

表镶金刚石切削具切削与磨损理论分析

〔美〕 F·C 艾勃等

李大佛 李良刚译

屠厚泽 校

湖北科学技术出版社

内 容 提 要

在把岩石视为刚体、库仑体和塑性体的前提下,从单颗金刚石切削岩石始,建立起了单颗金刚石切削理论。运用这一理论确定金刚石工作面上的应力、切削力的组成以及切除岩石的体积。金刚石磨损的主要结果是金刚石刃尖逐渐磨平形成小平面。单颗金刚石切削理论可推广到磨损的金刚石切削作用分析。

运用单颗金刚石切削理论可从理论上确定表镶金刚石钻头和表镶金刚石铣刀的性能。在给定的岩性和切削条件下,确定钻头的转速和轴向载荷;结合金刚石磨损速率理论以确定铣刀在其寿命期间的性能。通过一系列试验证明了理论与试验相符,理论是成熟的。

本书的显著特点是理论计算严谨、试验资料充分、图件精细准确。目前出版的一些探矿工程方面的教材和著作对这些理论和资料还在应用,因此它不仅具有现实的较高的学术价值,也具有历史的、经典的意义。

本书可供从事探矿工程、机械切削、金刚石切削具研制领域有关的人员参阅。

表镶金刚石切削具切削与磨损理论分析

〔美〕 史勃等著

李大佛 李良刚 译

湖北科学技术出版社

邮电部武汉科学研究所印刷厂印刷

新华书店湖北发行所经销

787×1092毫米 16开本 10.75印张, 268千字

1980年12月第1版第1次印刷

印数1~2500

统一书号: ISBN 7-5352-0538-0/TG·4

定价: 5.50元

符号一览表

a (英寸)	金刚石半径
A (平方英寸)	金刚石切削表面面积
$A_1 = (1 + \sin \hat{\alpha}) / (2 \sin \hat{\alpha})$	
$A_2 = (1 - \sin \hat{\alpha}) / (2 \sin \hat{\alpha})$	
A_w (平方英寸)	单颗金刚石磨损平斑面积
α (弧度); (度)	低围压下岩石内磨擦角
$\hat{\alpha}$ (弧度); (度)	岩石内摩擦有效角或库仑角
b (磅/平方英寸)	莫尔包络线指数近似参数
$\beta = \tan \hat{\alpha}$	
c (弧度); (度)	金刚石切削表面前缘的切屑运动角
d (英寸)	铣刀切削深度
EV (英寸·磅/立方英寸)	钻头或铣刀切削单位体积岩石所需的能量
ζ	铣刀周边上金刚石孕镶块镶嵌系数
$\zeta(r)$	在表镶金刚石钻头切削表面上半径 r 处金刚石孕镶块镶嵌系数
γ (弧度); (度)	铣刀切削时的角方位
h (英寸)	无磨损的金刚石切削深度
h_w (英寸)	磨损的金刚石切削深度
HP (马力)	金刚石钻头或铣刀的功率
η (金刚石颗数/平方英寸)	镶嵌在铣刀胎体上的金刚石密度
$\eta(r)$ (金刚石颗数/平方英寸)	在直径 r 处金刚石钻头上镶嵌的金刚石密度
i, j, k	x, y, z 轴方向上的单位矢量
θ (弧度)	角坐标
θ, ϕ (弧度); (度)	球坐标
$J_1, J_2, \dots, J_6$	积分参数
K (平方英寸/磅)	金刚石磨损系数
L (英寸)	铣刀的切削宽度 (即铣刀宽度)
λ (弧度); (度)	对应于金刚石切削深度的 θ 值
λ_w (弧度); (度)	对应于金刚石磨损平斑的 θ 值
$\hat{\lambda}_w$ (弧度)	积分哑变量
Λ (弧度); (度)	金刚石切削表面上切屑滑移方位角
m	切屑滑移方向的参数
μ	岩石与金刚石切削面之间的摩擦系数
$\vec{n}$	指向金刚石切削表面的单位法向量

