

碳钢-橡胶硫化黏接拉伸力学行为 与黏接失效机理

石昌帅¹, 王澳¹, 祝效华¹, 万孝峰², 柴国栋³, 李波³

(1.西南石油大学 机电工程学院, 成都 610500; 2.中国石油集团济柴动力有限公司成都压缩机分公司, 成都 610100; 3.西南石油大学 工程学院, 四川 南充 637001)

摘要: **目的** 研究碳钢-橡胶黏接结构件的拉伸力学行为和黏接失效机理, 同时获得黏接工艺参数对碳钢-橡胶黏接界面质量的影响规律。**方法** 引入内聚力模型来描述黏接界面的黏接失效过程, 通过黏接结构件界面力学性能实验拟合, 获得内聚力参数, 建立碳钢-橡胶黏接三维拉伸数值模型, 从拉伸应力、剥离应力、损伤因子和刚度弱化的角度分析碳钢-橡胶在拉伸载荷作用下的黏接失效行为, 研究刚度、初始损伤强度和断裂能对碳钢-橡胶黏接界面力学性能的影响规律。**结果** 在实验得到的内聚力参数下, 碳钢-橡胶黏接界面中部最大拉伸应力比边缘增大了 0.42 MPa, 黏接界面边缘的最大剥离应力比最大拉伸应力增大了 0.77 MPa。在拉伸位移为 1.35 mm 时, 黏接界面中部最先进入损伤演化。当拉伸位移增至 1.8 mm 时, 黏接界面边缘进入损伤演化, 黏接界面中部完全失效, 刚度的减小使得黏接界面的抗拉伸能力增强, 刚度越小黏接界面的抗拉伸能力增强效果越明显。初始损伤强度小于 3.42 MPa, 黏接界面损伤演化速度明显较慢, 在较大拉伸位移下才会发生黏接失效。不同断裂能的黏接界面进入损伤演化时的拉伸位移一致, 断裂能越大的黏接界面损伤演化至完全失效的速度越慢。**结论** 碳钢-橡胶黏接界面中部的最大拉伸应力较大, 最大剥离应力较小, 黏接界面中部最先发生黏接失效。减小碳钢-橡胶黏接界面的刚度, 提高初始损伤强度和断裂能可以有效预防黏接失效。不同内聚力参数的碳钢-橡胶黏接界面发生初始黏接失效的位置和范围具有随机性, 但黏接失效均从黏接界面中部扩散至边缘。

关键词: 硫化黏接; 内聚力模型; 黏接失效; 拉伸失效; 橡胶; 数值模拟

中图分类号: TQ332; TG496; TQ43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)04-0417-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.04.038

Tensile Mechanical Behavior and Bonding Failure Mechanism of Carbon Steel-rubber Vulcanizing Bonding

SHI Chang-shuai¹, WANG Ao¹, ZHU Xiao-hua¹, WAN Xiao-feng², CHAI Guo-dong³, LI Bo³

收稿日期: 2022-05-10; 修订日期: 2022-08-29

Received: 2022-05-10; Revised: 2022-08-29

基金项目: 国家自然科学基金 (52174210, 52034006); 成都国际科技合作项目 (2019-GH02-00034-HZ); 南充市学校科技战略合作应用基础研究项目 (SXHZ049)

Fund: National Natural Science Foundation of China (52174210, 52034006); Chengdu International Science and Technology Cooperation Project (2019-GH02-00034-HZ); Nanchong City-School Science and Technology Strategic Cooperation Applied Basic Research Project (SXHZ049)

作者简介: 石昌帅 (1984—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为井下工具结构优化设计与力学特性。

Biography: SHI Chang-shuai (1984-), Male, Doctor, Professor, Research focus: structural optimization design and mechanical properties of downhole tools.

通讯作者: 祝效华 (1978—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为钻井提速理论与方法。

Corresponding author: ZHU Xiao-hua (1965-), Male, Doctor, Professor, Research focus: theory and method of drilling speed increase.

引文格式: 石昌帅, 王澳, 祝效华, 等. 碳钢-橡胶硫化黏接拉伸力学行为与黏接失效机理[J]. 表面技术, 2023, 52(4): 417-426.

SHI Chang-shuai, WANG Ao, ZHU Xiao-hua, et al. Tensile Mechanical Behavior and Bonding Failure Mechanism of Carbon Steel-rubber Vulcanizing Bonding[J]. Surface Technology, 2023, 52(4): 417-426.

- (1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;
2. CNPC Jichai Power Company Limited Chengdu Compressor Branch, Chengdu 610100, China;
3. School of Engineering, Southwest Petroleum University, Sichuan Nanchong 637001, China)

ABSTRACT: The work aims to research the tensile mechanical behavior and bonding failure mechanism of carbon steel-rubber bonding structural parts and to obtain the effects of bonding process parameters on the quality of carbon steel-rubber bonding interfaces. The cohesive zone model was introduced to describe the bonding failure process of bonding interface. The cohesive parameters were obtained based on the experimental fitting of interfacial mechanical properties of bonding structural parts. A three-dimensional tensile numerical model of carbon steel-rubber bonding was established. The bonding failure behavior of carbon steel-rubber under tensile load was analyzed from the perspectives of tensile stress, peel stress, damage factor and stiffness weakening. The effects of stiffness, initial damage strength and fracture energy on mechanical properties of carbon steel-rubber bonding interface were studied. Under the cohesive parameters obtained from the experiment. The maximum tensile stress in the middle of carbon steel-rubber bonding interface was 0.42 MPa larger than that in the edge, and the maximum peel stress at the edge of the bonding interface was 0.77 MPa greater than the maximum tensile stress. When the tensile displacement was 1.35 mm, the middle of the bonding interface first entered damage evolution. When the tensile displacement increased to 1.8 mm, the edge of the bonding interface entered damage evolution, and the middle of the bonding interface was completely failed. The tensile strength of the bonding interface increased with the decrease of the stiffness. The tensile strength of the adhesive interface increased with the decrease of the stiffness. The smaller the stiffness, the more obvious the tensile resistance of the bonding interface. When the initial damage strength was less than 3.42 MPa, the damage evolution rate of bonding interface was obviously slow, and the bonding failure occurred under large tensile displacement. The tensile displacements of the bonding interfaces with different fracture energy were the same when the bonding interfaces entered into damage evolution, and the larger the fracture energy, the slower the damage of the bonding interface evolved to complete failure. The results show that, the larger the maximum tensile stress in the middle of carbon steel-rubber bonding interface, and the smaller the maximum peel stress. The bonding failure occurs first in the middle of the bonding interface. The carbon steel-rubber bonding interface enters the damage evolution stage, resulting in the decrease of bonding force and tensile stress. As long as the carbon steel-rubber bonding interface entered damage evolution, it will rapidly evolve to complete failure. The larger the tensile displacement, the greater the trend of rubber edge shrinkage to the middle, and the greater the elastic deformation energy. Once the bonding failure occurs, the bonding interface will quickly spread from the middle to the edge and the area where bonding failure occurs is large. Reducing the stiffness of carbon steel-rubber bonding interface, increasing initial damage strength and fracture energy can effectively prevent bonding failure. The location and range of initial bonding failure at the carbon steel-rubber bonding interface with different cohesion parameters are random, but the bonding failure spreads from the middle of the bonding interface to the edge. The results can provide a theoretical basis for the vulcanizing bonding process of carbon steel - rubber.

