

[苏联] Г.И.波克罗夫斯基 合著
И.С.费多罗夫

刘清荣 黄文彬 合译

在变形介质中 冲击与爆破作用

中国工业出版社

在变形介质中冲击与爆破作用

Г.И.波克罗夫斯基 合著
〔苏联〕 И.С.费多罗夫

刘清荣 黄文彬 合译

中国工业出版社

书中叙述了爆炸时的各种现象和在土壤、岩石中爆炸作用的物理原理，叙述了不同爆破参数的计算公式，阐述了相似理论、冲击和爆炸的模拟方法，也阐述了土壤、岩石和建筑材料中冲击和爆破的模拟作用。

本书适用于科学工作者、各方面的建筑工程技术人员、矿山爆破工程技术人员，以及有关高等院校师生阅读和参考。

Г. И. Покровский, И. С. Федоров
ДЕЙСТВИЕ УДАРА И ВЗРЫВА
В ДЕФОРМИРУЕМЫХ СРЕДАХ
Промстройиздат Москва 1957

在变形介质中冲击与爆破作用
刘清荣 黄文彬 合译

建筑工程部图书编辑部编辑(北京西郊百万庄)

中国工业出版社出版(北京佳林路10号)

北京市书刊出版业营业许可出字第110号

中国工业出版社第四印刷厂印刷

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·字数233,000

1965年7月北京第一版·1965年7月北京第一次印刷

印数0001—1,840·定价(科五)1.20元

统一书号: 15165·413(建工-29)

前 言

在采矿工业和建筑工程中，广泛地应用着爆破作业。对于劳动量大而又繁重的采矿和土方工程而言，应用爆破能量的可能性是众所周知的，然而，在理論上，这一可能性只是在某些情况下才有所依据。与此同时，应用爆炸能量的实践，对研究和改进爆破参数的計算方法、在矿岩中以及在破坏各种构筑物时的爆炸作用，提出了許多新的要求。为了滿足实践的需要，本书闡述了与爆炸和冲击作用及其模拟方法相关的一系列物理問題。此外，书中还闡述了借助于爆破来解决的各种工程問題的經驗分析，以及解决这类問題所依据的物理規律。

苏联爆破工作者的丰富实践經驗 和在这方面的各种 理論研究，至今尚未汇合成为一个統一的体系，从而很难交流經驗。結果，常常发生一些誤解和錯誤（例如，錯誤地解释炮眼中聚能装葯的作用等）。