N (转/分)	金刚石钻头转速, 铣刀主轴转速
NS	铣刀上镶嵌的金刚石总数
$\gamma(r)$ (弧度), (度)	金刚石在半径 r 处面形角的绝对值
P_1 (磅)	金刚石切削面上的法向分力
P_2 (磅)	金刚石切削面上的切向分力
P_{1N} (磅)	切削面上的法应力所产生的金刚石法向切削分力
P_{1S} (磅)	切削面上的剪应力所产生的金刚石法向切削分力
P_{2N} (磅)	切削面上的法应力所产生的金刚石切向切削分力
P_{2S} (磅)	切削面上的剪应力所产生的金刚石切向切削分力
P_{1W} (磅)	磨损平斑上的法应力所产生的金刚石法向切削分力
P_{2W} (磅)	磨损平斑上的剪应力所产生的金刚石切向切削分力
r (英寸)	金刚石钻头切削表面上的径向位置
R (英寸)	金刚石钻头半径; 铣刀半径
R_1	取芯钻头所取岩芯半径
S (英尺/小时)	金刚石钻头钻进速度
$\bar{S}$ (英尺/分)	铣刀表面速度
σ (磅/平方英寸)	法应力
σ_c (磅/平方英寸)	切削时围压
σ_{max} (磅/平方英寸)	金刚石切削面上的最大法应力 (不包括静水压所产生的分力)
σ_o (磅/平方英寸)	岩石无侧限抗压强度
σ_w (磅/平方英寸)	金刚石磨损平斑上的法应力
$\sigma(\theta)$ (磅/平方英寸)	在 θ 角位置时作用于压头上的法应力
$\vec{\sigma}(\theta, \phi)$ (磅/平方英寸)	金刚石切削面上法应力矢量
$\hat{\sigma}_o$ (磅/平方英寸)	岩石现场抗压强度
$\hat{\sigma}_{max}$ (磅/平方英寸)	金刚石切削面上的最大法应力 (包括静水压产生的分压)
t (分)	时间
T (磅·英尺)	金刚石钻头与铣刀所需的转矩
τ (磅/平方英寸)	剪切应力
τ_∞ (磅/平方英寸)	据指数近似的莫尔包络线所得的剪切应力极限值
$\vec{\tau}(\theta, \phi)$ (磅/平方英寸)	金刚石切削面上的剪应力矢量
$\vec{\tau}_h(\theta, \phi)$ (磅/平方英寸)	金刚石切削面上剪应力矢量的水平分量
$\vec{\tau}_v(\theta, \phi)$ (磅/平方英寸)	金刚石切削面上剪应力矢量的垂向分量
V (英寸/分)	切削时工件的给进速度
V_c (立方英寸/英寸)	单颗金刚石移动单位长度切除的切屑体积
V_d (立方英寸/英寸)	金刚石切削表面移动单位长度滑过的体积
V_w (立方英寸)	由于出现磨损平斑每颗金刚石磨损掉的体积

W_c (英寸·磅/立方英寸)	每颗金刚石切除单位体积材料所需的功
W (磅)	金刚石钻头的钻压
W_1 (磅)	铣刀主轴推力
W_2 (磅)	铣刀主轴给进力
WR (Btu/小时)	切削具工作时每颗金刚石的功率
WR_1 (Btu/小时)	金刚石钻头垂向运动时每颗金刚石的功率
WR_2 (Btu/小时)	金刚石钻头旋转时每颗金刚石的功率
x, y, z	直角坐标系
Ψ (平方英寸/磅)	指数近似的莫尔包络线参数
Ω (弧度), (度)	切屑滑移方向的参数

特别符号表示矢量的量

编者注:

1英寸 = 0.0254m

1英尺 = 0.3048m

1平方英寸 = $6.451600 \times 10^{-4} m^2$

1立方英寸 = $1.63871 \times 10^{-5} m^3$

1加仑 = 3.78543L

1磅 = 0.453592kg

1马力 = 735.499W

Btu: 英国热量单位

目 录

符号一览表	(III)
插图目录	(VI)
数表目录	(V III)
绪论	(1)

单颗金刚石切削作用分析

引言	(4)
金刚石切削表面应力分布	(5)
切削力	(9)
金刚石切削掉的材料	(12)
理论与试验结果对比	(13)
讨论	(19)

磨损的金刚石切削作用分析

引言	(25)
磨损的金刚石切削表面应力分布	(26)
磨损的金刚石切削时所需的力	(27)
磨损的金刚石切削掉的材料	(28)
讨论	(29)

表镶金刚石钻头性能分析

引言	(30)
表镶金刚石钻头性能理论	(30)
理论与试验结果对比	(32)
表镶金刚石钻头特性	(40)
讨论	(44)

表镶金刚石铣刀性能分析

引言	(45)
表镶金刚石铣刀性能理论	(45)
表镶金刚石铣刀测试	(50)
理论与试验结果对比	(55)
表镶金刚石铣刀特性	(58)
讨论	(60)

结论	(61)
----	--------

对今后工作的建议.....	(62)
参考资料.....	(63)
致谢.....	(65)
附录 I 岩石性质与近似莫尔包络线.....	(66)
附录 II 莫尔包络线的直线近似.....	(81)
附录 III 金刚石钻头性能的理论数值结果.....	(83)
附录 IV 金刚石铣刀性能的理论数值结果.....	(113)

插图目录

()