KEY WORDS: vulcanizing bonding; cohesive zone model; bonding failure; tensile failure; rubber; numerical simulation

黏接工艺具有简单、轻量 and 应力均匀等优点, 目前对于黏接相同或不同材料的需求不断增加, 黏接工艺受到了各个领域的广泛关注^[1-2]。在异质材料的组合黏接中, 金属-橡胶复合体系的应用领域十分广泛, 如轮胎、橡胶衬套、人字簧、桥梁的支撑缓冲垫和火箭发动机的柔性接头等^[3]。金属-橡胶之间的力学性能和化学结构差异巨大, 因此难以获得较高的黏接强度。在工程应用中, 金属-橡胶复合件存在各种形式的破坏, 其中黏接界面失效为主要破坏形式之一, 因此有必要开展金属-橡胶黏接界面失效机理的研究工作。需要指出的是, 文中所讨论的黏结界面泛指被黏物之间的所有起连接作用的界面相, 故黏结层本身也被视为广义的界面。

许多学者对金属-橡胶黏接进行了研究。孙永国等^[4]提出金属-橡胶的硫化黏接工艺需根据胶合剂自身的特性来调整, 黏合强度对硫化时间和硫化温度较为敏感。孟宪印等^[5]、王勇等^[6]提出了金属与橡胶热硫化黏接工艺的过程控制方法, 分析了硫化黏接失效原因, 并提出了相关的措施。穆洪帅等^[7]认为, 橡胶硫化工艺和配方及金属表面质量是影响金属球铰产品与橡胶黏接强度的主要因素。Souid 等^[8]通过实验发现, 在高固化温度下获得的金属-橡胶黏接质量显著降低, 剥离能量的降低与橡胶在固化过程中的回归现象有关。Ismail 等^[9]研究了金属-橡胶发生腐蚀后的黏接失效行为, 通过实验发现腐蚀反应中产生的羟基离子会导致附着失效。Andreikova^[10]采用了新的黏接

技术,研究了橡胶对铝镁合金、碳钢和不锈钢的附着性,测试了不同金属与橡胶的黏接强度。朱宏伟等^[11]比较了不同黏接工艺下的不锈钢-橡胶变形量和黏接强度,发现不同胶黏剂的厚度、类型和喷涂方式影响黏接稳定性。刘大晨等^[12]通过在橡胶硫化过程中施加电场,提升了铁-橡胶的黏接性能,橡胶导电性、电场强度对黏接性能的影响显著。王鹏等^[13]、陈国栋等^[14]分别研究了硫化压力和硫化温度对金属与橡胶黏接强度的影响,硫化压力的提高使得黏接强度呈现先减小后增大的规律,硫化温度应保持在 145~165 °C 内。

目前,针对金属-橡胶硫化黏接行为的研究大多限于实验,受到现有实验条件的限制只能分析黏接破坏失效的最终状态,难以对黏接失效过程进行定量分析。通过引入内聚力模型,可以利用数值模拟方法分析金属-橡胶黏接界面的失效行为。内聚力模型最早由 Dugdale^[15]提出,内聚力模型的核心思想是界面应力与相对位移之间的函数关系。内聚力模型使用损伤和断裂力学的概念来模拟界面的渐进式损伤和失效。Needleman^[16]完善了从初始分离到完全分离过程的理论框架。目前,内聚力模型已被广泛应用于各个领域,例如模拟混凝土开裂、金属焊接材料损伤、复合材料分离和剥落等。

文中首先通过黏接结构件界面力学性能实验拟合,获得内聚力参数,再建立碳钢-橡胶三维拉伸数值模型,引入内聚力模型来分析碳钢-橡胶黏接界面损伤演化和黏接失效过程,研究碳钢-橡胶黏接结构件的拉伸力学行为和黏接失效机理,开展碳钢-橡胶硫化黏接效果与影响因素的分析评价工作。

1 内聚力模型参数识别

1.1 内聚力模型

碳钢-橡胶黏接界面的主要失效方式为拉伸失效,但橡胶经拉伸后会发​​生径向收缩,这会对黏接界面造成一定的剪切破坏,因此失效形式属于混合失效。Afaano^[17]、Li 等^[18]认为,双线性模型可以同时满足计算效率和精度的要求。由此,文中采用如图 1 所示的双线性内聚本构模型来模拟碳钢-橡胶-碳钢之间的黏接失效行为。

初始损伤准则用于确定内聚力单元是否达到其所能承受的最大应力。文中采用最常用的二次名义应力准则^[19-20],表达式见式(1)。

$$\left(\frac{\sigma_n}{\sigma_n^{\max}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_s^{\max}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_t^{\max}}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

式中: σ_n 为内聚力单元受到的法向应力; σ_s 、 σ_t 为 2 个切向的应力; σ_n^{\max} 为内聚力单元法向最大临界应力; σ_s^{\max} 和 σ_t^{\max} 为 2 个切向的最大临界应力。

内聚力单元出现损伤后就会进入损伤演化阶段,这

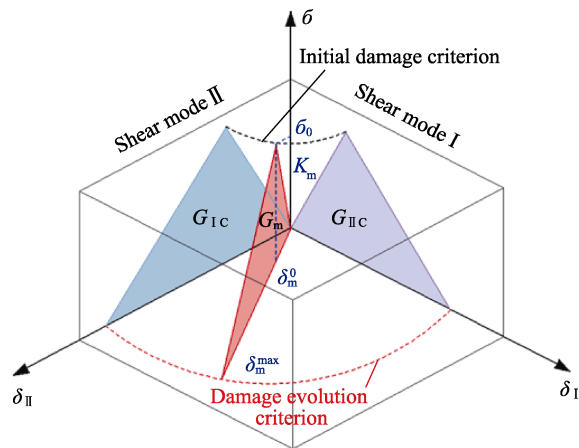


图 1 双线性内聚本构模型
Fig.1 Bilinear cohesive constitutive model

是黏接界面力学性能的退变过程。此过程可以用刚度弱化来描述,内聚力单元初始损伤后的刚度计算见式(2)。

$$K = K_0(1 - D) \quad (2)$$

式中: K_0 为材料完好时的刚度; D 为刚度弱化参数,取值范围为 0~1。

当 D 为 1 时,内聚力单元完全失效,黏接界面失去黏合效果。当 D 为 0 时,内聚力单元完好,计算见式(3)^[21]。

$$D = \frac{\delta_m^f(\delta_m^{\max} - \delta_m^0)}{\delta_m^{\max}(\delta_m^f - \delta_m^0)} \quad (3)$$

式中: δ_m^{\max} 为自变量,表示在加载过程中结点的最大位移; δ_m^0 表示当材料初始损伤时结点的位移; δ_m^f 表示当材料完全损伤时结点的位移。