本书提出了許多原理和計算方法，是基于热力学第一定律和第二定律来发展模拟理論的一种嘗試。該方法甚至对那些連数学描述还不清楚的过程也可以确定出相似規律性。

作者期望本书能够有助于爆炸和冲击作用的研究和計算方法的进一步发展与完善。作者对諸讀者和各单位所提出的批評意見預先表示感謝。

目 录

前 言

緒 論 1

第一章 冲击和爆炸的基本規律 5

第一节 爆炸的各种形式 5

第二节 爆炸时爆裹的传播 13

第三节 聚能爆炸物理学 16

第四节 定向爆破作用的物理学 24

第二章 介质中的爆炸作用 39

第一节 历史回顧 39

第二节 岩石中爆炸作用的一般定性情况 41

第三节 变形波的结构 45

第四节 爆炸自动模拟的基本原理 48

第五节 考虑介质和炸药性质时的自动模拟规律的扩展 53

第六节 在平峒和管道中的空气和气体冲击波 61

第七节 土壤中爆炸作用的特点 61

第八节 爆炸冲量在土壤中的传播 64

第三章 在介质中炸药量的計算 72

第一节 爆炸时岩石破坏区和单位炸药消耗量的确定 72

集中药包破碎岩石作用的理論計算 72

柱状药包破碎岩石作用的理論計算 75

抛掷岩石时炸药量的計算 81

最小抵抗綫数值很大时抛掷爆破炸药量的計算 85

水平抛掷与定向抛掷岩石的炸药量計算 93

大爆破时抛掷岩石炸药量計算方法的实验验证 94

抛掷爆破炸药量新計算公式的应用范围 98

抛掷爆破时提高炸药能量利用率的途径 104

第二节 炮眼法和深孔药包法破碎岩石 111

炮眼法破碎岩石 111

集中药包破碎岩石 115

第三节 爆炸时岩石的移动 115

爆炸时岩石移动的流体动力学理論.....	115
抛擲和水平抛擲爆破时岩石碎块的飞散.....	120
爆炸的地震作用.....	122
殉爆現象.....	124
药包外壳碎片的速度.....	125
第四章 相似理論和动力过程的模拟方法	126
第一节 历史回顧.....	126
第二节 应用热力学的相似准則和量綱准則研究	
冲击模拟現象.....	127
第三节 应用热力学的相似准則和量綱准則研究	
炸药的爆炸模拟.....	139
第五章 动力过程的模拟实际应用	152
第一节 土壤抛擲爆破的模型研究.....	152
第二节 在爆破作用下模型土壤內应力分布的研究.....	162
爆破效率的計算.....	162
爆破所产生的应力.....	169
爆破点附近冲击波的传播.....	178
爆炸过程的分析和評述.....	189
在砂土和粘土中爆炸应力的測定試驗.....	194
在层状結構中爆破时应力的測定試驗.....	213
第三节 爆破时土壤变形圈的研究.....	221
土壤变形圈半径的理論計算.....	221
爆破时土壤变形的实验研究.....	227
第四节 在硬岩中炸药爆破时破坏半径和球形裂隙的研究.....	236
破坏半径和远处的球形裂隙的理論計算.....	236
用实验确定不同材料、岩石的破坏半径和裂隙半径.....	239
第五节 在不同的冲击与爆炸作用下鋼筋混凝土梁动力变形的	
研究.....	249
理論上的假定.....	249
研究在冲击和爆炸作用下梁弯曲的方法与装置.....	252
冲击、发射和爆炸时鋼筋混凝土梁的彈性变形的研究結果.....	256
冲击和爆炸时彈性变形的研究結果的分析.....	264
第六节 結論.....	269
第七节 考虑动力振动的土坝稳定性的研究.....	270

VI

水工結構物的动力振动模拟.....	270
离心机上模拟动載荷作用下土坝稳定性的装置.....	274
試驗結果.....	275
第八节 結束語	279
参考文献	280

緒 論

物质初始状态的突然变化并极其迅速地释放出大量能量的现象，通常称为爆炸。被释放出来的能量将使周围介质产生剧烈的破坏。任何物体，当它们以很高的速度碰撞时，也会产生爆炸现象。

下列物质，例如阿莫尼特、狄納米特、梯恩梯、特屈儿、里索金、四硝化戊四醇、硝化棉、有烟火药和无烟火药等等的爆炸，就是释放出大量能量的典型情况。

热能、电能、原子能，以及高速运动的物体的动能，皆可引起爆炸。当火花放电或通过细导线放电时，电能将转化为热能，使空气受热或引起金属导线的气化，这时所发生的现象，就是爆炸所特有的现象。

当原子核内能转化为核碎片的动能时，在瞬间内将释放出巨大的能量，从而导致爆炸。

高速运动的物体碰撞时，例如陨石墜地，将释放出热能，这些热能足以使碰撞体加热，并使其变为炽热的压缩气团，从而引起猛力爆炸（通古斯陨石、錫霍特-阿林陨石，以及其它陨石爆炸等等）。

在自然界中，有时会发生大规模的火山爆炸。地震的震源也属于爆炸之列。强烈地震的能量是以 $10^{23} \sim 10^{25}$ 尔格来衡量的，为了获得同样的效果，必须有几千吨乃至几亿吨的炸药。

在太阳中，可以观测到猛力爆炸；在星际宇宙中（譬如在所谓的“新星”和“超新星”中）亦可观测到爆炸，而且具有更大的规模。

在技术中，爆炸是用炸药的化学能来实现的，并用以破碎岩

石和抛擲岩石，以及破坏建筑物、各种结构物、冰等等。

应用于技术中的爆炸，其物理过程是非常复杂的和多种多样的，而且过去还研究得很少。现在，各国正进行着爆破工程的理论与实践方面的大量研究工作。

实际上，人们熟悉爆炸现象是比较早的。譬如，早在1548年，立陶宛的涅曼河曾借助于爆炸法清理了船只的航路；而17世纪起，在采矿工程中就已经广泛地应用了有烟火药来破碎岩石。但是，对于爆炸这样特有的现象下一个科学的定义，需要有高度发展的自然科学。在18世纪，俄罗斯彼得堡当代科学家 M. B. 罗蒙诺索夫、埃列尔、伯努里、雷曼等人的卓越的著作，给自然科学的发展提供了必要的前提。M. B. 罗蒙诺索夫关于物质不灭定律的发现是上述这些著作的基本环节。他最先对爆炸作了科学的分析，并在1749年所写的“论硝石的成因和性质”一书中，给爆炸下了定义（译成现代的术语）：爆炸是一种瞬时释放大 量气体和大量能量的现象。

