



中华人民共和国国家标准

GB/T 41346.1—2022

机械安全 机械装备转运安全防护 第1部分：结构设计准则

Safety of machinery—Transportation protection for machinery equipment—
Part 1: Specifications for structure design

2022-03-09 发布

2022-10-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 基本要求	1
5 防护结构设计	2
5.1 荷载	2
5.2 材料和选用	2
5.3 结构分析与验算	3
5.4 强度与变形验算	4
5.5 起吊	4
5.6 转运与堆码	5
6 使用信息	5
附录 A (规范性) 生物质工程材料构件和材料力学性能测试方法	6
附录 B (规范性) 钢构件强度与稳定性验算	17
附录 C (规范性) 生物质工程材料构件强度与稳定性验算	21
附录 D (资料性) 转运振动	24
参考文献	27

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。

本文件是 GB/T 41346《机械安全 机械装备转运安全防护》的第 1 部分。GB/T 41346 已经发布了以下部分：

- 第 1 部分：结构设计准则；
- 第 2 部分：拉紧装置安全要求。

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。

本文件由全国机械安全标准化技术委员会(SAC/TC 208)提出并归口。

本文件起草单位：南京林业大学、福建省闽旋科技股份有限公司、安徽邓氏机械制造有限公司、深圳国技仪器有限公司、金谋士(厦门)管理咨询有限公司、漳州科晖专用汽车制造有限公司、漳州佳龙科技股份有限公司、漳州科虹电子有限公司、东方电气集团东方汽轮机有限公司、中国第一重型机械股份有限公司、南京森工生物质材料研究院有限公司、中国第二重型机械集团德阳万路运业有限公司、太原重型机械集团有限公司、台州龙江化工机械科技有限公司、快乐木业集团有限公司、浙江梦丽宏竹木有限公司、皮尔磁电子(常州)有限公司、江西飞宇竹材股份有限公司、佛山市顺德区万怡家居用品有限公司、南京理工大学、四川蜀兴优创安全科技有限公司、惠州学院、四川成渝高速公路股份有限公司成雅分公司、浙江如晶科技有限公司、佛山市宾宏设备有限公司、中机生产力促进中心、常州工学院、季华实验室、广东强劲机电工程有限公司、苏州华兴源创科技股份有限公司、中汽认证中心有限公司、西安凯益金电子科技有限公司、东莞市车龙物流有限公司、广州宁基智能系统有限公司、厦门弘信电子科技集团股份有限公司、泉州市劲力工程机械有限公司、佛山市定中机械有限公司、陕西国宏福检测技术有限公司、西安久鑫长物联网科技有限公司、广东当家人智能电器有限公司、义乌市粤鑫模具科技有限公司、焙之道食品(福建)有限公司、西安凯金哲检测有限公司。

本文件主要起草人：周爱萍、曾华山、沈玉蓉、邓衍夫、郭冰、李忠、田伟、苏毅、赖志煌、蔡松华、何东、许怀东、吴建伟、居里镡、熊从贵、陈文辉、崔兆彦、许应甲、高祥齐、柳红、董欣韬、满涛、付卉青、王首江、刘治永、杨浩、刘年祥、黄剑锋、刘燕燕、唐思远、王春龙、居荣华、黄之炯、李健男、袁从淦、冯盛辉、张欣、姜涛、宋小宁、吴向亮、韩传云、徐骏、贵人兵、黄东升、朱斌、段衍筠、谢增强、林通、颜陆军、陈新建、方志明、钟云山、沈德红、王俊、张挺、薛从福、何明利、肖本崇。

引 言

在机械装备转运过程中,尤其是对于重达数十吨甚至上百吨的重型设备,因振动、重心偏移等原因而发生设备坠落、倾覆等安全事故,不仅直接导致设备损坏,而且可能对周边人员产生伤亡事故。GB/T 41346《机械安全 机械装备转运安全防护》从设备转运过程中的防护结构设计和牢固固定两个角度规定安全要求,其目的是确保机械装备在转运过程中的稳定性和安全性,从而保障机械装备及相关人员的安全。

GB/T 41346《机械安全 机械装备转运安全防护》由以下两部分组成。

- 第1部分:结构设计准则。规定了防护结构的设计准则,目的是确保在机械装备的转运过程中防护结构能够发挥其固定作用。
- 第2部分:拉紧装置安全要求。规定了机械装备转运过程中所使用的拉紧装置,目的是确保在机械装备的转运过程中,拉紧装置能够发挥其拉紧和固定作用。

机械领域安全标准体系由以下几类标准构成。

- A类标准(基础安全标准),给出适用于所有机械的基本概念、设计原则和一般特征。
 - B类标准(通用安全标准),涉及机械的一种安全特征或使用范围较宽的一类安全装置:
 - B1类,安全特征(如安全距离、表面温度、噪声)标准;
 - B2类,安全装置(如双手操纵装置、联锁装置、压敏装置、防护装置)标准。
 - C类标准(机械产品安全标准),对一种特定的机器或一组机器规定出详细的安全要求的标准。
- 根据 GB/T 15706—2012,本文件属于 B2 类标准。

本文件尤其与下列与机械安全有关的利益相关方有关:

- 机器制造商;
- 健康与安全机构。

其他受到机械安全水平影响的利益相关方有:

- 机器使用人员;
- 机器所有者;
- 服务提供人员;
- 消费者(针对预定由消费者使用的机械)。

上述利益相关方均有可能参与本文件的起草。

此外,本文件预定用于起草 C 类标准的标准化机构。

本文件规定的要求可由 C 类标准补充或修改。

对于在 C 类标准的范围内,且已按照 C 类标准设计和制造的机器,优先采用 C 类标准中的要求。

机械安全 机械装备转运安全防护

第1部分：结构设计准则

1 范围

本文件规定了机械装备转运安全防护的安全防护结构设计基本要求、安全防护结构设计要求和使
用信息。

本文件适用于机械装备转运安全防护的结构设计。

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 191 包装储运图示标志

GB/T 5398—2016 大型运输包装件试验方法

GB/T 15706—2012 机械安全 设计通则 风险评估与风险减小

GB/T 41346.2 机械安全 机械装备转运安全防护 第2部分：拉紧装置安全要求

GB 50017—2017 钢结构设计标准

3 术语和定义

GB/T 15706—2012 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

防护结构 guarding structure

在机械装备转运过程中，用于保护机械装备免受振动、冲击和碰撞等力学作用造成的损伤或破坏而
承受荷载的保护性结构。

3.2

荷载 load

施加在防护结构上使结构或构件产生内力和变形的各种直接或间接的作用。

3.3

机械装备 mechanical equipment

生产制造某种或某类产品所配备的各种机器、设备和工装等的集合。

4 基本要求

4.1 防护结构的设计应根据产品特点、转运环境使其结构安全可靠、经济合理。

4.2 设计防护结构时，应从实际出发，合理选择材料、结构方案和构造措施，并应符合机械装备及其防
护结构在运输、装卸过程中承载与稳定的要求。需要时，还应符合防潮、防腐蚀等要求。

4.3 防护结构受力应简单明确，减少应力集中，尽量避免材料三向受拉。

4.4 防护结构应按承载能力极限状态进行设计。

注：承载能力极限状态是指防护结构或结构构件达到最大承载能力或出现不适于继续承载的变形。当防护结构或结构构件出现下列状态之一时，即认为超过了承载能力极限状态：

- 结构构件或连接因材料强度不够而破坏，包括疲劳破坏、脆性断裂等；
- 整个结构或结构的一部分作为刚体失去平衡(如倾覆等)；
- 结构转变为机动体系；
- 结构或结构构件丧失稳定性。

4.5 防护结构进行设计时，应根据结构破坏可能产生的后果，确定防护结构的安全防护级别。

5 防护结构设计

5.1 荷载

5.1.1 荷载分类

防护结构的荷载可分为直接作用和间接作用两类：

- 直接作用：防护结构自重、机械装备自重、堆码自重、冲击作用、风荷载等；
- 间接作用：转运激振或起吊等引起的惯性作用、温度影响等。

注：温度影响是由于温度变化在防护结构或结构构件中引起内力或变形的效应。

5.1.2 荷载标准值

荷载标准值是防护结构设计中用以验算极限状态所采用的荷载量值，主要通过防护结构、机械装备等物体的尺寸与材料单位体积的重量计算确定。

5.1.3 荷载组合

防护结构设计应根据使用过程中在防护结构上可能同时出现的荷载，按承载能力极限状态进行荷载组合，并应取各自的最不利的效应组合进行设计。

防护结构设计宜考虑机械装备在运输中的风荷载作用，防护结构应采用可靠措施与交通运输装备固定，防止被大风刮倒。

5.1.4 温湿度影响

防护结构的设计应采取措施以减少或消除温度和湿度的影响。

防护结构的设计应采取措施(如控制木质材料的含水率)以减小材料变形而引起应力变化。

5.2 材料和选用

5.2.1 防护结构材料应根据机械装备重量、转运状况、安全防护级别等，综合考虑机械装备的重要性、荷载特征、防护结构形式、应力状态、连接方法、转运环境等因素，选择环保、强度高、质量轻、经济合理、性能可靠的材料。宜优先采用速生木材、生物质工程材料等绿色可再生材料。

注：生物质工程材料(engineering bio-material)是由秸秆、木材、竹材等天然材料经工业化生产的、具有明确力学性能参数的生物质复合材料。在防护结构中主要使用下列生物质工程材料：

