

ICS 点击此处添加 ICS 号

CCS 点击此处添加 CCS 号

团 体 标 准

T/CCTAS XX—2021

短定子磁浮车辆车体强度设计及试验鉴定 规范

Strength design and test accreditation specification for short stator maglev vehicle

(本草案完成时间: X)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国交通运输协会 发布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 基本原则	1
5 设计载荷工况	2
6 试验	5
7 评定方法	8
附 录 A	10
附 录 B	11
参 考 文 献	12
索 引	13

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国交通运输协会XXXXXXXXXXXXXXXX提出。

本文件由中国交通运输协会标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：中车长春轨道客车股份有限公司、西南交通大学、大连交通大学、中车株洲电力机车有限公司、中车唐山机车车辆有限公司、中车大连机车车辆有限公司、中国铁道科学研究院集团有限公司、清远磁浮交通有限公司、北京市地铁运营有限公司

本文件主要起草人：王爱彬、梁世宽、王剑博、董楠、马卫华、谢素明、任忠华、邵晴、王锴、张敏、卢翀、熊哲辉、张福李、王同曜、高利华

短定子磁浮车辆车体强度设计及试验规范

1 范围

本文件规定了磁浮交通短定子磁浮车辆车体强度设计基本原则、设计载荷工况、试验以及评定方法。本文件适用于设计速度不大于200km/h新造短定子磁浮车辆，其他磁浮车辆可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 33194-2016铁路应用 机车车辆车体结构要求

GB/T 228.1-2010 金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 短定子磁浮车辆 short stator maglev vehicle

采用常导电磁悬浮技术实现悬浮导向，通过直线感应电机实现牵引和电制动的轨道交通车辆。

3.2 设备连接装置 equipment attachment

连接设备和车体的紧固件以及相关的局部承载结构或安装座。

[来源：GB/T 33194-2016, 3.1]

3.3 整备状态下的车体质量 m_1 mass of the car body in working order m_1

安装了所有部件，完全装配好的车体的质量。

注：包括车辆内饰、车内设备、滑台及迫导向机构质量。

3.4 悬浮架质量 m_2 mass of the bogie m_2

悬浮架的二系悬挂以下所有设备，包括二系悬挂装置的质量。

注：车体与悬浮架之间的连接部件的质量按比例分配到 m_1 和 m_2 中。

3.5 正常有效载荷 m_3 mass under normal payload m_3

车辆定员载荷下的乘客质量。

注：乘客质量：每人按60kg计算。

3.6 超常有效载荷 m_4 mass under exceptional payload m_4

车辆超员载荷下的乘客质量。

注：乘客质量：每人按60kg计算。

4 基本原则

4.1 车体结构应设计成整体承载结构。

4.2 车体结构应能满足要求所有载荷与其运用要求一致的最大载荷，不产生永久变形和疲劳损伤。

4.3 车体结构应具备一定的刚度,满足其安装设备正常工作与运行过程中旅客乘坐舒适度的需要。整备状态下车体的固有振动模态应与悬挂自振频率充分隔离,以避免产生共振现象。