图

1	典型的石油金刚石钻头.....	(1)
2	典型的金刚石铣刀.....	(2)
3	金刚石切削作用示意图.....	(4)
4	二维圆形压头切向运动的滑移线场和法应力.....	(6)
5	金刚石切削作用坐标系统.....	(7)
6	金刚石切削面上的法应力和剪应力.....	(7)
7	金刚石切削面上的法应力分布模型.....	(8)
8	金刚石切削面上的力.....	(10)
9	Garner所用金刚石的几何图形, 说明其有效半径随着切削深度的增加而增大.....	(13)
10	切削力的理论与试验对比.....	(20)
11~14	金刚石切削力的理论与试验对比.....	(20)
15~18	切削槽体积的理论与试验对比.....	(22)
19~20	切削熔铸耐火材料时典型的金刚石磨损平斑.....	(25)
21	用于磨损金刚石切削的坐标系统.....	(26)
22	磨损金刚石切削力.....	(27)
23	钻头切削表面切削单元.....	(30)
24~35	金刚石钻头性能的理论与试验对比.....	(33)
36	典型的AX矿山取芯钻头.....	(39)
37~43	金刚石钻头的理论性能.....	(40)
44	表镶金刚石铣刀切削示意图.....	(45)
45	岩石单元示意图.....	(46)
46	铣刀上的切削力.....	(48)
47	铣刀侧力仪试验装置.....	(50)
48	铣刀侧力仪的测力环.....	(51)
49	铣刀侧力仪所用的电子仪器.....	(51)
50	铣刀测试装置.....	(52)
51	典型的铣刀试验记录.....	(52)
52	铣刀载荷与金刚石磨损平斑面积关系的理论与试验对比.....	(56)
53~56	表镶金刚石铣刀性能的理论与试验对比.....	(56)
57~58	表镶金刚石铣刀的理论性能.....	(59)
59	印第安纳灰岩近似莫尔包络线.....	(71)
60	玛丽安娜灰岩近似莫尔包络线.....	(71)
61	沃尔夫克普灰岩近似莫尔包络线.....	(72)
62	迦太基大理岩近似莫尔包络线.....	(72)

63	尤尔大理岩近似莫尔包络线.....	(73)
64	丹比大理岩近似莫尔包络线.....	(73)
65	海斯马克白云岩近似莫尔包络线.....	(74)
66	卢宁白云岩近似莫尔包络线.....	(74)
67	D-1 白云岩近似莫尔包络线.....	(75)
68	布莱恩硬石岩近似莫尔包络线.....	(75)
69	伯里亚砂岩近似莫尔包络线.....	(76)
70	巴恩斯砂岩近似莫尔包络线.....	(76)
71	油溪砂岩近似莫尔包络线.....	(77)
72	绿河页岩近似莫尔包络线.....	(77)
73	泥质页岩近似莫尔包络线.....	(78)
74	梅特威板岩近似莫尔包络线.....	(78)
75	雷伯图粉砂岩近似莫尔包络线.....	(79)
76	弗吉尼亚绿岩近似莫尔包络线.....	(79)
77	石英近似莫尔包络线.....	(80)

数 表 目 录

表

1 ~ 5	单颗金刚石切削印第安纳灰岩的理论结果	(14)
6	确定金刚石钻头理论性能的岩石破坏参数值	(33)
7 ~ 10	表镶金刚石铣刀试验结果	(53)
11	各类岩石性能及近似莫尔包络线参数	(66)
12	岩石性质	(67)

计算机输出结果:

..金刚石钻头分析	(83)
..铣刀的理论性能	(113)

绪 论

近二十年来,表镶金刚石钻头已成功地应用于矿业和石油工业,以对中等硬度到目前所知最硬的岩石钻进和取芯。采用其它钻具不能经济有效地对非常坚硬的岩石进行钻进或获取岩芯。

这几年来,其它类型的表镶金刚石切削工具也得到了推广和应用,特别是表镶金刚石铣刀的应用。这些铣刀被应用于耐火工业切削耐火材料,应用于建筑业切削各种类型的建筑石材,在公路和机场混凝土跑道的平整中,表镶金刚石铣刀也发挥了作用。

考虑到表镶金刚石切削工具日益增长的应用和重要性,很自然我们要研究这些切削工具的切削方式以及影响金刚石磨损的各种因素。研究成果将有助于切削工具的设计改进,有助于采用更合理的操作方法。

实质上,表镶金刚石切削工具是由近似球状的金刚石紧嵌在金属材料的胎体(它构成切削具的工作面)上构成。金刚石一般稍微凸露出切削表面,所出露的高度称为金刚石出刃。工作时,在施加的外力作用下,切削工具相对于工件的表面运动,金刚石作为许多小的单独的切割单元,切割的总效果是把材料从工件上切除掉。图1和图2分别为典型的石油金刚石钻头和表镶金刚石铣刀。

为了分析这些切削工具的工作性能,首先应研究单颗金刚石的切削机制,一旦这一机制确定后,整个切削工具的工作性能就可通过综合所有单颗金刚石的总效应而得到。

此外,在表镶金刚石切削工具切削非金属材料时,有关材料的破坏方式方面还存在一些问题。因此,一定要考虑所切削材料一般的破坏特征。目前,表镶金刚石切削工具所切削的大量非金属材料主要是岩石、宝石和混凝土,这些材料的一般性质将成为以下研究的基础。

近年来,人们对岩石力学领域的研究兴趣日增,已出版了几本有关岩石变形和破坏的著作。Bredthauer^[1]、Handin和Hager^[2,3],Gnirk和Cheatham^[4]发表了他们著名的试验结果;Wuerker^[5]广泛收集发表了有关在低围压下岩石性质的数据;回顾以往所做的工作,Cheatham和Gnirk^[6]对有关岩石变形与破坏的理论分析和试验的现状做了全面的总结。

