

高等学校试用教材



# 铲土运输机械设计

太原重型机械学院杨晋生 主编



机械工业出版社

一九八一年三月十四日

79.722  
4072

高等学校试用教材

# 铲土运输机械设计

太原重型机械学院杨晋生 主编



机械工业出版社

034796

## 铲土运输机械设计

太原重型机械学院杨晋生 主编

\*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本  $787 \times 1092 \frac{1}{16}$  · 印张  $21 \frac{3}{4}$  · 字数 537 千字

1981 年 1 月北京第一版 · 1981 年 1 月北京第一次印刷

印数 0,001—4,600 · 定价 2.25 元

\*

统一书号: 15033 · 4878

## 前 言

本书是根据 1978 年 5 月高等学校一机部对口专业座谈会上拟订的出版计划和 8 月在太原召开的专业会议上确定的《铲土运输机械设计》教学大纲编写的。全书包括四个方面的内容：土力学的基本知识及土的切削原理；轮式和履带式机械的行驶理论；铲土运输机械的牵引平衡、牵引特性、牵引性能参数的确定及牵引性能参数合理匹配的条件；铲土运输机械（推土机、装载机、铲运机、平地机）总体参数的分析、选择、合理匹配及工作装置的设计。本书着重基本概念的介绍和基本理论的分析，同时较详细地介绍了铲土运输机械的设计步骤与方法。通过教学，培养学生分析问题和解决问题的实际能力，掌握铲土运输机械设计的基本方法，并具有一定从事科学研究的能力。

本书为工程机械专业教材，可作为矿山机械等专业及从事铲土运输机械研究、设计的科技人员的参考书。

本书由太原重型机械学院杨晋生主编；太原重型机械学院茅承钧、西安公路学院孙祖望、孙树仁、吉林工业大学南基信参加编写。同济大学黄宗益、宋德朝；天津工程机械研究所黄春华主审。

在编写本书过程中，曾得到天津工程机械研究所燕棠、王受沅、谭学斌、汪国华、郭占山、陈之立等同志及有关工厂的支持和帮助，借此表示衷心的感谢。

由于编写者水平所限及时间仓促，书中错误之处在所难免，切望读者批评指正。

# 目 录

绪论 .....	1	§ 4-1 牵引平衡和功率平衡 .....	55
§ 1 铲土运输机械的用途及其在国民 经济中的地位 .....	1	§ 4-2 牵引性能参数的确定 .....	63
§ 2 铲土运输机械的发展概况与发展 趋势 .....	1	§ 4-3 牵引特性 .....	79
§ 3 铲土运输机械的使用性能 .....	2	§ 4-4 动力特性 .....	100
§ 4 本课程与其他课程的关系和主要 内容 .....	3	第五章 推土机设计 .....	103
§ 5 铲土运输机械的设计方法与步骤 .....	4	§ 5-1 推土机用途、分类及发展概况 .....	103
第一章 土力学与铲土运输机械 .....	7	§ 5-2 推土机总体设计 .....	110
§ 1-1 土力学基本知识 .....	7	§ 5-3 推土机工作装置设计 .....	143
§ 1-2 车辆的“浮力”与“推力” .....	14	第六章 装载机设计 .....	181
§ 1-3 土的切削理论 .....	18	§ 6-1 概述 .....	181
第二章 轮式机械的行驶理论 .....	26	§ 6-2 装载机的总体设计 .....	191
§ 2-1 轮式机械行驶原理 .....	26	§ 6-3 装载机总体布置 .....	213
§ 2-2 轮胎运动学 .....	27	§ 6-4 装载机的稳定性 .....	219
§ 2-3 轮胎动力学 .....	30	§ 6-5 装载机的总体受力分析及轮胎 的校核 .....	227
§ 2-4 影响滚动阻力的因素 .....	33	§ 6-6 装载机工作装置设计 .....	235
§ 2-5 驱动轮的滑转效率和附着性能 .....	34	§ 6-7 装载机典型液压系统分析 .....	260
§ 2-6 多桥驱动的寄生功率 .....	36	第七章 铲运机设计 .....	268
§ 2-7 轮式机械行走系的效率 .....	42	§ 7-1 铲运机的用途、分类及其发展 概况 .....	268
第三章 履带式机械的行驶理论 .....	43	§ 7-2 铲运机总体设计 .....	273
§ 3-1 履带式机械的行驶原理 .....	43	§ 7-3 铲运机工作装置设计 .....	297
§ 3-2 履带行走机构的运动学 .....	43	§ 7-4 链板装斗式铲运机的计算特 点 .....	316
§ 3-3 履带行走机构动力学 .....	44	第八章 自行式平地机设计 .....	320
§ 3-4 影响行驶阻力的因素 .....	48	§ 8-1 平地机的用途及其发展现状 .....	320
§ 3-5 履带行走机构的附着性能及其 影响因素 .....	50	§ 8-2 平地机的总体设计 .....	323
§ 3-6 履带行走机构的效率 .....	54	§ 8-3 平地机工作装置设计 .....	332
第四章 铲土运输机械的牵引性能 .....	55	§ 8-4 平地机强度计算 .....	336
		§ 8-5 典型液压系统分析 .....	342