4.4 在保证强度和刚度的前提下,车体结构应最大限度降低自重。

4.5 车体结构设计寿命不应低于30年。

5 设计载荷工况

5.1 一般要求

用于车体结构设计的载荷工况包括静载荷工况和疲劳载荷工况,设计载荷工况与本文件规定不同时,应按用户规定的技术条件执行。

5.2 车体车钩区域纵向静载荷

该载荷工况下车体质量为 m_1 且垂向加速度取 $1g$ 。

当车体宽度为2.8m及以上时,作用在缓冲装置或者车钩附件上的压缩载荷应不小于350kN,车钩附件上的拉伸载荷不小于280kN。

当车体宽度小于2.8m时,作用在缓冲装置或者车钩附件上的压缩载荷不小于200kN,车钩附件上的拉伸载荷不小于160kN。

5.3 车体垂向静载荷

5.3.1 最大运用载荷

在车体空气弹簧位移支撑,车体承受垂向最大运用载荷为 $1.3 \times g \times (m_1 + m_4)$ 。

5.3.2 架车和吊车

在车体架车点位置或吊车点位置支撑,车体承受垂向载荷为 $1.1 \times g \times m_1$ 。

5.3.3 利用移位支承台车或顶车

对应5.3.2中的载荷工况,使一个架车点相对于其他三个支承点所在平面垂直移动。分析时,第四点相对于其他三点的垂直移动量取10mm。如果需要更大的偏移量应在技术规范中规定。

5.3.4 车顶外表面承受静载荷

车体车顶外表面任意位置两处各200cm²的区域可分别同时承受1kN垂向载荷。

5.4 气动载荷

对于运行车速不低于160km/h的车辆,在以下情况下,将出现明显的空气动力学载荷情况:

- a) 列车高速行驶;
- b) 隧道内行驶;
- c) 有强侧风作用;

车辆应承受上述工况中的极端运行条件下所引起的最大空气动力学载荷。

5.5 车体静载荷组合工况

车体宽度不小于2.8m时的叠加工况:

——压缩力和垂向载荷: 350kN和 $1g \times (m_1 + m_4)$;

——拉伸力和垂向载荷: 280kN和 $1g \times (m_1 + m_4)$ 。

车体宽度小于2.8m时的叠加工况：

——压缩力和垂向载荷：200kN和 $1g \times (m_1 + m_4)$ ；

——拉伸力和垂向载荷：160kN和 $1g \times (m_1 + m_4)$ 。

5.6 接口处的静态验证载荷工况

5.6.1 车体悬浮架连接装置的验证载荷工况

车体悬浮架连接装置应能承受5.3.1和5.3.2中规定的载荷，也应能独立承受以下载荷与一个车体质量 m_1 在 $1g$ 垂向加速度作用下产生的载荷的组合：

- a) 车辆在起动及紧急制动条件下沿着纵向产生的最大加速度，一般起动加速度取 $1.15g$ ，紧急制动减速度取 $1.3g$ ，并由牵引拉杆承担车体的纵向约束。
- b) 每个悬浮架的横向力，等于超常横向载荷或悬浮架质量 m_2 施加 $1g$ 横向加速度。

5.6.2 设备连接装置的验证载荷工况

为了计算车辆运行过程中作用在附属设备上的作用力，组件的质量应乘以纵向、横向和垂向的加速度，加速度值分别为 $\pm 1.3g$ 、 $\pm 1g$ 、 $\pm 1.5g$ 。各个载荷工况应单独施加。

说明因纵向、横向和垂向的加速度产生的载荷应结合设备自身可能引起的最大载荷情况分别给予考虑。纵向和横向的加速度应结合因 $1g$ 的垂向加速度产生的载荷一起考虑，垂向的载荷包括附属设备的净重。若设备质量或其安装方法可能改变了车辆动力学特性，则应研究上述规定加速度值的适用性。

5.6.3 迫导向机构验证载荷工况

车体与迫导向机构的连接部位应能承受迫导向机构工作所引起的最大载荷。考核车辆在正常有效载荷下通过最小半径水平曲线线路时迫导向机构所产生的载荷。

注：未配置迫导向机构车辆不需要考核本工况。

5.6.4 车端减振器验证载荷工况

车体与车端减振器的连接部位应能承受车端减振器最大拉伸或最大压缩状态下所产生的载荷。

注：未配置车端减振器车辆不需要考核本工况。

5.7 车体一般疲劳载荷工况

5.7.1 载荷输入

应确定能引起疲劳损伤的所有循环载荷输入。

进行车体结构的疲劳损伤评定时，应考虑下列输入载荷。

5.7.2 有效载荷谱

在有效载荷变化不大时，应使用正常有效载荷 m_3 。

在有效载荷变化较大时，应在技术规范中规定各级有效载荷及其所用时间的比例，该比例应用于计算使用的适当格式表示有。有效载荷水平应以 m_3 和 m_4 的分数表示出来。在相关工况中，应考虑不同质量状况下有效载荷分布的变化。

