

球磨机

介质工作 理论与实践

段希祥 曹亦俊 编著

冶金工业出版社



球磨机介质工作理论与实践

冶金工业出版社

ISBN 7-5024-2385-0



9 787502 423858 >

TD453
D-896

ISBN 7-5024-2385-0
TD · 329 定价15.00元

TD453
D-896

球磨机介质工作理论与实践

段希祥 编著
曹亦俊

北 京

冶金工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

球磨机介质工作理论与实践/段希祥,曹亦俊编著.
北京:冶金工业出版社,1999.8
ISBN 7-5024-2385-0

I. 球… I. ①段…②曹… II. 球磨机-磨矿-研究 IV. TD453

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 45991 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 黄淦祥 美术编辑 王耀忠 责任校对 朱翔 责任印制 牛晓波
北京源海印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1999 年 8 月第 1 版,1999 年 8 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32;6.625 印张;177 千字;204 页;1-1500 册

15.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64013877

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

球磨机是矿料碎磨作业的主要设备,在有色、黑色、化工、核工业及建材的矿物选矿和加工业中占有重要地位,在煤炭及电力等部门中被广泛应用。但由于磨矿过程的复杂性,对球磨机介质工作理论的研究一直不透彻,实践中对球磨机的装球与补给等工作均是以少数经验公式为依据,或者完全凭经验,难以有效地提高磨碎效率。笔者在总结自己多年来的科研成果及实践经验的基础上写成这本《球磨机介质工作理论与实践》。本书从岩矿的抗破碎性能和磨矿过程的力学原理出发,对钢球尺寸进行选择计算,导出了钢球直径半理论公式,较详细地论述了钢球尺寸、充填率及钢球质量等对磨矿过程的影响,较合理地解决了粗磨及细磨中的介质选择计算问题。书中还详细地介绍了将该项研究成果用于十几个选矿厂在提高磨矿效率、降低球耗等方面的效果,体现了理论与实践的紧密结合。本书可供从事矿物加工人员,研究粉碎理论及工艺的工程技术人员,本科生和研究生使用;亦可供从事矿料粉碎的工程技术人员参考。

全书共分6章,第1、2、3、4章由段希祥撰著,第5、6章由曹亦俊撰著。全书由段希祥审订及修改定稿。

由于笔者水平所限,经验不足,仓促成书,书中缺点及错误,衷心希望读者批评指正。

著 者

1998年12月

152-40-08

目 录

1 绪论	1
1.1 球磨机介质的工作理论及发展	1
1.2 球磨机介质工作理论须研究的问题	4
2 岩矿的抗破碎力学性质	7
2.1 岩矿的力学强度与力学性质特征	7
2.1.1 矿物的力学性质与强度	7
2.1.2 岩矿的力学强度	10
2.1.3 岩矿力学性质特征	11
2.2 岩矿的力学强度测定	13
2.2.1 岩矿力学性质的研究方法	13
2.2.2 标准力学试件抗压强度测定	14
2.2.3 标准力学试件抗压强度测定结果分析讨论	16
2.3 不规则矿块力学强度测定	18
2.3.1 不规则矿块的普遍性	19
2.3.2 不规则矿块的抗破碎性能研究	20
2.3.3 不规则矿块抗破碎性能测定	23
2.3.4 不规则矿块抗压强度确定的方法	26
3 磨矿过程的力学原理	29
3.1 磨矿过程的性质及目的	30
3.1.1 磨矿作业分类及目的要求	30
3.1.2 选矿前的磨矿及要求	32
3.1.3 金属矿磨矿的特性及要求	35
3.2 岩矿破碎的力学过程	38
3.2.1 矿物晶体破碎理论	38
3.2.2 岩矿破碎的强度理论	41
3.2.3 岩矿的破碎形式与破碎力的关系	45

