第 15 卷　第 1 期　　复　合　材　料　学　报　　Vol 15　No. 1
1998 年　2 月　　ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA　　February　1998

花岗石加工用金刚石-金属复合材料磨损机理研究

徐西鹏　沈剑云　黄　辉　骆灿彬
(华侨大学机械工程系, 泉州 362011)

摘　要　本文通过大量实验过程, 跟踪观察了花岗石锯切过程中金刚石-金属复合材料在各种加工条件下的磨损状态; 探讨了花岗石种类、金刚石、金属合金结合剂等因素对磨损状态的影响。最后, 分析了磨、抛过程中金刚石的磨损特点, 并提出了相应的解决措施。

关键词　花岗石, 锯切, 金刚石, 复合材料节块, 磨损
中图分类号　TH117, TF125. 34

天然花岗石已在建筑、机械等行业得广泛应用。但是, 由于其材质成分复杂, 可加工性十分特别。用金刚石-金属合金复合材料制成的金刚石工具是目前花岗石磨削、锯切加工用的最重要工具, 而且已成为工业领域中消耗金刚石的最大用户。但是在目前, 由于加工中金刚石的非正常磨损所造成的浪费很大。

金刚石-金属合金复合材料的锯切过程是通过固位在合金中的金刚石颗粒实现切削的, 因此在使用过程中, 不同的金刚石和金属结合剂状态是决定复合材料节块使用效果的关键。各种锯切条件主要通过影响节块表面状态来影响锯切效果。因此, 本文拟从分析不同金刚石节块使用效果和节块表面磨损状态的对应关系着手, 综合探讨形成不同节块表面磨损状态的原因和影响因素, 提出减少金刚石-金属复合材料使用过程中金刚石非正常磨损的依据。

1　实验条件与方法

表1　金刚石节块条件　　Table 1　Specification of diamond segments

编号	金刚石种类	金刚石目数/USMESH	金刚石浓度	结合剂	烧结温度	硬度/HRB	花岗石种类
1	SMD	40/50	30	Co-Cu-Sn	830	85-90	G635
2	SMD	40/50	35	Co-Cu-Sn	830	85-90	G635
3	SMD	40/50	42	Co-Cu-Sn	830	85-90	G635
4	SMD	40/50	35	Co-Cu-Sn	830	85-90	G603
5	SMD	40/50	35	Co-Cu-Sn	830	85-90	中国红
6	SMD	40/50	35	Co-Fe-Cu-Sn-WC	830	100-105	G635
7	SMD	40/50	35	Co-Fe-Cu-Sn	780	90-95	G635
8	SMD	40/50	35	Fe-Cu-Sn	740	80-85	G635
9	SMD_{30}	40/50	28	Co-Fe-Cu-Sn-WC	830	100-105	G635

锯切试验在 φ350～φ400小型锯切机和 φ1600锯切机上进行。清水冷却。实验锯片线速度 v_s

收修改稿、初稿日期: 1997-07-17, 1997-05-29
国家自然科学基金项目(59705015)及福建省自然科学基金重点项目(E97017)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

= 34m/s, 微观形貌分析在JSM-35C 和KyKy-Amay 扫描电镜及XTL-1体视显微镜下进行。金刚石-金属合金复合材料节块的压制、烧结在SJJ-H 自动热压机上完成。锯切过程中节块耐磨度用Δ= 切割石材面积(m^2)/金刚石节块径向磨损量(mm)来表示。实验用金刚石节块条件见表1。

2 实验结果及讨论

2.1 金刚石、金属结合剂磨损形貌特征及磨损机理分析

2.1.1 节块磨损形貌特征

图1给出了花岗石锯切过程中, 几种典型的金刚石磨粒的破碎、磨平、脱落及结合剂磨损

(a) 完整晶形 (whole crystal)

(b) 微观破碎 (micro fracture)

(c) 宏观破碎 (macro fracture)

(d) 磨粒脱落 (pop-out of diamond)

(e) 磨粒磨平 (polished grain)

(f) 锯切后的花岗石表面 (sawn granite surface)

(g) 结合剂表面的冲蚀坑 (flush erosive pits on bond surface)

(h) 结合剂表面的耕犁痕迹 (ploughing tracks on bond surface)

(i) 金刚石滑位 (diamond displacement)

图1 金刚石磨粒及结合剂磨损形貌的SEM 照片 Fig. 1 SEM photographs of worn diamond and bond appearances