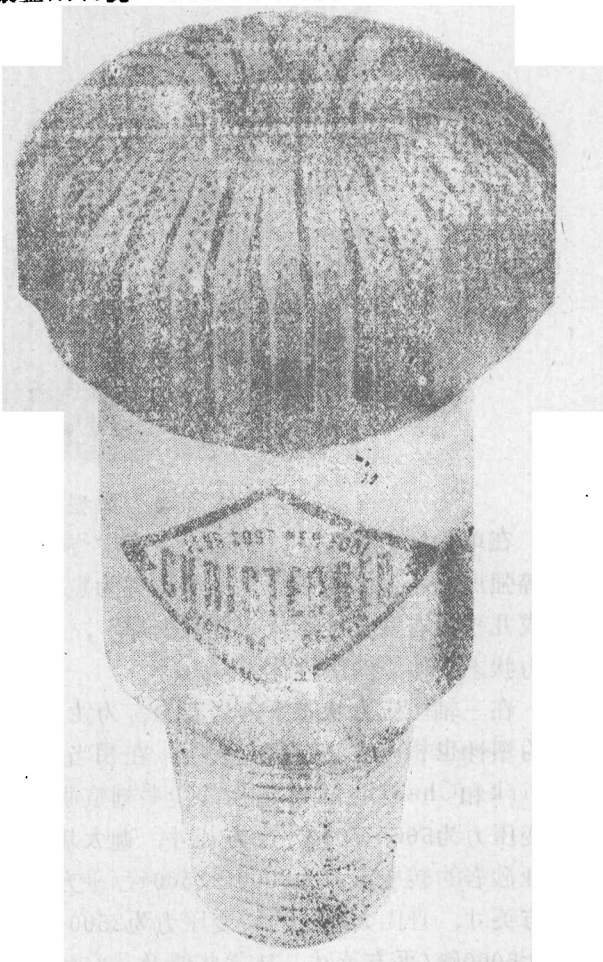


图1 典型的石油金刚石钻头

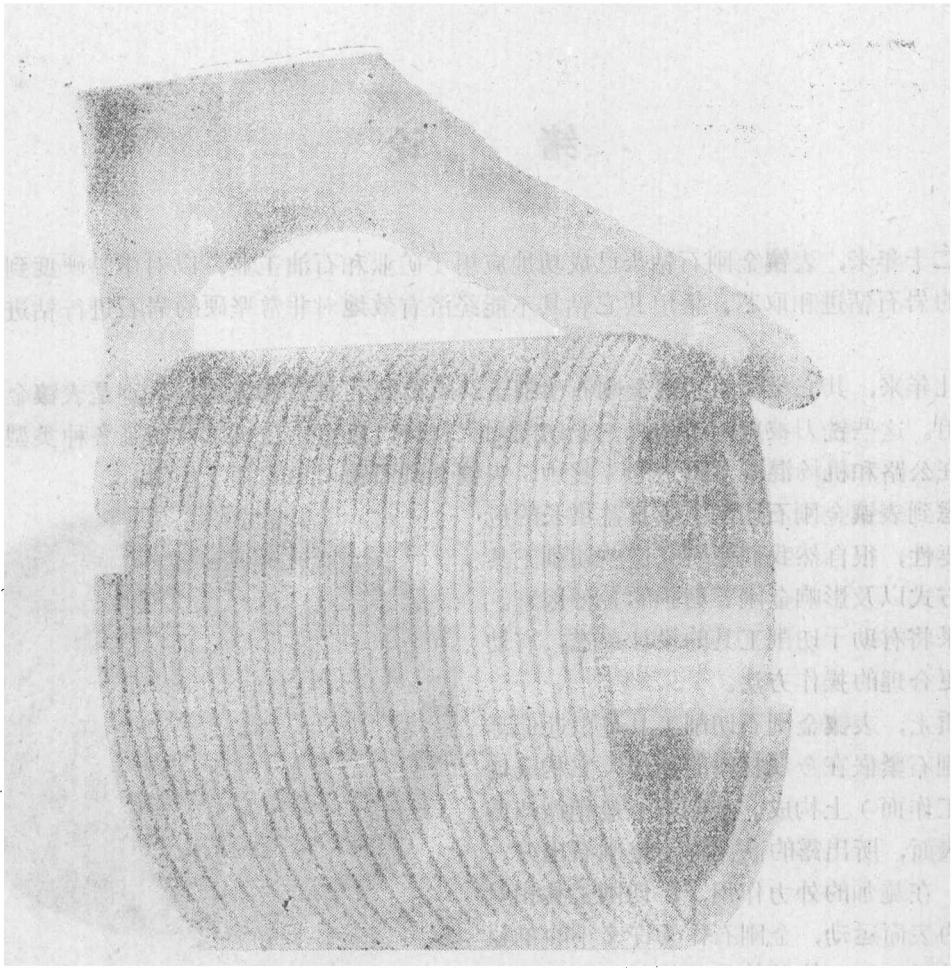


图2 典型的表镶金刚石铣刀

在单轴拉力作用下，岩石一般表现得非常脆弱。在单轴压力作用下，岩石表现出稍弱或中等强度。不管张裂或压裂实质上都为脆性断裂，即表明岩石在剪裂、张裂出现以前，很少有或几乎没有发生变形或“塑性变形”，因此，在发生破裂以前岩石的行为非常近似于单轴应力状态条件下的弹性体。