- a) 单板层积材——将旋切机或刨切机切削得到的木材单板，按木材纹理互成平行的方式，组坯胶合而成的材料；
- b) 竹集成材——将以原竹经剖分、去青、去黄及刨削、干燥等工序(纵向剖削加工)形成的宽度20 mm~30 mm、厚度5 mm~20 mm的矩形截面竹条为单元进行顺纹组坯、施胶、热压而成的工程竹基复合材料；
- c) 重组竹——以原竹疏解形成的竹束为单元进行顺纹组坯、施胶、压制而成的工程竹基复合材料。

5.2.2 防护结构材料宜具有良好的耐候、抗振和抗冲击性能。防护结构不应采用没有明确力学性能参数的材料作为承重构件。围护材料宜采用经济、轻质、防潮、防水材料。

5.2.3 如果防护结构采用金属材料,则所用金属材料的力学性能和物理性能应符合相应安全防护级别防护能力的要求。通常宜选 Q235 钢、Q355 钢、Q390 钢和 Q420 钢。

5.2.4 下列情况的承重构件或连接材料宜采用 D 级碳素结构钢或 D 级、E 级低合金高强度结构钢:

- 直接承受动力荷载或振动荷载的焊接构件或连接件;
- 工作温度低于 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的构件或连接件。

5.2.5 防护结构采用生物质工程材料时,宜考虑其顺纹抗拉、抗压、抗剪、抗弯设计强度、顺纹弹性模量、横纹抗压强度和压缩弹性模量等力学性能以及容重、含水率等物理性能,并在设计文件中注明材料的力学性能和物理性能与施工要求。有关生物质工程材料构件力学性能按附录 A 规定的方法进行测试。

5.3 结构分析与验算

5.3.1 结构方案

防护结构方案选择要求如下。

- a) 防护结构宜采用成熟的结构体系。当采用新型结构体系时,应充分进行计算论证,必要时进行试验验证。
- b) 封闭式防护结构宜采用空间杆系结构或平面单元组成的箱型结构,敞开式防护结构宜采用空间杆系结构或托盘型结构。
- c) 防护结构传力途径应简单、明确。
- d) 防护结构应具有足够的刚度和承载力,以及良好的结构整体稳定性和构件稳定性。
- e) 防护结构宜采用超静定结构,重要构件与关键传力部位宜增加冗余约束,避免因部分结构或构件破坏导致整个结构丧失承载能力,从而影响结构的整体安全性。

5.3.2 设计方法

安全防护结构应按承载能力极限状态进行设计。

防护结构构件应按荷载效应的基本组合,按照公式(1)进行设计:

$$\gamma_0 S \leq R \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

γ_0 ——防护结构安全系数;

S ——荷载标准值;

R ——结构构件的抗力函数,根据防护结构材料强度设计值确定。

承载能力极限状态设计方法,宜考虑荷载效应的基本组合,必要时还宜考虑荷载效应的偶然组合。

应根据机械装备在转运过程中其防护结构遭受破坏的程度而可能造成的后果(如危及人的生命、经济损失等),按表 1 对其安全防护性能进行分级。

表 1 机械装备防护结构安全防护性能分级

安全防护级别	防护结构破坏程度	造成的后果
一级	很严重	危及生命、经济损失巨大
二级	严重	不危及生命、经济损失较大
三级	不严重	不危及生命、经济损失较小

防护结构安全系数(γ_0)应分别根据其安全防护级别进行确定:

- a) 对于安全防护级别为一级的结构构件, γ_0 不应小于 1.4;
- b) 对于安全防护级别为二级的结构构件, γ_0 不应小于 1.3;
- c) 对于安全防护级别为三级的结构构件, γ_0 不应小于 1.2。

5.3.3 结构分析

防护结构构件的内力和变形验算可按结构静力学方法进行弹性分析。

防护结构简化力学计算模型宜尽量与构件及连接的实际情况相符合,应根据实际工况考虑以下因素:

- 结构几何尺寸、材料性能、边界条件、构造措施;
- 结构的荷载作用、初始应力和变形状况等。

应对分析结果进行判断和校核,在确认其合理有效后方可用于防护结构设计。

5.4 强度与变形验算

5.4.1 计算防护结构或构件的强度、稳定性以及连接的强度时,应采用荷载设计值(即荷载标准值乘以安全系数)。计算其疲劳强度时,应采用荷载标准值。钢构件的强度和稳定性应按附录 B 规定的方法验算;生物质工程材料构件的强度与稳定性应按附录 C 规定的方法验算。

5.4.2 对于承受动荷载的防护结构,防护结构的强度和稳定性验算宜考虑动力作用,动力作用效应可采用静力作用效应设计值乘以动力系数 1.5。需要时,可采取消能减振措施,提高防护结构抗振性能。

5.4.3 防护结构的受弯构件应进行正截面受弯承载能力、斜截面受剪承载能力验算,对有变形控制要求的防护结构,应对其受弯构件的挠度进行验算。

5.4.4 防护结构的轴心受拉构件、轴心受压构件应进行受拉承载能力、受压承载能力验算,受压构件还应进行稳定性验算。

5.4.5 防护结构的拉弯构件、压弯构件宜考虑同时受到轴力与弯矩作用,应进行承载能力验算,压弯构件应进行稳定性验算。

5.4.6 防护结构连接件应安全可靠、安装方便,设计时宜考虑构件变形、动荷载对连接节点的影响,保证节点可靠传递荷载,具有足够的强度与刚度,避免出现构件未破坏而节点先破坏的现象。防护结构的连接节点可采用钉连接、螺栓连接、钢板螺栓连接、焊接等连接方式。防护结构的连接材料及验算宜考虑以下因素。

- 金属连接件及螺钉等宜进行防腐蚀处理或采用不锈钢产品。与生物质工程材料直接接触的金属连接件及螺钉等宜避免防腐剂引起的腐蚀。
- 防护结构用胶作为连接时,应符合结合部位的强度和耐候性的要求,应保证其胶合强度不低于竹(木)材及生物质工程材料顺纹抗剪和横纹抗拉的强度,并应符合环境保护的要求。
- 构件节点变形角度不宜大于 $2^\circ \sim 3^\circ$,并节点不宜进入弹塑性变形。
- 防护结构体系为框架结构体系,在进行内力分析时,梁柱连接宜采用刚接或铰接假定进行内力计算,并根据防护结构采用的材质,按附录 B 或附录 C 规定的相关方法进行验算。梁与柱的半刚性连接只具有有限的转动刚度,在承受弯矩的同时会产生相应的交角变化,在内力分析时,应预先确定连接的弯矩—转角特性曲线,以便考虑连接变形的影响。
- 连接件的安装宜通过分步安装,不宜将螺栓一次拧紧,重要承重构件采用双螺帽。减少因安装误差使构件产生应力。

5.5 起吊

机械装备防护结构应根据产品形状与质量设计起吊点,进行起吊验算。起吊加速度引起的超载按

公式(2)计算:

$$F_a = (G_1 + G_2)(1 + \alpha) \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中:

F_a ——起吊过载,单位为牛(N);

G_1 ——被吊货物的质量,单位为千克(kg);

G_2 ——防护结构质量,单位为千克(kg);

α ——加速度系数:按公式 $\alpha = \frac{a}{g}$ 计算,其中 a 为起吊加速度, g 为重力加速度。当 $\frac{a}{g} \leq 0.2$ 时,

取 0.2;当 $\frac{a}{g} > 0.2$ 时,按 $\alpha = \frac{a}{g}$ 计算。

5.6 转运与堆码

防护结构应能承受转运中路面的振动激励及堆码荷载。道路转运振动激励应根据转运道路条件、转运速度确定由道路不平度对转运工具产生的振动激励,转运振动相关计算方法见附录 D。

防护结构转运过程中应避免污损、浸水和暴晒,并注意防雨、防潮和防火。

对于大型或重型机械装备,应注明转运要求,包括行驶速度、路况、堆码和防护要求。

堆码应按 GB/T 5398—2016 中 6.6.5 规定的方法进行试验。

6 使用信息

防护结构包装储运的图示标志应符合 GB/T 191 的规定,并至少给出以下安全相关信息:

- a) 重心位置和/或起吊位置;
- b) 堆码层数;
- c) 防护结构安装信息;
- d) 贮存要求;
- e) 需要时,防水、防潮、防腐蚀要求;
- f) 需要时,采用符合 GB/T 41346.2 的拉紧装置。

附录 A

(规范性)

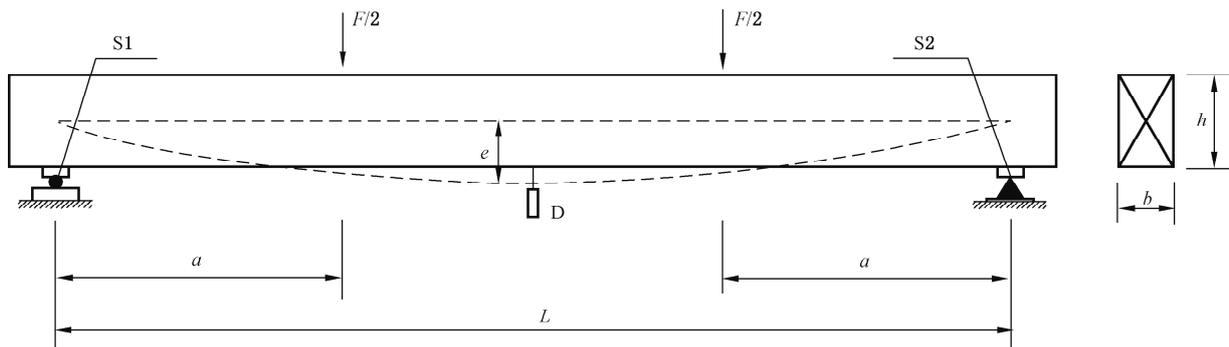
生物质工程材料构件和材料力学性能测试方法

A.1 足尺构件力学性能测试

A.1.1 足尺构件的抗弯强度及弹性模量测定

图 A.1 示出了试验装置和试件构型示意图。足尺梁试件截面为矩形，纵轴沿生物质工程材料顺纹方向。

抗弯试验采用两点施力(四点弯曲试验)，加力(即荷载)点施加的力等于 $F/2$ (F 为试验机作动端的力)，梁两端支座其中一端为滑动铰支座，允许梁产生垂直于跨度方向的转动和水平方向的位移，另一端支座只允许梁产生垂直于跨度方向的转动。加力点距离其最近支座距离相等，加力点之间的距离不小于 $6h$ ，加力点与最近支座之间的距离为 $4h \sim 7h$ (h 为梁截面高度)；加力点和支座处的轴承宽度应大于试件截面宽度，以防止梁和轴承接触处的高应力集中；为防止加力过程中试件受压边发生侧向偏转，应设置侧向约束，且侧向支撑不应限制加力方向上的位移。