# 绪 论

## § 1 铲土运输机械的用途及其在国民经济中的地位

铲土运输机械是工程机械中范围较大用途较广的一个大类，它包括推土机、装载机、铲运机、平地机和运土车几个重要的机种。它通常主要是作为工程准备机械使用，其作业范围主要是土方、石方和散粒物料的推挖、铲装、运输及平整等。由于铲土运输机械的作业范围比较广，所以在国内外它们被广泛地应用在民用建筑、水利建设、道路构筑、机场修建、矿山开采、码头建造、农田改良及国防等工程中。随着科学技术的发展，人类为改善生活条件，提高物质生活水平而改造自然，重新安排山河的工程越来越大，如运河的开凿，大水坝的构筑，大电站的建设及填海造田等，要完成这些工程巨大的土方量没有大量优质高效的铲土运输机械的使用是难以设想的。特别是近年来一些工程建设要在高原、沙漠及高寒地带等人烟稀少，作业条件恶劣地区进行，这些工程对铲土运输机械的依赖程度就更大。

冶金工业的发展在很大程度上取决于矿石的开采，而近年来露天矿开采发展很快，在露天矿的开采中，土石和矿物的挖掘运输加上剥离物料约占总开采工作量的85~90%，这些物料的铲装，运输在很大程度上要依靠铲土运输机械。

铲土运输机械的应用范围，随着科学技术的日益发展也在不断的扩大，由于近年来发动机废气净化的研究有了新的进展，净化装置不断完善，所以铲土运输机械中某些机种的应用范围正在由地上向地下发展。像内燃装载运输机，由于其无轨、能源独立、机动灵活、活动范围大及生产效率高优点，因此在矿山井巷装载和运输作业中使用越来越广泛。无线电遥控水下推土机在海底施工中也在发挥着很大的作用。

由上述可知，铲土运输机械与国家的工农业生产，国防等工程及各项基本建设有着密切的关系。这些机械对于加快施工速度，保证工程质量，解放笨重的体力劳动，提高生产效率均有很大的意义，因此它在国民经济建设中的作用与地位也越来越被人们所重视。

## § 2 铲土运输机械的发展概况与发展趋势

铲土运输机械与其他所有的机械一样，随着蒸汽机的诞生而出现，同时也随着其动力的不断改进而发展。动力从蒸汽机发展到现在的汽油机和柴油机，给产品的内部结构和性能都带来了很大的变化。

目前铲土运输机械所采用的动力大部分为柴油机，虽然各国在这方面进行了多年的研究，也出现了一些其他类型的发动机，但由于经济价值、材料、结构及成本等方面的原因，目前在铲土运输机械上尚未得到应用。因此今后铲土运输机械的动力仍然是柴油机，而只不过是继续进行改进和完善它的性能的研究。例如，提高效率，增加其输出功率；减少故障维修，增加可靠性；减少噪音和振动，进一步完善排气净化；高寒地区低温发动，防冻措施，防冻橡胶及钢材等脆性断裂措施；热带地区热平衡及输出功率的降低；沙漠地带的防尘；高原地带由于



气压的降低而引起输出功率下降等课题。总之，在今后的若干年内，铲土运输机械的动力是朝着使用和制造更经济，效率更高，适应性更强，性能更好，结构更加可靠方面发展。

铲土运输机械的发展与钢铁工业和汽车拖拉机工业的发展是分不开的。这些工业的发展，为铲土运输机械的发展提供了物质基础。另一方面道路的构筑，市政和其他基本建设的发展，对土方工程提出了更多的要求，促使了铲土运输机械无论在技术上或者在产品类型和数量上迅速发展。

目前铲土运输机械在技术上已经达到比较完善的程度，液压技术已经得到了普及，先进的电子技术不仅使用在产品的生产和检验上，而且还应用在试验研究上。无线电遥控及激光技术也在铲土运输机械上得到了应用。不仅采用了先进技术，而且在产品的产量、质量和结构方面均达到了一个新的高度。

铲土运输机械今后的发展趋势大致为：

#### （一）向两极发展

为了满足巨大工程的需要，铲土运输机械正在朝着产品越来越大，单位重量功率越来越高的方面发展，以提高作业效率，加快工程进度及降低生产成本；同时为了适应城市大量市政建设和环境维护等工程的要求，也朝着小巧、灵活的方面发展。

#### （二）广泛采用新技术，提高自动化程度

目前电子和激光技术在铲土运输机械上的应用，还仅仅开始，但这方面的改进和可靠性的提高进展都比较快，今后自动控制和无人驾驶将在铲土运输机械上获得广泛的应用，尤其是在危险、有害气体和高温场地作业的机械。

#### （三）提高可靠性和耐用性

铲土运输机械作业条件比较恶劣，负荷性质特殊，超载和冲击等情况时常出现，因此铲土运输机械的零部件除在室内反复进行疲劳试验和冲击试验外，还必须做各种气候条件下较长时间的现场实验，以确保产品的可靠性和耐用性。

#### （四）改善操纵性、提高舒适性

改善操纵性，增加驾驶员的舒适性，减轻劳动强度是铲土运输机械发展的重要方面，它也是提高机械的生产效率的一个有力措施。例如借助于液压、电气和压缩空气等增力装置使操纵省力。驾驶室设置供暖降温设备，座椅的高低前后均可调整，以增加驾驶员的舒适性。

