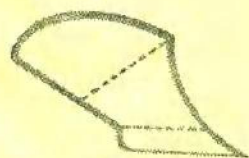


犁体曲面理论

苏联 Л. Б. 洛亚捷夫 著



中国工业出版社

犁体曲面理论

苏联 Л.В.格亚捷夫 著

李 守 仁 譯
張 天 明 校

中国工业出版社

本书共分三篇：第一篇是土堡运动力学。阐述了土堡的运动理论，推导出土堡沿犁体曲面相对运动轨迹的微分方程式，作用在土堡和犁体上的力。同时推导出犁体阻力的公式；第二篇是犁体曲面的球面表示。阐述了根据已知几何条件设计可展犁体曲面的解析方法，和利用曲面的球面表示研究现有犁壁的方法；第三篇是根据工艺观点设计犁体曲面。阐述了根据土堡的极限运动轨迹设计直纹曲面的方法及试验研究结果。

本书可供从事犁和其他耕耘机具工作部件的设计、研究工作者及农业机械制造、农业机械化专业的师生参考。

Л.В.Гячев
**ТЕОРИЯ ЛЕМЕШНО-ОТВАЛЬНОЙ
ПОВЕРХНОСТИ**

ТРУДЫ ИНСТИТУТА (АЧИМСХ).

ВЫПУСК 13

ЗЕРНОГРАД 1961

* * *

犁体曲面理论

李守仁 译

张天明 校

*

农业机械部中国农业机械化科学研究院编辑(北京德外北沙滩)

中国工业出版社出版(北京佟麟阁路丙10号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张 $9^{3/8}$ ·字数222,000

1964年10月北京第一版·1964年10月北京第一次印刷

印数0001—2,440·定价(科七)1.70元

*

统一书号: 15165·2595(农机-50)

前 言

机器工作部件所完成工艺过程的理论研究具有重要的意义。因为机器工作的性能，它的生产率和能量消耗决定于工作部件是否符合于它们的用途。

只有当具有理论时，从各方面考虑和分析机器工作条件以及从提高劳动生产率的角度来对工作部件提出要求的工程计算才成为可能。

因此创造工作过程的新理论，或者把现有的理论在其基础上发展到能够解决实际问题的水平，是农业力学的主要任务。

犁属于工作过程理论发展还不够完整的农业机器之列。

耕地是主要的农业工作之一。正如农业力学奠基人 В.П. 郭列契金 (Горячкин) 提出的：“是农业中最重要的，时间最长的，最昂贵的和最繁重的”工作。每年耕地要消耗几千万个劳动日和数百万吨的燃料。

除了普通用途的犁以外，带特殊犁壁的犁得到了广泛应用：例如林用犁，用于掩埋和挖开葡萄丛的犁，种植深耕犁，耕作沼泽地和盐碱化土壤的犁等等。上述犁的某些工作部件还不完善，还不能保证完成农艺要求。

提高耕地机组工作速度的问题是和探求工作部件的特殊形式相联系。应用高速，除了可以提高劳动生产率外（由于应用更大马力的高速拖拉机），还可减少金属用量，减少保养和改善机组的灵活性，使大马力的拖拉机和悬挂犁的编组简单化。但是至今还未找到满意的高速犁体工作曲面形状。

由于犁体曲面的设计方法不完善，使得改善现有的和创造新型的工作曲面类型受到障碍。实际上寻找新的犁壁形状的方法是用挑选的方法——制造很多参数不同的犁体，用试验的方法从其中选择好的。这种设计犁体的方法需要花费很大的劳动和时间，

但还不能保证选择出犁体参数及曲面形状无誤。

鉴于以上事实，探討能够根据給出的工作条件和犁的用途决定犁体曲面参数的設計和計算方法是非常迫切的任务。作为这种方法基础的工作过程理論，应该包括土垡运动学和动力学及在耕翻过程中发生的其他的更复杂的物理—化学过程。在这个理論中土垡的运动力学問題应该占有特別重要的地位，因为犁工作的农艺要求指标(土垡的捻碎和翻轉，植被的覆盖，土垡的抛投等)及耕地的能量消耗首先是犁工作部件和土壤互相作用的结果。