计算刚度弱化参数 D 的关键在于 δ_m^{\max} 和 δ_m^0 ,一般由能量描述的 2 个准则来实现: B-K 准则、power 准则。文中选用 B-K 准则来描述黏接界面损伤失效的过程^[22],见式(4)~(6)。

$$G_T = G_{IC} + (G_{IIc} - G_{IC}) \left(\frac{G_{II}}{G_I} \right)^\eta \quad (4)$$

$$G_{IC} = \frac{T \delta_m^{\max}}{2} \quad (5)$$

$$G_{IIc} = \frac{\tau \delta_m^{\max}}{2} \quad (6)$$

式中: G_T 为混合模式下的断裂能; G_{IC} 、 G_{IIc} 分别为材料法向断裂能和切向断裂能; G_I 、 G_{II} 分别为界面牵引力和剪切力做功; η 为材料参数; T 、 τ 分别为法向和切向的最大应力。

1.2 碳钢-橡胶拉伸和剪切实验

碳钢-橡胶黏接试样拉伸与剪切实验数据的处理思路和方法一致,在这里着重阐述碳钢-橡胶拉伸实验数据的处理思路和方法。碳钢-橡胶在硫化黏接作用下的拉伸和剪切实验结果如图 2 所示。由碳钢-橡胶黏接试样拉伸实验获得的拉伸力-位移关系曲线如

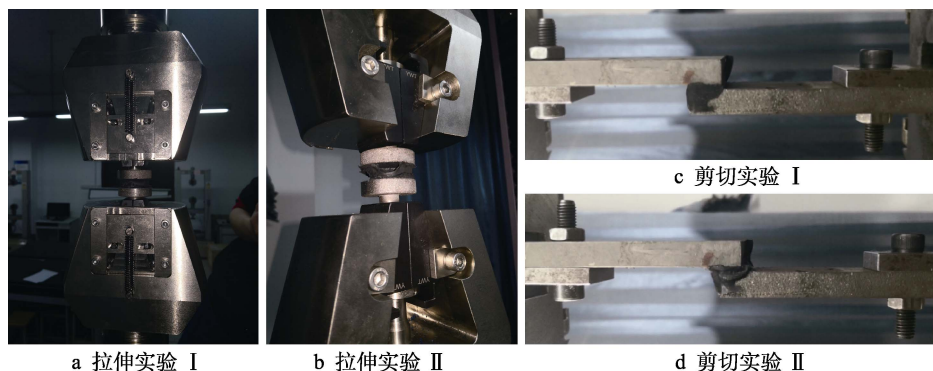


图2 碳钢-橡胶硫化黏接下的拉伸和剪切实验

Fig.2 Tensile and shear experiments of carbon steel-rubber vulcanizing bonding: a) tensile experiment I; b) tensile experiment II; c) shear experiment I; d) shear experiment II

图3所示。将试件拉伸至位移为 δ_m^0 时,碳钢-橡胶之间的黏接力达到最大值,碳钢-橡胶黏接界面开始出现内聚力破坏失效,但此时的位移 δ_m^0 包含了2个部分:碳钢-橡胶之间的相对滑移;橡胶本体的应变。由此可知,实验测得的碳钢-橡胶黏接试样拉伸力与位移关系曲线不能直接用于识别碳钢-橡胶内聚力模型本构关系的相关参数。实验难以测得橡胶在拉伸载荷下的伸长量,因此需要结合橡胶力学性能和数值模拟方法,计算橡胶在拉伸载荷作用下的伸长量,以此来排除橡胶变形对碳钢-橡胶的拉伸力-位移关系曲线的影响。

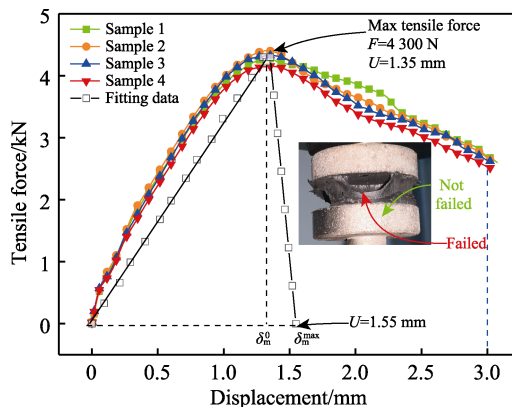


图3 碳钢-橡胶的拉伸力-位移关系曲线
Fig.3 Tensile force-displacement curve of carbon steel-rubber

1.3 有限元模型与参数识别

在拉伸实验中,橡胶和碳钢的直径均为40 mm,厚度分别为2、10 mm。由图3可知,碳钢-橡胶黏接界面所能承受的最大拉力为4300 N,可以计算出黏接界面所能承受的最大拉伸应力为3.42 MPa。文中采用Yeoh本构模型,参数 $C_{10}=0.948$, $C_{20}=0.1837$, $C_{30}=-0.00681$, $D_{10}=D_{20}=D_{30}=0.1$ 。如图4所示,根据拉伸实验中橡胶的几何尺寸建立橡胶两侧拉伸数值模型,橡胶上、下表面边缘处的位移较大,而中部接近80%区域的位移均为0.15 mm,故橡胶在拉伸应力

3.42 MPa下的总伸长量为0.3 mm。由此可知,碳钢-橡胶的相对位移为0.525 mm。在完全失效时,碳钢-橡胶的相对位移为0.625 mm。由此可以得到内聚力模型的3个法向参数, $\sigma_n^{\max}=3.42$ MPa, $G_{IC}=1.07$ N/mm, $K_{nn}=6.514$ N/mm³。以相同的方法获得了切向参数, $\sigma_s^{\max}=\sigma_t^{\max}=6$ MPa, $G_{IIIC}=3.144$ N/mm, $K_{ss}=K=8.596$ N/mm³。

基于内聚力模型建立碳钢-橡胶黏接三维有限元模型(图5),碳钢和橡胶的网格数量和类型如图5

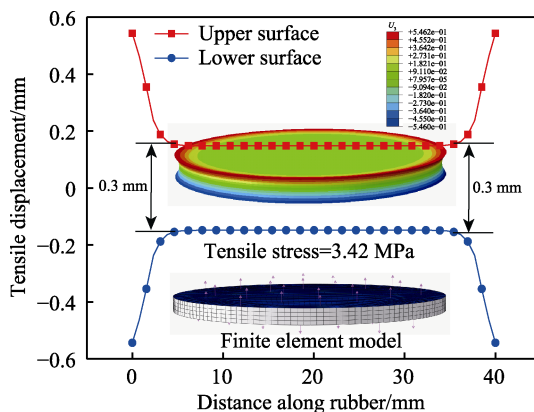


图4 橡胶两侧拉伸的数值模拟
Fig.4 Numerical simulation of rubber stretching on both sides

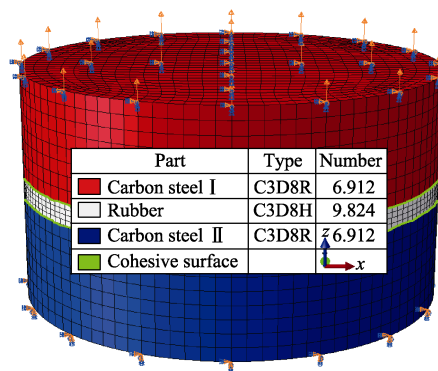


图5 碳钢-橡胶黏接三维有限元模型
Fig.5 Three-dimensional finite element model of carbon steel rubber bonding