形貌的SEM 照片。可看出, 锯切过程中, 金刚石的失效方式主要有以下几类[1~2]:

a. 完整晶形(图1(a)): 这种晶形表明金刚石出露于结合剂表面, 但却未经受损伤, 这样的

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

金刚石晶形保持越久锯切过程越容易进行, 锯片耐磨度越高。

b. 微观破碎(图1(b)): 这种工作状态表明金刚石在工作过程中经受了冲击和磨蚀, 金刚石表面出现裂纹和挤压碎裂痕迹。

c. 宏观破碎(图1(c)): 金刚石磨粒在经受重负荷或金刚石本身内部有缺陷、承载能力低情况下发生的大块崩碎。这种状态导致金刚石出刃高度大大降低, 甚至失去切削能力。

d. 磨粒脱落(图1(d)): 指金刚石从结合剂中脱离, 留下脱落凹坑。金刚石切削相当长一段时间后, 磨粒自然磨钝, 出刃高度降低, 随着磨粒周围结合剂的进一步磨损, 对金刚石的把持力将减弱, 导致金刚石脱落。当金刚石基本完成其切削作用后再脱落属正常现象, 此时的脱落坑较浅。若是一参与切削就脱落, 则属非正常脱落, 此时的脱落坑较深。

e. 磨平、抛光(图1(e)): 指磨粒上承受冲击负荷较轻, 只承受磨蚀、抛光作用。这种工作状态在锯切过程中应尽力避免, 否则会导致摩擦热上升。

2.1.2　节块及花岗石摩擦过程模型图

为了分析花岗石摩擦过程中金刚石、结合剂磨损形貌特征及形成机理, 给出图2所示的锯磨过程中金刚石、结合剂及花岗石摩擦过程模型图。从图中可总结出以下几点:

a. 花岗石的磨损: 从图中可看出, 金刚石在去除花岗石的同时, 挤压的作用引起花岗石的脆性断裂, 在花岗石中存在各种缺陷、应力集中, 使得裂纹因而成长, 导致脆性破坏(见图1(f)所示的花岗石锯切表面形貌照片), 形成崩碎岩屑。但花岗石作为一种典型的脆性材料, 其破坏方式与其所承受的负载状态有很大关系[3], 对不同的节块耐磨度与功耗指标要求, 花岗石存在不同的去除方式[4]。

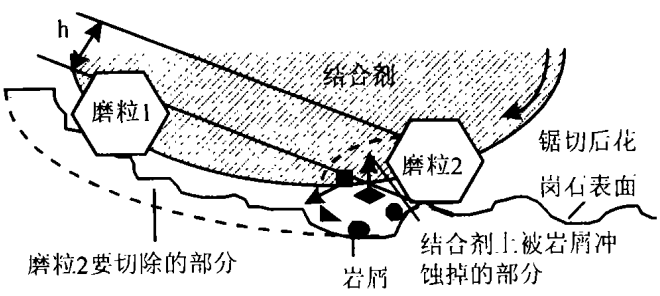


图2　金刚石、结合剂及花岗石摩擦过程模型图

Fig. 2　Schematic showing process of friction among diamonds, bond and granite

b. 金刚石的磨损: 金刚石在经受和花岗石的直接磨擦、磨损的同时, 还要受到花岗石切削碎屑的冲击和磨蚀。因此金刚石的磨损类型可归纳为磨粒磨损、冲击磨损和流体中固体微粒引起的冲蚀[5]。而金刚石实际的磨损过程要经历不同的路径: 可以是从完整晶型开始, 经历微破碎再到宏观破碎, 最后发生脱落; 也可以是一开始就发生脱落。倒底按何路径则取决于金刚石的品质、所承受载荷和结合剂等的性质。

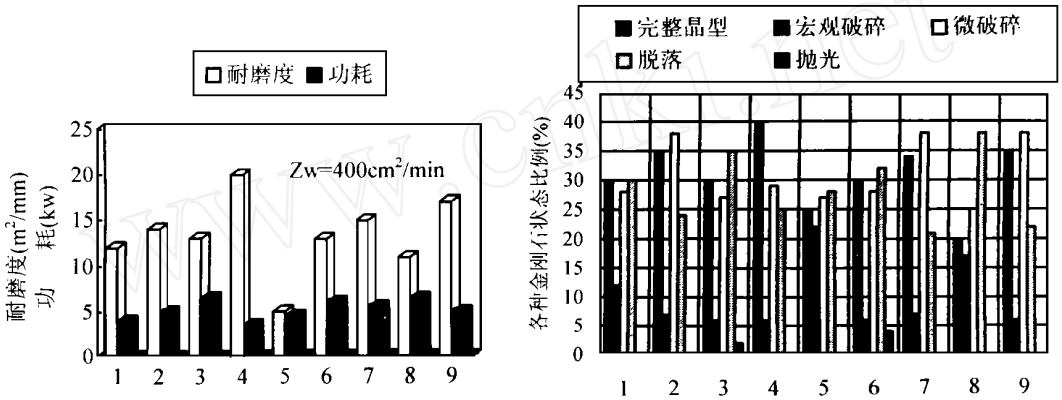
c. 结合剂的磨损: 作为起固位金刚石作用的金属结合剂, 其磨损过程具有较复杂的摩擦学特性。花岗石切削岩屑和破碎的金刚石碎屑在切削液的带动下冲蚀结合剂表面, 在表面形成冲蚀痕迹(见图1(c、d)中的结合剂形貌和图1(g)所示的凹坑), 也即结合剂在类似一种流体研削的条件下被磨蚀。而在金刚石前端的月牙洼凹坑则显示出锯切过程中, 流体形成气穴而引起冲蚀[5], 也即是一种气蚀的结果。除以上两种磨损外, 结合剂还会承受花岗石中硬质点的刮削和耕犁, 其形貌类似金属磨削加工的纹理(图1(a)、(h))。