这一爆炸的定义，迄今仍保留着它的意义。特别是根据这一定义可以找出通常不仅从多数人的注意中，而且甚至会从专家们注意中容易忽略的一些爆炸形式。

如果从 M. B. 罗蒙诺索夫的定义出发，那么就可以揭示出下列一些爆炸形式，例如火花放电、球形闪电、陨石碰撞，等等。

现代自然科学和工业，会愈来愈多地遇到这样的现象，即物体承受极高的压力作用，这时会产生很高的温度，而且物质的运动速度将远远地超过不久前还认为无法达到的限度。为了掌握物质运动的新形式，研究爆炸及其各种变化，可以说是非常必要的。

应当指出，近几个世纪技术发展的标志，是集聚在炸药中的能量储备和功率的不断地和急剧地增长。其中最具有代表性的指标，就是某一既定的单位重量炸药的功率。

在能够保证单位质量具有高功率的各种过程当中，猛烈爆炸的特点是具有多样性和适应性，并且包含有许多尚未应用于实验物理和工程物理中的可能性。在工业、建筑工程，以及国民经济

的其它部門中，广泛地应用爆炸肯定是有远大前途的。然而，在爆炸学說的比較緩慢发展和該領域在工程中应用的巨大可能性之間，存在着很大的差距。

早在 19 世紀末，Д.И. 門捷列夫曾給爆炸科学提出如下的任务〔1〕：“最初有这样一种看法，即目前各国所有从事該学科（不久以前，只是一些專門的职业活动，例如炮手、火工术者、法国的火药工程师和硝石工程师等人才感到兴趣的一門学科）的科学家們，仅仅为一个窄小的技术分支服务，这样一来就失去了爆炸科学的更广泛的科学上和社会上的效用，而且也徒劳无益地承受了研究炸药时所經常遇到的危險……。

但是，这种看法是和事实不符的。我們用不着去提醒下列事实，諸如将化学-物理知識与炸药工程一結合，就导致黑火药和有烟火药被完全新的品种所代替了；真正成为全民性的軍事义务以后，也将落在爆炸科学人員的肩上，并責成他們在保卫和平方面做出貢獻；随着工业的发展，民用的爆破力日益有所增加；等等。我們只提一下本学科的两个方面，它吸引着全世界的科学家来从事炸药的研究工作。

一般容易研究的物理現象和化学現象，經常是在低溫和低压条件下进行的，我們將得到的物质方面的知識受这些条件所限。何况，無論在地壳內部和太阳中，或者在大多数的其它情况下，物质恰好是处在（或一度处在）这样的高溫和强大压力之下，致使自然科学家們不能进行自己的观察。而炸药則極其容易地达到高溫和高压的綜合性条件”。

爆炸科学已經有了相当程度的发展，但与此同时也提高了对它的要求。可以認為，从总体上看，上面所引述的 Д.И. 門捷列夫一段話現今仍未失去它的意义。

新的超功率能源的发现和現代技术中功率的急剧增长，給爆炸学說領域提出了一系列的理論、实验和应用方面的課題。但是，只有当爆炸学說的总水平达到了足够高度的条件下，只有在該領域內对某些基本問題深入而全面地研究的条件下，上述这些課題

才能更有效地解决。

本书不可能詳尽地討論与自然界及技术中爆炸和冲击現象有关的一切問題。这里只是詳細地討論了与目前生产上所用炸藥有关的問題；在动載荷作用下，水工結構物的稳定性問題；爆轰物理基础；聚能效应；定向爆炸作用現象；变形波的某些特点；爆炸冲量通过土壤的传递；爆炸时岩石破坏范围的确定方法；破碎和抛掷岩石时，計算炸藥量的新公式；爆炸时岩石移动及其地震作用。