現有犁的理論不能完全充分闡明耕地过程的运动学和动力学問題。还不清楚土壤的性质、耕地速度、犁体曲面形状和其他許多因素对土垡在犁壁上运动軌迹、犁体牵引阻力及土壤的捻碎等有何影响。所以創造新的、具有科学依据的犁体工作曲面的設計計算方法，要求对耕地时土垡的运动規律首先进行理論和試驗研究。

这种情况激起了作者从事土垡运动理論的研究，并在它的基础上研究犁体工作曲面的設計方法。这两个互相不能分割的問題形成农业力学的一个特別部分，把它叫做“犁体曲面理論”。作者在1949年~1956年完成了犁体曲面理論的研究，并且苏联部长會議所属的发明創造事业局登記了这个科学研究論著。这个理論的闡述，也构成了本书的内容。

实际应用所推荐的理論，并不一定限制于設計犁体工作曲面問題。应该指出的是：在土垡沿犁体曲面运动和材料沿其他机器，例如用于加工土壤，掘土以及用切削刀加工金属和其他材料等机器工作曲面的运动規律之間存在着一定的共同性。材料的物理性质以及当加工时材料中所发生物理过程的区别，未必引起机械規律的根本区别。

上面所談的可作为計算一系列整地机械和筑路机械（例如开沟机，雪犁），以及在某些情况下計算切削工具时（車具，銑刀等）应用所推荐的犁体曲面理論的可能性。当然，这种应用不能

是形式主义的；当解决每个具体問題时，这些方法應該相应地改变。

提醒讀者注意，本书分为三篇。

在第一篇中叙述土垡沿犁体工作曲面的运动学和动力学。这里分析了在不同运动阶段土垡微粒的軌迹，以及作用在土垡和犁体上的力。

在第二篇中叙述了根据已知几何条件設計可展开犁体曲面的方法，以及現有犁壁的分析方法。

在第三篇中叙述了根据土垡的极限运动軌迹設計直紋曲面的方法，以及試驗研究結果。应用理論解决实际問題——高速犁体和复盖犁工作曲面参数的論証和設計。

本著作是供从事于土壤加工过程研究的专家，在整地机械方面工作的設計师用，同样可供农业机械化学院和农业机械制造学院的大学生参考。讀者應該熟悉理論力学和材料力学的知識，同时还应具有微分几何和球面三角的基本概念。考虑到上面所提的微分几何和球面三角在高等学校一般不予讲授，所以在第一篇中引用了几何学中的某些知識。

最后，作者认为有責任向B.A.热列果夫斯基(Желиговский)院士表示深厚的謝意，他在犁体曲面理論問題方面提供了很多宝贵的建議。

作 者

目 录

前 言 緒 言

§1 犁体曲面理論的对象·····	1
§2 犁壁理論发展历史簡介·····	3
1 土堡的运动理論·····	3
2 犁体曲面設計方法·····	8

第一篇 土堡运动力学

第一章 有关的几何知識·····	13
§1 球面三角的基本概念·····	13
1 球面图形的初步·····	13
2 球面三角形·····	17
3 解斜三角形的主要公式·····	19
4 解直角球面三角形的公式·····	20
§2 某些微分几何知識·····	22
1 平面和空間曲綫·····	22
2 曲面·····	30
3 可展曲面·····	36
4 曲面綫·····	39
第二章 耕翻时土堡运动理論·····	41
§1 提出問題的范围·····	41
1 犁体曲面的形状·····	42
2 犁的运动特性·····	42
3 土堡的相对运动·····	42
4 土壤的机械性质·····	43
5 犁和培土器的工作原理·····	45
§2 土堡的运动过程·····	47
1 第一阶段——鋒刃在土壤中的运动·····	47

