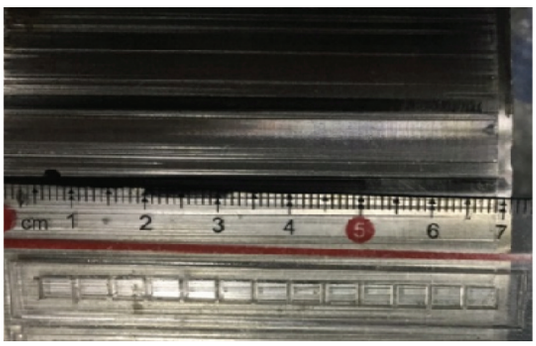
Fig. 4　Numerical change status on the pressure gauge of the press machine in the process of assembly/disassembly of node

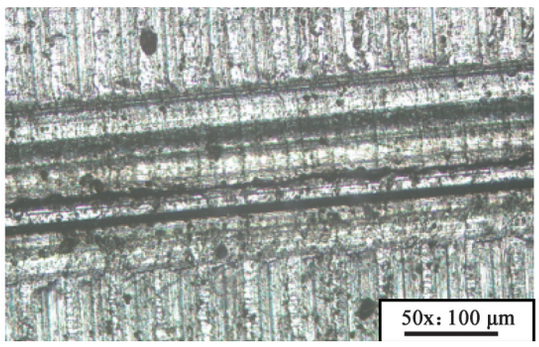
④阶段Ⅲ中，3#组保留熔融层节点所需的初始拆解压力远高于其他节点，代表该节点的承载能力也远高于其他节点；另外，一旦拆解过程开始，3#组保留熔融层节点所需的拆解压力会出现大幅下降，虽然压力中值仍高于其他节点零件，但与 1#组常规节点较为接近，且波动幅度也小于常规节点，约为后者的一半，代表此阶段 3#组节点拆卸过程中的冲击小于常规节点。

2.3.2　压装/拆卸后零件损伤

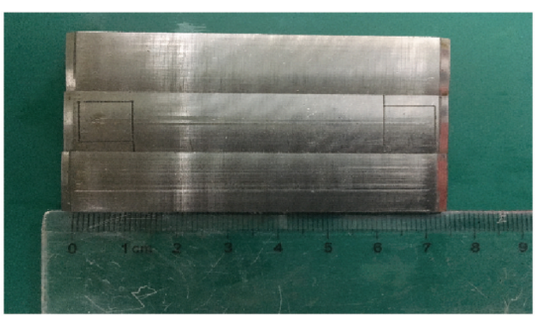
如图 5 所示，经历一次压装/拆卸操作后，常规节点的整个配合表面上均可见平行于拆解方向的平直划痕及散布的微凹坑，损伤形式及损伤程度较为一致。其中，最深的一条划痕起始于节点外钢套倒角处，并贯穿于整个配合面宽度方向，最深处深度达 164 μm。这些划痕大多由配合面上的微观凸峰/粘结点切削形成，划痕两侧可观察到明显的由材料推挤后形成的尖锐凸起。微凹坑损伤则大多由过盈配合面上的表层材料/粘着节点脱落形成，分布较为零散，划痕区域与无划痕区域均有出现，但在划痕较深的部位微凹坑损伤呈密集分布的趋势。

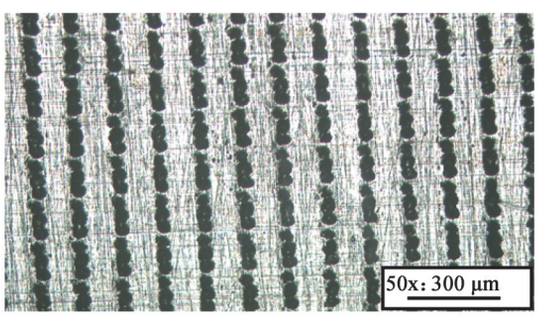
与常规节点的损伤状态相比，无熔融层织构节点表面的拆解损伤程度有明显降低。拆解损伤主要以划痕形式存在，且划痕数量远少于常规节点。JD-YS-TP-1 试样上平行于拆解方向的划痕数量较少，且较为稀疏，深度也较浅显，且大多出现在织构图案中无凹坑的表面部位。JD-YS-TP-2 试样上的划痕较为密集，长划痕与密集划痕更多出现在无织构与浅织构部位。JD-