本书詳細地討論了相似理論和动力过程的模拟方法，爆炸和冲击模拟法的实际应用，在硬岩中計算爆炸后所形成的裂隙半径和变形圈半径的方法。此外，还叙述了在各种不同的爆炸和冲击作用下，鋼筋混凝土梁的动力变形的研究以及利用模型对于考虑动力振动时地下水工結構物稳定性的研究。

第一章

冲击和爆炸的基本规律

第一节 爆炸的各种形式

通常，人们都把爆炸同炸药的某种形式的转化联系在一起。这缩小了爆炸知识的领域，并不可能更广泛和有效地运用这一领域中所确定的各种规律性。其实，爆炸的概念可以更广义些，因为它包括单元粒子的位能高速转化成动能的所有过程。爆炸的传播是超音速的，同时使爆炸产物开始也以超音速扩散（飞散）。

根据爆炸时释放的位能形式，最重要的爆炸形式有下列几种（图1）：

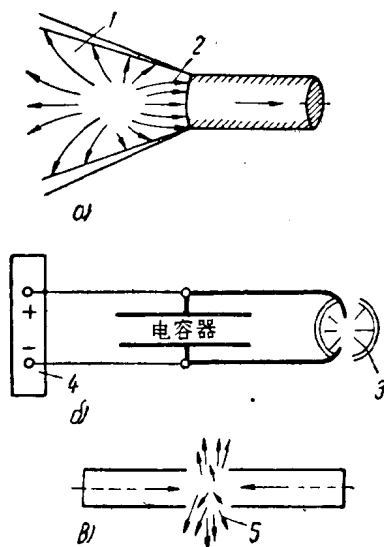


图 1 爆炸的几种形式

- a) 在爆轰过程中的药包爆炸；
 b) 电容电荷；c) 两杆碰击。
 1—扩散的爆炸产物；2—爆轰波波锋；3—空气中冲击波波锋；4—电源；5—被冲击破碎的物质的飞散

- 1) 分子电子层或原子核位能释放所产生的爆炸(图1, a);
- 2) 瞬时放电所产生的爆炸, 特别是当导綫烧毁或脉冲电流击穿电介质时所发生的瞬时放电引起的爆炸(图1, б);
- 3) 沿不同方向运动着的两个或更多数量的物体相互碰撞时所产生的爆炸, 此时物体所具有的动能, 最低应能保证部分碰撞体的完全破碎和破碎产物的猛烈飞散(图1, в)。

为了实现上述各种形式的爆炸, 物质单位体积内必须具有足够的能量, 使其粉碎成细小的颗粒, 并且无论在破碎体中或者在周围介质中至少能使这些颗粒的一部分具有超音速的速度。虽然能够进行爆炸的条件有多种多样, 但仍可确定某些共同的爆炸规律。例如, 爆炸结果所得到的物质是严格按照药包几何形状及其结构所决定的方向运动的。如果药包作得很仔细, 则可以作到非常准确地控制爆炸产物的运动及其能量在空间的分布。这些, 对于工程技术和实验科学也具有应用的可能性, 但很难给予过高的估价。

更进一步来说, 由于爆炸具有明显的几何特性, 就可以在此领域中确定有关量方面的一般规律, 后者适用范围很广。应当指出, 许多苏联学者和工程师, 如 M. A. 沙道夫斯基、Ю. Б. 哈里頓、Я. Б. 捷里多維奇、M. A. 拉弗連契耶夫、A. Ф. 別利亚耶夫、O. E. 弗拉索夫、K. П. 斯达紐柯維奇、П. И. 謝多夫和其他许多人等, 在这方面作出了有成绩的工作。

最近几年所确立的一般规律, 就可使各种不同的爆炸形式归纳成统一的体系, 并且将通常似乎彼此互不相干的现象联系起来。现仅举出下列几点作为各种爆炸形式的实例:

- 1) 在宇宙中不止一次地观察到的《新星》和《超新星》的形成, 这可以看作是原有不太明显的稳定的星体的爆炸;
- 2) 隕石对行星的冲击或高速运行的天体的其他形式的碰撞;
- 3) 地壳中机械应力能量以某种形式自发地放出, 从而引起地震;

4) 火山爆发时的某些现象(例如, 克拉卡島火山爆炸^①);
 5) 一般爆破工程以及地震勘探中所用的各种不同爆炸形式;