所示。在碳钢 I 上表面施加位移载荷边界, 在碳钢 II 下表面施加完全约束边界, 赋予橡胶与碳钢接触的 2 个表面内聚力接触属性。

2 碳钢-橡胶黏接界面失效机理

2.1 碳钢-橡胶黏接界面力学行为分析

碳钢-橡胶黏接界面不同区域的拉伸应力-拉伸位移变化曲线如图 6 所示。根据黏接界面的应力分布情况, 从黏接界面边缘至中心均匀取 10 个结点, 观察黏接界面应力变化和黏接失效情况。碳钢-橡胶黏接界面拉伸应力线性增至最大, 此时材料开始出现损伤, 导致黏接力下降, 拉伸应力随之线性减小为 0。当结点 1 至结点 3 区域的拉伸应力达到最大值时, 拉伸位移较大。结点 4 至结点 10 区域在拉伸位移为 1.35 mm 时, 拉伸应力达到最大值 (接近 3.42 MPa), 与实验的最大误差不超过 1.2%。在结点 1 的拉伸位移为 1.8 mm 时, 拉伸应力的最大值只有 3 MPa。黏接界面边缘的最大拉伸应力明显小于中部, 这是由于橡胶作为不可压缩的弹性体, 在拉伸过程中橡胶边缘表现出向中间收缩的趋势, 这种趋势导致橡胶中部区域承受的拉伸力较大。

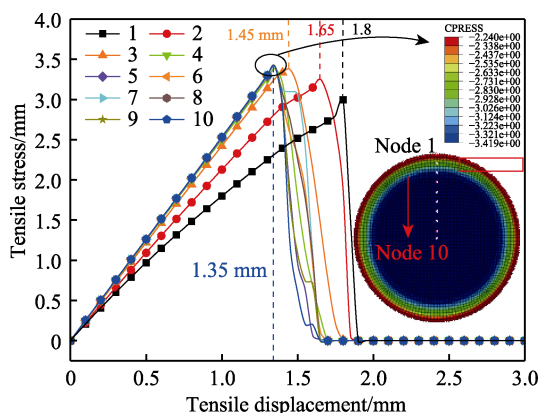


图 6 黏接界面拉伸应力-拉伸位移变化曲线
Fig.6 Tensile stress-tensile displacement curves of bonding interface

如图 7 所示, 除黏接界面边缘剥离应力明显大于中部外, 黏接界面剥离应力的变化趋势与拉伸应力相似。结点 4 至结点 10 区域的最大剥离应力与最大拉伸应力基本一致。结点 1 的最大剥离应力比最大拉伸应力大 0.77 MPa, 表明黏接界面边缘与碳钢的分离难度大于黏接界面中部。

拉伸位移 (TD, Tensile Displacement) 沿橡胶下表面的路径取值如图 8 所示。当拉伸位移为 1.3 mm 时, 黏接界面中部的拉伸应力均匀, 且明显大于黏接界面边缘的拉伸应力, 此时黏接界面还未出现损伤。随着拉伸位移的增加, 黏接界面中部开始出现损伤, 黏接界面中部的拉伸应力随着黏接力的下降出现明

显下降, 在材料损伤严重区域其拉伸应力的下降幅度较大; 当材料完全损伤时, 拉伸应力下降为 0。

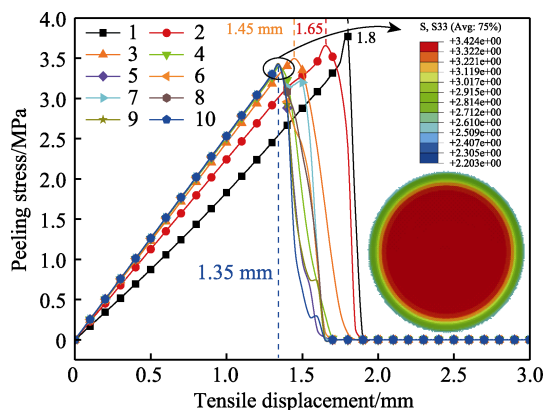


图 7 黏接界面剥离应力-拉伸位移变化曲线
Fig.7 Peeling stress-tensile displacement curves of bonding interface

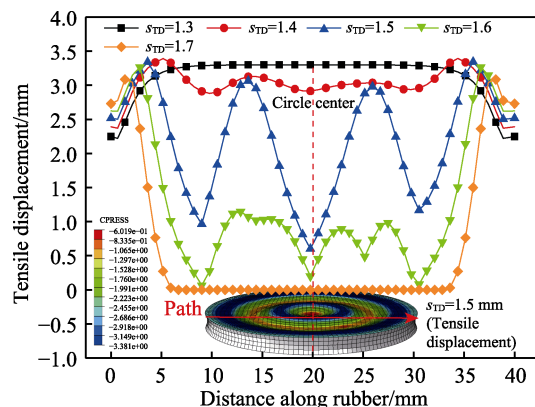


图 8 黏接界面相同路径的拉伸应力变化曲线
Fig.8 Tensile stress curves of bonding interfaces in the same path

2.2 碳钢-橡胶黏接界面失效行为分析

当损伤因子达到 1 时, 黏接界面进入损伤演化阶段。如图 9 所示, 损伤因子因材料损伤累积效应呈指数增长趋势, 直至达到 1。从图 9 可以看出, 当拉伸位移为 1.35 mm 时, 黏接界面中部至边缘其损伤因子逐渐减小, 结点 4—结点 10 区域最先被损伤。当拉伸位移为 1.8 mm 时, 因黏接失效, 橡胶中部已与碳钢分离, 而橡胶边缘还与碳钢黏接, 橡胶呈凹槽状。黏接界面各区域进入损伤演化阶段的拉伸位移与最大拉伸应力对应的拉伸位移一致。结点 1 至结点 3 区域在较大拉伸位移下进入损伤演化阶段。

当刚度弱化参数达到 1 时, 黏接界面完全失效。从图 10 可以看出, 碳钢-橡胶黏接界面只要进入损伤演化阶段, 就会快速演化至完全失效。结合图 10 可以看出, 当拉伸位移为 1.35 mm 时, 黏接界面中部最先进入损伤演化阶段; 当拉伸位移为 1.8 mm 时, 黏接界面边缘进入损伤演化阶段, 黏接界面中部完全失效。

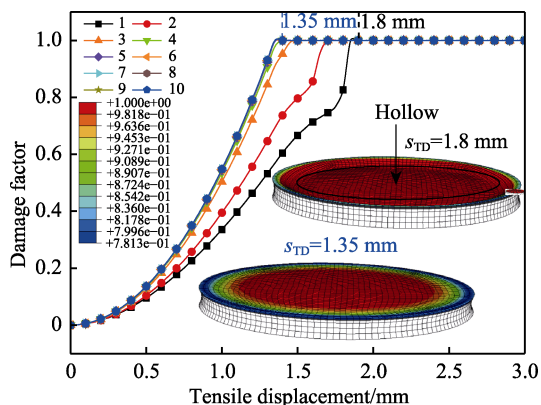


图9 黏接界面损伤因子-拉伸位移变化曲线
Fig.9 Damage factor-tensile displacement curves of bonding interface