(a) 常规节点压装–拆解损伤宏观照片

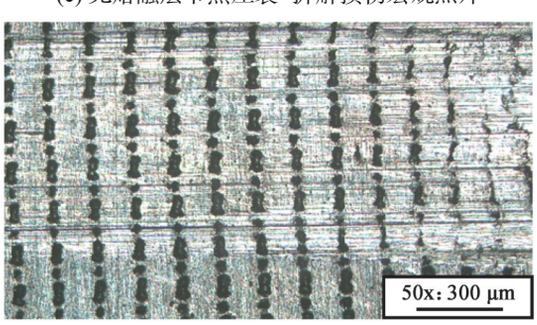


(b) JD-YS-NT-01 显微观察

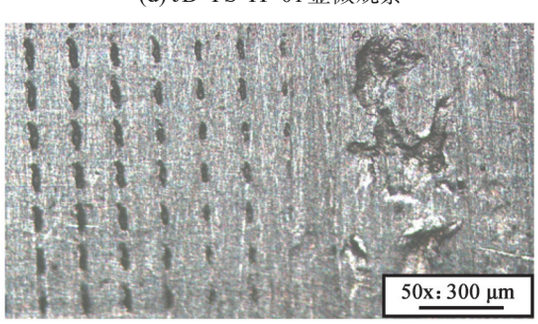

(c) 无熔融层节点压装–拆解损伤宏观照片



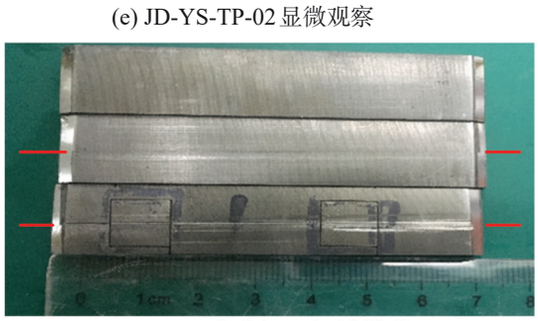
(d) JD-YS-TP-01 显微观察



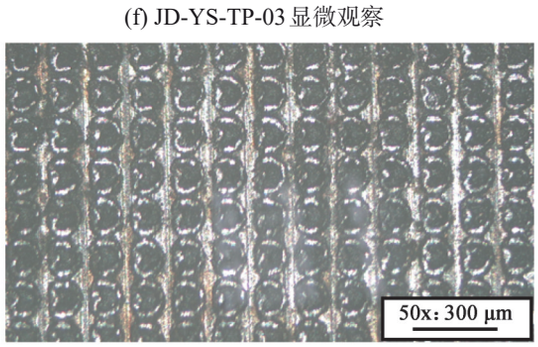
(e) JD-YS-TP-02 显微观察



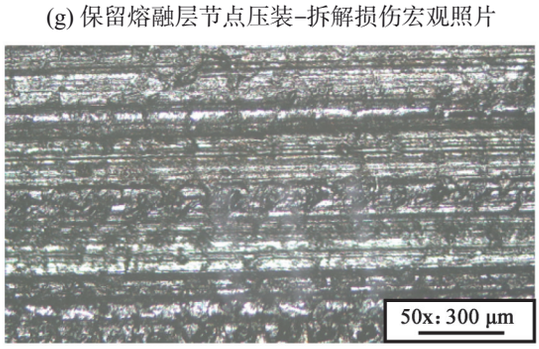
(f) JD-YS-TP-03 显微观察



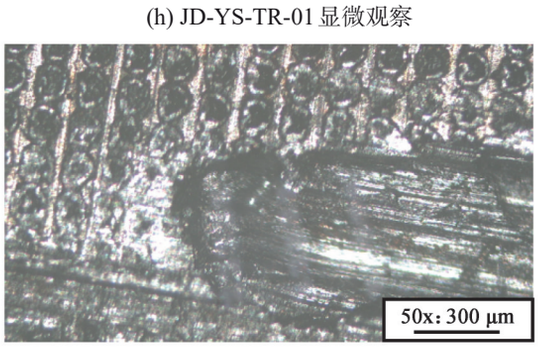
(g) 保留熔融层节点压装–拆解损伤宏观照片



(h) JD-YS-TR-01 显微观察



(i)JD-YS-TR-02 显微观察



(j) JD-YS-TR-03 显微观察

图 5　压装–拆卸试验后橡胶节点表面损伤

Fig. 5　Surface damages of rubber nodes after assembly-disassembly test

YS-TP-3 试样上的划痕最为密集，经放大观察发现一处材料剥离损伤，损伤面积约 300 μm×1 050 μm，且该处存在表面织构缺失现象。

保留熔融层的织构节点零件压装–拆卸试验结束后，转臂孔未发现肉眼可辨损伤，节点零件表面存在少量划痕。深色凹坑外围的亮白圆环形突起为激光加工时产生的熔融层，其硬度等力学特性与原有材料存在显著区别[14]。其中，JD-YS-TR-01 试样表面未见拆解损伤；JD-YS-TR-02 试样表面划痕密集但深度较浅，划痕长度大多为 20~50 mm，仅出现一条浅划痕贯穿整个配合面宽度方向，划痕最深处的轮廓谷深 S_v 为 21 μm，试样表面没有出现材料堆积型损伤；JD-YS-TR-03 试样表面的密集划痕逐渐演化为材料缺失，并出现局部材料隆起，但该损伤仅延续了 10 mm 左右，并未进一步扩展或者恶化。总体来说，拆解损伤产生的位置与无熔融层的情况类似，大多出现在织构图案缺失、织构深度较浅的部位。

2.3.3 表面织构压装/拆卸减损机理分析

综上所述，定位转臂–橡胶节点检修阶段在配合表面上出现的损伤实质上是一种摩擦损伤。因为在高接触压力与外加轴向压力的作用下，配合表面的微观轮廓峰之间发生了剧烈的挤压、滑擦；产生局部粘着、材料微粒剥离，并形成游离磨粒，导致三体磨损的发生，进一步加剧界面间的摩擦磨损状态。压装时，节点表面涂抹的 MoS_2 润滑剂能在配合界面间起到一定的隔离作用，降低摩擦磨损程度，但在过盈量的影响下，真正能够进入配合界面间的润滑剂数量有限，无法杜绝游离磨粒和三体磨损的产生，这也是 1#组常规节点整个配合表面上均出现损伤的原因。