总之铲土运输机械是向大功率、高速度、高效率、低公害、自动化程度高、能量消耗少、使用周期长、安全舒适等方面发展。

## § 3 铲土运输机械的使用性能

铲土运输机械使用性能的好坏，是检验设计是否正确的唯一标准，对铲土运输机械来讲，其整机使用性能主要包括：牵引性、动力性、机动性、稳定性和经济性等。

### 一、牵引性

铲土运输机械的牵引性，是反映在各种作业速度下能够发出的最大牵引力的性能。牵引性直接影响着这些机械的作业能力与作业效率。牵引性能的好坏，是用牵引功率和牵引效率来评价的，它表明了铲土运输机械工作时发动机功率利用的有效程度，是重要的一个使用性能指标。

## 二、动力性

动力性是反映铲土运输机械以不同档位行驶时，所具有的加速性能，以及所能达到的最大行驶速度和爬坡能力。动力性的指标用动力因素来评价。动力性直接影响着铲土运输机械的生产效率。

## 三、机动性

机动性是反映铲土运输机械的直线行驶的稳定性和狭窄场地转向和通过的能力。机动性与操纵性有很大的关系，操纵性以最小转向半径来评价。机动性影响铲土运输机械的适用程度。

## 四、作业安全性

1. 稳定性：稳定性是表明铲土运输机械作业或在坡道上行驶时抵抗纵向和横向倾翻和滑移的性能。铲土运输机械的稳定性用稳定度来评价。

2. 制动性能：制动性反映铲土运输机械在各种行驶速度下停车的能力。主要以制动距离来评价。

## 五、经济性

经济性是表示铲土运输机械在作业过程中燃料消耗是否经济合理的性能。经济性通常用两个指标来评价。

一个是发动机额定比油耗，即每千瓦小时所消耗燃料的克数，这个指标可以用来比较同机种不同型号机器经济性的好坏；另一个是发动机额定小时燃油耗，即发动机每小时所消耗燃料的公斤数，这个指标可以用来核算作业成本，由于它包含着使用中各种因素的影响，因此不能作为评价不同型号机械经济性能好坏的指标。

上述整机的各种使用性能，是由总体设计和各总成部件的设计共同来保证的，它涉及到正确的选用发动机功率；合理地选择总体参数、传动、转向、制动、行走各系统及工作装置的结构型式；各总成的合理匹配和布置。

## § 4 本课程与其他课程的关系和主要内容

本课程是高等学校工程机械、筑路机械、建筑机械等专业的一门主要的专业课程。它是在学习了基础课及内燃机、液压及液力传动、金属结构及工程机械底盘等专业基础课之后进行的后续课程。

本课程的主要内容有下列四部分：

### 一、土力学与铲土运输机械

介绍土力学的基本知识，例如土的极限平衡理论；挡土墙理论；车辆的“浮力”与“推力”的概念；土的切削理论，切削阻力的试验和理论研究，土的物理机械性质及土的承载能力等。学习这部分，可以为学习铲土运输机械设计，分析各种阻力的产生、大小影响因素及计算方法打下基础。

### 二、轮式和履带式铲土运输机械行驶理论

研究轮式和履带式铲土运输机械行走机构的运动学和动力学，分析行走机构的滚切阻力，介绍行走机构与路面间的附着性能及影响附着性能的各种因素，介绍减少滚动阻力及改善附着性能的途径。



### 三、铲土运输机械的牵引性能

研究铲土运输机械运动时各种阻力的计算；驱动力和各阻力及驱动功率和各阻力所消耗的功率，它们对应的相互之间的平衡关系；分析并确定传动系基本参数及其合理的匹配；介绍牵引特性和动力特性曲线的绘制方法，并通过这些特性曲线分析所设计的铲土运输机械的牵引性能、动力性能及燃料经济性。

### 四、铲土运输机械的总体设计

研究并确定铲土运输机械作业时各种阻力，确定总体参数并分析它对整机性能的影响，选择各总成的结构型式并进行合理的布置，进行总体受力分析，分析工作装置的结构类型，确定其结构尺寸，并进行强度计算。通过学习使学生树立正确的设计思想，掌握总体设计与工作装置强度计算的要领，为毕业后从事工程机械研究与设计打下良好的基础。

## § 5 铲土运输机械的设计方法与步骤

铲土运输机械每个机种在批量生产以前，都要经过图式设计，样机试制和试验鉴定三个阶段。

### 一、铲土运输机械的设计

铲土运输机械的设计程序大致如下：

1. 研究设计任务，制定设计原则：上级机关或使用部门根据工程建设的需要，提出新型铲土运输机械的设计任务，或根据现有机械的使用情况，提出改进设计。设计部门要成立专门的设计小组，根据设计任务书对作业场地和加工制造条件等进行深入细致的研究，征求使用部门的意见，在广泛深入调查的基础上确定机械的设计原则，即当各种使用性能发生矛盾时，应服从那一种使用性能等。这样制定的设计原则是以后设计中确定各总成部件的结构和布置方案时的唯一准则，例如，为了改善驾驶员的劳动条件和保证作业和行车安全，在中型以上的铲土运输机械上，操纵机构都采用各种助力装置；安全通风及保暖的驾驶室；互锁装置及各种警报器等。总之，在深入调查研究的基础上，吸取国外的先进技术，并结合我国的实际情况，发挥设计人员的智慧制定出正确合理的设计原则，从而使以后的整机设计具有正确的方向。

