

轨道车辆玻璃粘接计算及载荷研究

徐 迪 魏培欣

中车南京浦镇车辆有限公司 江苏 南京 210013

摘 要：本研究针对轨道车辆玻璃粘接接头的基本形式，探讨并提出了粘接接头尺寸计算方法，通过分析车辆运行过程中粘接接头所受的载荷，建立合理的尺寸计算模型，最终要求设计计算载荷必须要小于接头承受极限载荷。最后对后续轨道车辆玻璃粘接设计的前景和研究方向进行了展望。随着轨道车辆对轻量化、舒适度要求的不断提高，新材料应用比重越来越大，粘接技术得到了越来越广泛的应用。玻璃作为轨道车辆车窗、车门等部件的重要组成部分，其与车体的连接方式对车辆的整体性能有着重要影响。然而，若玻璃粘接接头尺寸设计不合理，可能导致接头过早失效，引发玻璃脱落等重大安全事故。因此玻璃的粘接属于高安全等级的粘接，在EN17460^[1]标准中属于A1等级接头。在玻璃的粘接设计计算过程中，必须分析全面，计算精确，验证严格，从而保证粘接连接的可靠。

关键词：轨道车辆；玻璃粘接接头；接头尺寸计算方法；极限载荷

1 玻璃粘接接头的环境及载荷分析

1.1 环境

轨道车辆在运行过程中，玻璃粘接接头面临着复杂的工作环境。温度方面，车辆运行区域的气候差异以及车内空调系统的运行，会使玻璃粘接接头经历较大的温度变化，可能导致材料热胀冷缩，产生热应力。湿度环境也不容忽视，潮湿的空气可能会影响粘接剂的性能，降低粘接强度。此外，轨道车辆在运行过程中还会受到振动、冲击等动态载荷的作用，这些因素都对玻璃粘接接头的性能和寿命提出了严峻挑战。

1.2 载荷分析

1.2.1 静载荷

由玻璃自身的重量产生的重力以及车辆静止时所受的外部压力，如车辆在交汇时的风压等，构成了玻璃粘接接头所承受的静载荷。静载荷相对稳定，但在接头设计时必须予以准确计算和考虑，以确保接头能够长期承受这些静态作用力而不发生破坏。

1.2.2 动载荷

(1) 振动载荷

轨道车辆在运行过程中，由于轮轨之间的相互作用、车载设备等因素，会产生持续的振动。这种振动会使玻璃粘接接头承受周期性的应力作用，长期的振动可能导致接头疲劳损伤，降低其承载能力。

(2) 冲击载荷

车辆启动、制动、紧急刹车以及通过道岔、不平路面等情况时，会产生较大的冲击载荷。冲击载荷具有瞬时性和高强度的特点，对玻璃粘接接头的抗冲击性能要求极高，若接头无法承受冲击载荷，可能会瞬间发生破

坏。冲击振动要求可参照UIC 566^[2]和GB/T 21563^[3]这两个标准。

1.2.3 热载荷

温度变化会使玻璃/金属和粘接剂产生不同程度的热胀冷缩。由于玻璃/金属和粘接剂的热膨胀系数不同，温度变化会在粘接接头处产生热应力。在极端温度条件下，热应力可能成为导致接头失效的主要因素之一。

玻璃粘接过程中选择的胶粘剂需具有一定弹性的胶粘剂，设计的胶层需具有一定的厚度。一般选择弹性聚氨酯或者硅烷改性聚氨酯等胶粘剂。

2 粘接设计计算

根据玻璃粘接接头所受的各类载荷，运用材料力学中的应力分析方法，计算接头内部的应力分布。胶粘剂的实际受力情况较为复杂，而低模量的弹性胶粘剂在受力时应力集中不明显，因此在载荷强度计算过程中可以进行简化，用名义应力取代实际应力进行计算。对于复杂的受力状态，则需要借助有限元分析软件，建立精确的力学模型，对不同载荷工况下接头的应力分布进行模拟和分析。

先要确定接头承载极限载荷数值 σ_D ，根据胶粘剂的相关试验得到载荷特征参数值，再考虑载荷极限的安全系数，最终得到承载极限载荷数值。

2.1 粘接接头载荷计算

在粘接计算过程中，需考虑粘接接头的横截面积，同时还要考虑接头的长度、宽度等尺寸参数，以确保接头在各种载荷作用下的应力分布均匀，避免出现应力集中现象。以侧窗玻璃为例，计算方法如下：

2.1.1 剪切载荷

根据力的分析,胶层的剪切载荷由两部分构成:

侧窗自身重量引起的静态剪切载荷 τ_1 :

$$\tau_1 = m \cdot g / S_{\text{粘}} \quad (1)$$

式中:

τ_1 ——因侧窗自身重量引起的剪切载荷

m ——侧窗自身重量

g ——重力加速度

$S_{\text{粘}}$ ——粘接面积

冲击载荷引起的动态剪切载荷 τ_2

$$\tau_2 = m \cdot a_1 / S_{\text{粘}} \quad (2)$$

式中:

τ_2 ——因冲击载荷引起的剪切载荷

m ——侧窗自身重量

a_1 ——车辆运行中的最大冲击加速度

$S_{\text{粘}}$ ——粘接面积

对应上述公式(2)中的 a_1 值可按照UIC 566^[2]和GB/T 21563^[3]进行取值,根据标准最大加速度的方向为纵向,即沿车长方向,5g加速度其数值可按照50m/s²进行计算。

2.1.2 拉伸载荷

胶层的拉伸载荷由两部分构成:

车辆内外压力差引起的拉伸载荷 σ_1 :

$$\sigma_1 = \Delta P \cdot S_{\text{窗}} / S_{\text{粘}} \quad (3)$$

式中:

σ_1 ——因内外压力差引起的拉伸载荷

ΔP ——车辆内外压力

$S_{\text{窗}}$ ——侧窗面积

$S_{\text{粘}}$ ——粘接面积

对应上述公式(3)中的 ΔP ,根据不同速度等级的车辆,内外压力差取值^[5]不同。高速列车的粘接车窗在运动过程中主要承受的力为气动阻力所带来的空气压力,也就是拉伸应力,列车运行速度越快,气动阻力占比例越高。

冲击载荷引起的横向拉伸载荷 σ_2 :

$$\sigma_2 = m \cdot a_2 / S_{\text{粘}} \quad (4)$$

胶层拉伸载荷 σ_2 :

$$\sigma_2 = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (5)$$

2.1.3 等效应力

根据冯米塞斯等效应力公式^[4],计算等效应力,等效应力公式为:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2 \right] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)} \quad (6)$$

上述公式(6)中,玻璃粘接的拉伸应力只有一个方向,故 σ_{yy} 和 σ_{zz} 不做考虑;剪切应力存在两个方向,纵向应力 τ_{xy} 和 τ_{yz} 垂向应力,等效应力公式可简化为:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2} \sigma_z^2 + 3(\tau_1^2 + \tau_2^2)} \quad (7)$$

根据以上结果计算得到的等效应力载荷必须要小于胶粘剂承受载荷极限,即 $\sigma_v < \sigma_D$ 。

2.2 有限元分析计算

有限元分析是一种强大的数值计算方法,能够对复杂结构进行精确模拟和量化分析。在轨道车辆玻璃粘接接头载荷计算中,利用有限元分析软件,建立玻璃粘接接头的三维模型,将实际的载荷条件、材料属性和边界条件等参数输入模型中,进行模拟计算。通过有限元分析,可以直观地了解接头在不同载荷工况下的应力、应变分布情况,发现潜在的应力集中区域和薄弱环节。可根据分析结果,对接头尺寸进行优化调整,直到满足设计要求。

对于一些几何形状复杂的粘接接头,如司机室前挡风玻璃的粘接,在进行应力计算时,需要借助FEA有限元模拟分析手段进行。

3 试验方法验证

应力和应变载荷计算完成后,可参考这些数值选择合适的胶粘剂。但胶粘剂的相关文件给出的仅是胶粘剂完全固化而未考虑长期老化的性能。胶粘剂在实际使用中有很多因素会引起胶粘剂性能的衰减,如静态载荷引起的蠕变,动态载荷引起的疲劳,紫外线、高温、高湿等因素引起的老化,环境中介质对胶粘剂的腐蚀等。

3.1 拉伸试验

通过拉伸试验可以测定玻璃粘接接头在拉伸载荷作用下的极限承载能力。可采用不同的加载速率和环境条件,以模拟实际运行过程中的不同工况。

3.2 剪切试验

剪切试验用于测定玻璃粘接接头在剪切载荷作用下的极限载荷。与拉伸试验类似,将试件安装在剪切试验机上,施加剪切载荷,观察接头的破坏情况。通过剪切试验,可以了解接头在剪切力作用下的承载能力和破坏模式,为接头设计提供重要的参考数据。

3.3 疲劳试验

由于轨道车辆在运行中,玻璃胶接头会受到振动等疲劳载荷的作用,因此疲劳试验对于确定接头的极限载

荷也非常重要。根据疲劳试验结果,可以绘制接头S-N曲线,从而确定接头在疲劳载荷作用下的极限载荷。

3.4 老化试验

需要进行老化试验,将老化后的性能作为胶粘剂的实际性能。老化试验应包含尽量多的实际影响因素,使用“时间浓缩效应”进行加速老化,尽量模拟实际使用寿命中的老化情况。也需要注意老化条件过高时可能引起胶粘剂的“过老化”,偏离实际的老化机理。

结语与展望

深入分析了轨道车辆玻璃粘接接头的工作环境与载荷类型,明确了各类载荷对接头性能的影响,为接头尺寸计算和极限载荷确定提供了基础。提出来粘接接头载荷计算方法,提高了接头尺寸设计的准确性和可靠性。最后可通过试验测试验证了上述方法的有效性。对比理论计算和测试结果,发现存在的问题并提出了改进方向。

目前玻璃的粘接设计和工艺已经比较成熟,但对胶

粘剂的人工加速老化与实际使用过程中的老化之间的关系尚不明确,需要我们进一步深入的研究,这将是后续轨道交通粘接技术的主要研究方向,随着经验的积累,轨道车辆玻璃的粘接将会更加可靠安全。随着胶粘剂技术的快速发展,对未来轨道车辆行业的创新和发展起到积极的促进作用。

参考文献

- [1]DIN EN 17460-2022 铁路应用-轨道车辆及其部件的粘接[S].
- [2]UIC 566-1990 客车车体及车体部件的载荷[S].
- [3]GB/T 21563-2008 轨道交通机车车辆设备冲击和振动试验[S].
- [4]刘金凤,王瑾璐,王元伍等.CRH3型动车组侧窗的粘接结构设计[J].中国胶粘剂,2013,22(4):5-7.
- [5]肖金平,黄志祥,陈立.高速列车空气动力学研究技术综述[J].力学与实践,2013,35(2):1-10.