3.2.4	破碎产品的粒度与能态	48
3.2.4.1	粉碎所需能量与产品粒度的模型研究	49
3.2.4.2	粉碎所需能量与产品粒度特性的关系研究	53
3.2.4.3	粉碎所需能量与产品粒度特性对磨矿的启示	55
3.3	钢球在磨矿中的力学作用	56
3.3.1	磨矿过程的耗能与节能	56
3.3.2	钢球在磨机中的运动与能态变化	59
3.3.3	钢球对矿粒的磨矿作用	61
3.3.4	球荷的能态与磨矿作用	66
4	球磨机钢球尺寸的选择计算	72
4.1	钢球尺寸的选择综述	72
4.1.1	影响钢球尺寸的因素	72
4.1.2	确定钢球尺寸的过程与方法	75
4.1.3	试验确定球径的方法	79
4.1.4	经验球径公式的局限性与误差	82
4.1.5	实践确定球径经验方法的普遍性	85
4.2	钢球直径的半理论公式推导	88
4.2.1	矿块或矿粒的抗破坏能量 $E_{\text{抗}}$	89
4.2.2	钢球的打击动能 E_0	90
4.2.3	钢球直径的半理论公式与经验修正	92
4.3	球径半理论公式的验证分析	97
4.3.1	与各个常见球径公式的计算结果比较分析	97
4.3.2	球径半理论公式的适应性分析	100
4.3.3	粗磨、细磨的工艺特征及对球径选择的要求	102
4.4	钢球对磨矿过程的影响	104
4.4.1	钢球充填率的影响	104
4.4.2	钢球尺寸的影响	106
4.4.3	钢球质量的影响	108
4.4.4	钢球材质成分对选矿工艺的影响	110
5	粗磨机钢球尺寸的选择及应用	113
5.1	国内外粗磨机中钢球尺寸的状况分析	113
5.1.1	国外粗磨机钢球尺寸的状况	113

5.1.2	我国粗磨机钢球尺寸的现状	115
5.1.3	我国粗磨机钢球尺寸偏大的原因	118
5.1.4	降低粗磨机钢球尺寸的尝试	121
5.2	按自然矿块实际需要的破碎力选择粗磨机球径	124
5.2.1	粗磨机球径的精确选择计算	124
5.2.2	破碎统计力学原理在钢球尺寸配比中的应用	127
5.2.3	各种装球制度下的磨矿作用	129
5.2.4	球径精确化下的磨矿效果	131
5.3	粗磨机精确选择球径的生产应用	132
5.3.1	某铁矿选厂的生产应用	132
5.3.2	某公司选厂的试验及应用	137
5.3.3	某金矿选厂的试验及应用	144
6	细磨机磨矿介质的选择及应用	147
6.1	国内外细磨介质的应用概述	147
6.1.1	国外应用研究概况	147
6.1.2	国内应用研究概况	148
6.2	矿石细磨过程的特征及对介质的要求	152
6.2.1	矿石细磨过程的工艺特征	152
6.2.2	矿石细磨过程对介质的特殊要求	158
6.3	细磨介质尺寸的精确选择计算	159
6.3.1	试验选择方法	159
6.3.2	半理论公式计算法	161
6.4	细磨介质的形状选择	162
6.4.1	球形介质对细磨过程的不适应性	162
6.4.2	短柱形介质在细磨中的优势	164
6.4.3	短柱形介质的参数选择	165
6.5	细磨介质的材质选择	166
6.5.1	材质质量及硬度对细磨指标的影响	166
6.5.2	介质制造加工方式对细磨经济指标的影响	167
6.5.3	金属晶体与抗磨特性	170
6.5.4	材质加工方式的合理选择	174
6.5.5	新型细磨介质的提出及应用研究	174

6.6 新型细磨介质的工业试验及应用	175
6.6.1 锡矿选矿厂细磨机中的试验及应用	175
6.6.2 硬质石英砂岩铜矿选厂中的试验及应用	179
6.6.3 镍矿选厂细磨过程的试验研究	184
6.6.4 铁矿选厂细磨过程的试验及应用	189
6.7 新型细磨介质的扩展运用	191
6.7.1 中粗粒级磨机介质选择存在的问题	191
6.7.2 新型细磨介质扩展到中粗粒级磨机的应用	193
参考文献	199