6) 引起金属破碎的微量放电(显然, 用作电化腐蚀方法加工金属时正是产生这类现象);

7) 坚硬物体在阴极雾化时的某些现象, 等等。

星体爆炸应视为大量气态物质平衡的突然破坏。这种超威力爆炸形式发生之前, 由于星体内部释放出巨大数量的原子能使气态物质受热。天文学家通过观察确定, 以前不明亮的小星有时会突然地明亮了数百万倍。这种闪光是由于在星体原子爆炸时, 产生的迅速扩散的气体云而出現的。渐渐失去本身光亮的爆炸气体的进一步扩散, 在好几个世纪的时期中都可观测到。

很显然, 通常很近似于球形的星体在爆炸时, 爆炸气体并非均等地向各个方向飞散, 这可由许多不同的原因来解释, 在这里指出这点是有益的。通常认为, 最强的辉光是在扩散的气体同不可见的宇宙云相碰的地方见到的。这些气体在冲击时变热而开始发光。

由于化学反应而释放出能量的那种爆炸, 称为化学爆炸。可是, 如果没有其它形式的爆炸的话, 则化学爆炸本身在实践中就不可能应用那么广泛。为了引起爆炸, 必须有起爆能。由于放电而产生的冲击或爆炸, 经常可作为起爆能。

下面我们将较详细地论述一下冲击时的爆炸。假设我们有一个迅速飞行的子弹, 它在飞行过程中遇到一块硬护板。子弹冲击护板时, 迅速地毁坏, 并使护板受到部分破坏。这时, 子弹运动的能量, 主要是消耗在被破坏材料的强力加热上和它们以极大的速度向四方飞散上。结果几乎在瞬间内释放出大量的热和出现高速飞向四方的粉碎的小粒子流。这粒子流本身的许多性质恰如扩散的气体一样。因此, 子弹在冲击时的破坏与爆炸具有某些相似

① 克拉卡島火山在印度尼西亚, 1883 年发生火山爆发, 是当时世界上最大的一次。——譯者注

的地方。如果子弹的速度大约增至 1.5 公里/秒时，那么，在冲击时释放出的能量作用下，子弹的金属便开始熔化和蒸发。在这种情况下，我们便获得强力冲击下的爆炸的全部景象。

在撞针冲击作用下，枪筒中引信的爆炸是冲击爆炸的特殊而较复杂的情形。这时，一部分活性物质开始被引燃，然后迅速燃烧到活性物质的其余部分，最后到整个发射药。

星球陨石坠落时发生的爆炸是冲击爆炸的另一个最显明的例子。在宇宙空间中快速飞行的陨石，当它以每秒数公里，有时以每秒数十公里的速度进入地球大气层时，受到巨大的大气阻力。与运行物体的前部相碰撞的空气，将加热到几万度的高温。由于和炽热空气相接触，陨石表面开始加热，熔化和蒸发。墜入大气层的小天体，往往未达地表就完全烧毁。如果陨石的质量很大（初始质量大于 1 万吨），那么，它在大气中来不及烧尽而落在地球上，并且穿入地层的深度不能超过其直径的 1~2 倍。这是因为陨石在穿入土壤时，破坏得极为迅速，当它所经过的路程等于其直径的 1~2 倍时，便完全转化为赤热的气体（图 2）。这里，我们得到了完全与爆炸相似的效果。而且通过精确的计算可以证明，不坚固的物体以约等于 3 公里/秒的速度冲击坚固的障碍物，以及物体以 4 公里/秒的速度与强度相等的障碍物相碰时，按其性质而言，完全与中等威力药包的爆炸相似。因此可以认为，巨大的陨石的冲击确实可以产生强力的爆炸。例如，1908 年夏天墜落于西伯利亚通古斯河畔的巨大的陨石发生了爆炸，爆炸的结果使大森林中许多公里范围以内的树木崩倒了。按所破坏的总体而论，

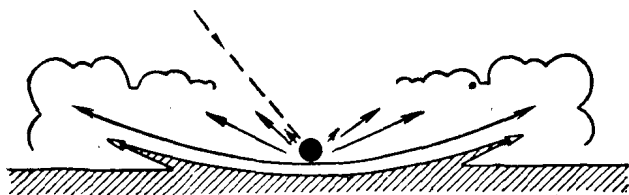


图 2 陨石对地球表面的冲击示意图

可以認為通古斯隕石的爆炸力大約和一百萬噸梯恩梯的爆炸作用相仿。

與巨大威力爆炸（例如，隕石墜落時發生的爆炸）的同時，還存在微觀的小規模爆炸。儘管是微觀的爆炸，它們卻對科學和技術具有很重要的意義。這裡所指的是所謂一種汽穴現象，其實質如下所述。