在三轴压应力状态下，岩石的行为发生了很大的变化，一般随着压应力的显著增大岩石的塑性也相应提高。研究表明，在相当高的围压下岩石发生宏观尺度上的塑性破坏。Gnirk和Cheatham^[4]所做的尖凿刻痕研究表明，印第安纳灰岩由脆性破裂到塑性破坏的转变压力为500~700磅/平方英寸，迦太基大理岩的转变压力为750~1250磅/平方英寸，伯里亚砂岩的转变压力为2000~2500磅/平方英寸，弗吉尼亚绿岩的转变压力为2500~3000磅/平方英寸，丹比大理岩的转变压力为2500~5000磅/平方英寸，海斯马克白云岩的转变压力大于5000磅/平方英寸。从这些值及其它已发表的数据可以看出一个很有意义的现象，即许多岩石行为在相对低的三轴压应力状态下表现为塑性。如果把三轴压应力条件下岩石的“破坏”看作是完全破裂或宏观的塑性变形，那么一般岩石的破坏特征很自然地可用众所周知的莫尔包络线来描述。这决非说莫尔包络线是十分完善的岩石破坏准则（因为它没有考虑中间主应力的影响），而是发现在大多数工程应用中采用它是合适的。因此，在目前的切削理论研究中，莫尔包络线用作判断被切削材料破坏的基本准则。

莫尔包络线通常用三轴试验的数据作图表示。为了分析的目的,包络线用方程式表示比较方便。在以往文献所提到的几种近似形式中, Cheatham⁷提出了一个抛物线形式,而 Paone和Tandanand⁸提出了指数形式来近似,下面的研究中采用了指数形式。应用已发表的数据,在此建立了19种岩石恰好的参数。在附录I中总结了岩石的性质,给出了近似莫尔包络线参数,及根据数据绘出的与近似莫尔包络线对比的曲线图。

研究了在各种条件下岩石破坏的实质后,回过头来我们继续讨论单颗金刚石的切削作用。正如前面所提到的,关于切削过程中材料破坏的实质在某些方面还不十分清楚。Weavind和Dyer⁹定性地描述了切除材料的两种可能机制。据所提出的第一个机制,金刚石滑过工件表面,由于金刚石的挤压作用使工件表面发生轻微的塑性屈服,当工件在滑过的金刚石后面再次出露时,由于弹性恢复而产生了切屑,这种情况下,伴随材料的切除所产生的材料的破坏方式实质上是张性或脆性的。

南非约翰尼斯堡威特沃特斯兰德大学H. H. Schlössin教授持有点相似的观点。他认为最大张应力在金刚石后相隔一段距离出现,接着发生的张裂型式为变形的“环状”(变形是由于伴随金刚石滑移的切向力作用)。他用单颗金刚石滑过石英晶体所做的一些试验证实了这种张裂确实存在。很遗憾,石英比大多数岩石要硬许多倍。在此,他认为作用在金刚石刃尖上的垂向载荷不象金刚石切削工具在正常工作时所需要的那样足够大,不能切除一定量的材料。上述试验与其说代表了“切削过程”,不如说更是代表了滑移摩擦。

Weavind和Dyer提出的第二种可能的切削机制为“犁式切削”。在这种情况下,金刚石向前滑移,把要切削的材料向前面或两侧推,材料的主要破坏方式实质上可能是剪裂和脆性或塑性的。

考虑到前述的两种机制都好像是合理真实的,在某些情况下,有理由认为实际中两种机制可能共存。因此,重要的问题是在材料的切削中究竟哪一种机制占主导地位。

Garner^[10]最近用单颗金刚石的切削所做的试验工作在某种程度上有助于澄清这一问题。在切削印第安纳灰岩和塞米诺尔页岩时,作用于粒度为3颗/克拉金刚石上的力既有法应力,也有切应力。此外,还用直径为1/8英寸的碳化钨球体做了试验。这些试验表明,当作用于金刚石和工件之间的法应力超过临界值或阈值时,就会在工件上形成一个刻槽。当围压为0或围压很低时,形成大块的切屑(表明脆性破裂);当围压很高时,没有出现切屑,形成的刻槽是光滑的,刻槽与金刚石的轮廓一致。所有在外压超过临界值的情况中,都会在刻槽底部出现一定量的细粒、紧密压实的粉末,这种现象清楚地表明刻槽是由犁式切削形成的,因为脆性的张裂不可能形成这样的切面。进一步的试验结果表明,在金刚石切削过程中既存在脆性破裂,也存在塑性变形。

在假定金刚石切削工具在切削非金属材料时,材料的切除方式主要是犁式切削的前提下,建立了单颗金刚石的切削理论,对印第安纳灰岩所做的理论分析结果与Garner^[10]的试验结果相当吻合。

因为金刚石的磨损是影响金刚石切削工具寿命的一个主要因素,结合金刚石磨损速率理论,上述理论的应用已推广到包括磨损金刚石性能的分析中。这使在金刚石整个使用寿命期内对金刚石切削性能的理论预测成为可能(金刚石严重破裂的情况除外)。