1 绪 论

1.1 球磨机介质的工作理论及发展

自 1893 年球磨机出现 100 多年以来,它在金属矿及非金属矿选矿厂、冶金、建材、化工及电力部门等若干基础行业的矿料粉碎中得到广泛的应用。球磨机在工业上应用及发展中经历了如此长时间而未被淘汰的这个事实本身就说明它从结构到工作原理基本上是可靠的及合理的,性能也是比较好的,虽然它也有些缺点,但要将它从矿料粉碎中淘汰出去是相当困难的。换句话说,球磨机在今后相当长的时期内仍将是矿料磨碎作业的主要设备,对它的工作理论进行深入研究仍是十分必要的及有价值的。

球磨机在磨矿过程中由于参变数众多,问题错综复杂,研究起来是十分困难的。长期以来,选矿及粉碎工作者们对磨机磨矿介质进行了大量研究,也取得不少成就。但对球磨介质而言,仅能对球介质作抛落运动的特殊状态进行定量的数学描述;对球介质的泻落运动状态只能进行定性的描述。即使是出现更早的棒磨机,也只能对棒介质的运动作定性描述。50 年代后兴起的自磨机,虽然已有 40 多年历史,但对自磨机的工作原理仍在争议之中,有的认为以冲击为主,有的认为以磨剥为主。因此,即使是出现上百年的而且研究比较多的球磨机,其工作理论也仍然是研究得很不透彻,甚至连球的尺寸确定这样基本的问题在这以前也只得借助经验及经验公式来解决。球磨介质工作理论的这种现状,为选矿及粉碎工作者提出了任重而道远的研究任务。

纵观过去进行的球磨介质工作理论研究,主要是研究磨机内钢球作抛落运动的情况^[1,2]。这方面有代表性的是 E. W. 戴维斯(Davis)及 Л. Б. 列文逊(Левесон),还有我国的王仁东。他们的研

究始于 20 世纪 30 年代，其研究的方法是在具有玻璃端盖的实验室磨机中用快速摄影照相摄下磨机内钢球的运动轨迹，确定了钢球作抛落运动时，轨迹由圆及抛物线组成，然后用数学分析方法建立钢球的圆运动及抛物运动基本方程式，并用此组方程式求解在钢球运动轨迹上各特殊点的几何位置，进而能从数学上定量地描述钢球运动的轨迹。按照他们的研究成果，只要知道磨机规格、转速及装球率，就可以求解钢球运动的各种问题，包括临界转速率、由泻落运动进入抛落运动的界限、钢球运动的动能、最大的落下高度、适宜的装球率、钢球能态的调节，直至计算磨机需用的功率等等。应该说，E. W. 戴维斯等人的钢球运动理论是严密的及完整的，而且迄今为止也还没有更完善的理论可代替它们。当然也应该看到，这个传统的理论也有它们的缺陷，因为它们是在假设磨机内只装钢球且钢球无滑动及相互间没有作用的前提下推导出来的，其假设前提与实际有出入。但是，实验及生产实践表明，当磨机内存在水及矿砂并且球荷充填率达到 40%~50% 时，钢球基本无滑动，与理论推导假设的前提条件相符，而且工业生产中球荷的充填率多在 40%~50%，恰好符合上述理论的要求。因此，这个传统理论还是有运用价值的。如果磨机内的球荷充填率低于 40%，钢球出现严重的滑动现象，已超出该理论推导时的假设前提条件，自然不能用该理论来解决问题。如后来出现的高转速及超临界磨矿，因高转速及超临界下的球荷充填率已减至 40%~20%，钢球存在严重滑动现象，球荷之间及球与衬板之间存在剧烈的相对滑动，这是使用该理论时应注意的地方。

正因为戴维斯等人的传统理论有一定缺陷，所以多年来有许多研究者企图修正它，使它更完善。如：有的考虑了钢球的滑动而对球的上升高度进行修正^[3]；有的认为磨机内的球荷运动状态不只是抛落及泻落两种，而应该还有介于两者之间的混合式，并认为这三种运动状态随磨矿条件的变化而彼此互相转化，甚至进一步提出与戴维斯等人理论不同的见解，认为磨机内介质和物料存在一个“微微移动的内核”，下落的运动轨迹不是抛物线，是一