标引序号说明：

- a —— 加力点距最近支座的距离，单位为毫米(mm)；
- b —— 试件宽度，单位为毫米(mm)；
- e —— 试件挠度，单位为毫米(mm)；
- h —— 试件高度，单位为毫米(mm)；
- F —— 试验机作动端的力，单位为牛(N)；
- L —— 两支座间跨距，单位为毫米(mm)；
- S1 —— 滑动支座(钢承压板)；
- S2 —— 铰支座(钢承压板)；
- D —— 位移计。

图 A.1 试验装置测试足尺试件抗弯性能示意图

为评估梁弯曲时的弹性模量 E_m ，首先确定荷载-挠度曲线线性段力的增量与挠度增量的比值 $\frac{\Delta F}{\Delta e}$ ，则静弯曲弹性模量 (E_m) 按公式(A.1)计算：

$$E_m = \frac{a}{4b h^3} \left(\frac{\Delta F}{\Delta e} \right) (3L^2 - 4a^2) \dots\dots\dots (A.1)$$

式中：

- E_m ——静弯曲弹性模量,单位为兆帕(MPa)；
- a ——加力点距最近支座的距离,单位为毫米(mm)；
- b ——试件宽度,单位为毫米(mm)；
- h ——试件高度,单位为毫米(mm)；
- ΔF ——荷载-挠度曲线线性段力的增量,单位为牛(N)；
- Δe ——荷载-挠度曲线线性段挠度的增量,单位为毫米(mm)；
- L ——两支座间跨距,单位为毫米(mm)。

测量在试验装置最大试验荷载的 10%~40%力(荷载)范围上试件的荷载-挠度曲线线性段力的增量与挠度的增量的比值 $\frac{\Delta F}{\Delta e}$,则抗弯强度(f_m)按公式(A.2)计算：

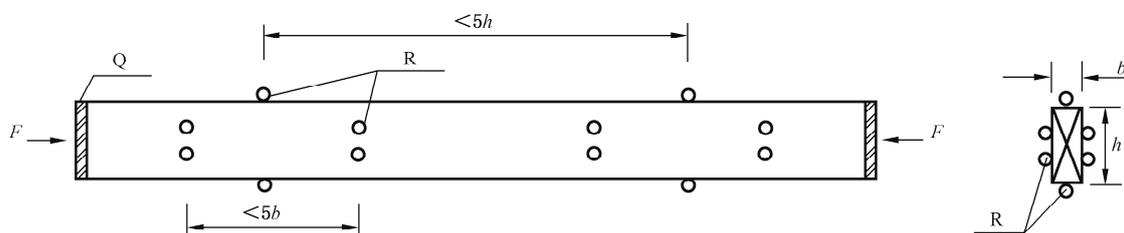
$$f_m = \frac{3F_u a}{bh^2} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

- f_m ——抗弯强度,单位为兆帕(MPa)；
- F_u ——试件破坏时的荷载值,单位为牛(N)。

A.1.2 足尺构件的顺纹抗压强度测定

图 A.2 示出了试验装置和试件构型示意图,两端施力点可自由转动。试件截面为矩形,纵轴应沿生物质工程材料顺纹方向。



标引序号说明：

- b ——试件宽度,单位为毫米(mm)；
- h ——试件高度,单位为毫米(mm)；
- F ——试验机作动端的力,单位为牛(N)；
- Q——钢承压板；
- R——横向约束。

图 A.2 试验装置测试足尺试件顺纹抗压强度示意图

试验时,应在试件纵轴方向布置间距不大于 $5h$ 的侧向约束;在试件横向布置间距不大于 $5b$ 的侧向约束。沿试件轴线施加力直至试件破坏,顺纹抗压强度($f_{c,0}$)按公式(A.3)计算：

$$f_{c,0} = \frac{F_{c,0,u}}{bh} \dots\dots\dots (A.3)$$

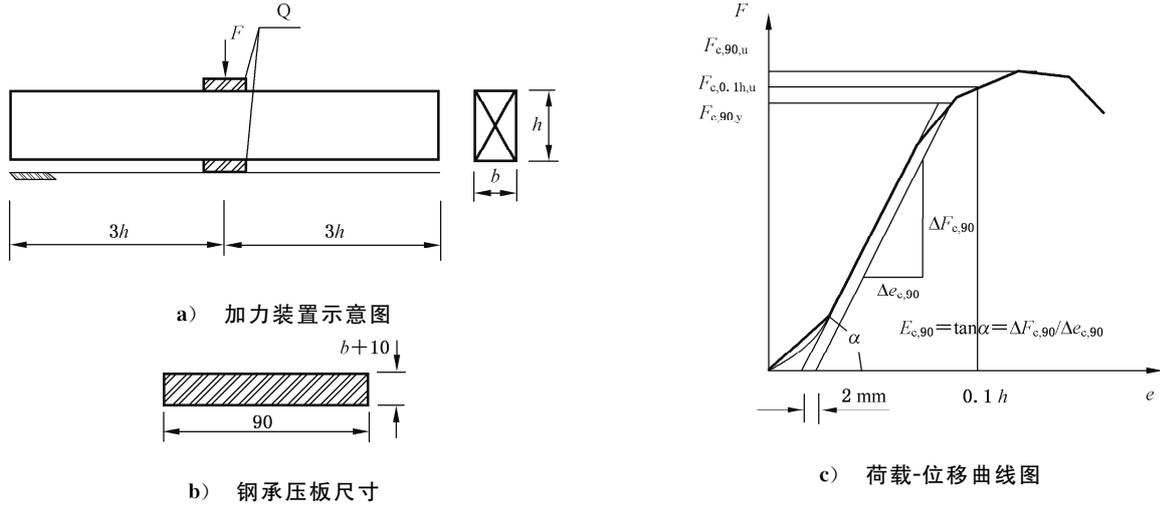
式中：

- $f_{c,0}$ ——顺纹抗压强度(足尺试件、小试件),单位为兆帕(MPa)；
- $F_{c,0,u}$ ——沿试件的顺纹方向轴向施加荷载直至其破坏时对应的荷载值,单位为牛(N)。

A.1.3 足尺构件的横纹抗压强度及弹性模量测定

图 A.3 示出了试验装置和试件构型示意图。试件截面为矩形，试验时施力轴线平行于生物质工程材料横纹方向。

加力点应设置承压板，其中，承压板长度为 90 mm、宽度为 $(b+10)$ mm， b 即为图 A.2 中的试件宽度 (b) 。试验装置施力压头不应相对其加力(荷载)轴线位移或转动，且图 A.3 a) 中的上、下承压板应平行，并与试件表面垂直。



标引序号说明：

- b —— 试件宽度，单位为毫米(mm)；
- h —— 试件高度，单位为毫米(mm)；
- $F_{c,90,u}$ —— 沿试件的横纹方向对试件施加荷载直至其破坏时对应的荷载值，单位为牛(N)；
- $F_{c,0.1h,u}$ —— 沿试件的横纹方向对试件施加荷载直至其施力变形达到 $0.1h$ 时对应的荷载值，单位为牛(N)；
- $F_{c,90,y}$ —— 横纹抗压屈服荷载，取荷载-位移曲线线性段偏移 2 mm 与原曲线交点处荷载值，单位为牛(N)；
- $\Delta F_{c,90}$ —— 沿试件的横纹方向进行施力试验过程中得到的荷载-变形曲线的线性段荷载的增量，单位为牛(N)；
- $\Delta e_{c,90}$ —— 沿试件的横纹方向进行施力试验过程中得到的荷载-变形曲线的线性段施力变形的增量，单位为毫米(mm)；
- $E_{c,90}$ —— 横纹抗压弹性模量，单位为兆帕(MPa)；
- α —— 沿试件的横纹方向进行施力试验过程中得到的荷载-变形曲线的线性段与水平方向的夹角，单位为度($^{\circ}$)；
- F —— 试验机作动端的力，单位为牛(N)；
- Q —— 钢承压板。

图 A.3 试验装置测试足尺试件横纹抗压强度及弹性模量示意图

测量和记录上、下两个承压板中心线间距的变化量，即为试件的变形，并得到如图 A.3 c) 所示的荷载-位移曲线。试验时，应沿试件的横纹方向施加荷载直至其破坏或其变形达到 $0.1h$ 为止，二者满足任一条件即可停止试验。如果试件在加力(荷载)过程中产生屈曲，则应设置侧向约束，防止侧向偏转。