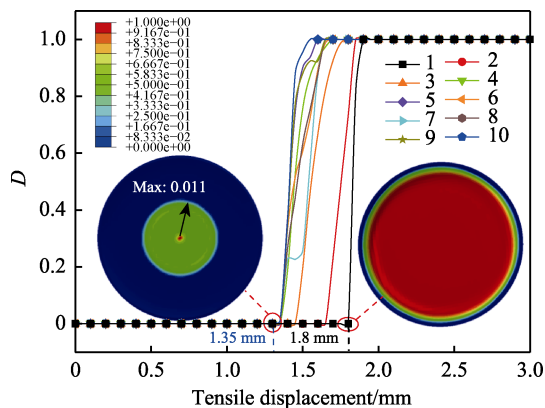


图10 黏接界面刚度弱化参数-拉伸位移变化曲线
Fig.10 Stiffness weakening parameter-tensile displacement curves of bonding interface

如图11所示,当拉伸位移为1.35 mm时,黏接界面中部出现损伤。黏接界面圆心和距离圆心10 mm处区域的损伤演化速度呈先快后慢的趋势,这2处先发生较快速度的损伤,使得黏接力快速下降,导致这2处的橡胶发生弹性变形,在一定程度上降低了这2

处之间区域的损伤演化速度。当这2处损伤较为严重时,它们之间的区域损伤速度加快。当拉伸位移增至1.65 mm,黏接界面中部完全失效。当拉伸位移继续增加时,黏接失效从黏接界面中部扩散至边缘。

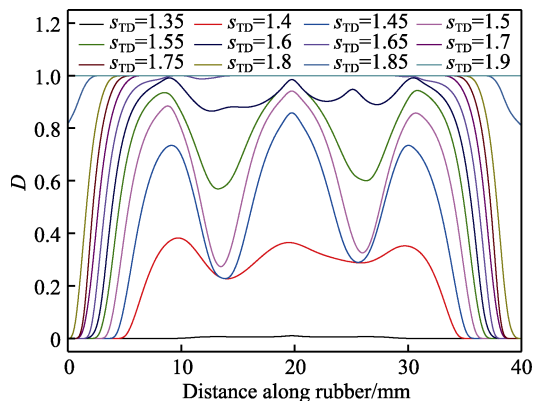


图11 黏接界面相同路径刚度弱化参数变化曲线
Fig.11 Stiffness weakening parameter curves of bonding interfaces in the same path

2.3 验证实验

碳钢-橡胶黏接试样在初始拉伸时的形貌如图12a所示,橡胶边缘向内收缩。当拉伸位移为1.35 mm时,黏接界面内部开始萌生裂纹。如图12b所示,随着拉伸位移的增加,因黏接失效产生的裂纹由黏接界面内部向外扩展。如图12c所示,当拉伸位移为1.85 mm时,碳钢-橡胶黏接试样的下黏接界面边缘区域大部分黏接良好,而中间区域黏接完全失效。实验现象表明,在拉伸过程中,碳钢-橡胶黏接界面的黏接失效从中间区域开始,再向边缘扩展。实验现象与有限元仿真结果基本吻合,进一步证明有限元模型的有效性和准确性。

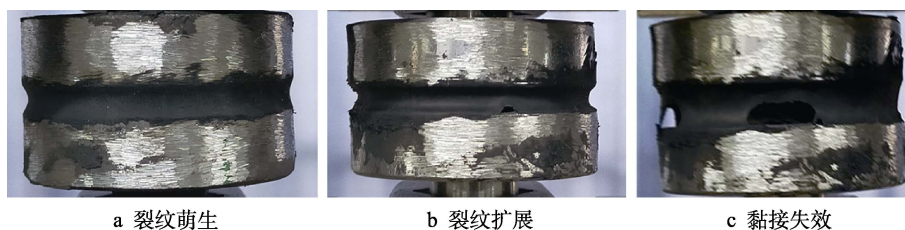


图12 碳钢-橡胶拉伸验证实验
Fig.12 Tensile verification experiment of carbon steel-rubber: a) crack initiation; b) crack growth; c) bonding failure

3 内聚力模型参数影响

3.1 刚度影响

由于这里只研究碳钢-橡胶在拉伸载荷下的黏接失效机理,因此保持内聚力切向参数不变,只改变法向参数。采用单因素变量法,将黏接界面法向刚度分

别设置为4.514、5.514、6.514、7.514、8.514 N/mm³。

如图13所示,刚度的减小使得黏接界面在较大的拉伸位移下才达到最大拉伸应力值,黏接界面最大拉伸应力不因刚度而改变。黏接界面的刚度越小,则黏接界面拉伸应力的上升速度越慢,下降速度越快。当材料刚度减至5.514 N/mm³时,黏接界面的拉伸应力垂直下降。这是因为黏接界面断裂能相同,黏接界

面达到损伤演化的能量越大, 由损伤演化至完全失效的能量越小, 拉伸应力与拉伸位移围成的三角形面积会尽可能保持相同。刚度的减小使得黏接界面抗拉伸能力增强, 刚度越小黏接界面抗拉伸能力增强得越明显。

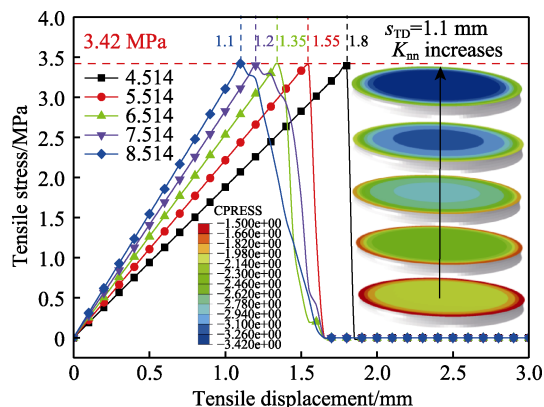


图 13 不同刚度黏接界面拉伸应力-拉伸位移变化曲线

Fig.13 Tensile stress-tensile displacement curves of bonding interfaces with different stiffness

如图 14 所示, 刚度越小, 则黏接界面进入损伤演化时的拉伸位移越大, 黏接界面损伤演化至完全失效的速度越快。拉伸位移越大, 则橡胶边缘向中间收缩的趋势越明显, 弹性变形势能越大。黏接界面一旦发生黏接失效, 就会迅速从中部扩展至边缘, 同时发生黏接失效的区域越广。从图 14 中还可以看出, 不同刚度的黏接界面中部发生黏接失效的位置和范围均不相同。

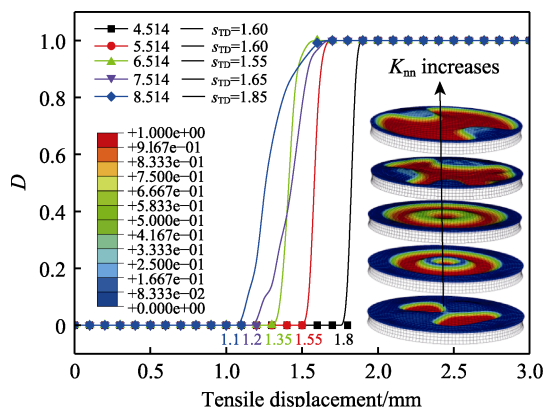


图 14 不同刚度黏接界面刚度弱化参数-拉伸位移变化曲线

Fig.14 Stiffness weakening parameter-tensile displacement curves of bonding interfaces with different stiffness

如图 15 所示, 当拉伸位移为 3 mm 时, 不同刚度黏接界面的失效情况完全不同。在刚度为 5.514、6.514 N/mm³ 时, 碳钢-橡胶发生黏接失效的界面分别是上黏接界面、下黏接界面, 橡胶与一侧碳钢完全分离。其他刚度的碳钢-橡胶两侧的黏接界面都会发生黏接失效, 但发生黏接失效的位置和范围均不相同。由此可见, 不同刚度的碳钢-橡胶两侧黏接界面发生