条复杂曲线，最后还导出介质和矿石的运动轨迹方程式^[4]，等等。但是，这些修正所作的工作量很大，而且在理论上并无大的突破，实际应用的效果也不大，生产上也没有采用，而仅作为一种学术研究而已。实际上，现有的研究已证实，磨机内钢球的运动状态主要由磨机的转速率及球荷充填率来决定，同时它又受衬板形状、矿料性质、磨矿浓度、磨矿介质状态等等因素影响。R. E. 麦基弗 (McIvor) 对钢球的运动作了研究，认为球荷运动轨迹与磨机直径无关，故在考虑磨机内钢球的运动状态时可以不管磨机规格的大小^[5]。因此，钢球的运动状态是个多变量的函数，而且是个连续状态，不是一二种或三四种状态所能总结得了的。而重要的问题是，如何根据磨矿的性质及目的来选择钢球的运动状态，以及如何调节各个影响因素而实现需要的运动状态，研究后面这两个问题比花费不少功夫去修正前面的理论更有意义。

作为球磨介质的工作理论，不应该只满足于知道钢球的运动为止，而应该把钢球的运动与矿粒的破碎联系起来，把钢球的能态与破碎行为联系起来，甚至与破碎后的产品特性联系起来。只有这样，才能使钢球运动与磨矿效果紧密联系，磨矿效果才是研究钢球运动的目的，亦是研究球磨介质工作理论的目的。

近年来，国内外的研究者们开始注意钢球的磨矿行为。无论钢球作什么运动，只有钢球与矿粒相接触才有可能产生破碎行为。国外有人提出，应研究钢球在磨机中的破碎概率问题。笔者的研究指出^[6]，磨机中钢球对矿粒的作用是随机的，钢球落下或滚下时可能打着矿粒，也可能打不着矿粒，而钢球打着矿粒后矿粒的破碎行为也是随机的，可能产生破碎，也可能不产生破碎，对于这样的随机过程只有用统计的办法，即概率论的办法来解决。在这里，笔者仿照物理学上气体对器壁压力的统计力学办法，提出破碎统计力学的概念，即用概率论的方法求取使破碎概率最高时球磨介质状态。这种方法经初步试验验证是可行的。应该说，用破碎统计力学的方法指导磨机中钢球尺寸的选择及配比，以保证有高的破碎概率，则磨机也就有高的生产率，这自然是球磨介质的

工作理论范畴。

1.2 球磨机介质工作理论须研究的问题

球磨机的磨矿作用是由于钢球的运动造成的，所以，研究球磨介质工作理论首先要研究钢球的运动规律，而戴维斯等人的传统理论即是研究磨机内钢球运动规律的。但是，作为球磨机介质的工作理论，应该包括更宽的范围，下述是球磨介质工作理论必须研究的问题。

(1) 提高矿物解离的选择性。无论是金属矿还是非金属矿的选矿，选矿前磨矿的目的首先是使待分选的矿物粒子之间实现相互解离。使待分选矿物粒子充分单体解离，既是选矿的前提条件，也是评价磨矿产品质量的首要标准。为了实现矿物粒子之间的充分单体解离，应使矿物粒子的解离行为具有选择性，即沿不同矿物粒子之间的结合面解离。如何正确地选择钢球的工作参数及能态，使钢球对矿块的破碎朝着提高矿物解离选择性的方向进行，这是实现磨矿目的的问题，自然也是磨矿介质的工作理论问题。

(2) 改善磨矿产品的粒度组成特性。选矿前的磨矿从工艺上说属矿物入选前的准备作业，它要为选矿准备待选矿物单体解离充分及粒度适合选矿要求的物料。因为任何选矿方法均受粒度限制，也均有一个有效的粒度范围，超出这个范围的过粗及过细粒级均难以有效分选。因此，如果使矿物充分单体解离是磨矿的第一目的，那么使磨矿产品的粒度适合选矿要求就是磨矿的第二目的。使磨矿产品的粒度适合选矿要求，是选矿的必要条件，也是评价磨矿产品质量的重要标准。如何科学地选择钢球尺寸及配比，使磨矿产品的粒度适合于选矿要求，同时减少有害的过粉碎粒级的含量，这同样是如何更好地实现磨矿目的的问题，这当然也是磨矿介质工作理论问题。

(3) 提高能量媒介体的能量转换效率。磨矿过程既是一个能耗巨大的过程，又是一个能量利用率极低的过程。岂有研究磨矿介质工作理论而不涉及提高能量效率的道理？磨矿过程是一个功