试件横纹抗压强度 $(f_{c,90})$ 应依据试件破坏时的荷载值 $(F_{c,90,u})$ ，或试件受荷变形达到 $0.1h$ 时的荷载值 $(F_{c,0.1h,u})$ ，按公式(A.4)或公式(A.5)计算：

$$f_{c,90} = \frac{F_{c,90,u}}{90b} \dots\dots\dots (A.4)$$

或

$$f_{c,90} = \frac{F_{c,0.1h,u}}{90b} \dots\dots\dots (A.5)$$

式中：

$f_{c,90}$ ——横纹抗压强度(足尺试件、小试件),单位为兆帕(MPa)；

$F_{c,90,u}$ ——沿试件的横纹方向对试件施加荷载直至其破坏时对应的荷载值,单位为牛(N)；

$F_{c,0.1h,u}$ ——沿试件的横纹方向对试件施加荷载直至其施力变形达到 $0.1 h$ 时对应的荷载值,单位为牛(N)。

横纹屈服荷载对应的抗压强度($f_{c,90,y}$)按公式(A.6)计算：

$$f_{c,90,y} = \frac{F_{c,90,y}}{90b} \quad \dots\dots\dots (A.6)$$

式中：

$f_{c,90,y}$ ——横纹抗压屈服荷载对应的抗压强度(足尺试件),单位为兆帕(MPa)；

$F_{c,90,y}$ ——横纹抗压屈服荷载,取荷载-位移曲线线弹性段偏移 2 mm 与原曲线交点处荷载值,单位为牛(N)。

横纹抗压弹性模量($E_{c,90}$)按公式(A.7)计算：

$$E_{c,90} = \frac{\Delta F_{c,90} h}{\Delta e_{c,90} 90b} \quad \dots\dots\dots (A.7)$$

式中：

$E_{c,90}$ ——横纹抗压弹性模量,单位为兆帕(MPa)；

$\Delta F_{c,90}$ ——沿试件的横纹方向对试件进行施力试验,得到的荷载-变形曲线的线性段荷载的增量,单位为牛(N)；

$\Delta e_{c,90}$ ——沿试件的横纹方向进行施力试验过程中得到的荷载-变形曲线的线性段施力变形的增量,单位为毫米(mm)。

A.1.4 足尺构件的顺纹抗剪强度测定

A.1.4.1 梁的抗剪强度

本方法适用于测量生物质工程材料制的梁受横向荷载剪切状态下的顺纹剪切强度。图 A.4 示出了试验装置和试件构型示意图。两端支座处应设置承压板。承压板应有足够的宽度和长度,其宽度应不小于 b ,长度应不大于 h 。

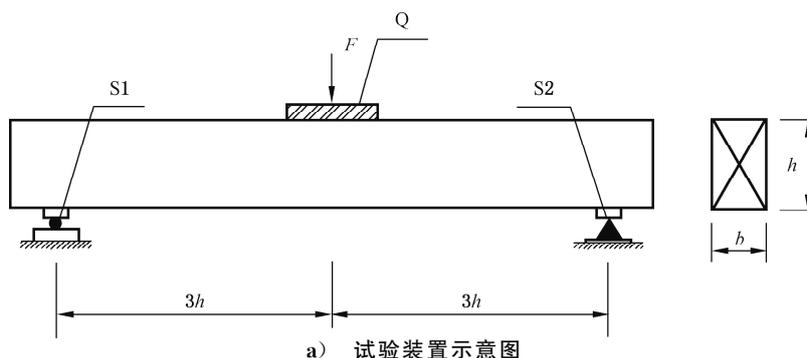
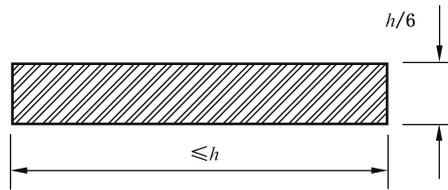


图 A.4 试验装置测量足尺试件顺纹抗剪强度示意图



b) 钢承压板尺寸

标引序号说明:

- b —— 试件宽度,单位为毫米(mm);
- h —— 试件高度,单位为毫米(mm);
- F —— 试验机作动端的力,单位为牛(N);
- S1 —— 滑动支座(钢承压板);
- S2 —— 铰支座(钢承压板);
- Q —— 钢承压板。

图 A.4 试验装置测量足尺试件顺纹抗剪强度示意图 (续)

试验时,试验装置如图 A.4 所示对试件施加试验荷载直至使其破坏为止。横纹抗剪强度($f_{c,v}$)按公式(A.8)计算:

$$f_{c,v} = \frac{0.75 F_{c,u}}{bh} \dots\dots\dots (A.8)$$

式中:

- $f_{c,v}$ —— 横纹抗剪强度,单位为兆帕(MPa);
- $F_{c,u}$ —— 沿试件横纹方向施加试验荷载(如图 A.4 所示)直至试件被剪切破坏时对应的荷载值,单位为牛(N)。

A.1.4.2 界面抗剪强度

图 A.5 示出了试验装置和试件构型示意图。采用两轨测试法测量顺纹界面抗剪强度。试件尺寸为 $b \times h \times L = (32 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}) \times (55 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}) \times (300 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm})$ 。两侧钢板厚度应不小于 10 mm,对于刚度较大的试件,厚度可在一定范围内增加。检查试件各表面,确保相邻面互相垂直,相对面互相平行。

安装试件时确保试验装置的施力轴线与试件纵轴线之间的夹角为 14° ,如图 A.5 所示。试验装置以位移控制模式均匀施加荷载,且应在 $5 \text{ min} \pm 2 \text{ min}$ 内达到使试件破坏的荷载值($f_{c,14v}$)。应记录每个被测试件的破坏时间,并应标注破坏时间与规定试验时间 $5 \text{ min} \pm 2 \text{ min}$ 的偏差超过 2 min 的试件。

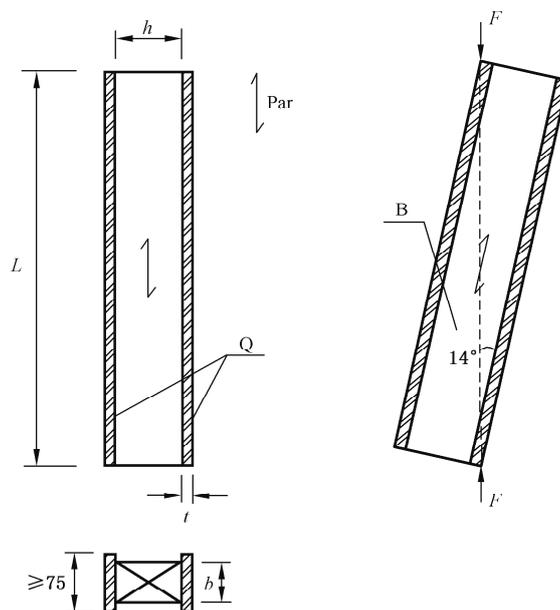
若破坏发生于试件与钢胶合界面处,且该区域面积小于整体破坏区域的 20% 时,则试验结果有效,否则,试验结果无效。

试件顺纹界面抗剪强度($f_{c,14v}$)按公式(A.9)计算:

$$f_{c,14v} = \frac{F_{c,14v} \cos 14^\circ}{L_{c,14v} b} \dots\dots\dots (A.9)$$

式中:

- $f_{c,14v}$ —— 材料顺纹抗剪强度(足尺试件、胶合界面),单位为兆帕(MPa);
- $F_{c,14v}$ —— 在施力轴线与试件纵轴线呈 14° 施力条件下,试件破坏时对应的荷载值,单位为牛(N);
- $L_{c,14v}$ —— 两支座间跨距,单位为毫米(mm)。



标引序号说明：

- b* —— 试件宽度,单位为毫米(mm);
- h* —— 试件高度,单位为毫米(mm);
- L* —— 试件长度,单位为毫米(mm);
- t* —— 钢承压板厚度,单位为毫米(mm);
- F* —— 试验机作动端的力,单位为牛(N);
- Par —— 纤维方向;
- B —— 竹材试件;
- Q —— 钢承压板。

图 A.5 试验装置测量带胶合钢板足尺试件顺纹界面抗剪强度示意图

A.2 材料力学性能测定(小试件)

A.2.1 材料顺纹抗拉强度和弹性模量测定

材料顺纹拉伸试件如图 A.6 所示。进行拉伸试验时,应确保试验装置的拉力轴线与试件顺纹方向一致,并应以 1 mm/min 的速度匀速施加试验力(荷载),测量试件中部 10 mm 范围内的拉伸应变和拉伸试件时刻对应的实际拉力值。

材料顺纹抗拉强度及顺纹拉伸弹性模量应分别按公式(A.10)和公式(A.11)计算:

$$f_{t,0} = \frac{F_{t,0,u}}{A_{t,0}} \dots\dots\dots (A.10)$$

式中:

- $f_{t,0}$ —— 材料顺纹抗拉强度,单位为兆帕(MPa);
- $F_{t,0,u}$ —— 沿顺纹方向拉伸试件直至其破坏时对应的实际拉力,单位为牛(N);
- $A_{t,0}$ —— 顺纹拉伸试件的横截面面积,单位为平方毫米(mm²)。

$$E_{t,0} = \frac{\Delta\sigma_{t,0}}{\Delta\varepsilon_{t,0}} \dots\dots\dots (A.11)$$

式中：

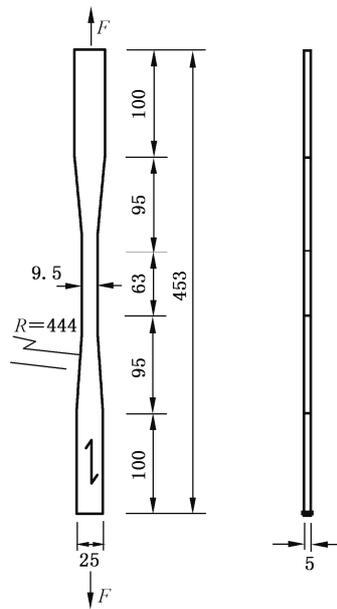
$E_{t,0}$ ——材料顺纹拉伸弹性模量，单位为兆帕(MPa)；

$\Delta\sigma_{t,0}$ ——材料顺纹拉应力增量， $\Delta\sigma_{t,0} = \frac{\Delta F_{t,0}}{A_{t,0}}$ ；