初始黏接失效的位置和范围具有随机性。

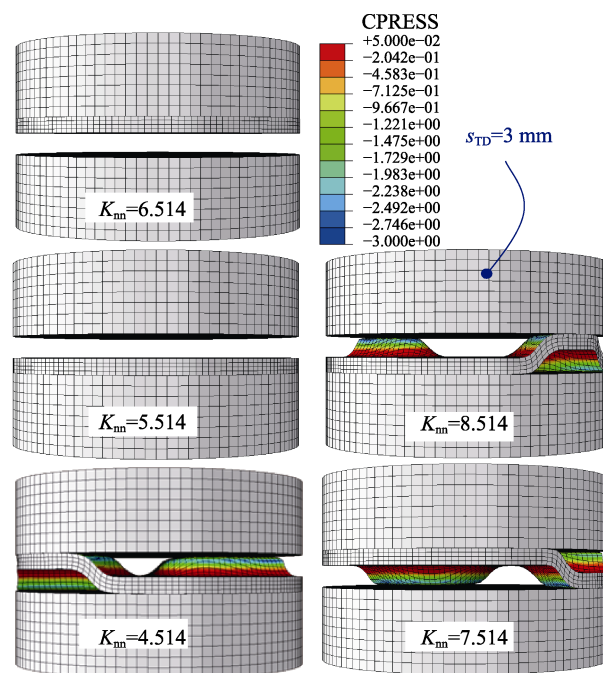


图 15 不同刚度黏接界面黏接失效示意图

Fig.15 Schematic of bonding failure of bonding interfaces with different stiffnesses

3.2 初始损伤强度的影响

将初始损伤强度分别设置为 1.42、2.42、3.42、4.42、5.42 MPa。如图 16 所示, 初始损伤强度的增大会使黏接界面最大拉伸应力增大, 且最大拉伸应力在拉伸位移较大时出现。由于刚度不变, 因此不同初始损伤强度的黏接界面拉伸应力的增加速度相同。为了保持断裂能, 拉伸应力的下降速度随着初始损伤强度的增加而增加。当初始损伤强度大于 3.42 MPa 时, 拉伸应力垂直下降, 此时能量累积已超过断裂能, 黏接界面一旦损伤, 黏接力就会快速下降至 0。

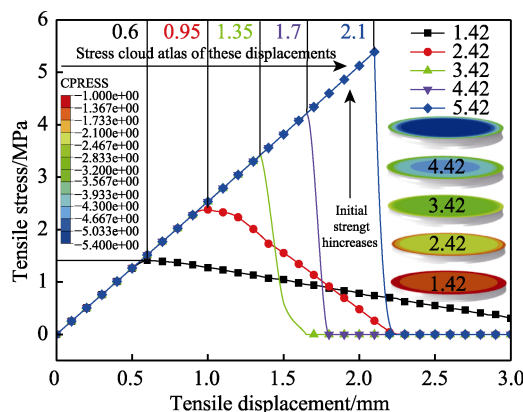


图 16 不同初始损伤强度拉伸应力-拉伸位移变化曲线

Fig.16 Tensile stress-tensile displacement curves of different initial damage strength

如图 17 所示, 当初始损伤强度小于 3.42 MPa 时, 黏接界面的损伤演化速度明显较慢, 在较大的拉伸位移下才发生了黏接失效。当初始损伤强度不小于 3.42 MPa 时, 黏接界面的损伤演化速度较快, 随着初始损伤强度的增加, 黏接界面完全失效所需的拉伸位移增大。初始损伤强度越大, 则黏接界面进入损伤演化的拉伸位移越大。对比图 17 中的云图可以看出, 当初始损伤强度不大于 3.42 MPa 时, 损伤演化会从黏接界面中部往边缘扩展, 损伤的区域几乎同时发生完全失效, 初始损伤强度越大, 则损伤演化扩展时间越短。当初始损伤强度大于 3.42 MPa 时, 黏接界面中部区域损伤演化至完全失效的时间极短, 进入损伤演化的区域来不及扩展, 就会完全失效, 黏接界面中部区域直至发生完全失效时才会向边缘扩展。这是因为较大的拉伸位移使得橡胶向中间收缩的趋势越明显, 橡胶较大的弹性变形势能使得黏接界面一旦发生损伤, 就会快速演化至完全失效。

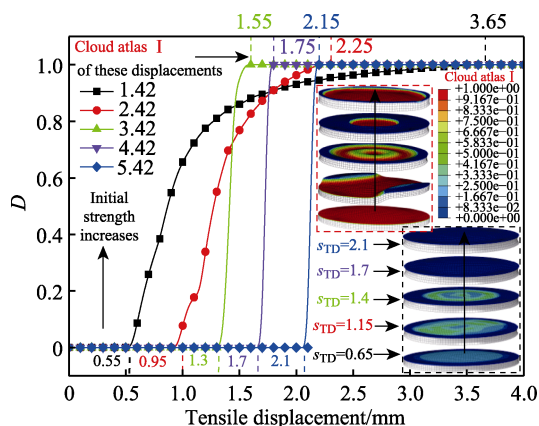


图 17 不同初始损伤强度刚度弱化参数-拉伸位移变化曲线

Fig.17 Stiffness weakening parameter-tensile displacement curves of different initial damage strength

3.3 断裂能的影响

保持其他参数不变, 将断裂能分别设置为 1.07、2.07、3.07、4.07、5.07 N/mm。如图 18 所示, 断裂

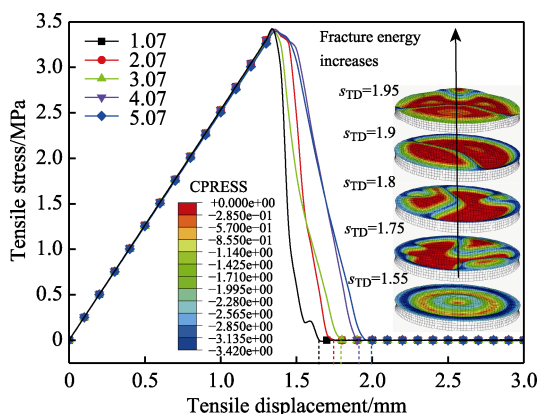


图 18 不同断裂能拉伸应力-拉伸位移变化曲线
Fig.18 Tensile stress-tensile displacement curves of different fracture energy

能的增加不影响黏接界面的最大拉伸应力, 但会使拉伸应力的下降速度减缓, 黏接界面完全失效时的拉伸位移增加。刚度和初始损伤强度的不变, 使得黏接界面进入损伤演化的能量相同, 断裂能的增加会使黏接界面由损伤演化至完全失效阶段的能量增加。断裂能的增加可以有效提高黏接界面的抗拉伸能力。从图 18 可以看出, 黏接界面拉伸应力为 0 区域的位置和范围均不相同, 这些区域的碳钢与橡胶发生了分离。