能相互转变的力学过程，而这个功能的相互转变正是通过磨矿介质来实现的。这里，钢球尺寸及运动状态的选择都直接影响着能量转换效率的高低。因此，科学地选择钢球的尺寸及运动状态，是使钢球如何更好地完成自身能量传递媒介体的任务，显然，这也是球磨介质的工作理论问题。

(4) 降低球磨介质的消耗。在球磨机工作过程中，钢球作为破碎体实施破碎力而破碎矿块。在此过程中，钢球必然遭到矿石块的抵抗，钢球将矿块破碎了，同时，钢球自身也遭到矿块的磨损。由于矿石一般是比较硬的物料，故钢球的磨损也是比较严重的。另外，磨矿中也出现钢球与钢球互相磨损及钢球与衬板互相磨损的情况，这些硬度大的钢件之间的相互磨损比钢球与矿石之间磨损更为厉害。磨矿介质既要磨矿就要被磨损，而且这种磨损是很大的。理论及实践均说明，在材质一定的情况下，钢球的磨损直接与钢球尺寸相关，并且与钢球直径的某次方成比例。因此，如何调整介质参数及运动状态，使磨矿介质的耗量降低，这同样是球磨介质的工作理论问题。

(5) 提高磨矿作用的针对性。磨矿的对象是岩矿，不同的岩矿有不同的岩矿结构及力学强度，因而也具有不同的可磨性。不管岩矿的力学结构及强度，以不变应万变的办法对各种岩矿实施相同的破碎作用，这种做法绝不会收到好的磨矿效果。只有针对岩矿的结构及力学强度来选择相适应的磨矿条件，才可能得到好的磨矿效果，即是说，要提高磨矿的针对性。实际上，提高磨矿的针对性就是对岩矿的抗破碎力学性能开展研究，根据岩矿的抗破碎性能来选择磨矿条件，主要是选择磨矿介质的参数及力学状态。因此，对岩矿的抗破碎性能研究应当是球磨介质的工作理论问题。

认真分析以上五个问题，它们无一不和磨矿破碎体钢球的参数及力学状态密切相关。事实上，既然磨矿是靠破碎体钢球对矿粒的破碎来实现的，那么，破碎能否实现及破碎后的效果如何当然得由破碎体钢球的参数及力学状态来决定。

通过以上分析不难看出，传统的球磨介质工作理论主要研究钢球的运动规律，由此得出磨机内钢球的运动分区，从而指出各个球荷分区发生的磨矿作用，指出发生磨矿的可能性。但是，磨矿作用是否能实现，以及磨矿作用是否能按人们的意愿实现，得由钢球的具体工作条件来决定。这就是说，钢球的运动规律回答了磨矿的可能性；钢球的参数及力学状态回答磨矿的现实性及磨矿效果的好坏。因此，作为球磨介质的工作理论只研究了球荷的运动及磨矿的可能性是不全面的，只有同时研究具体钢球的工作参数及力学状态才能说清磨矿的现实性及磨矿效果，才能使磨矿介质的工作理论更为完整。以往的教科书及专著比较充分地研究了钢球的运动规律，而很少涉及钢球的参数及力学状态，以及它们与磨矿作用的实现及磨矿效果的关系。本书正想补足后面不足的内容，具体包括：①岩矿的抗破碎性能研究。这是提高磨矿针对性所必须的，此研究为钢球参数及力学状态选择提供依据；②磨矿过程的力学原理研究。弄清在磨矿这一力学过程中钢球的力学作用；③钢球尺寸的选择计算研究。钢球尺寸是钢球的主要工作参数，它决定着钢球的能量及力学状态，也决定着磨矿行为是否发生及怎样发生的问题，以及决定着磨矿效果的好坏，这是本书理论的核心内容；④粗磨机钢球尺寸的选择及应用研究。针对粗磨机给矿粒度粗及粒度范围宽的特点，研究如何科学地解决粗磨机的球径选择计算，用工业试验及生产实例证明前述理论的正确；⑤细磨机磨矿介质的选择及应用研究。针对细磨机给矿粒度细及粒度范围窄的特性，研究如何科学地选择细磨介质，提出用新型细磨介质取代小钢球的技术方案，经试验证明其正确性。