$\Delta F_{t,0}$ ——材料顺纹拉伸试验的拉力增量，单位为牛(N)；

$\Delta\varepsilon_{t,0}$ ——材料顺纹拉伸试验的拉应变增量。

单位为毫米



标引序号说明：

F ——试验机作动端的力，单位为牛(N)；

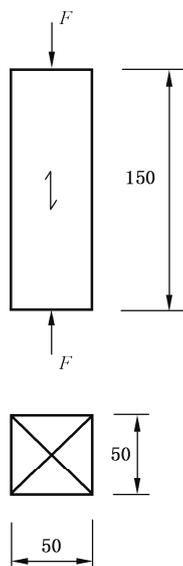
R ——试件圆弧半径，单位为毫米(mm)。

图 A.6 顺纹拉伸试件

A.2.2 材料顺纹抗压强度和压缩弹性模量测定

材料顺纹压缩试件如图 A.7 所示。进行压缩试验时，应使试验装置的压缩力轴线与试件顺纹方向一致，并应以1.5 mm/min的速度匀速施加试验力，测量试件中部 10 mm 范围内的压缩应变和压断试件时刻对应的实际压缩力值。

单位为毫米



标引序号说明:

 F ——试验机作动端的力,单位为牛(N)。

图 A.7 顺纹压缩试件尺寸示意图

材料顺纹抗压强度和压缩弹性模量应分别按公式(A.12)和公式(A.13)计算:

$$f_{c,0} = \frac{F_{c,0,u}}{A_{c,0}} \quad \dots\dots\dots (A.12)$$

式中:

 $f_{c,0}$ ——材料顺纹抗压强度(足尺试件、小试件),单位为兆帕(MPa); $F_{c,0,u}$ ——沿顺纹方向压缩试件直至其破坏时对应的实际压缩力,单位为牛(N); $A_{c,0}$ ——顺纹压缩试件的横截面面积,单位为平方毫米(mm²)。

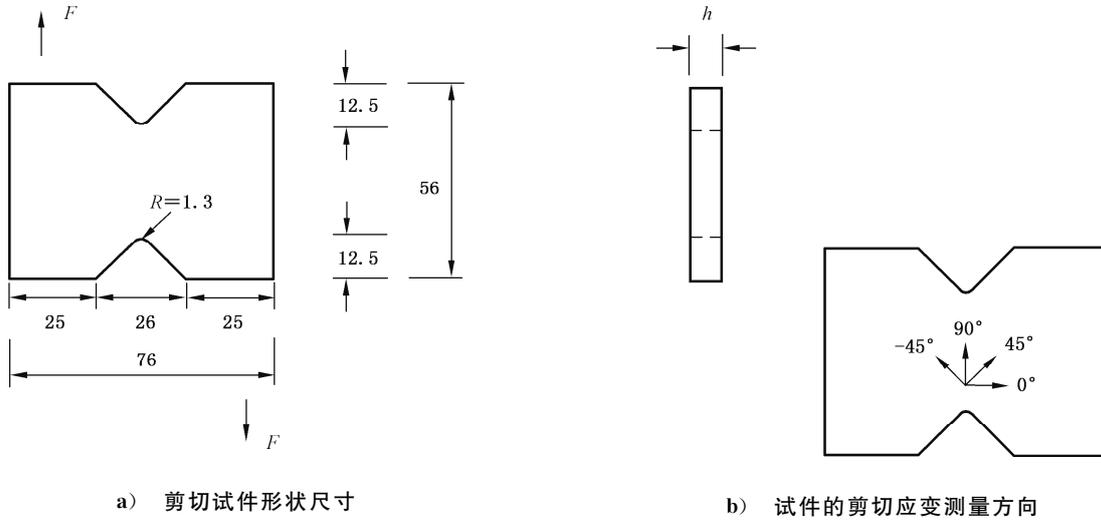
$$E_{c,0} = \frac{\Delta\sigma_{c,0}}{\Delta\varepsilon_{c,0}} \quad \dots\dots\dots (A.13)$$

式中:

 $E_{c,0}$ ——材料顺纹压缩弹性模量,单位为兆帕(MPa); $\Delta\sigma_{c,0}$ ——材料顺纹压应力增量, $\Delta\sigma_{c,0} = \frac{\Delta F_{c,0}}{A_{c,0}}$; $\Delta F_{c,0}$ ——材料顺纹压缩试验的压缩力增量,单位为牛(N); $\Delta\varepsilon_{c,0}$ ——材料顺纹压缩试验的压缩应变增量。

A.2.3 材料顺纹抗剪强度和剪切模量测定

材料顺纹剪切试件如图 A.8 所示,进行剪切试验时,应使试验装置的加力(荷载)方向与试件顺纹方向一致,并应以 1 mm/min 的速度匀速施加试验力直至试件破坏。测量试验中部 10 mm×10 mm 范围内的剪切应变和剪断试件时刻对应的实际剪切力值。



标引序号说明：

h —— 试件高度，单位为毫米(mm)；

F —— 试验机作动端的力，单位为牛(N)。

图 A.8 抗剪试件示意图

材料顺纹抗剪强度和横纹抗剪强度分别按公式(A.14)和公式(A.15)计算：

$$f_{s,0} = \frac{F_{s,0,u}}{A_{s,0}} \dots\dots\dots (A.14)$$

式中：

$f_{s,0}$ —— 材料顺纹抗剪强度(小试件)，单位为兆帕(MPa)；

$F_{s,0,u}$ —— 沿试件顺纹方向剪切试件直至其破坏时对应的实际剪切力，单位为牛(N)；

$A_{s,0}$ —— 顺纹剪切试件的横截面面积，单位为平方毫米(mm²)。

$$F_{s,90} = \frac{F_{s,90,u}}{A_{s,90}} \dots\dots\dots (A.15)$$

式中：

$F_{s,90}$ —— 材料横纹抗剪强度(小试件)，单位为兆帕(MPa)；

$F_{s,90,u}$ —— 沿试件横纹方向剪切试件直至其破坏时对应的实际剪切力，单位为牛(N)；

$A_{s,90}$ —— 横纹剪切试件的横截面面积，单位为平方毫米(mm²)。

材料顺纹剪切模量和横纹剪切模量分别按公式(A.16)和公式(A.17)计算：

$$G_0 = \frac{\Delta F_{s,0}}{A_{s,0} (|\Delta\epsilon_{+45^\circ}| + |\Delta\epsilon_{-45^\circ}|)} \dots\dots\dots (A.16)$$

式中：

G_0 —— 材料顺纹剪切模量，单位为兆帕(MPa)；

$\Delta F_{s,0}$ —— 材料顺纹剪切试验中剪切力增量，单位为牛(N)；

$\Delta\epsilon_{+45^\circ}$ —— 剪切试验中得到的+45°方向剪切应变值；

$\Delta\epsilon_{-45^\circ}$ —— 剪切试验中得到的-45°方向剪切应变值。

$$G_{90} = \frac{\Delta F_{s,90}}{A_{s,90} (|\Delta\epsilon_{+45^\circ}| + |\Delta\epsilon_{-45^\circ}|)} \dots\dots\dots (A.17)$$

式中：

G_{90} —— 材料横纹剪切模量，单位为兆帕(MPa)；

$\Delta F_{s,90}$ —— 材料横纹剪切试验中剪切力增量，单位为牛(N)。

为防止试件安装不善导致的偏转效应,宜采集试件的双侧应变,当工程剪切应变为 0.004 时,计算每侧的剪切模量 G_a 和 G_b ,若两侧剪切模量相差大于 3%,宜及时检查偏转原因并纠正。

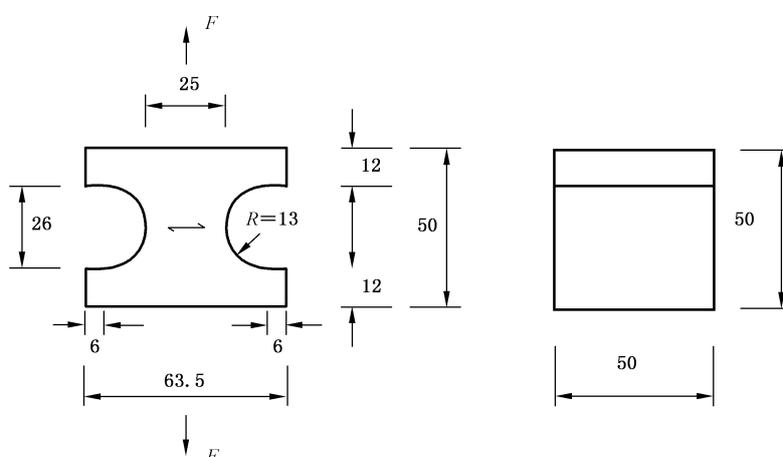
为计算剪切模量 G_0 或 G_{90} ,剪切力增量和剪切变形增量宜在剪切力-变形曲线线性段中最大剪切力的 10%~40% 范围选取。

A.2.4 材料横纹抗拉强度和弹性模量测定

材料横纹拉伸试件如图 A.9 所示。进行拉伸试验时,应确保试验装置的拉力轴线与试件的纤维方向垂直,并应以 1 mm/min 的速度匀速施加试验力,测量试件中部 10 mm 范围内的拉伸应变和拉断试件时刻对应的实际拉力值。

注:试件破坏位置不在中间截面的试件试验结果无效。

单位为毫米



标引序号说明:

F ——试验机作动端的力,单位为牛(N)。

图 A.9 材料横纹拉伸试件示意图

材料横纹抗拉强度和横纹抗拉弹性模量应分别按公式(A.18)和公式(A.19)计算:

$$f_{t,90} = \frac{F_{t,90,u}}{A_{t,90}} \quad \dots\dots\dots (A.18)$$

式中:

$f_{t,90}$ ——材料横纹抗拉强度(小试件),单位为兆帕(MPa);

$F_{t,90,u}$ ——沿与横纹拉伸试件纤维方向垂直的方向拉伸试件直至其破坏时对应的实际拉力,单位为牛(N);

$A_{t,90}$ ——横纹拉伸试件的横截面面积,单位为平方毫米(mm^2)。

$$E_{t,90} = \frac{\Delta\sigma_{t,90}}{\Delta\epsilon_{t,90}} \quad \dots\dots\dots (A.19)$$

式中:

$E_{t,90}$ ——材料横纹拉伸弹性模量,单位为兆帕(MPa);

$\Delta\sigma_{t,90}$ ——材料横纹拉应力增量, $\Delta\sigma_{t,90} = \frac{\Delta F_{t,90}}{A_{t,90}}$;

$\Delta F_{t,90}$ ——材料横纹拉伸试验的拉力增量,单位为牛(N);

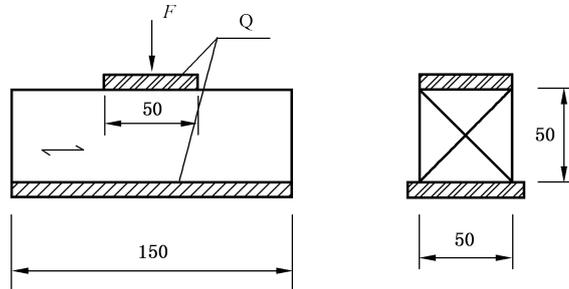
$\Delta\epsilon_{t,90}$ ——材料横纹拉伸试验的拉应变增量。

A.2.5 材料横纹抗压强度和压缩弹性模量测定

横纹压缩试件如图 A.10 所示。进行压缩试验时,应使试验装置的压缩力轴线与试件纤维方向垂

直,试验力(F)应通过宽度为 50 mm 的金属承压板,以 1.5 mm/min 的速度匀速施加,测量试件中部 10 mm 范围内的压缩应变和压断试件时刻对应的实际压缩力值。

单位为毫米



标引序号说明:

F —— 试验机作动端的力,单位为牛(N);

Q —— 钢承压板。

图 A.10 横纹压缩试件示意图

材料横纹抗压强度和横纹压缩弹性模量应分别按公式(A.20)和公式(A.21)计算:

$$f_{c,90} = \frac{F_{c,90,u}}{A_{c,90}} \dots\dots\dots (A.20)$$

式中:

$f_{c,90}$ —— 材料(足尺试件、小试件)横纹抗压强度,单位为兆帕(MPa);

$F_{c,90,u}$ —— 沿横纹方向压缩试件直至其破坏时对应的实际压缩力,单位为牛(N);

$A_{c,90}$ —— 横纹压缩试件的横截面面积,单位为平方毫米(mm^2)。

$$E_{c,90} = \frac{\Delta\sigma_{c,90}}{\Delta\epsilon_{c,90}} \dots\dots\dots (A.21)$$

式中:

$E_{c,90}$ —— 材料横纹压缩弹性模量,单位为兆帕(MPa);

$\Delta\sigma_{c,90}$ —— 材料横纹压应力增量, $\Delta\sigma_{c,90} = \frac{\Delta F_{c,90}}{A_{c,90}}$;

$\Delta F_{c,90}$ —— 材料横纹压缩试验的压缩力增量,单位为牛(N);

$\Delta\epsilon_{c,90}$ —— 材料横纹压缩试验的压缩应变增量。

附录 B
(规范性)
钢构件强度与稳定性验算

B.1 概述

钢材受力构件的截面分为实腹式与格构式两类,其中实腹式又分型钢截面(包括普通型钢与薄壁型钢),组合截面(钢板组合与型钢组合截面);格构式截面又分缀条式截面与缀板式截面。机械装备防护结构一般采用实腹式型钢构件。

B.2 受弯构件的强度与稳定性验算

B.2.1 在主平面内受弯的实腹构件,其受弯强度应按公式(B.1)验算:

$$\frac{M_x}{\gamma_x W_{nx}} + \frac{M_y}{\gamma_y W_{ny}} \leq f \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

M_x 、 M_y ——同一截面处绕 x 轴和 y 轴的弯矩设计值,单位为牛毫米(N·mm);

W_{nx} 、 W_{ny} ——对 x 轴和 y 轴的净截面模量,当截面板件宽厚比等级为 S1、S2、S3 或 S4 级时,应取全截面模量,当截面板件宽厚比等级为 S5 级时,应取有效截面模量,均匀受压翼缘有效外伸宽度可取 15,腹板有效截面可按 GB 50017—2017 中 8.4.2 的规定选用,单位为立方毫米(mm³);

γ_x 、 γ_y ——截面塑性发展系数,应按 GB 50017—2017 中 6.1.2 的规定取值;

f ——钢材的抗弯强度设计值,单位为牛每平方米(N/mm²)。

B.2.2 在主平面内受弯的实腹构件,受剪强度应按公式(B.2)验算:

$$\tau = \frac{VS}{It_w} \leq f_v \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

τ ——构建受剪强度,单位为兆帕(MPa);

V ——计算截面沿腹板平面作用的剪力设计值,单位为牛(N);

S ——计算剪应力处以上(或以下)毛截面对中和轴的面积矩,单位为立方毫米(mm³);

I ——构件的毛截面惯性矩,单位为四次方毫米(mm⁴);

t_w ——构件的腹板厚度,单位为毫米(mm);

f_v ——钢材的抗剪强度设计值,单位为牛每平方米(N/mm²)。

B.2.3 当受弯构件受到集中荷载时,应在该荷载处设置支承加劲肋,加劲肋厚度不小于构件最小厚度值。受弯构件支座处,还应在该处设置同样要求的加劲肋。

B.2.4 防护结构受弯构件的整体稳定性,可通过在构件的受压翼缘上铺设板材,并与其牢固相连,能阻止构件受压翼缘的侧向位移,或在构件的侧向设置横撑,横撑间距不大于 2 倍受弯构件的高度,能阻止受弯构件的侧向位移,即可不计算受弯构件的整体稳定性。

B.2.5 受弯构件的支座处应采取构造措施,以防止其端截面的扭转。

B.2.6 受弯构件的变形可以通过增加支撑,避免变形超过受弯构件的限值,即跨度的 1/250。

B.3 轴心受拉、受压构件的强度与稳定性验算

B.3.1 轴心受拉构件,当端部连接及中部拼接处组成截面的各板件都有连接件直接传力时,其截面强度验算规定如下。

- a) 除采用高强度螺栓摩擦型连接者外,若发生毛截面屈服,其截面强度应采用公式(B.3)进行验算:

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq f \quad \dots\dots\dots(B.3)$$

式中:

- σ ——毛截面屈服强度,单位为兆帕(MPa);
- N ——所计算截面处的拉力设计值,单位为牛(N);
- f ——钢材的抗拉强度设计值,单位为牛每平方米(N/mm²);
- A ——构件的毛截面面积,单位为平方毫米(mm²)。

若发生净截面断裂,净截面断裂采用公式(B.4)进行验算:

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq 0.75f \quad \dots\dots\dots(B.4)$$

- b) 采用高强度螺栓摩擦型连接的构件,其截面强度验算应符合下列规定:

- 1) 当构件为沿全长都有排列较密螺栓的组合构件时,其截面强度应按公式(B.5)计算:

$$\frac{N}{A_n} \leq f \quad \dots\dots\dots(B.5)$$

式中:

A_n ——构件的净截面面积,当构件多个截面有孔时,取最不利的截面,单位为平方毫米(mm²);

- 2) 除 1) 的情况外,其毛截面强度计算应采用公式(B.3),净截面断裂应按公式(B.6)计算:

$$\sigma = \left(1 - 0.5 \frac{n_1}{n}\right) \frac{N}{A_n} \leq 0.7f_u \quad \dots\dots\dots(B.6)$$

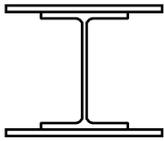
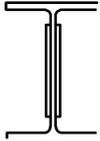
式中:

- f_u ——钢材的抗拉强度最小值,单位为牛每平方米(N/mm²);
- n ——在节点或拼接处,构件一端连接的高强度螺栓数目;
- n_1 ——所计算截面(最外列螺栓处)上高强度螺栓数目。

B.3.2 轴心受压构件,当端部连接及中部拼接处组成截面的各板件都有连接件直接传力时,截面强度应按公式(B.3)验算。但含有虚孔的构件尚需在孔心所在截面按公式(B.4)验算。

B.3.3 轴心受拉构件和轴心受压构件,当其组成板件在节点或拼接处并非全部直接传力时,应对危险截面的面积乘以有效截面系数,不同构件截面形式和连接方式的值见表 B.1。

表 B.1 轴心受力构件节点或拼接处危险截面有效截面系数

构件截面形式	连接形式	有效截面系数 η	图例
角钢	单边连接	0.85	
工字形、H形	翼缘连接	0.90	
	腹板连接	0.70	

B.3.4 除可考虑屈服后强度的实腹式构件外,轴心受压构件的稳定性宜采用公式(B.7)计算:

$$\frac{N}{\varphi Af} \leq 1.0 \quad \dots\dots\dots (B.7)$$

式中:

φ ——轴心受压构件的稳定系数(取截面两主轴稳定系数中的较小者),需考虑构件的长细比(或换算长细比)、钢材屈服强度和截面分类等因素,见 GB 50017—2017。