2. 编制技术任务书：为了使设计的机械反映当前国际先进水平和密切结合我国的实际情况，使设计工作建立在可靠的基础上，在制定设计任务书之前要作以下准备工作。

1) 从国内外同类型机械中选择几台经过实践证明适合我国具体情况，并且比较先进的作为参考样机，对其主要性能进行试验，对各总成部件的结构进行分析；

2) 收集国内外同类型机械的资料，做出其主要参数及各总成型式的统计表，进行分析比较。

在上述工作基础上，根据所设计机械的主要用途，作业条件和使用部门意见，经过认真的分析和计算，初步确定其主要参数及各总成的型式，写在技术任务书中。

设计任务书是选型的书面总结，是技术设计的指导性文件，其内容应包括：机械的类型、主要参数、各总成结构型式、方案选择的依据、简要说明等。

实践证明，正确的技术任务书可以使设计工作具有明确的目的和正确的方向。反之，如果技术任务书编制不当，它会给设计工作带来大量的返工，因此，编制技术任务书要慎重、

要考虑全面。

3) 草图设计: 在技术任务书确定之后, 根据初步确定的轴距、轮距及各总成的结构型式进行草图设计。草图设计要绘制传动系统和液压系统图, 根据所确定的参数, 参考同类型机械画出总体布置和各总成部件的草图, 通过具体的布置, 初步确定各总成的相互位置及固定方法。

在草图设计的基础上, 利用初步估算的各部件的重量, 计算重心位置, 验算桥荷分配及压力中心, 初步确定轮胎及履带尺寸; 根据自重、桥荷分配或压力中心及保证机械行驶和作业稳定性等方面的要求, 最后确定轴距、轮距或轨距和履带接地长度及宽度等。然后进行牵引、动力特性曲线的绘制, 分析所设计机械的牵引性能、动力性能及经济性, 并进行稳定性验算。

为了达到理想的效果, 草图设计常常是多种方案同时进行, 对这些方案进行全面的分析与比较, 最后择优选取作为技术设计的依据。

4) 技术设计: 技术设计包括整机总图和各总成部件图的设计, 是草图设计的具体化。

根据总体布置草图绘制整机总图, 在此图上确定与整机尺寸有关的各总成的主要尺寸, 并提出对各总成尺寸重量方面的具体要求。部件设计根据总体布置的要求和已确定的部件型式结合该部件的受力情况, 使用特点及相关部件的尺寸等进行总成部件的总图设计, 确定主要零件的结构尺寸。

各总成部件图设计完后, 把它们据实画在总图上, 进行仔细的校对和审查, 以便及时发现和纠正绘图和设计中的错误, 解决部件与部件及部件与整机之间的矛盾, 并对相对运动的零、部件的运动轨迹进行校核, 防止干涉。

在此过程中对牵引、制动、稳定及作业等性能进行详细的分析与计算, 并对主要零件进行强度计算, 分析和计算动力特性, 以确定所设计机械的动力特性指标。

5) 工作图设计: 工作图设计包括绘制全套的图纸, 并编制全部技术文件, 绘制工作图应使其在满足产品使用性能及质量要求的前提下, 尽量简化零件的形状, 降低技术要求, 减少材料消耗, 以降低制造成本。

新产品的的设计质量最终体现在零件图上, 任何一个零件如果在设计中产生错误, 都会影响整机的性能或给试制工作带来麻烦。因此, 设计者必须有高度的责任感, 仔细校核所设计的零件图, 力求在图纸上发现并消除错误。并合理正确的提出制造精度和技术条件。

在设计时要贯彻标准化, 通用化和系列化, 尤其是相同机种、相同系列的产品更应如此, 这样不仅使加工制造简化, 便于组织批量生产, 降低成本, 而且给使用和维修配套带来方便。

在设计过程中, 设计、工艺和供销三方面的人员也要紧密配合。设计人员要主动和工艺、供销人员联系, 以便提高产品的工艺性, 更好的进行外购件、外协件的准备工作。只有这样的密切协作, 才能提高产品的质量和加快试制速度。

在设计铲土运输机械时通常采用相似原理的方法。所谓相似原理就是根据其主要参数按照一定的比例关系放大或缩小。但根据相似原理设计的机械越是大型化, 要保持强度、刚度、热平衡便越困难, 因为根据相似原理, 材料所发生的应力和挠度是分别按重量的  $1/3$  和  $2/3$  次方的比例增加。解决的办法通常有二: 一是采用高级材料提高其强度和刚度; 二是采用非相似的结构设计, 即复杂的结构用电子计算机进行解析, 通过有限单元法进行强度计算, 这样

会使设计计算迅速和准确。

## **二、试制样机**

样机试制的目的是通过生产实践来验证和考察设计图纸的正确性。其主要工作包括：划分加工件、协作件和外购件；编制试制工艺文件；设计和制造试制所必须的工艺装备；进行零件加工和部件装配及总装。

## **三、试验鉴定**

样机试制出来后，要进行技术检查，全面检查零件的加工和部件的装配是否符合设计要求，检查合格后要按照国家规定进行长时间的工业性试验，以考察机器设计是否正确，结构性能是否先进。在试验期间要作详细的记录，发现问题及时修正。样机进行严格的试验后进行技术鉴定，以检查各机件性能有无改变是否达到设计要求以及磨损情况等。如果样机鉴定认为满意，则可交付生产。