2	第二阶段——土堡沿犁铧和犁胸的运动	48
3	第三阶段——土堡沿犁壁的运动	49
4	第四阶段——土堡出了犁壁曲面的运动	52
5	采用的某些代表符号	53
§3	土壤沿铧刃的运动	55
1	土粒的运动轨迹	55
2	决定土壤沿刃表面可能滑动的条件	58
§4	土堡沿犁铧和犁壁胸部的运动	60
§5	土堡中点在犁壁上的相对轨迹	66
1	轨迹的微分方程式	66
2	轨迹微分方程式的分析	71
§6	繪制相对轨迹的方法	74
1	下极限轨迹	74
2	具有凝聚性的土堡微粒的轨迹	79
§7	土粒离开犁壁后的运动	85
結論		87
第三章 作用在土堡和犁体上的力		89
§1	刃切割土壤所产生的力	89
1	消耗于土粒位移的力	89
2	刃对于土壤的动压力	92
§2	当沿犁铧运动时作用于土堡上的力	95
1	改变土粒绝对速度的力(犁铧对土堡的动压力)	95
2	土堡进入犁铧时使它产生变形的力(犁铧对土堡的静压力)	97
§3	沿犁壁运动时作用在土堡上的力	104
1	改变土粒绝对速度的力	104
2	在土堡本身重量作用下产生的力	107
3	由于土堡凝聚性所产生的土堡对犁壁的正压力	109
4	总压缩土堡的力	110
§4	作用在犁体上的力	113
1	使土粒具有速度所需的力	113

2 克服土堡重力和对曲面摩擦力所需的牵引力	115
3 犁体的牵引阻力	116
4 决定捻碎土堡的因素	118
結論	123

第二篇 犁体曲面的球面表示

第四章 可展犁体曲面的解析設計方法	125
§1 可展曲面一般情况的設計方法	125
1 球面映象曲綫和元綫的方向	125
2 根据已知几何条件求关系式 $\gamma=\gamma(\varepsilon)$	129
3 导曲綫	131
4 繪制曲面的順序	134
§2 繪制可展犁壁曲面的展开图	139
1 在展开图上繪制导曲綫	139
2 求展开图上元綫間的夹角	142
3 求展开图上的元綫长度	144
4 繪制犁壁展开图的程序	145
§3 具有平面曲率綫的可展曲面	145
1 具有平面曲率綫的可展曲面的一般情况	145
2 傾斜柱体的情况($\omega=\pi/2$)	148
3 正交曲綫位于垂直平面的情况	150
4 正交曲綫位于垂直于沟壁平面的情况	151
5 繪制犁壁展开图	152
結論	153
第五章 应用曲面的球面表示研究現有的犁壁形状	154
§1 研究曲面的方法	154
1 研究曲面的任务	154
2 根据測繪結果繪制曲面的球面映象区域	155
3 求水平扭柱形曲面上 ε 和 γ 值的解析公式	157
4 曲面的类型及对可展曲面的偏差程度	160
5 根据測繪結果写出可展曲面的关系式 $\gamma=\gamma(\varepsilon)$	163

6 繪制接近原非展曲面的可展曲面·····	163
§2 研究現有犁壁形状的实例·····	165
1 犁II-5-35的主犁体·····	165
2 犁II-5-35的小前犁犁体和犁IB-1.7的覆盖型犁体·····	172
3 美国犁体工作曲面·····	180
4 被研究犁体的几个特点·····	186
5 根据曲面对可展曲面的偏差程度比較所分析的犁体·····	188
結論·····	189

第三篇 根据工艺观点設計犁体曲面

第六章 根据土堡相对运动的已知极限軌迹設計犁体曲面的方法·····	190
§1 土堡相对运动的上极限軌迹·····	190
1 基本原理·····	190
2 起初曲綫切綫的球面指示綫方程式·····	191
3 繪制起初曲綫·····	201
§2 設計的直紋曲面的元綫方向·····	203
1 初步見解·····	203
2 一般类型直紋曲面的元綫在空間的方向·····	204
3 起初曲綫主法綫球面指示綫和水平扭柱形元綫的方向·····	208
4 根据已知測地綫繪制傾斜扭柱形的元綫·····	209
5 可展曲面的元綫·····	211
6 繪制可展曲面犁壁的展开图·····	217
§3 土堡运动的确切計算·····	218
1 在展开图上繪制土堡的确切軌迹·····	218
2 求軌迹不是測地綫时的犁壁包容土堡角·····	219
§4 根据已知螺旋綫設計犁体曲面·····	221
1 螺旋綫切綫的球面指示綫·····	221
2 繪制螺旋綫·····	228
3 繪制可展曲面(傾斜柱体)·····	229
4 繪制水平和傾斜扭柱形的元綫·····	230
5 繪制一般类型直紋曲面的元綫·····	231