B.3.5 轴心受压构件为 H 形、工字形和箱形截面时,宜沿高度方向布置加劲肋,H 型、工字型加劲肋在腹板两侧对称布置,厚度不小于 0.75 倍腹板厚度,加劲肋间距不大于 2 倍横截面最小尺寸的腹板。或增加柱间支撑,支撑处布置加劲肋。

B.4 拉弯、压弯构件的强度与稳定性验算

B.4.1 弯矩作用在两个主平面内的拉弯构件和压弯构件。

除圆管截面外,弯矩作用在两个主平面内的拉弯构件和压弯构件,其截面强度宜采用公式(B.8)验算:

$$\frac{N}{A_n} \pm \frac{M_x}{\gamma_x W_{nx}} \pm \frac{M_y}{\gamma_y W_{ny}} \leq f \quad \dots\dots\dots (B.8)$$

式中:

N ——同一截面处轴心压力设计值,单位为牛(N);

M_x 、 M_y ——分别为同一截面处对 x 轴和 y 轴的弯矩设计值,单位为牛毫米(N·mm);

W_{nx} 、 W_{ny} ——对 x 轴和 y 轴的净截面模量,单位为立方毫米(mm³);

γ_x 、 γ_y ——截面塑性发展系数,根据其受压板件的内力分布情况确定其截面板件宽厚比等级,当截面板件宽厚比等级不符合 S3 级要求时取 1.0,符合 S3 级要求时,可从 GB 50017—2017 中表 8.1.1 选取;需要验算疲劳强度的拉弯、压弯构件,宜取 1.0;

A_n ——构件的净截面面积,单位为平方毫米(mm²)。

B.4.2 压弯构件的稳定性验算如下。

a) 除圆管截面外,弯矩作用在对称轴平面内的实腹式压弯构件,弯矩作用平面内稳定性宜采用公式(B.9)验算,通过设置柱间支撑、横向支撑等,避免弯矩作用下的平面外稳定性问题。防护结构不宜采用单轴对称压弯构件。

$$\frac{N}{\varphi_x Af} + \frac{\beta_{mx} M_x}{\gamma_x W_{1x} (1 - 0.8N/N'_{Ex}) f} \leq 1.0 \quad \dots\dots\dots (B.9)$$

式中:

N ——所计算构件范围内轴心压力设计值,单位为牛(N);

φ_x ——弯矩作用平面内轴心受压构件稳定系数;

M_x ——所计算构件段范围内的最大弯矩设计值,单位为牛毫米(N·mm);

W_{1x} ——在弯矩作用平面内对受压最大纤维的毛截面模量,单位为立方毫米(mm³);

β_{mx} ——等效弯矩系数,见 GB 50017—2017 中 8.2;

N'_{Ex} ——参数,单位为毫米(mm),参数的计算见公式(B.10):

$$N'_{Ex} = \pi^2 EA / (1.1\lambda_x^2) \quad \dots\dots\dots (B.10)$$

E ——构件的弹性模量,单位为兆帕(MPa);

A ——构件的截面面积,单位为平方毫米(mm²);

λ_x ——构件对截面主轴 x 的长细比,即计算长度与截面的回转半径之比。

b) 弯矩作用在两个主平面内的双轴对称实腹式工字形和箱形截面的压弯构件,其稳定性宜采用公式(B.11)~公式(B.13)验算:

$$\frac{N}{\varphi_x A f} + \frac{\beta_{mx} M_x}{\gamma_x W_x (1 - 0.8N/N'_{Ex}) f} + \eta \frac{\beta_{ty} M_y}{\varphi_{by} W_y f} \leq 1.0 \quad \dots\dots\dots (B.11)$$

式中：

- φ_x ——对强轴 $x-x$ 的轴心受压构件整体稳定系数；
- φ_{by} ——均匀弯曲的受弯构件整体稳定性系数。该系数的计算见 GB 50017—2017 中附录 C, 其中工字形截面的非悬臂构件 φ_{bx} 的确定见 GB 50017—2017 中 C.0.5。 φ_{by} 可取为 1.0; 对闭合截面, 取 $\varphi_{bx} = \varphi_{by} = 1.0$;
- M_x 、 M_y ——所计算构件段范围内对强轴和弱轴的最大弯矩设计值, 单位为牛毫米 (N·mm);
- W_x 、 W_y ——对强轴和弱轴的毛截面模量, 单位为立方毫米 (mm³);
- β_{mx} ——等效弯矩系数, 宜考虑 GB 50017—2017 中 8.2.1 弯矩作用在平面内的稳定计算有关规定;
- β_{ty} ——等效弯矩系数, 宜考虑 GB 50017—2017 中 8.2.1 弯矩作用在平面内的稳定计算有关规定。

$$\frac{N}{\varphi_y A f} + \eta \frac{\beta_{tx} M_x}{\varphi_{bx} W_x f} + \frac{\beta_{my} M_y}{\gamma_y W_y (1 - 0.8N/N'_{Ey}) f} \leq 1.0 \quad \dots\dots\dots (B.12)$$

式中：

- φ_y ——对弱轴 $y-y$ 的轴心受压构件整体稳定系数；
- φ_{bx} ——均匀弯曲的受弯构件整体稳定性系数。该系数的计算见 GB 50017—2017 中附录 C, 其中工字形截面的非悬臂构件 φ_{bx} 的确定见 GB 50017—2017 中 C.0.5。 φ_{by} 可取为 1.0; 对闭合截面, 取 $\varphi_{bx} = \varphi_{by} = 1.0$;
- M_x 、 M_y ——所计算构件段范围内对强轴和弱轴的最大弯矩设计值, 单位为牛毫米 (N·mm);
- W_x 、 W_y ——对强轴和弱轴的毛截面模量, 单位为立方毫米 (mm³);
- β_{my} ——等效弯矩系数, 宜考虑 GB 50017—2017 中 8.2.1 弯矩作用在平面内的稳定计算有关规定;
- β_{tx} ——等效弯矩系数, 宜考虑 GB 50017—2017 中 8.2.1 弯矩作用在平面内的稳定计算有关规定;
- N'_{Ey} ——参数, 单位为毫米 (mm), 参数的计算见公式 (B.13):

$$N'_{Ey} = \pi^2 EA / (1.1\lambda_y^2) \quad \dots\dots\dots (B.13)$$

式中：

- E ——构件的弹性模量, 单位为兆帕 (MPa);
- A ——构件的截面面积, 单位为平方毫米 (mm²);
- λ_y ——构件对截面主轴 y 的长细比, 即计算长度与截面的回转半径之比。

附录 C

(规范性)

生物质工程材料构件强度与稳定性验算

C.1 轴心受拉和轴心受压构件

C.1.1 轴心受拉构件的承载能力,应按公式(C.1)验算:

$$\frac{N}{A_n} \leq f_t \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

式中:

 f_t ——材料顺纹抗拉强度设计值,单位为牛每平方米(N/mm²); N ——轴心受拉构件拉力设计值,单位为牛(N); A_n ——受拉构件的净截面面积,单位为平方毫米(mm²)。计算 A_n 时应扣除分布在 150 mm 长度上的缺孔投影面积。

C.1.2 轴心受压构件的承载能力,应按公式(C.2)和公式(C.3)验算:

a) 按强度验算:

$$\frac{N}{A_n} \leq f_c \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

b) 按稳定验算:

$$\frac{N}{\varphi A_n} \leq f_c \quad \dots\dots\dots (C.3)$$

式中:

 f_c ——材料顺纹抗压强度设计值,单位为牛每平方米(N/mm²); N ——轴心受压构件压力设计值,单位为牛(N); A_n ——受压构件的净截面面积,单位为平方毫米(mm²); φ ——轴心受压构件稳定系数,按 0.6 计算(长细比不超过 75,超过 75 宜通过采用增加斜撑、横撑等措施提高受压构件稳定性)。

C.1.3 不论构件截面上有无缺口,构件的长细比均应按公式(C.4)和公式(C.5)验算:

$$\lambda = \frac{l_0}{i} \quad \dots\dots\dots (C.4)$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad \dots\dots\dots (C.5)$$

式中:

 l_0 ——受压构件的计算长度(mm),应按实际长度乘以下系数:

- 两端铰接:1.0;
- 一端固定,一端自由:2.0;
- 一端固定,一端铰接:0.8;

 i ——构件截面的回转半径,单位为毫米(mm); I ——构件的全截面惯性矩,单位为四次方毫米(mm⁴); A ——构件的全截面面积,单位为平方毫米(mm²)。

防护结构的受压构件的长细比不宜大于 1/250。

C.2 受弯构件

C.2.1 受弯构件抗弯承载能力,应按公式(C.6)验算:

$$\frac{M}{W_n} \leq f_m \quad \dots\dots\dots(C.6)$$

式中:

f_m ——材料抗弯强度设计值,单位为牛每平方米(N/mm²);

M ——受弯构件弯矩设计值,单位为牛毫米(N·mm);

W_n ——受弯构件的净截面抵抗矩,单位为立方毫米(mm³)。

防护结构的受弯构件的高宽比不宜超过4,以避免构件的失稳。

C.2.2 受弯构件的抗剪承载能力,应按公式(C.7)验算:

$$\frac{VS}{Ib} \leq f_v \quad \dots\dots\dots(C.7)$$

式中:

f_v ——材料顺纹抗剪强度设计值,单位为牛每平方米(N/mm²);

V ——受弯构件剪力设计值,单位为牛(N);

I ——构件的全截面惯性矩,单位为四次方毫米(mm⁴);

b ——构件的截面宽度,单位为毫米(mm);