5.7.3 加载/卸载循环

应确定加/卸载循环数并以适合于分析的方式表示。如果车辆有效载荷与自重之比较大，并且有效载荷经常变化时，加/卸载产生的疲劳损伤可能会比较明显。

5.7.4 轨道引起的加载

轨道垂向、横向和扭曲不平顺引起的载荷可由下列方式确定：

- a) 动态模拟（根据轨道几何形状和不平顺相关的数据）；
- b) 预定或类似路线上测得的数据；
- c) 或用经验数据表示（加速度、位移等）。

数据的特性根据疲劳分析方法（疲劳累计损伤法、疲劳极限法）的不同而不同。

正常运用条件下，适用于疲劳极限法的横向加速度及垂向加速度的经验值分别取 $\pm 0.15g$ 和 $(1 \pm 0.15)g$ ，如果没有合适的数据（如上所述）可用时，应采用经验值。

疲劳累积疲劳损伤分析中的当量动载荷可采用横向加速度 $\pm 0.15g$ 及垂向加速度 $(1 \pm 0.15)g$ ，并假定每个加速度作用 10^7 次循环。

5.7.5 气动载荷

对于运行车速不低于160km/h的车辆，在以下情况下将出现明显的空气动力学载荷情况：

- a) 列车高速行驶；
- b) 隧道内行驶；
- c) 有强侧风作用。

应考虑上述载荷的相关性，必要时给出影响分析结果的适当表示方法，如果没有获取特殊数据，则进行 10^6 次循环。

5.7.6 牵引和制动载荷

通常应在技术规范中确定由于起动/停车产生的载荷循环数量和幅度。应考虑临时停车的影响。

如果没有具体数据可用，则按纵向加速度值取 $\pm 0.15g$ ，并作用 10^7 次循环。

应对车辆动态相互作用引起的纵向加速度情况进行评定，若产生明显的载荷输入，则其影响应计入载荷循环中。

5.7.7 乘客上下车载荷

车辆停站时乘客上下车引起的车辆有效负载循环变化，车体的有效负载为 (m_1+m_3) ，应依据车辆实际运用数据计入循环次数或按 10^6 次循环作用。

5.8 接口处的疲劳载荷

5.8.1 一般要求

应确保所有相关的接口载荷以正确的方式组合，包括选择适当的载荷循环数。

5.8.2 车体/悬浮架连接装置

应采用5.7.4规定的方法并根据悬挂部件的工作特性确定牵引和制动以及车辆的动态相互作用引起的疲劳载荷。

5.8.3 滑台导轨安装座疲劳载荷

应根据车辆运行过程中所承受的载荷及变化情况,对滑台导轨安装座所承受的循环负载情况进行评估。

5.8.4 车钩安装座疲劳载荷

应根据运用要求对车钩安装座所承受的循环负载情况进行评估。

5.8.5 设备连接装置疲劳载荷

设备连接装置应能够承受因车辆动力学引起的加速度而产生的载荷以及因设备自身运动而产生的附加载荷情况。加速度值可以按照5.7.4所述的情况进行确定。随着车体运动而运动的设备组件在纵向、垂向及横向的加速度经验值分别为 $\pm 0.15g$ 、 $(1 \pm 0.15)g$ 、 $\pm 0.15g$ 。每种情况下负载循环的次数为 10^7 次。

5.9 疲劳载荷工况的组合

应确定疲劳载荷工况的相关组合,确保在工况中实现设计要求。在某些应用中,可能需要将牵引/制动循环引起的全局载荷(见第5.7.6)和由纵向加速度引起的其他载荷与同时作用的垂向和横向载荷相组合。