§5 具有平面曲率綫的可展曲面·····	232
1 測地綫切綫的球面指示綫·····	232
2 犁壁包容土堡角·····	234
3 可展曲面元綫的方向·····	235
4 起初曲綫的切綫的方向·····	237
結論·····	238
第七章 应用犁体曲面理論計算犁的工作部件·····	239
§1 土堡运动某些阶段的試驗研究·····	239
1 基本情况·····	239
2 研究方法·····	240
3 試驗結果·····	243
§2 高速犁体工作曲面的計算·····	250
1 概述·····	250
2 計算的前提·····	251
3 高速試驗性犁体的試驗結果·····	260
4 高速犁体計算的举例·····	265
§3 覆盖葡萄丛过冬的犁体工作曲面的計算·····	272
1 覆盖葡萄丛过冬的农艺要求及覆盖犁体必需的形狀·····	272
2 沟底傾斜布置时决定角之間关系的公式·····	276
3 覆盖犁体可展曲面的計算·····	279
結論·····	283
結束語·····	285
参考文献·····	289

緒 言

§1 犁体曲面理論的对象

犁体曲面理論是犁的理論的一部分，它包括：

a) 耕翻时土堡的运动(运动学和动力学)理論；

b) 犁体曲面的設計方法。

土堡运动力学在犁体曲面理論中具有重要的意义，用它来确定土粒的軌迹、速度和加速度，以及作用于土堡上的力和曲面形状、耕地速度、土壤物理机械性质的关系。耕地时土堡运动規律的知識，給予决定曲面几何参数对运动影响的可能性；其次，也可為選擇工作曲面最适宜的参数提出理論根据，用該曲面来完成所要求的工艺过程。

土堡运动的理論研究不能缺少土壤物理机械性质方面的某些知識。但是当概括的分析問題时，沒有必要拥有表示土壤性质的数量值，只要知道在每种具体情况下，土堡接近于那种类型物理体就够了，使分析它成为可能。那么具有某些抵抗变形能力的土堡，我們可以把它看作固体，可变形的物体；如果土粒間的联結破坏，則可看作是散粒体等等。研究自然界現象的这种方法（研究主要現象，消除掉次要的現象）在科学上是通用的，并且应用很广，例如在力学方面（絕對剛体，质点，理想液体，絕對彈性体等等）。

根据上面的叙述，在以后只分析土堡簡化模型的运动，在現代土壤性质知識水平下是可以完成的。

必須指出，按照耕翻过程的不同阶段使土堡承受变形，并且改变着自己的物理机械性质；这个变化决定于所完成的工艺过程本身的特性。鉴于以上所述，当研究土堡运动时，必須拥有关于耕翻时在土壤中所发生物理过程的明确的概念系統。

B. A. 热列果夫斯基院士在自己的論著“耕地工艺过程理論基

础”一文中揭示了在土壤中构成耕地过程实质的物理现象。遵循这个理论，我们可以解决当研究土垡运动时所产生的的一系列困难，这些困难在纯粹力学的基础上不能得到解决。其中，当解土垡沿犁壁相对运动轨迹的微分方程式时，曾应用耕地工艺过程理论求积分的常数项。

犁体曲面的设计方法不能看作与耕地时土垡运动理论是隔绝的。恰恰相反，只有在研究土垡运动的基础上，才可能实现具有科学依据的设计方法，这个设计方法直接以土垡运动和作用于土垡上的力所决定的曲面几何参数为依据。

首先，土垡在犁壁上的理论轨迹形状（按我们的术语叫做：“上极限轨迹”）属于这类参数。根据“已知的土垡极限轨迹”设计犁体曲面的方法，所得到的曲面不仅保证要求的土垡运动，而且保证所希望的力的作用性质；尤其是当已知轨迹、耕地速度和土壤物理机械性质时，可以计算犁体的牵引阻力。

和土垡极限轨迹密切联系的曲面的其他参数是曲面的切面（或者法线）方向在空间的总和。如果认为土垡对犁壁的摩擦角等于零。这个参数（“曲面的球面映象”）可由犁壁对土垡作用元力的总和求得，这样曾对法线偏斜为摩擦角的诸元力可认为和法线重合。

必须指出，力的作用方向总合并不决定曲面的形状，因为力的方向不仅和曲面的形状有关，而且和一些与曲面不相干的因素有关：如土垡对犁壁的摩擦角，土垡的相对运动轨迹等等。但是相反的任务可以解决，如果事先给出土壤的性质和求出土垡的运动，根据已知的球面映象可以求出作用力的方向。