S ——剪切面以上截面对中性轴面积矩,单位为立方毫米(mm³)。

C.2.3 对有变形控制要求的防护结构,应对其受弯构件的挠度按公式(C.8)进行验算:

$$\omega \leq [\omega] \quad \dots\dots\dots(C.8)$$

式中:

$[\omega]$ ——受弯构件的挠度限值,单位为毫米(mm),一般可取构件长度的1/150;

ω ——构件按荷载效应的标准组合计算的挠度,单位为毫米(mm)。

C.3 拉弯构件和压弯构件

C.3.1 拉弯构件的承载能力,应按公式(C.9)验算:

$$\frac{N}{A_n f_t} + \frac{M}{W_n f_m} \leq 1 \quad \dots\dots\dots(C.9)$$

式中:

N ——轴向拉力设计值,单位为牛(N);

M ——弯矩设计值,单位为牛毫米(N·mm);

A_n ——构件净截面面积,单位为平方毫米(mm²);

W_n ——净截面抵抗矩,单位为平方毫米(mm²);

f_t ——木材顺纹抗拉强度设计值,单位为牛每平方米(N/mm²);

f_m ——木材顺纹抗弯强度设计值,单位为牛每平方米(N/mm²)。

C.3.2 压弯构件及偏心受压构件的承载能力,应按公式(C.10)和公式(C.11)验算:

a) 按强度验算

$$\frac{N}{A_n f_t} + \frac{M}{W_n f_m} \leq 1$$

$$M = N e_o + M_o \quad \dots\dots\dots(C.10)$$

b) 稳定验算

$$\frac{N}{\varphi \varphi_m A_o} \leq f_c \quad \dots\dots\dots(C.11)$$

$$\varphi_m = (1 - K)^2 (1 - kK)$$

$$K = \frac{Ne_0 + M_0}{Wf_m \left(1 + \sqrt{\frac{N}{Af_c}}\right)}$$

$$k = \frac{Ne_0}{Ne_0 + M_0}$$

式中:

- φ 、 A_0 ——轴心受压构件的稳定系数、计算面积,面积单位为平方毫米(mm^2);
- φ_m ——轴向力和初始弯矩共同作用的折减系数;
- N ——轴向压力设计值,单位为牛(N);
- M_0 ——横向荷载作用下跨中最大初始弯矩设计值,单位为牛毫米($\text{N} \cdot \text{mm}$);
- e_0 ——构件的初始偏心距,单位为毫米(mm);
- f_t ——木材顺纹抗拉强度设计值,单位为牛每平方毫米(N/mm^2);
- f_m ——木材顺纹抗弯强度设计值,单位为牛每平方毫米(N/mm^2)。

C.3.3 当需验算压弯构件或偏心受压构件弯矩作用平面外的侧向稳定性时,应按公式(C.12)验算:

$$\frac{N}{\varphi_y A_0 f_c} + \left(\frac{M}{\varphi_l W f_m}\right) \leq 1 \quad \dots\dots\dots (\text{C.12})$$

式中:

- φ_y ——轴心压杆在垂直于弯矩作用平面 y - y 方向按长细比(λ_y)确定的轴心压杆稳定系数;
- φ_l ——受弯构件的侧向稳定系数;
- N ——轴向拉力设计值,单位为牛(N);
- M ——弯矩设计值,单位为牛毫米($\text{N} \cdot \text{mm}$)。
- W ——构件全截面抵抗矩,单位为平方毫米(mm^2)。

附 录 D
(资料性)
转运振动

D.1 道路转运振动激励宜根据转运道路条件、转运速度确定由道路不平度对转运工具产生的振动激励。

D.2 转运振动分析时,宜取不小于 100 m 的典型路段,按照车辆运行最大限速计算转运道路不平度空间函数。公路道路不平度功率谱密度宜按照 GB/T 7031 选取,取值见表 D.1。

表 D.1 公路道路不平度功率谱密度

单位为立方米

路面等级	$G_d(n_0)^a$		
	下限	几何平均	上限
A	—	16×10^{-6}	32×10^{-6}
B	32×10^{-6}	64×10^{-6}	128×10^{-6}
C	128×10^{-6}	256×10^{-6}	512×10^{-6}
D	512×10^{-6}	$1\ 024 \times 10^{-6}$	$2\ 048 \times 10^{-6}$
E	$2\ 028 \times 10^{-6}$	$4\ 096 \times 10^{-6}$	$8\ 192 \times 10^{-6}$
F	$8\ 192 \times 10^{-6}$	$16\ 384 \times 10^{-6}$	$32\ 768 \times 10^{-6}$
G	$32\ 768 \times 10^{-6}$	$65\ 536 \times 10^{-6}$	$13\ 072 \times 10^{-6}$
H	$13\ 072 \times 10^{-6}$	$262\ 144 \times 10^{-6}$	—

^a n_0 ——参考空间频率,单位为波长每米(m^{-1}), $n_0=0.1\ m^{-1}$;
 $G_d(n_0)$ ——位移功率频谱密度,单位为立方米(m^3)。

D.3 各等级路面的道路不平度的空间函数可根据表 D.1 中的功率谱密度,采用谐波叠加法或按照公式(D.1)计算。

$$h(x) = \sum_{k=1}^N a_k \cos(2\pi n_k x + \varphi_k) \quad \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

- a_k ——谐波幅值,按公式(D.2)计算,单位为米(m);
- n_k ——谐波频率, $n_k \in [n_l, n_u]$,按公式(D.3)计算,单位为每米(m^{-1});
- n_l ——对应车辆速度下限谐波频率,单位为每米(m^{-1});
- n_u ——对应车辆速度上限谐波频率,单位为每米(m^{-1});
- φ_k ——随机相位角, $\varphi_k \in [0, 2\pi]$;
- x ——车辆行程,单位为米(m);
- N ——建立路面不平度函数样本总数。

$$a_k^2 = 4G_x(n_k) \Delta n \quad \dots\dots\dots (D.2)$$

式中:

- $G_x(n_k)$ ——第 k 个频段功率谱密度,单位为 m^2/m^{-1} ,按公式(D.5)计算;
- Δn ——谐波频率增量,单位为每米(m^{-1}),按公式(D.4)计算。

$$n_k = n_l + (k - 1/2) \Delta n \quad \dots\dots\dots (D.3)$$

式中:

k ——频段数, $k=1, 2, \dots, N$ 。

$$\Delta n = (n_u - n_l) / N \quad \dots\dots\dots (D.4)$$

公式(D.3)中:

当 $n_k \in [n_l, n_u]$ 时, 功率谱密度按公式(D.5)计算。

$$G_x(n) = G_x(n_0) \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-w} \quad \dots\dots\dots (D.5)$$

式中:

n ——空间频率, 表示单位长度内谐波的数量, 单位为每米(m^{-1});

n_0 ——参考空间频率, 按 $n_0=0.1$, 单位为每米(m^{-1}), 按公式(D.5)计算;

$G_x(n_k)$ ——路面不平度系数, 按表 D.1 取值;

w ——频率指数。

当 $n_k \notin [n_l, n_u]$ 时, 功率谱密度取 0。

D.4 激振源分析时, 可将车箱包装结构和包装物均简化为刚体, 车辆-包装结构系统可取如图 D.1 所示的 4 动力系统, 车轮数量根据实际状态确定。

D.5 仅考虑竖向振动时, 可采用图 D.1 的简化模型, 得出前车辙竖向激励空间函数[见公式(D.6)]以及后车辙竖向激励空间函数[见公式(D.7)]。

$$\overline{h_1}(x) = \frac{1}{2} [h_1^r(x) + h_1^l(x)] \quad \dots\dots\dots (D.6)$$

式中:

$\overline{h_1}(x)$ ——前车辙竖向激励空间函数;

$h_1^r(x)$ 、 $h_1^l(x)$ ——分别为左前轮辙、右前轮辙的竖向空间激励函数。

$$\overline{h_2}(x) = \frac{1}{2} [h_2^r(x) + h_2^l(x)] \quad \dots\dots\dots (D.7)$$

式中:

$\overline{h_2}(x)$ ——后车辙竖向激励空间函数;

$h_2^r(x)$ 、 $h_2^l(x)$ ——分别为左后轮辙、右后轮辙的竖向空间激励函数。

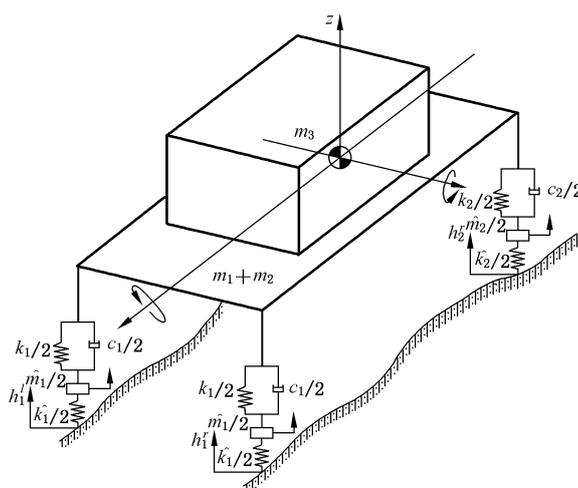


图 D.1 横纹压缩试件示意图

D.6 车辆-被包装物动力系统可采用公式(D.8):

$$M_V \ddot{Z} + C_V \dot{Z} + K_V Z = R_V H_V \quad \dots\dots\dots (D.8)$$

式中：

M_V ——系统质量矩阵；

C_V ——阻尼矩阵；

K_V ——刚度矩阵，根据系统实际情况确定；

R_V ——转化矩阵；

H_V ——空间不平度矩阵，分别根据道路情况和系统状态确定。

参 考 文 献

- [1] GB/T 7031 机械振动 道路路面谱测量数据报告
-