# 第一章 土力学与铲土运输机械

铲土运输机械与土<sup>⊙</sup>的关系极为密切，例如图 1-1 所示推土机的作业：一方面土是推土机的作业对象；另一方面土又是推土机的支承物，推土机依靠土给它的反作用力（牵引力）来加工土自己本身，这种密切关系中有三方面问题是设计铲土运输机械时所必须考虑的，并且要解决好：

- 1) 土要能够支持住机器，使它在作业过程中不下陷——有良好的通过性；
- 2) 车辆的行走机构在相应的路面上能够充分发挥出牵引力；
- 3) 合理确定工作装置的结构及参数以便尽可能降低土的切削阻力，以获得良好的作业效率。

我们的目的是设计出性能优良的铲土运输机械。性能优良的含意除上述三点之外，还有结构先进、强度和刚度好、重量轻、优良的动力经济性、操纵性和成本低等。要满足这些要求，仅仅具备机械设计的知识是不够的，还要具备土力学、土与行走机构和工作装置的相互关系的知识，要求设计者具有更广泛的知识面。

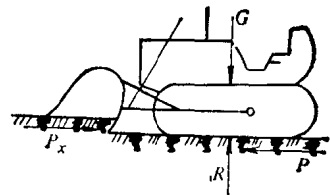


图1-1 推土机与土的相互关系

## § 1-1 土力学基本知识

首先说明的一点是：有关车辆行走机构和工作装置与其相互作用的土的分类工作我们还没有进行，因此暂时参考国外有关资料，同时这对于我们今后对土在这方面的分类工作也有价值。但是，不管情况如何从土的明显的性质上的差别来看，分成如下两大类是可行的：

无粘性土——也称作摩擦性土，在土的颗粒之间无粘性、没有粘聚力存在，如干砂、砂质土等；

粘性土——在土的颗粒之间有粘性、即有粘聚力存在，如粘土。

试验已经证明，无论是哪种土体，在受到外力作用后都是在剪应力的作用下而发生破坏的。对于无粘性土，剪切面上的极限剪应力  $\tau'$  与法向应力成正比，符合库伦摩擦定律（见图1-2）：

$$\tau' = \mu_2 \sigma = \sigma \operatorname{tg} \phi \quad (\text{MPa}) \quad (1-1)$$

式中  $\mu_2$ ——土的内摩擦系数（表 1-5）；

$\phi$ ——土的内摩擦角， $\mu_2 = \operatorname{tg} \phi$ 。

对于粘性土，极限剪应力不仅与法向应力  $\sigma$  有关，而且与其粘性〔粘聚力  $c$ （兆帕）——见表 1-7〕有关：

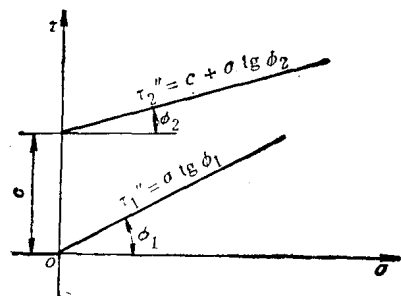


图1-2 土的极限剪应力

⊙ 工程上所指的土，包含有除大石头而外的土壤及其与碎石的混合物、岩石风化沉积物等。

$$\tau'' = c + \sigma \operatorname{tg} \phi \quad (\text{MPa}) \quad (1-2)$$

### 一、极限平衡理论

土体受力后能否发生破坏，取决于土体内部剪应力  $\tau$  值是否超过土的极限剪应力  $\tau'$ 。我们把土体在其内部的剪应力  $\tau$  未超过极限剪应力  $\tau'$  的状态称为弹性平衡状态； $\tau$  值超过  $\tau'$  时已发生剪损的状态称为塑性流动状态；把  $\tau$  值即将超过，但尚未超过  $\tau'$  的状态称为极限平衡状态。下面讨论土体受力后达到极限平衡状态时的一些性质：

#### (一) 土体中一点的应力状态

当土体承受负荷后，取其内一单元体加以分析（见图 1-3）。在土体内单元体受到来自四面八方的压力，但只讨论其二向应力状态即可，则有：

$$\sigma_1 > \sigma_2$$

在已知的主应力  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  作用下，可求得该土体内某一点处与主应力作用面呈任  $\alpha$  角的斜面  $m-n$  上的法向应力  $\sigma$  和剪应力  $\tau$  之值。

根据土单元体的静力平衡条件  $\Sigma X = 0$ 、 $\Sigma Y = 0$  有：

$$\left. \begin{aligned} \sigma ds \sin \alpha - \tau ds \cos \alpha - \sigma_2 ds \sin \alpha &= 0 \\ \sigma ds \cos \alpha + \tau ds \sin \alpha - \sigma_1 ds \cos \alpha &= 0 \end{aligned} \right\}$$

解该联立方程得：

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\alpha \\ \tau &= \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\alpha \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

由式 (1-3) 可见，任一斜面上的  $\sigma$  和  $\tau$  值均为  $\alpha$  的函数。这与《材料力学》所讲过的道理一样，因为假设土体在破坏之前是弹性体，这种假设对于获得一般性解答是允许的。

式 (1-3) 所对应的图形（见图 1-4）称为莫尔应力圆。利用它对式 (1-3) 进行图解极为方便，只要知道  $\alpha$  值，便可立即在图形上找到相应的  $\sigma$  和  $\tau$  值。