根据“给出的球面映象”设计犁体曲面的方法可能得到无限量满足几何条件的曲面，这些几何条件即是曲面的切面和元线在空间的方向。这种方法许可根据给出的犁铧、犁胸和犁翼的配置设计曲面，正象 B. II. 郭列契金院士所建议的。用这种方法分析现有犁壁曲面几何形状很方便，同时也很重要。

土垡运动理论和在此理论基础所制定的犁壁设计方法，至

少可以实现和初步接近犁体曲面的工程计算，正如高速犁壁实例所表明的。

§2 犁壁理论发展历史简介

1. 土堡的运动理论

现代犁体工作曲面的形状是长期历史发展过程的结果[2]。在这个发展过程的一定阶段，产生了论证工作部件合理形状的必要性，这激起了科学家从事犁工作过程的研究。

犁的第一篇论著是伯力(Бейли)在1795年发表的。在该文中确定了保证土堡正确翻转所需的土堡断面尺寸，并求出耕地表面具有最大面积的条件。

拉姆布鲁什尼(Ламбрушини)(1832)和鲁得利费(Ридольфи)把土堡运动看作首先支于沟底绕土堡的一个棱边翻转，然后再绕另一个棱边。在此基础上，他们建议犁壁曲面由两个螺旋面构成，其中每一个螺旋面相应于上面所谈的翻转。

谢格依兹(Сегниц)(1856)求出了土堡上升的能量，认为运动是按拉姆布鲁什尼-鲁得利费理论进行，没有考虑摩擦力。

在给出土堡的尺寸和犁壁的形状，并以拉姆布鲁什尼-鲁得利费所建议的土堡运动为出发点时，格拉乌阿奈(Гранвуанэ)(1882)求出了土堡由于重力作用而对犁壁产生的压力，后来他曾建议在探求犁壁形状时应以克服土堡重力所产生摩擦力的最小拉力消耗为条件。

Т.М. 哥罗古尔斯基(Гологурский)(1916)研究了楔的碎土过程[3]，同时还研究了土壤的机械性质(摩擦力，抗压，抗剪，抗弯等)。

上面所提到的研究者的工作，都未能导致建立耕地时土堡运动的总理论，因为他们所分析的是单个的，有时是偶然的，并且是互相无关的土堡力学问题。因此犁的设计工作(和其他农业机器一样)在欧洲各国和在美国到不久之前还完全是用经验的方法进行。

В. П. 郭列契金院士对这个时期农业力学的发展进行了以下的批評^[4]：“专家們的主要注意力曾放在所謂机器学上，即放在无数工厂无数机器型号的学識上，对此不需要理論基础的准备，对任何理論都采取了輕視的态度，认为这些都不算数。”

农业机具理論的奠基者是偉大的俄罗斯和苏联的科学家瓦西里·普罗赫罗維奇·郭列契金 (Василий Прохорович Горячкин)。В. П. 郭列契金院士写了很多犁方面的理論經典著作。“犁的理論”，“楔的理論”，“可展犁壁曲面的設計”，“耕地机具的稳定性”，“拖拉机犁的拉力”和很多别的都属于此。在这些著作中分析了各式各样犁的理論問題，其中研究了土粒的軌迹，土壤的破碎理論，犁壁的設計方法，犁的稳定性問題，推导出了犁牵引力的合理公式。

犁壁非常重要的理論問題之一的研究是由 В. П. 郭列契金院士开始的，这就是土堡运动学（堡块相对运动和絕對运动軌迹的形状）。

这个問題在 В. П. 郭列契金的很多著作中都闡述过，其中有“农业力学”^[5]和“土壤沿犁壁的运动”^[6]。

在上面所指的著作中分析了土堡进到斜楔表面的規律，同时推导了土堡相对运动和絕對运动軌迹的微分方程式。但是由于沒有明显表示軌迹和土壤性质及耕地速度的关系，实际应用这些公式很困难。

可惜，土堡运动学問題到現在为止差不多沒有得到进一步的发展。

С. Я. 罗茲曼 (Розман) 曾着手土堡沿犁壁运动理論研究的尝试^[7,8]。但是他所求的土壤运动的特性不是由土堡上作用的力决定，而服从于預先給出的已知的运动图形，对于不同类型的犁壁不同，而力是根据所給出的运动求出。这种研究运动的途徑是不能得到正确結論的。