假設在某種液流中，例如在水中，壓力急劇地降低。於是，液體中的極小空氣泡，開始迅速膨脹。此時液體如沸騰一般。如果液體中壓力急劇升高，則氣泡迅速地被壓縮和砰然閉合。這時，向氣泡中心運動的液體物質的運動速度逐漸增大，而達氣泡中心處卻驟然停止（圖3）。在停止時釋放出大量能量，因而一部分水被蒸發，並使其溫度短時升高到大約 $10,000^{\circ}\text{C}$ 左右。儘管被加熱的水的體積極小，但其溫度卻超過了威力最高的炸藥爆炸時所測到的溫度，並足以使水分子電子層的一部分受到破壞。汽穴現象伴隨著短時的發光現象。

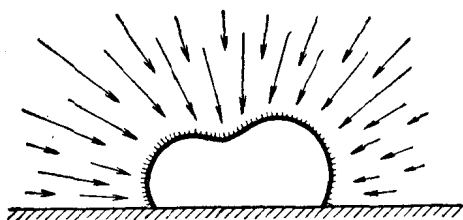


圖 3 在汽穴現象中空氣泡減小時液體的流動

如果在水工結構物中（例如，在透平機葉片附近等），水的運動速度調節得不够好，則在液流的一定地方可能發生汽穴現象。接連不斷發生的微小爆炸的力量也是非常大的，它能夠迅速地破壞最堅硬的金屬。這將導致透平機葉片和螺旋推進器葉片過早地報廢。對於汽穴破壞作用，必須用消除引起汽穴氣泡的脈沖現象的辦法，來進行徹底地預防。

看來，不久的將來，就會借助於汽穴作用來加工金屬和其它

坚硬的材料。为此，可以在液体中，通过超声振动用人工方法造成汽穴作用。

下面我们研究一下电爆现象。闪电（一种强大的放电）可作为电爆最常见的例子。当发生闪电的情况下，离子流（带电粒子）穿透空气，并强力地使之加热。由于被加热的空气流迅速地扩散，在空气中就好像发生了补充的气体物质一样。因而，可以认为，闪电同样是爆炸的一种特殊形式。除闪电之外，还有很多种电爆形式。其实，任何电火花都是微小的，但按其规模却是一种最强力的爆炸。在电火花足够聚集时，可以在百万分之一秒的时间内得到大约等于第聶伯河水电站的功率，且温度接近于 $100,000^{\circ}\text{C}$ 。按爆炸能量集中程度的不同，集中（加强）的电力放电约超过威力最大的炸药的9倍。例如，当以电容为数十微法，电压达数万伏的电容器作为能源，在用电火花击穿电介质的条件下，便可获得上述的结果。放电应当尽可能在感应最小的电路中通过，而且大部分能量的释出应该约在一千万分之一秒的时间之内。

应当指出，在电爆领域内，也正象一系列其它的物理爆破领域内一样，还有很多尚未解决的问题。球状闪电的爆炸问题应属于未解决的问题之列。

众所周知，球状闪电是在闪电与某些障碍物冲击时发生的。这时形成了耀眼的明亮的火球，它易于被风吹动，能发出特别的噼啪声响，并且好象具有强烈的内部运动。如果这种闪电遇到任何一种略微阻止其内部运动的障碍物，它就能够以巨大的力量爆炸。

长时间以来，多次试图阐明这种奇特的自然现象的本质，都没有成功。著名的苏联物理学家 Я.И. 弗連克耳非常重视这个问题的研究。从他的前提条件出发，苏联科学院的同事 B.A. 别洛康尼对球状闪电提出了下列解释。在闪电击穿大气时，发现有密集的带电粒子组的运动。若带电粒子流遇到障碍物，则它被阻止而形成环状旋风。这时，由于电的引力作用而形成了由带电荷的粒子组成的旋风壳，其电荷与旋风内部的电荷恰好相反（图4）。