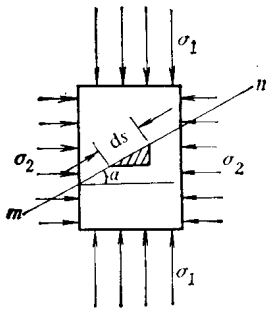


图1-3 土单元受力状态

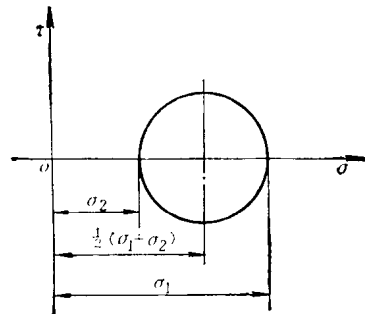
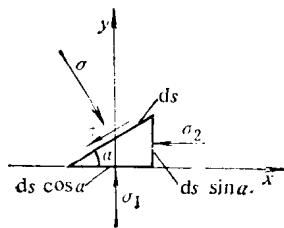


图1-4 莫尔应力圆

#### (二) 极限平衡条件

从式 (1-3) 和图 1-5 可知，在  $\alpha = 45^\circ$  的截面上  $\tau$  值为最大，但土体并未发生破坏，因为由  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  所规定的实线圆上各点所代表的应力值与极限剪应力相差较大。如果人为地改变  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  的数值，例如缩小  $\sigma_2$  值（维持  $\sigma_1$  不变；或维持  $\sigma_2$  不变而增大  $\sigma_1$  值等办法），则应力圆增大，直到与直线  $\tau' = c + \sigma \operatorname{tg} \phi$  相切为止。这时在虚线圆上各点所表示的应力状态

中，只有点  $M'$  所代表的应力  $\tau$  值达到  $\tau'$  值而处于极限平衡状态。由于土的内摩擦性质的缘故而使得在截面倾角  $\alpha > 45^\circ$  时（具体是  $\alpha = 45^\circ + \frac{\phi}{2}$ ），剪应力  $\tau$  才达到  $\tau'$ 。

在前面的土体应力状态分析中，若截面倾角  $\alpha$  大于  $90^\circ$  以后，会使得  $\tau$  的方向发生变化，因此在图 1-5 中的横座标下面，存在着与  $\tau'' = c + \sigma \operatorname{tg} \phi$  对称的极限应力线就是这个道理。

如果再略增大  $\sigma_1$  与  $\sigma_2$  的差值，莫尔应力圆上的点  $M'$  所代表的应力值即超过极限剪应力，土体发生塑性流动。在图 1-5 上， $2\alpha = 90^\circ + \phi$ ，就是说土体滑移面与最大主应力作用面之夹角为

$$\alpha = 45^\circ + \frac{\phi}{2} \tag{1-4}$$

这就使得我们很容易找到土体破坏时滑移面的位置和方向（见图 1-6）。滑移面的方向与大主应力  $\sigma_1$  作用面呈  $\alpha = 45^\circ + \frac{\phi}{2}$ ，而与大主应力  $\sigma_1$  的方向呈  $\alpha = 45^\circ - \frac{\phi}{2}$ 。

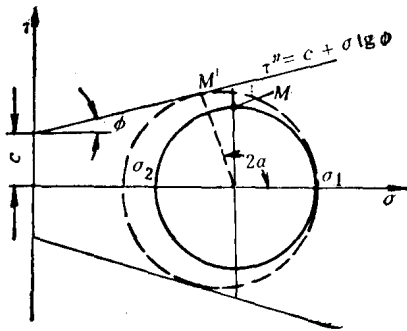


图1-5 极限平衡图解

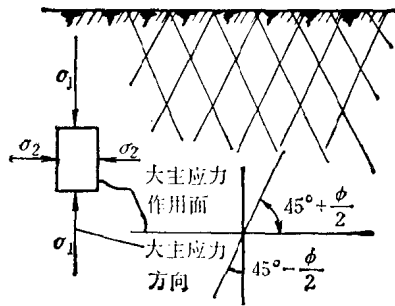


图1-6 土体剪裂线方向

通常把极限平衡状态称为郎肯 (Rankine) 应力状态。

与图 1-5 所示的情形相反，若仍维持  $\sigma_1$  不变，不是减小  $\sigma_2$ ，而是增加  $\sigma_2$ （见图 1-7），这时当  $\sigma_2$  增加到  $\sigma'_2$  时，形成一新的莫尔应力圆，其圆心为  $O'_1$ 。它与  $\tau'' = c + \sigma \operatorname{tg} \phi$  相切于点  $M'$ ，又建立了新的极限平衡状态。此时大主应力  $\sigma_2$  处于水平方向、大主应力作用面为垂直方向，滑移面与大主应力作用面之夹角仍为  $\alpha = 45^\circ + \frac{\phi}{2}$ ，与大主应力方向之夹角仍为  $\alpha = 45^\circ - \frac{\phi}{2}$ 。