如图 19 所示, 不同断裂能的黏接界面进入损伤演化时的拉伸位移一致, 断裂能越大的黏接界面损伤演化至完全失效的速度越慢。从图 19 可以看出, 当拉伸位移为 3 mm 时, 碳钢-橡胶两侧黏接界面发生黏接失效的位置和范围均不相同。值得注意的是, 黏接失效均从黏接界面中部扩展至边缘。

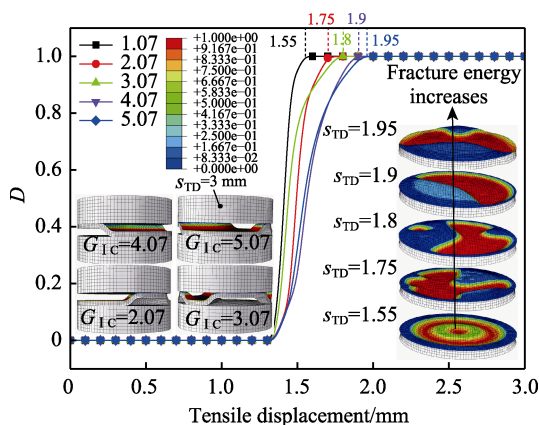


图 19 不同断裂能刚度弱化参数-拉伸位移变化曲线
Fig.19 Stiffness weakening parameter-tensile displacement curves of different fracture energy

4 结论

1) 在碳钢-橡胶拉伸过程中, 橡胶边缘具有向中间收缩的趋势。这种趋势导致黏接界面中部的最大拉伸应力较大, 最大剥离应力较小, 因此黏接界面中部比黏接界面边缘更易发生剥离。

2) 损伤因子随着材料损伤的累积呈指数增长趋势, 直至达到 1, 碳钢-橡胶黏接界面进入损伤演化阶段, 黏接力开始下降, 拉伸应力开始减小。只要碳钢-橡胶黏接界面进入损伤演化阶段, 就会快速演化至完全失效。黏接界面中部最先发生黏接失效, 然后从中部逐渐扩展至边缘。

3) 碳钢-橡胶黏接界面的刚度减小, 使得黏接界面的抗拉伸能力增强。黏接界面刚度越小, 黏接界面的抗拉伸能力增强得越明显, 黏接界面进入损伤演化时的拉伸位移增加得越明显。拉伸位移越大, 则橡胶边缘向中间收缩的趋势越大, 弹性变形势能越大。一旦黏接界面发生黏接失效, 就会迅速从中部扩散至边缘, 同时发生黏接失效的区域越大。

4) 碳钢-橡胶黏接界面初始损伤强度的增加使得黏接界面最大拉伸应力增加, 抗拉伸能力增强。拉伸应力的下降速度随着初始损伤强度的增加而增加, 当初始损伤强度大于 3.42 MPa 时, 拉伸应力垂直下降, 此时能量累积已超过断裂能。一旦黏接界面发生损伤, 就会快速演化至完全失效。当初始损伤强度不大于 3.42 MPa 时, 黏接界面中部进入损伤演化阶段, 就会往边缘扩展, 直至这些区域完全失效。当初始损伤强度大于 3.42 MPa 时, 黏接界面中部直至完全失效才会向边缘扩展。

5) 断裂能不同的碳钢-橡胶黏接界面进入损伤演化时的拉伸位移一致。断裂能越大, 黏接界面损伤演化至完全失效的拉伸位移越大, 黏接界面的抗拉伸能力越强。不同内聚力参数的碳钢-橡胶两侧黏接界面发生初始黏接失效的位置和范围具有随机性, 但黏接失效均从黏接界面中部扩展至边缘。减小碳钢-橡胶黏接界面的刚度, 提高初始损伤强度和断裂能可以有效预防黏接失效。

参考文献:

- [1] 王成, 周保菊, 张津源. 轨道客车车顶复合材料板黏接工艺质量提升研究[J]. 黏接, 2021, 48(11): 9-11.
WANG Cheng, ZHOU Bao-ju, ZHANG Jin-yuan. Research on the Quality Improvement of the Bonding Process for the Roof Composite Plate of Rail Passenger Cars[J]. Adhesion, 2021, 48(11): 9-11.
- [2] 王彩珍, 王琼, 盛文刚. 内燃机车玻璃钢头罩与司机室碳钢骨架黏接工艺[J]. 铁道技术监督, 2021, 49(9): 52-55.
WANG Cai-zhen, WANG Qiong, SHENG Wen-gang. Bonding Process between FRP Head Cover and Carbon Steel Framework of Driver's Cab of Diesel Locomotive[J]. Railway Quality Control, 2021, 49(9): 52-55.
- [3] BALDAN A. Adhesion Phenomena in Bonded Joints[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012, 38: 95-116.
- [4] 孙永国, 韩文彬, 姚其胜. 天然橡胶与金属热硫化黏接工艺研究[J]. 世界橡胶工业, 2015, 42(3): 40-43.
SUN Yong-guo, HAN Wen-bin, YAO Qi-sheng. Study on the Technics of Nature Rubber to Metal Heat Vulcanizing Bonding[J]. World Rubber Industry, 2015, 42(3): 40-43.
- [5] 孟宪印, 陈猛, 姚坤经, 等. 橡胶与金属热硫化黏接工艺的过程控制[J]. 世界橡胶工业, 2016, 43(1): 1-22.
MENG Xian-yin, CHEN Meng, YAO Kun-jing, et al. Process Control of Thermal Vulcanization Bonding Process between Rubber and Metal[J]. World Rubber Industry, 2016, 43(1): 1-22.
- [6] 王勇, 瞿连辉, 曾飞. 橡胶/金属硫化黏接失效原因分析及对策[J]. 特种橡胶制品, 2008, 29(4): 30-33.
WANG Yong, QU Lian-hui, ZENG Fei. Cause for Cure Adhesive Failure of Rubber/Metal[J]. Special Purpose Rubber Products, 2008, 29(4): 30-33.
- [7] 穆洪帅, 翟继芹, 徐浩, 等. 球铰产品橡胶与金属粘合不牢原因分析及解决措施[J]. 世界橡胶工业, 2016, 43(5): 15-19.
MU Hong-shuai, ZHAI Ji-qin, XU Hao, et al. Analysis and Solutions for Bonding Failure between Rubber and Metal in Bushing[J]. World Rubber Industry, 2016, 43(5): 15-19.
- [8] SOUID A, SARDA A, DETERRE R, et al. Influence of Reversion on Adhesion in the Rubber-to-Metal Vulcanization-Bonding Process[J]. Polymer Testing, 2015, 41: 157-162.
- [9] ISMAIL I, HARUN M K. Adhesion Failure of Rubber/Metal Composites Undergoing Corrosion[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2017, 90(3): 455-466.
- [10] ANDREIKOVA L N. Investigation of Rubber Attachment to Different Metals[J]. Klei Germetiki Tekhnologii, 2021, 8: 24-27.
- [11] 朱宏伟, 王林, 曹广如, 等. 不锈钢/天然橡胶的黏接性能研究[J]. 特种橡胶制品, 2022, 43(1): 44-46.
ZHU Hong-wei, WANG Lin, CAO Guang-ru, et al. Adhesive Property of Stainless Steel/Natural Rubber[J]. Special Purpose Rubber Products, 2022, 43(1): 44-46.
- [12] 刘大晨, 王立强, 经琳琳, 等. 电场下天然橡胶与 Fe 的热硫化黏接[J]. 材料科学与工艺, 2015, 23(6): 46-51.
LIU Da-chen, WANG Li-qiang, JING Lin-lin, et al. Heat Vulcanization Bonding between Natural Rubber and Iron under Electric Field[J]. Materials Science and Technology, 2015, 23(6): 46-51.
- [13] 王鹏, 苏正涛, 赖亮庆, 等. 硫化压力对橡胶/金属热硫化黏接剥离强度的影响[J]. 航空材料学报, 2016, 36(1): 69-74.
WANG Peng, SU Zheng-tao, LAI Liang-qing, et al. Impact of Curing Pressure on Peel Strength of Hot-Curing Metal / Rubber Adhesive Joint[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(1): 69-74.
- [14] 陈国栋, 满敬国, 钱伟国, 等. 硫化温度对橡胶和金属黏接强度的影响[J]. 世界橡胶工业, 2009, 36(9): 40-42.
CHEN Guo-dong, MAN Jing-guo, QIAN Wei-guo, et al. Effect of Curing Temperature on Bonding Strength between Rubber and Metal[J]. World Rubber Industry, 2009, 36(9): 40-42.
- [15] DUGDALE D S. Yielding of Steel Sheets Containing Slits[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960, 8(2): 100-104.
- [16] NEEDLEMAN A. A Continuum Model for Void Nucleation by Inclusion Debonding[J]. Journal of Applied Mechanics, 1987, 54(3): 525-531.
- [17] ALFANO G. On the Influence of the Shape of the Interface Law on the Application of Cohesive-Zone Models[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66(6): 723-730.
- [18] LI Wei-zhou, SIEGMUND T. An Analysis of the Indentation Test to Determine the Interface Toughness in a