2 岩矿的抗破碎力学性质

岩矿是磨碎的对象，不同的岩矿有不同的结构和力学强度以及不同的可磨性。要使磨碎有效地进行，就必须对岩矿的抗破碎性能有深入的了解，然后针对岩矿的抗破碎特性采取与之相适应的破碎方法和工艺参数，才可能取得好的磨矿效果。因此，研究岩矿的抗破碎性能是磨碎岩矿时要首先开展的工作，舍此，磨碎就失去针对性，就不会有好的效果。

另外，岩矿的抗破碎力学性质也依破碎力的性质和作用方式不同而不同，研究实际工业生产中岩矿块的抗破碎力学性质也是破碎工程所必须的。

2.1 岩矿的力学强度与力学性质特征

2.1.1 矿物的力学性质与强度

岩矿通常由多种矿物聚合组成，单一矿物组分的岩矿不太多。无论是单一组分的还是多种矿物组分组成的岩矿，其力学强度均由组分矿物的力学性质及聚合方式所决定。因此，认识矿物的力学性质和强度是分析岩矿力学强度的基础。

矿物的力学性质是多方面的，但影响矿物破碎的力学性质主要是硬度、韧性、解理和结构缺陷等几个方面。自然界中的固体矿物，除褐铁矿 ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)、蛋白石 ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) 和黑曜石 (SiO_2 为主要成分) 等少数几种属于非晶体外，绝大多数属晶体矿物，晶体矿物内部质点呈有规则的排列。因此，要研究矿物的力学性质，主要是研究晶体矿物的力学性质。显然，晶体矿物的力学性质是由晶体的力学性质决定的。

矿物晶体的硬度首先由晶体中质点之间的键力所决定，硬度是指矿物抵抗外界机械力侵入的性质。组成矿物晶体的基本质点

——离子、原子和分子在空间作有几何规则的周期排列，每一个周期构成一个晶胞，晶胞即是构成晶体的基本单位。基本质点之间的键合情况决定着矿物晶体的硬度。基本质点间有五种结合键：原子键（也叫共价键）、离子键、金属键、氢键及范德华氏键（也叫分子键）。这五种结合键中，由离子间的库仑引力形成的离子键和原子间共有电子对的相互作用力形成的原子键具有最强的结合能，一般为 $1000\sim 4000\text{kJ/mol}$ ；金属键靠自由电子形成结合键，结合能就没有前两者大，约 $100\sim 800\text{kJ/mol}$ ；氢键靠氢原子与某一电负性较大的原子形成极性共价键结合时的剩余键力再与另一个电负性较大的原子形成的分子间力或分子内的键来结合，故其结合能比金属键还低，仅 $20\sim 30\text{kJ/mol}$ ；结合能最低的是范德华氏键（也叫分子键），仅 $0.4\sim 4.2\text{kJ/mol}$ ，它仅靠分子间的色散力、取向力和诱导力（也叫范德华氏力）来键合^[7]。不同结合键形成的矿物晶体有着不同的力学性质，因而也表现出不同的硬度。形式不同的结合键形成的各种矿物，呈现出各不相同的矿物硬度，现分别分析如下^[8]。

（1）原子键（或共价键）是由两个原子共同提供一定数量的电子形成的电子对，并赖以维持两个原子的结合，这种电子对同时受两个原子核的作用而不能任意运转，故原子键的结合力最强，而且具有方向性及饱和性。因此，原子键型的矿物硬度大，物理性质稳定，最难磨碎，以剪切力为主的磨剥作用效果最差，只有强烈冲击才容易打断牢固的原子键。金刚石是典型的原子键矿物，但自然界此类型的矿物不多。

（2）离子键是由一个或几个电子从一个原子转移到另一个原子上形成的，并由此使中性原子成为两个电荷相反的离子。这些电子云为球形对称的离子，其电场在各个方向均相同。离子键的特点是无方向性，也无饱和性，致使质点呈紧密堆积，且结合比较牢固，键力仅次于原子键。当质点沿某些面作滑动以后会造成阳离子的邻近点不再是阴离子而是其它阳离子，从而相互排斥，致使晶格内质点间在能量上最适宜的配位数受到破坏，晶格断裂。因