2#组和 3#组因节点表面的织构凹坑起到了良好的游离磨粒收纳作用，致使损伤程度大幅降低。3#组试样因表面熔融层的存在，游离磨粒的容纳空间较 2#组更大；且激光加工后形成的熔融层硬度较零件本体材料高[14-15]，在过盈配合接触压力作用下，界面间的接触大多发生在熔融层所在位置，从而减小了界面间的接触面积，降低了界面间的滑擦概率；另外，因熔融层材料强度较高，配合界面间发生粘着、材料微粒剥离的可能性也进一步降低，使得 3#组保留熔融层节点的压装–拆卸损伤更为轻微。2#组和 3#组的压装–拆卸损伤大多出现在图 5(f)所示的织构图案缺失、图 5(i)所示的织构深度较浅部位。至于 3#组出现图 5 (j)所示的较为明显的滑擦损伤，从如图 5(g)所示的宏观图片可以看到，损伤起源于加工分区的衔接处，且损伤一直扩展至整个配合长度方向，这也证明了以上分析的合理性。

3 结论

①对某型列车转向架定位转臂–橡胶节点过盈配合进行了数值分析，结果显示配合面边缘存在明显的接触压力激增现象，这与列车检修过程中发现的拆解损伤从边缘部位起始的趋势一致。

②将直径 100 μm、面密度 30% 的圆形凹坑织构引入橡胶节点配合表面，通过对比试验发现该类型织构具有良好的压装/拆卸减损效果，且织构激光加工形成的熔融层有利于减损效果的提升。

③通过对比试验的监测压力数据分析，发现保留熔融层和无熔融层的织构零件在整个压装与拆卸过程中，压力冲击程度较无织构零件的常规节点小，或与之大体相当，压装与拆卸过程较为平稳；保留熔融层的节点在整个压装与拆卸过程中，所需的压力中值均较常规节点大，表明其承载能力较常规节点高。

④对比试验证明，研究所采用的表面织构具有良好的过盈配合压装/拆卸减损效果，后续还需对该类型织构在长期服役过程中的性能演变进行深入研究。

参考文献：

[1] 周丹, 高鑫, 易利祥, 等. 面向低拆解损伤需求的过盈配合优化设计[J]. 机械设计与制造, 2019(2): 211-213.
ZHOU Dan, GAO Xin, YI Lixiang, et al. Optimal design of interference fit for the demand of low disassembly damage [J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(2): 211-213.