- Weakly Bonded Thin Film Coating-Substrate System[J]. *Acta Materialia*, 2004, 52(10): 2989-2999.
- [19] CAMPILHO R D S G, DE MOURA M F S F, PINTO A M G, et al. Modelling the Tensile Fracture Behaviour of CFRP Scarf Repairs[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2009, 40(2): 149-157.
- [20] 许达, 李玉顺, 张振文, 等. 内聚力模型在钢-竹组合梁变形分析中的应用[J]. *林产工业*, 2018, 45(8): 42-47.
- XU Da, LI Yu-shun, ZHANG Zhen-wen, et al. The Application of Cohesive-Zone Models in Deformation Analysis of Steel Bamboo Composite Beams[J]. *China Forest Products Industry*, 2018, 45(8): 42-47.
- [21] 寇剑锋, 徐绯, 郭家平, 等. 黏聚力模型破坏准则及其参数选取[J]. *机械强度*, 2011, 33(5): 714-718.
- KOU Jian-feng, XU Fei, GUO Jia-ping, et al. Damage Laws of Cohesive Zone Model and Selection of the Parameters[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2011, 33(5): 714-718.
- [22] 张杰, 邓砚泽, 张瀚, 等. II 型滑移开裂行为下竹胶板单搭接结构力学特性[J]. *中国表面工程*, 2021, 34(1): 112-120.
- ZHANG Jie, DENG Yan-ze, ZHANG Han, et al. Mechanical Properties of Bamboo Glued Board with Single Lap Structure under Mode II Slip Cracking Behavior[J]. *China Surface Engineering*, 2021, 34(1): 112-120.

责任编辑: 彭颖

(上接第 416 页)

- [12] LIU Yi-teng, LIU Rong-zheng, LIU Ma-lin, et al. Synthesis of SiC@Al₂O₃ Core-Shell Nanoparticles for Dense SiC Sintering[J]. *Particuology*, 2019, 44: 80-89.
- [13] CAO Lian-zhen, JIANG Hong, SONG Hang, et al. Thermal CVD Synthesis and Photoluminescence of SiC/SiO₂ Core-Shell Structure Nanoparticles[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 489(2): 562-565.
- [14] 宋金鹏, 高姣姣, 吕明. 颗粒弥散和核-壳共存的 TiCN 基金属陶瓷的制备[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(10): 2552-2560.
- SONG Jin-peng, GAO Jiao-jiao, LV Ming. Fabrication of TiCN-Based Cermet with a Coexisted Microstructure of Particle Dispersion and Core-Rim Structure[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(10): 2552-2560.
- [15] CAICEDO J C, AMAYA C, YATE L, et al. TiCN/TiNbCN Multilayer Coatings with Enhanced Mechanical Properties[J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(20): 5898-5904.
- [16] MONTEVERDE F, MEDRI V, BELLOSI A. Synthesis of Ultrafine Titanium Carbonitride Powders[J]. *Applied Organometallic Chemistry*, 2001, 15(5): 421-429.
- [17] SHAFYEI H, ASHIRI R. Electron Beam Assisted Physical Vapor Deposition of Very Hard TiCN Coating with Nanoscale Characters[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(12): 14821-14828.
- [18] HU Xin-ling, LI Dong-xu, HUANG Yan-zhen. Preparation and Mechanical Properties of Nano-Sized Flaky TiCN Compounds[J]. *Integrated Ferroelectrics*, 2019, 200(1): 43-48.
- [19] HUANG Shao-feng, LIU Xiao, LI Dong-xu. Studies about Microstructures and Mechanical Properties of Ti(C, N) Ceramic Material Using Different Solvents[J]. *Integrated Ferroelectrics*, 2020, 210(1): 83-88.
- [20] 张立学, 金志浩, 宫本钦生. 金刚石颗粒弥散 WC-Co 复合物的烧结及其韧化[J]. *复合材料学报*, 2004, 21(1): 51-55.
- ZHANG Li-xue, JIN Zhi-hao, MIYAMOTO Y. Sintering and Toughening Behavior of Dense Diamond Dispersed WC-10wt%Co Composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2004, 21(1): 51-55.
- [21] TANAKA K. Elastic/Plastic Indentation Hardness and Indentation Fracture Toughness: The Inclusion Core Model[J]. *Journal of Materials Science*, 1987, 22(4): 1501-1508.
- [22] 秦明升, 肖鹏, 熊翔, 等. 不同炭基体 C/C-SiC 制动材料压缩性能研究[J]. *矿冶工程*, 2009, 29(1): 90-93.
- QIN Ming-sheng, XIAO Peng, XIONG Xiang, et al. Research of Compressive Performance of Different Carbon Matrix C/C-SiC Braking Composites[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2009, 29(1): 90-93.
- [23] LIU Shao-cun, LI Bao-zhong, WU Ying-ju, et al. Mechanochemically Assisted Synthesis of Titanium Carbonitride from Metal and Organic Precursor[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2020, 103(11): 6112-6119.
- [24] 白成英, 苏魁范, 邓湘云, 等. 氧化结合法制备多孔碳化硅陶瓷及其特性[J]. *硅酸盐通报*, 2013, 32(9): 1699-1703.
- BAI Cheng-ying, SU Kui-fan, DENG Xiang-yun, et al. Preparation and Characterization of Porous SiC Ceramics by Oxidation Bonding Method[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2013, 32(9): 1699-1703.
- [25] 张立同. 纤维增韧碳化硅陶瓷复合材料: 模拟、表征与设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- ZHANG Li-tong. Fiber-Reinforced Silicon Carbide Ceramic Composites[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.

责任编辑: 万长清