在 К. С. 赫維略 (Хвилья) 的著作中^[9,10]一般說来关于軌迹和不同因素关系的設想是正确的，但是沒有推导出軌迹方程式。

В.И. 布罗莫斯基(Буромский)_[11]用試驗方法求出了土堡沿犁壁的运动軌迹。研究目的在于求出犁壁作用于土堡上力的方向,不同因素(土壤的凝聚性,运动速度)对軌迹形状的影响沒有考虑到。

В.П. 郭列契金院士奠定了土堡运动的第二个主要理論問題——犁体受力問題的研究基础。推导出了犁牵引阻力的合理公式_[12,18]

$$P = fg + kab + \varepsilon abv^2$$

这个公式給出了牵引阻力构成部分的总概念。但是这个公式中的系数 k 和 ε 发现有很大变化。首先它們与土壤性质,耕地速度,犁壁曲面的形状有复杂的关系。В.П. 郭列契金院士本人曾指出系数 k 和 ε 与不同因素存在的关系:

“在将来,当更詳尽的研究时,这个公式三項中的每一項可能得到发展,用更复杂的函数关系代替。”

很多研究者在分析犁的牵引阻力合理公式时得出发展这个公式必要性的結論。И.Ф. 瓦西連科(Василенко)院士_[14]就是其中之一,首先注意到,該公式显然沒有考虑到曲面形状对犁牵引阻力的影响,并且提出了自己的公式,用一个特殊的系数估計到这种影响。

К.С. 赫維略_[10]在理論方面研究土堡运动的基础上,同样得出了改变В.П. 郭列契金公式必要性的結論。К.С. 赫維略沒有提出自己的牵引阻力公式。

Н.В. 舒契金(Шучкин)教授在发展В.П. 郭列契金公式的同时提出了阻力公式_[15],这个公式是在邏輯推論的基础上从В.П. 郭列契金公式中得出的。公式中有很多系数是用試驗的方法得到,所以具有經驗公式的性质。

此外,Н.В. 舒契金教授企图說明:“从一方面来說是土壤坚实度和土壤对金属的摩擦力;从另一方面来說是犁体牵引阻力,二者之間质方面的函数关系。”但是对犁确定那类关系未必可能。

正如Н.В.舒契金本人所写的：“……工作部件的形状和机具的运动速度对最终的拉力值产生影响。”

对于更简单一些形状的机具，例如楔子，看来可以求出类似的关系式（当然速度仅仅在一定范围内变化）。А.Н.泽列宁（Зеленин）_[16]求出了用楔剪切土壤的阻力与坚实度 ДОРНИИ 指数之间的关系式。

Г.И.波克罗夫斯基（Покровский）教授_[17]从挤压土壤的能量消耗和克服摩擦力的角度出发，推导出了犁体牵引阻力的公式。但是在公式中没有犁体参数和耕地速度。

Г.Н.西涅奥科夫（Синеоков）_[18]曾完成了犁体受力的试验研究。

在国外学者的论著中，Р.多涅罗（Доннер）和 М.Л.尼科利斯（Никольс）_[19]的著作是值得注意的。在这个著作中推导出了土堡由于摩擦力作用承受挤压力的公式。但是作者没有把公式和土堡在曲面上的轨迹形状联系起来，在设计犁壁曲面时不可能利用它。Р.多涅罗和 М.Л.尼科利斯的著作没有得到进一步发展，没有引起注意，很快被忘记了。在晚些时候（1954）在研究土堡沿犁壁运动过程中我们曾推导出了类似的公式，它是所建议的土堡运动理论的一部分。

В.А.热列果夫斯基院士的著作“耕地工艺过程理论基础”_[20]对进一步发展犁的理论具有特别重要的价值。在这篇论著中分析了当耕作土壤时发生的物理过程，把土壤看作是水分，空气和土粒构成的复杂的物理体。

В.А.热列果夫斯基所提出的碎土理论，简述如下：土堡进入犁体曲面，受到挤压，这时土粒接近且承受塑性变形，从中挤出的水分包围住土粒空隙间的空气。当挤压土堡时，空气受到压缩，储藏压缩势能，而当压缩力停止作用时空气膨胀，土粒彼此裂开，这样来使土堡破碎。在文章中还确定了犁壁的碎土作用和作用在土堡上力方向的关系。