疲劳极限法分析应包括由5.7和5.8中规定的各种载荷按实际情况组合的代表性载荷工况。

5.10 振动模态

5.10.1 车体

在整备状态条件下,车体的固有振动模态频率应与悬浮架振动的频率充分隔离或隔绝,避免出现不良响应,并满足舒适度要求。

5.10.2 设备

在整备和所有运用条件下,设备振动基本模态应与车体结构和悬浮架的振动模态充分隔离或隔绝,避免出现不良响应。

6 试验

6.1 一般要求

6.1.1 试验项目包括静载荷试验、疲劳载荷或运用载荷试验和振动模态试验三部分。

注:运用载荷是指正常运用条件下车体承受的各种载荷。

6.1.2 静载荷试验应测定车体结构在静载荷作用下的强度。

6.1.3 疲劳载荷或运用载荷试验应测定车体结构在疲劳载荷或运用载荷作用下的强度。

6.1.4 振动模态试验应测定车体的动态参数。

6.2 静载荷试验

6.2.1 静载荷试验工况

6.2.1.1 静载荷试验工况至少应进行下列验证载荷试验，在验证载荷工况下车体或单独部件不应出现永久变形，宜通过测试应力不超过材料屈服极限予以判定：

- a) 车体垂向静态最大工作载荷；
- b) 架车或吊车工况载荷；
- c) 利用移位支撑架车工况载荷；
- d) 车体纵向静态载荷；
- e) 车体静态载荷组合。

在合适的情况下，允许通过合成单独试验工况的结果来验证这些载荷工况。任何附加试验要求应在用户规定的技术条件中规定。

在预试和正式试验中应进行下列测量：

- a) 关键位置的应变，包括如侧梁、上侧梁、门窗角；
- b) 支撑点之间的变形；
- c) 任何可能的残余变形；
- d) 任何可能的残余应变。

测量位置处的应力—应变关系应为线性。卸载后的残余应变 ε_{res} 应满足公式（1）的要求：

$$\varepsilon_{\text{res}} \leq 0.05 \frac{R}{E} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

ε_{res} ——残余应变，单位为毫米（mm）；

R ——屈服极限，按GB/T 228.1定义的下屈服强度（ R_{e1} ）或0.2%塑性延伸强度（ $R_{p0.2}$ ），单位为兆帕（MPa）；

E ——弹性模量。

在局部应力集中部位，允许根据应变最大测量值得出的应力值高于 R ，但其性能应保持线性。

如存在无法施加设计要求的满负载，需要对测试结果进行修正。可采用将测试值乘以设计载荷工况值与实际加载值之间的比值或通过等效过程处理。

针对上述情况以及测试结果属于各个单独的试验载荷工况组合情况的，应论证满足屈服强度要求的情况。

6.2.1.2 对于其他静载荷工况，可通过分析或试验或两者组合进行验证。

6.2.2 测量项目

测量项目应包括应力和垂向变形量。

6.2.3 测点布置

6.2.3.1 应力测点

应力测点应根据强度计算和结构分析的重要位置和所有危险部位进行布置。

6.2.3.2 垂向变形测点

垂向变形测点宜布置在车体底架结构中部及端部两侧。

6.2.4 试验方法

6.2.4.1 车体垂向最大运用静载荷

车体结构支撑在空气弹簧位置。在车体结构上施加 $1.3g \times (m_1 + m_2) - g \times m_0$ 垂向载荷，除质量大的设备在其安装位置施加集中载荷外，其余载荷均匀施加在地板上。

其中 m_0 为车体结构重量与试验工装重量之和。

对试验测得的数据进行处理，计算出对应于垂向载荷 $1.3g \times (m_1 + m_2)$ 的数据。

6.2.4.2 架车和吊车工况载荷

车体结构支撑在规定的架车/吊车位。首先在车体结构上施加 $1.1g \times m_1 - g \times m_0$ 垂向载荷，除质量大的设备应在其安装位置施加集中载荷外，其余载荷应均匀施加在地板上。对试验测得的数据进行处理，计算出对应于载荷 $1.1g \times m_1$ 的数据。