切削的基本理论已用于表镶金刚石钻头和铣刀的分析中,磨损理论也已在各种铣刀的分析中得到应用。从两个实例看,理论分析结果与试验所得结果相当一致。

单颗金刚石切削作用分析

引言

目前, 表镶金刚石切削工具所用的金刚石的几何形状没有特别的限制。但是, 实际上所用的金刚石是近圆形的。因此, 在这里的分析中, 假定金刚石是半径为 a 的球体。

在金刚石切削工具的操作过程中, 金刚石的轨迹存在某种程度的弯曲, 但通常金刚石与切削工具的尺寸、与切削轨迹的弯曲半径相比显得很小, 因此, 有理由忽略金刚石切削轨迹的弯曲及其工作表面的弯曲。

因此, 现在要讨论的问题就是: 球状的金刚石切削半无限体的平面 (比如岩石), 并且切削轨迹为一直线, 见图 3 所示。要讨论这一问题, 必须确定金刚石切削过程所需要的力的大小和方向, 以及金刚石从工件上所切除的材料量。

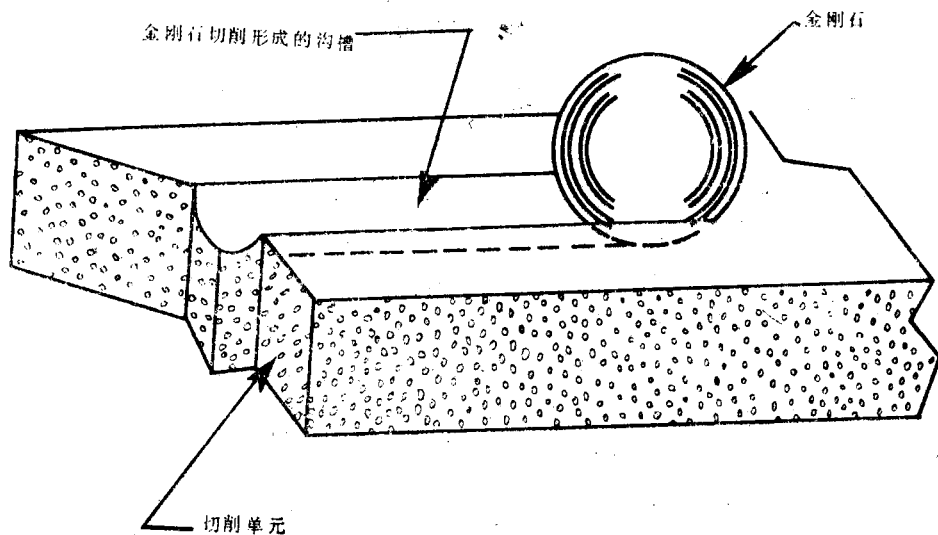


图 3 金刚石切削作用示意图

研究单颗金刚石的切削问题, 自然要考虑以往在金属切削领域所做的大量的理论分析和试验工作。在很大程度上, 金属材料的切削与磨削是在剪切作用下以韧性方式 (犁式切削) 进行的。这一机制的理论得到了试验结果的证实。但由于大多数金属在压应力状态下其抗剪强度很少或者没有任何增大, 因此在理论分析中没有考虑压应力的影响, 这样的分析对于象切削岩石这样的非金属材料是不够的。

也许现在所讨论的问题与以往的尖凿刻痕研究关系更为密切。作简化的假设, 提出的分析步骤相当成功地应用到了岩石二维压头刻痕分析。Cheatham^[12]和Gnirk在这方面的作最为突出。

研究中, 假定了岩石宏观塑性变形可用理想的、刚-塑性库仑体的行为来表示。尽管可

以肯定岩石是弹性的、在某种程度上是可压缩的，但认为在宏观塑性变形条件下，它们的影响没有多大意义。特别就现在所讨论的问题，当切削过程是连续的，或切削过程不是连续就是循环（切削作用）的时候，这一假设就显得特别地符合事实。同大的滑移及所发生的塑性变形相比，弹性变形可忽略不计。

在某些岩石的切削中，压缩作用也许有意义，但压缩作用效果会可能由于实际上的连续切削而大大降低。工件表面可能会由于前行的切削作用而处于压缩状态，Garner^[10]所做的单颗金刚石切削研究提供了这方面的资料。他发现切削槽中紧密压实的岩石粉末是由金刚石作用形成的，在连续切削过程中，这将是后续紧邻的金刚石的工作面。

初步分析时，可假定岩石是各向同性的、均质的，尽管此假设显然与岩石的实际情况不尽相同。其它的假设涉及材料的破坏。不象一般的曲线形莫尔包络线准则，所假设的材料库仑体性状使破坏准则包络线成为一条直线。正因为一般岩石的莫尔包络线为曲线，岩石的库仑体性质假设就显得不太理想。但是，建立在一般莫尔包络线基础上的分析增加了数学计算上的困难，因此，这里的分析中仍使用了简化了的库仑破坏准则。也许在将来某个时候有可能完成更一般的分析，正象最近Cheatham^[7]在这一方面所做的工作那样。附录II中讨论了建立莫尔包络线直线近似的方法。