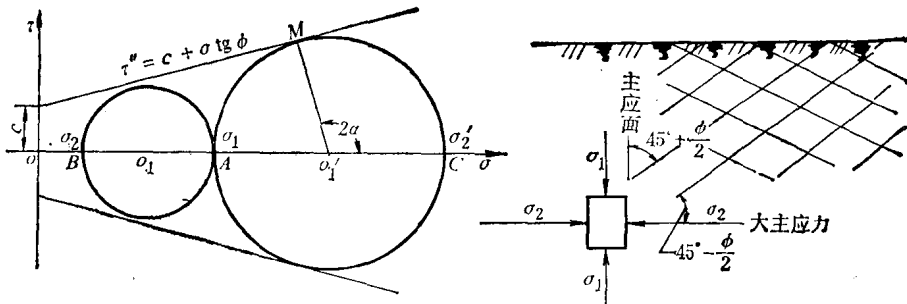


图1-7 土的被动郎肯状态

若由于垂直应力  $\sigma_1$  的作用而迫使土体在水平方向上向外扩张 (相当于减小  $\sigma_2$ ), 这时达到极限平衡状态又叫做主动郎肯状态; 相反, 若水平方向的主应力  $\sigma_2$  强迫压缩土体 (相当于减小  $\sigma_1$ ), 即图 1-7 所示的情形, 这时达到极限平衡状态叫做被动郎肯状态。

## 二、土体达到极限平衡状态时, 大小主应力之间的关系

从上面的讨论中说明了, 只有  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  之间达到一定的比例关系, 才能使土体达到极限平衡状态, 这种比例关系是由土的内部因素  $c$  和  $\phi$  所决定的。

### (一) 无粘性土

无粘性土的极限平衡状态如图 1-8 所示。从其几何关系可见,

$$\frac{O_1 M}{OO_1} = \sin \phi$$

因为

$$O_1 M = \frac{1}{2} (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$$

$$OO_1 = \frac{1}{2} (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})$$

所以

$$\frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}} = \sin \phi$$

因此有

$$\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \sigma_{\max} \sin \phi + \sigma_{\min} \sin \phi$$

整理后得

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} = \frac{\sin 90^\circ + \sin \phi}{\sin 90^\circ - \sin \phi} = \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$$

令

$$\operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) = N_\phi$$

我们称  $N_\phi$  为流值。则

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} = \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) = N_\phi \quad (1-5)$$

可见, 最大与最小主应力之比满足式 (1-5) 时即达到极限平衡状态, 其比值取决于土的摩擦特性。

### (二) 粘性土

粘性土的极限平衡条件, 可从图 1-9 利用上述方法直接写出:

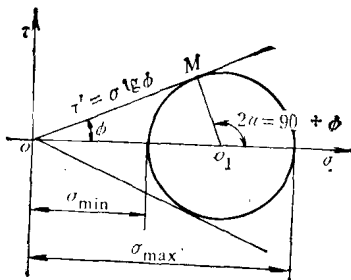


图1-8 无粘性土的极限平衡条件

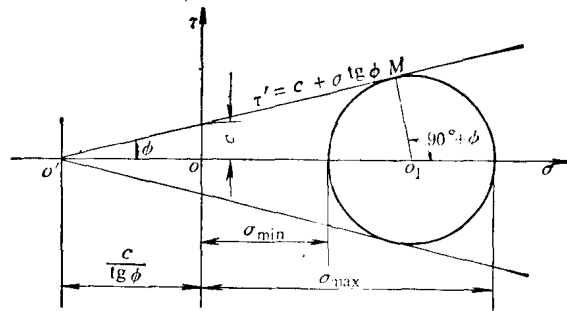


图1-9 粘性土的极限平衡条件



$$\sigma_{\max} + \frac{c}{\operatorname{tg} \phi} = \left( \sigma_{\min} + \frac{c}{\operatorname{tg} \phi} \right) \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) = \sigma_{\min} \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) + \frac{c}{\operatorname{tg} \phi} \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$$

整理后有: 
$$\sigma_{\max} = \sigma_{\min} \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) + 2c \operatorname{tg} \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) = \sigma_{\min} N_\phi + 2c \sqrt{N_\phi} \quad (1-6)$$

$$\sigma_{\min} = \sigma_{\max} \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) - 2c \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) = \sigma_{\max} \frac{1}{N_\phi} - 2c \frac{1}{\sqrt{N_\phi}} \quad (1-7)$$

可见, 最大与最小主应力之间的关系要比非粘性土复杂些, 因为多了一项粘聚力的影响因素。

### 三、挡土墙理论

简言之挡土墙理论是研究填土对墙壁压力的理论, 是土力学的一项基本理论。近年来国外某些研究单位利用它来探讨铲土运输机械的牵引力和铲掘阻力问题, 例如履带推土机作业时土对履带的反力和土对铲刀的切削阻力都可用挡土墙理论进行计算。

#### (一) 普遍郎肯状态

普遍郎肯状态是指在某一整体范围内受载的土整体达到极限平衡状态。例如图 1-10 所示的光滑内壁和光滑底的土箱, 当表面受有均布负荷  $q$  作用后, 在一定条件下达到极限平衡状态。