6.2.4.3 利用移位支撑架车工况载荷

车体结构支撑在规定的吊车位。首先在车体结构上施加 $1.1g \times m_1 - g \times m_0$ 垂向载荷，除质量大的设备应在其安装位置施加集中载荷外，其余载荷应均匀施加在地板上。然后将其中一支撑点下降或抬升10mm。对试验测得的数据进行处理，计算出对应于载荷 $1.1g \times m_1$ 的数据。

6.2.4.4 车体纵向静态载荷

6.2.4.4.1 纵向压缩载荷与垂向载荷 $g \times m_1$ 组合试验

车体结构支撑在空气弹簧位置。首先在车体结构上施加 $g \times m_1 - g \times m_0$ 垂向载荷，除质量大的设备在其安装位置施加集中载荷外，其余载荷均匀施加在地板上。然后在车钩连接处施加纵向压缩载荷。

对试验测得的数据进行处理，计算出对应于压缩载荷与垂向载荷 $g \times m_1$ 组合的数据。

6.2.4.4.2 纵向压缩载荷与垂向载荷 $g \times (m_1 + m_2)$ 组合试验

车体结构支撑在空气弹簧位置。首先在车体结构上施加 $g \times (m_1 + m_2) - g \times m_0$ 垂向载荷，除质量大的设备在其安装位置施加集中载荷外，其余载荷均匀施加在地板上。然后在车钩连接处施加纵向压缩载荷。

对试验测得的数据进行处理，计算出对应于压缩载荷与垂向载荷 $g \times (m_1 + m_2)$ 组合的数据。

6.2.4.4.3 纵向拉伸载荷与垂向载荷 $g \times m_1$ 组合试验

车体结构支撑在空气弹簧位置。首先在车体结构上施加 $g \times m_1 - g \times m_0$ 垂向载荷，除质量大的设备在其安装位置施加集中载荷外，其余载荷均匀施加在地板上。然后在车钩连接处施加纵向拉伸载荷。对试验测得的数据进行处理，计算出对应于拉伸载荷与垂向载荷 $g \times m_1$ 组合的数据。

6.2.4.4.4 纵向拉伸载荷与垂向载荷 $g \times (m_1 + m_2)$ 组合试验

车体结构支撑在空气弹簧位置。首先在车体结构上施加 $g \times (m_1 + m_2) - g \times m_0$ 垂向载荷，除质量大的设备在其安装位置施加集中载荷外，其余载荷均匀施加在地板上。然后在车钩连接处施加纵向拉伸载荷。对试验测得的数据进行处理，计算出对应于拉伸载荷与垂向载荷 $g \times (m_1 + m_2) - g \times m_0$ 组合的数据。

6.2.5 试验步骤

在正式试验前应进行预试验，载荷分阶段增加，直到最大载荷。然后进行三次正式试验，取三次正式试验结果的算术平均值进行评价。

6.3 疲劳载荷或运用载荷试验

如果疲劳强度计算表明车体疲劳强度满足本文件规定，可不进行疲劳载荷试验；如疲劳强度计算包含严重的不确定性或者计算表面疲劳强度不满足本文件的规定时，可用运用载荷试验直接测量工作应力来评价疲劳强度。

运用载荷试验在装备齐全的车辆上进行，车体装载正常有效载荷 m_0 。根据强度计算和静态试验结果确定关键区域并布置应变片，记录在典型运用条件下的动应力数据，对动应力数据进行计数统计处理，编制应力谱。利用7.2.1得出的S-N曲线，根据Palmgren-Miner法则累积损伤，推算出整个车体寿命的总损伤，应低于1。