金刚石切削表面应力分布

假设在切削过程中岩石的性状可以用理想的、刚-塑性库仑体来代表，那么就有可能近似地表示金刚石切削体表面的应力分布。在Hill^[13]和Prandtl^[14]所做工作的基础上，Cheatham^[12]讨论了确定二维压头刻痕可能的滑移线场的方法。利用这些方法有可确定沿半无限体表面切向滑动的压头周围可能的滑移线场。该滑移线场取决于内摩擦“有效”角或库仑角 $\hat{\alpha}$ 。图4表示了压头与岩石之间没有摩擦及 $\hat{\alpha}=30^\circ$ 时的滑移线场，它与圆形压头在垂向压入时滑移线场的一半相一致。存在于压头和岩石间的法应力 $\sigma(\theta)$ （见图4）已由Cheatham确定出：

$$\sigma(\theta) = \frac{\hat{\sigma}_0}{2\sin\hat{\alpha}} \left[(1 + \sin\hat{\alpha}) e^{2(\pi/2 - \theta)\tan\hat{\alpha}} - (1 - \sin\hat{\alpha}) \right] \quad (1)$$

这里 $\hat{\sigma}_0$ 为岩石现场的或有效抗压强度。岩石的有效抗压强度与无侧限抗压强度间存在如下关系。

$$\hat{\sigma}_0 = \sigma_0 + 2\sigma_c \left[\frac{\sin\hat{\alpha}}{1 - \sin\hat{\alpha}} \right] \quad (2)$$

σ_0 为切削时环境压力，比如围压。

与金刚石切削有关的滑移线场是三维的，但是集中在金刚石正前方的材料很大程度上受到其两边材料的限制。实际上，好象可以认为在滑移区内，沿平行于切削方向与工件表面平行的通过金刚石中心的面上存在着平面应变。这实际上意味着如果忽略摩擦作用，金刚石正前方的滑移线场实质上同前面所讨论的二维压头的情况是相同的，法应力的分布也是相同的。

据图5、图6所示的坐标系，金刚石切削面上的法应力 $\sigma(\theta, \phi)$ 与方程式（1）给出的

• 由于围压所产生的法应力对单颗金刚石的切削所需要的力没有影响，这里所讨论的应力值就不包括静水压的分力。但是，岩石的强度用现场抗压强度代表，而不是用无侧限抗压强度来表示

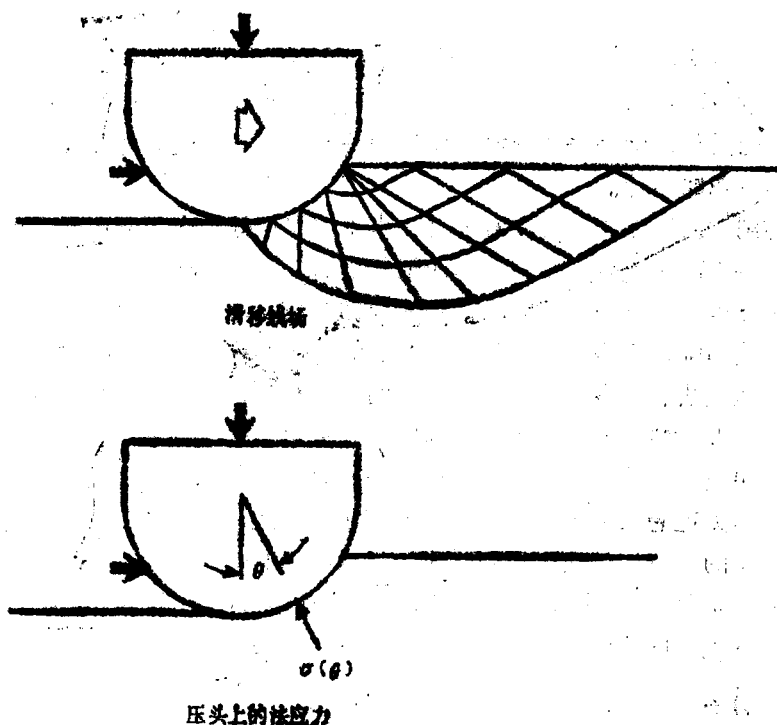


图4 二维圆形压头切向运动的滑移线场

相同, 当 $\phi = 0$ 时

$$\text{有} \quad \sigma(\theta, 0) = \hat{\sigma}_0 (A_1 e^{\beta(\pi-2\theta)} - A_2) \quad (3)$$

$$\text{这里} \quad A_1 = (1 + \sin \hat{\alpha}) / (2 \sin \hat{\alpha}) \quad (4)$$

$$A_2 = (1 - \sin \hat{\alpha}) / (2 \sin \hat{\alpha}) \quad (5)$$

$$\beta = \tan \hat{\alpha} \quad (6)$$

上述公式不能说明金刚石与岩石之间存在的滑动摩擦力, 不过切削表面上存在的摩擦力对法应力分布的影响被认为是次要的。这样就不计摩擦力或剪应力的情况下, 确定金刚石切削面上的法应力分布。由法应力所支配的剪应力分布与之重合。很显然, 在金刚石旁侧附近的法应力等于 0。给定法应力在 $\phi = \pm \pi/2$ 时为 0, 那么在金刚石任一侧, 法应力的变化与 ϕ 成线性关系, 这样, 法应力的分布为

$$\sigma(\theta, \phi) = \hat{\sigma}_0 \left[1 - \left| \frac{2\phi}{\pi} \right| \right] \cdot [A_1 e^{\beta(\pi-2\theta)} - A_2] \quad (7)$$