[2] 吕松江. 定位转臂橡胶节点压装后回弹原因分析与处理[J]. 金属加工(冷加工), 2016(增刊 1): 198-200.
LYU Songjiang. Reasons analysis and treatments for rebound of rubber node after pressure assembling into positioning arm[J]. Metal Working (Metal Cutting), 2016(Suppl 1): 198-200.

[3] 周丹, 高鑫, 易利祥, 等. 面向再制造低拆解损伤需求的过盈配合界面织构试验研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54 (21): 166-172.
ZHOU Dan, GAO Xin, YI Lixiang, et al. Experimental study on the texture of interference fit interface for remanufacturing of low disassembly damage demand[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(21): 166-172.

[4] 温诗铸. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
WEN Shizhu. Principles of tribology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1990.

[5] CARAMIA G. CARBONE G, DE PALMA P. hydrodynamic lubrication of micro-textured surfaces: two dimensional CFD-analysis[J]. Tribology International, 2015, 88: 162-169.

[6] 胡天昌, 胡丽天, 丁奇. 45#钢表面激光织构化及其干摩擦特性研究[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(1): 46-52.
HU Tianchang, HU Litian, DING Qi. Tribological properties of laser textured surfaces of 45# steel under dry friction [J]. Tribology, 2010, 30(1): 46-52.

[7] 胡天昌, 丁奇, 胡丽天. 激光表面织构化对 GCr15 钢摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(5): 447-451.

HU Tianchang, DING Qi, HU Litian. The effect of laser texturing of GCr15 steel surfaces on their tribological properties[J]. Tribology, 2011, 31(5): 447-451.

[8] CHEN Mingyuan, HONG Zhenghan, FANG Tehua, et al. Atomistic scale simulation of textured surfaces on dry sliding friction[J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2013, 37(3): 927-936.

[9] KOMVOPOULOS K. Adhesion and friction forces in microelectromechanical systems: mechanisms, measurement, surface modification techniques, and adhesion theory[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2003, 17(4): 477-517.

[10] 杨卓娟, 韩志武, 任露泉. 激光处理凹坑形仿生非光滑表面试件的高温摩擦磨损特性研究[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(4): 374-378.
YANG Zhuojuan, HAN Zhiwu, REN Luquan. Friction and wear behavior of bionic non-smooth surfaces at high temperature[J]. Tribology, 2005, 25(4): 374-378.

[11] 高鑫. 面向再制造低拆解损伤需求的过盈配合界面织构实验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
GAO Xin. Experimental study on the texture of interference fit interface for remanufacturing of low disassembly damage demand[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.

[12] 李芾, 傅茂海. 高速客车转向架发展及运用研究[J]. 铁道车辆, 2004, 42(10): 1-7.
LI Fu, FU Maohai. Research on development and operation of high speed passenger car bogies[J]. Rolling Stock, 2004, 42(10): 1-7.

[13] 张春良, 黄友剑, 许明杰. 铁路客车用内凹式橡胶转臂定位节点比较[J]. 铁道车辆, 2009, 47(7): 13-16.
ZHANG Chunliang, HUANG Youjian, XU Mingjie. Comparison between concave type rubber rotary arm positioning nodal points for axle boxes on railway passenger cars[J]. Rolling Stock, 2009, 47(7): 13-16.

[14] 王斌, 常秋英, 齐烨. 激光表面织构对不同材料干摩擦特性的影响[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(4): 408-413.
WANG Bin, CHANG Qiuying, QI Ye. Effect of laser surface texture on the tribological properties of different materials under dry friction[J]. Tribology, 2014, 34(4): 408-413.

[15] 周丹, 吴亮, 徐意, 等. 激光凹坑拆解减损织构对过盈配合服役承载性能的影响实验研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(23): 208-217.
ZHOU Dan, WU Liang, XU Yi, et al. Experimental study on the effect of laser pit texture on bearing capacity of interference fit in service[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(23): 208-217.

收稿日期：2020-10-29
修回日期：2022-10-11