6.4 振动模态试验

对整备状态下的车体利用模态分析方法进行模态识别，应识别出5Hz~40Hz频率范围的车体振型。

进行振动模态试验时，可采用单点激振多点测量或多点激振多点测量方法。鉴于车体较大而且结构复杂，宜优先采用多点激振、多点测量方法。试验时，可采用2Hz~40Hz白噪声随机信号激振，初步确定车体的模态和频率，在接近振型频率点时，再采用正弦扫描进行激振，以准确获得车体的真实模态。

进行车体模态测定时，车体应采用弹性支撑方式。

加速传感器的测量点应至少布置在7个测量断面上，可沿车体纵向均匀布置或选择特征部位，每一断面的每个边不少于3个，如图2所示。

传感器的布置可在车内，也可在车外。

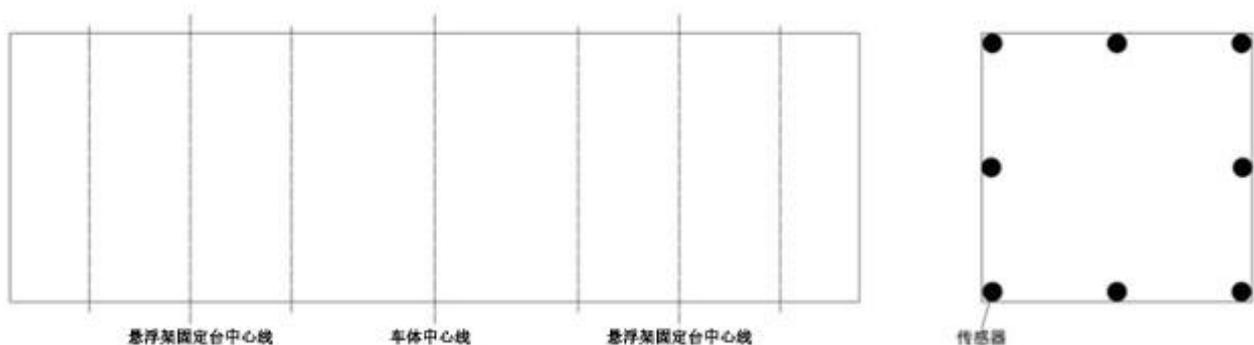


图2 传感器布置示意图

7 评定方法

7.1 静强度

在规定的静载荷工况下，应力不应大于材料的屈服强度。车体常用材料及其主要力学性能见附录A。在仅通过计算方式验证时，对于每个单独的载荷工况 S_1 取值1.15。在设计载荷将通过试验进行验证和/或已成功建立试验和计算之间相互关系时， S_1 取值1.0。

$$U = \frac{\sigma_c S_1}{R} \leq S_1$$

式中：

S_1 ——屈服极限安全系数；

R ——材料的屈服强度，即按GB/T 228.1-2010定义下的屈服强度(R_{eL})或者0.2%塑性延伸强度($R_{p0.2}$)，单位为兆帕(MPa)；

σ_c ——计算或试验得到应力，单位为兆帕(MPa)。

确定韧性材料的应力水平时，产生局部应力集中的部位可不满足上面的评定标准。当分析中计入局部应力集中时，允许理论应力超过材料的屈服强度。和应力集中有关的局部塑性变形区应足够小，当去除载荷时不应引起任何明显永久变形。计算时应力集中的处理方法参见GB/T 33194-2016中的方法处理，试验时应力集中的处理方法按6.2.1.1的规定。

此外，涉及碳纤维复合材料的验证，失效准则评估方法参见附录B。

7.2 疲劳强度

7.2.1 评价原则

疲劳强度应按下列原则得出的S-N曲线进行评价：

- a) 至少97.5%的存活概率；
- b) 按照部件或接头的几何形状进行细节分类；
- c) 利用试验技术和经验整理从小比例试样得出的极限值，确保其适用于全尺寸部件。