图 7 为法应力分布的模型图示。

为了便于分析, 把法应力表达为矢量形式。设 i, j, k 分别代表 x, y, z 轴方向上的单位矢量, 指向金刚石切削面的单位法向矢量 $\vec{n}$ 由公式 (8) 给出:

$$\vec{n} = -(i \sin \theta \cos \phi + j \sin \theta \sin \phi + k \cos \theta) \quad (8)$$

金刚石切削表面的法应力矢量就为

$$\vec{\sigma}(\theta, \phi) = \sigma(\theta, \phi) \vec{n}$$

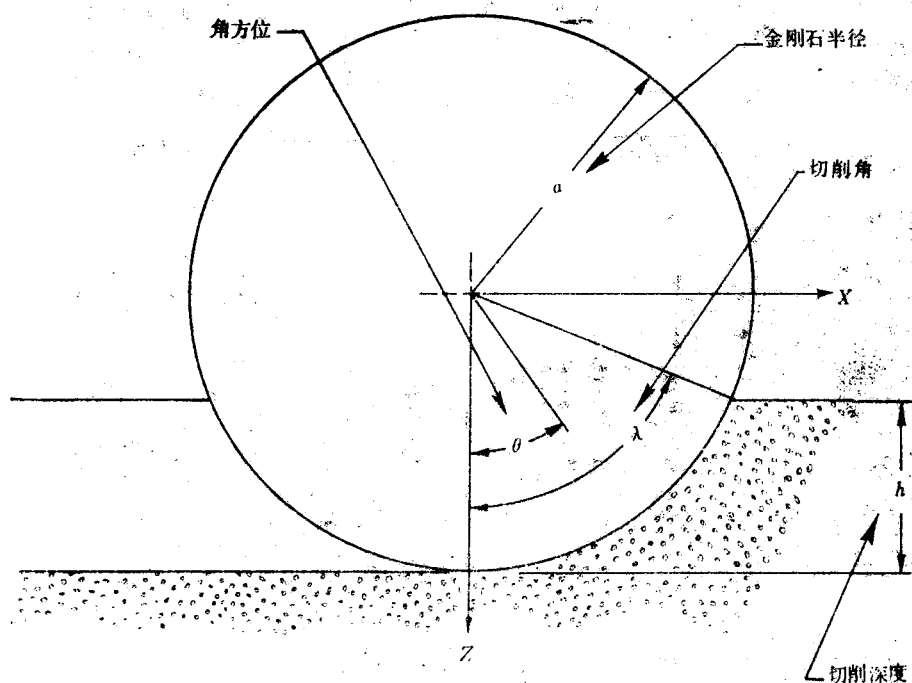


图5 金刚石切削的坐标系

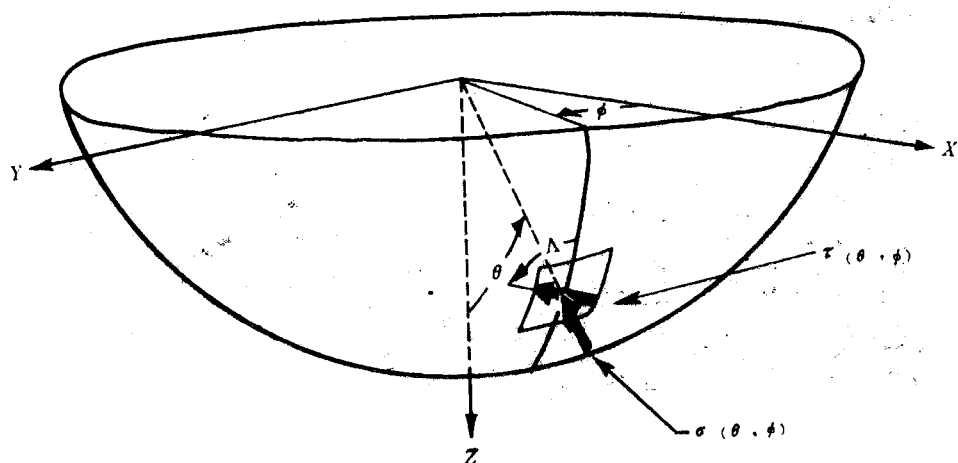


图6 金刚石切削面上的法应力和剪应力

$$\vec{\sigma}(\theta, \phi) = -\sigma(\theta, \phi)(i \sin \theta \cos \phi + j \sin \theta \sin \phi + k \cos \theta) \quad (9)$$

最大法应力值 σ_{max} 出现在金刚石切削面的底部, 在此 $\theta = 0$, 其值为

$$\sigma_{max} = \sigma_0 (A_1 e^{\pi \beta} - A_2) \quad (10)$$

在确定金刚石切削表上的剪应力 $\tau(\theta, \phi)$ 时, 假定剪应力的大小与法应力 $\sigma(\theta, \phi)$ 的大小成比例, 剪应力的方向与切屑相对于金刚石切削表面的运动方向一致。设 μ 为岩石与金刚石之间的滑动摩擦系数