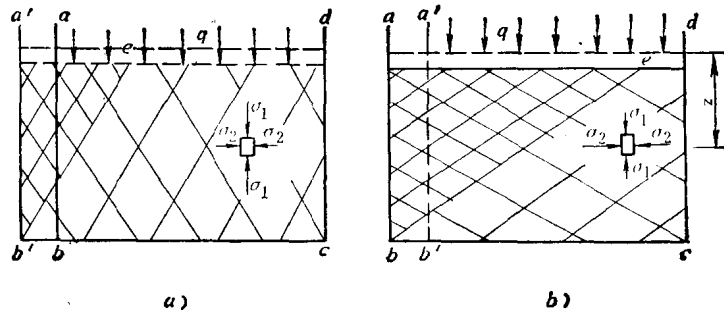


图1-10 土的变形条件和边界条件

1. 主动郎肯状态: 在箱内某一深度  $z$  处的土体承受垂直方向的压力  $q + z\gamma$  ( $\gamma$ ——土的重度,  $\text{千牛}/\text{米}^3$ ), 因而迫使土体水平侧向扩张, 因此土的水平面下降, 而侧壁由  $ab$  外移至  $a'b'$ 。当达到极限平衡状态时开始处于剪裂的边缘。这时土侧压力主动向外扩张, 称为主动土压力, 这种郎肯状态称之为主动郎肯状态。由于箱壁和底是光滑的, 它对土的变形毫无阻力, 所以整体都能达到郎肯状态, 称之为普遍主动郎肯状态 (见图 1-10 a)。

2. 被动郎肯状态: 与上述土体变形情况相反, 用外力把箱壁向内推到  $a'b'$  位置; 土体水平达到极限平衡状态时开始处于剪裂的边缘。土侧压力被外力所克服, 因此称土体向外作用的侧压力为被动土压力, 这种郎肯状态称之为被动郎肯状态。由于箱壁和底是光滑的、它对土的变形毫无阻力, 所以整体都能达到郎肯状态, 故称之为普遍被动郎肯状态 (见图 1-10 b)。

#### (二) 局部郎肯状态

实际上土体内并不存在产生普遍郎肯状态的变形条件。这是由于不仅箱底和箱壁是粗糙的, 它们与土之间存在着摩擦力, 而且土层与土层之间也存在着摩擦力。这些摩擦力会阻止

土体变形, 因此不能出现普遍郎肯状态, 而只能出现局部郎肯状态。

首先认为箱底粗糙而箱壁是光滑的, 则在图 1-10 a 的情况下, 土体沿  $a'b'e$  楔形内剪损, 其余均未达到郎肯状态; 在图 1-10 b 所示情况也是这样的情形, 其楔形  $abe$  因达到或超过极限平衡条件而被剪损。

理论研究和试验证明, 在箱壁和底都是粗糙的情况下, 相应的滑移面  $be$  是曲线  $\widehat{bd}$  和直线  $\overline{de}$  所组成 (见图 1-11)。在处于郎肯状态的楔体断面  $ade$  内, 其受剪型与图 1-10 所示相同, 而在楔体断面的  $abd$  内, 其受剪型由曲线组成, 这是由于箱壁与土之间有摩擦力而影响它变形的缘故, 同时这摩擦力也改变了箱壁对土的反作用的合力的方向, 而与壁之法线呈  $\delta$  角。

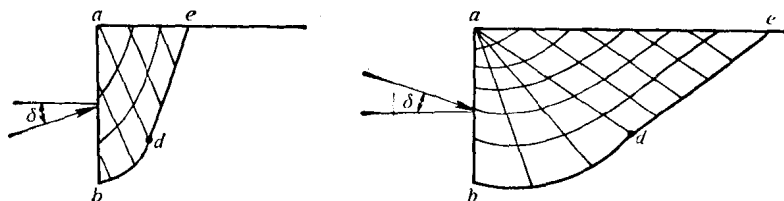


图1-11 粗糙箱壁对土体受剪型的影响

### (三) 挡土墙被动土压力计算

如图 1-12 所示, 在土表面作用有均布载荷  $q$ , 某深度  $z$  处土体单元承受垂直作用应力为

$$\sigma_1 = q + z\gamma$$

式中  $\gamma$ ——土体容重 ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )。

若垂直铁壁  $ab$  缓慢水平移动而加压于土体时, 可使它在达到被动郎肯状态之前应力分布很均匀。这种试验表明, 铁板前面的土体在达到局部被动郎肯状态之前, 接近地表面的土先达到被动郎肯状态 ( $ade$  区域), 其现象是土体向上拱起。  $abd$  称之为辐射剪切区, 由于铁壁与土之间的摩擦力作用而使  $bd$  呈曲线。

处于深度  $z$  的土单元, 垂直方向所受的应力  $\sigma_1 = q + z\gamma$  是小主应力, 水平方向的主应力是大主应力。根据式 (1-6) 有

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\min} N_\phi + 2c\sqrt{N_\phi} = qN_\phi + z\gamma N_\phi + 2c\sqrt{N_\phi}$$

土作用于铁壁上的法向力

$$P_n = \int_0^h \sigma_{\max} dz = qhN_\phi + \frac{1}{2}\gamma h^2 N_\phi + 2ch\sqrt{N_\phi}$$

上式是在未考虑铁壁与土体之间的摩擦力的理想情况下推导出来。但实际上摩擦力是存在的, 因此可用下式近似表达铁壁上所承受的应力和力:

$$\sigma_{\max} = qK_q + cK_c + \gamma zK_z$$

$$P_n = \int_0^h \sigma_{\max} dz = qhK_q + chK_c + \frac{1}{2}\gamma h^2 K_z \quad (\text{N}) \quad (1-8)$$

式中  $K_q$ 、 $K_c$ 、 $K_z$ ——是与  $z$  无关的, 可以计算出来的常数, 在《土力学》中有许多计算