7.2.2 评价方法

疲劳强度评价分疲劳极限法和累计损伤法，评价方法根据材料可用数据情况选取。

7.2.3 疲劳极限法

在5.7和5.8规定的载荷作用下，应力不应大于材料的疲劳极限。当材料疲劳极限出现在不大于 10^7 次循环时，取该疲劳极限。当材料没有规定疲劳极限或疲劳极限大于 10^7 次循环时，疲劳极限取 10^7 次循环时的疲劳强度。

7.2.4 累积疲劳损伤法

利用7.2.1得出的S-N曲线，根据Palmgren-Miner法则计算5.7和5.8中每个载荷工况作用 10^7 次循环产生的损伤，5.7和5.8分别累积所有载荷工况产生的损伤得到总损伤，总损伤均应低于1。

附录 A

(资料性附录)

车体常用材料及其主要力学性能

车体常用材料及其主要力学性能见表 A.1。

表A.1 车体结构常用材料及其主要力学性能

合金牌号	状态	产品形式	厚度 t mm	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ MPa	
				母材	焊接热影响区
5083	0	板材	$t \leq 40$	125	125
			$40 < t \leq 80$	115	115
	H111	板材	$t \leq 50$	125	125
			$50 < t \leq 80$	115	115
	H321	板材	$t \leq 40$	215	155
6005A	T6/T651	开口型材	$t \leq 5$	225	115
			$5 < t \leq 10$	215	115
			$10 < t \leq 25$	200	115
		闭口型材	$t \leq 5$	215	115
			$5 < t \leq 10$	200	115
6082	T6	板材	$t \leq 6$	260	125
			$6 < t \leq 12.5$	255	125
		型材	$t \leq 5$	250	125
			$5 < t \leq 25$	260	125

附 录 B

(资料性附录)

碳纤维复合材料失效准则评估方法

蔡-吴高阶张量多项式，兼顾碳纤维拉压强度不相等的情形，是现有成熟准则中对复合材料破坏描述得最为全面的准则。本规范对碳纤维复合材料的评价，使用的是蔡-吴失效准则，其一般形式为：

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j + F_{ijk} \sigma_i \sigma_j \sigma_k + \dots = 1 \quad (i, j, k \dots = 1, 2 \dots 6) \quad (\text{B.1})$$

式(B.1)中， σ_i ， σ_j ， σ_k 为应力张量，同时令三个剪应力为： $\tau_{23} = \sigma_4$ ， $\tau_{31} = \sigma_5$ ， $\tau_{12} = \sigma_6$ ； F_i ， F_{ij} ， F_{ijk} 为表征材料性能的强度张量；多项式项数越多，精度越高，但试验难度越大，费用也越高，一般取二阶张量形式如下：

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_3 \sigma_3 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{33} \sigma_3^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 + 2F_{23} \sigma_2 \sigma_3 + 2F_{31} \sigma_3 \sigma_1 + F_{44} \sigma_4^2 + F_{55} \sigma_5^2 + F_{66} \sigma_6^2 = 1 \quad (\text{B.2})$$

平面应力状态下，式(B.2)可简化为：

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_6 \sigma_6 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \sigma_6^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 = 1 \quad (\text{B.3})$$

式(B.3)中， F_{12} 需通过双轴强度试验确定，其它张量系数均由单层板强度值计算得到；在无试验数据时，一般取 $F_{12} = 0$ 或 $F_{12} = -0.5\sqrt{F_{11}F_{22}}$ ，但相关试验表明 F_{12} 的影响不应忽略，本规范取后者即把应力耦合系数设置为-1.4232e-6。在所有应力分量相互作用下，若式(B.3)左端计算值（即蔡-吴失效因子）小于1，则材料处于线弹性状态；若左端计算值等于1，则材料开始破坏；若左端计算值大于1，则材料已经破坏。

参 考 文 献

- [1] GB/T 33194-2016铁路应用 机车车辆车体结构要求
- [2] TB/T 3550.1-2019 机车车辆强度设计及试验鉴定规范 车体 第1部分：客车车体
- [3] CJJ/T262-2017中低速磁浮交通设计规范

索 引