为了保证金刚石工具合理的加工性能(一定的耐磨度和加工效率), 必须保证金刚石有合理的出刃高度(图2中的 h), 而结合剂的磨损速度应围绕充分固位金刚石而进行。否则就会造成出刃高度不足而影响锯切效率或造成出刃高度太大而影响把持力进而导致磨损加剧。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.1.3 不同金刚石节块使用效果及金刚石表现方式

图3(a)是用表1中各种节块制成的 ϕ350mm 直径锯片切割后的节块耐磨度和功率消耗。并在体视显微镜下观察了各节块工作后的金刚石状态(见图3(b))。从图中数据可看出,金刚石的粒度、品级、浓度、结合剂的性能以及工件材料性质等会影响金刚石的工作状态进而影响锯切效果。



(a) 金刚石节块使用效果
(performance of various diamond segments)

(b) 对应的金刚石表现方式
(corresponding diamond modes)

图3 不同金刚石节块使用效果及金刚石表现方式

Fig. 3 Performance of various diamond segments and corresponding diamond modes

金刚石的工作状态与节块的使用性能有良好的对应关系:微破碎和完整晶型比例越高节块耐磨性越好。宏观破碎和脱落比例越高节块耐磨性越差。金刚石在切削过程中,由于磨粒钝化,锯切力和发热量会增加。金刚石脱落有利于锯切过程的顺利进行,有利于降低功耗,但是,若脱落太多(如锯片3和8),则不但耐磨性大大降低,功耗也会增加。因为大量脱落会造成分摊到真正能参与切削的磨粒上的负载剧增,因而宏观破碎随之增加,使节块表面没有足够的磨粒参与切削,因而锯片变钝,功耗增加。同时,花岗石对结合剂的耕犁作用明显(见图1(h)),节块磨损剧增。金刚石在锯切过程中,完全不磨损而保持完整晶型对锯切过程自然很有利,但结合剂要磨损,金刚石也要逐渐磨损,直到脱落。否则,只有结合剂磨损,就会引起不必要的金刚石整粒脱落而造成浪费。此外,金刚石是典型的脆性材料,有不同的解理面,因此,在锯切过程中的冲击、机械摩擦下,不可避免地产生崩碎,但金刚石的微破碎对锯切过程非常重要。宏观破碎使锯切性能变坏,而微破碎特性则可使金刚石在遇到难切割的石材硬质点时,为避免硬性碰撞而发生一种"谦让"现象。这样,在接下来的锯切中,该颗产生微破碎的金刚石磨粒仍可参与切削,而不至于宏观破碎或脱落后完全失去切削作用。特别是微破碎的金刚石产生了微切削刃,更有利于花岗石特别是硬质花岗石切削过程的进行[1]。

2.2 影响节块磨损的因素及影响机制分析

花岗石作为一种典型的脆性材料,其破坏方式与其所承受的负载状态有很大关系。研究表明[4,6],锯切中存在最佳载荷条件,在该条件下,既足以花岗石顺利解理,作用到磨粒上的负荷又最佳,即可以获得最佳的节块耐磨度。能满足该最佳载荷条件的锯切条件即为最佳。锯切中各种条件(金刚石粒度、浓度以及切削用量等)均会引起花岗石承载特征的变化。下面就围绕如何产生这一最佳载荷条件讨论各因素对金刚石宏观破碎和非正常脱落的影响。

2.2.1 金刚石对锯切过程的影响

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

a. 粒度的影响

浓度一定时, 粗粒度金刚石使节块表面磨粒数减少, 单颗磨粒切削厚度增加, 从而使石材容易断裂、崩碎, 锯切轻快, 消耗的功率下降。但此时由于作用到每颗磨粒上的负荷大, 容易使金刚石过早破碎或脱落, 会影响金刚石节块耐磨度。对不同的花岗石, 存在一相应的最佳粒度。对粗晶粒、高石英含量这类难于解理的石材, 宜采用40/50, 50/60之类较细粒度金刚石, 而对容易解理的花岗石(如只有斜长石而无钾长石的灰白花岗石), 则可选择较粗粒度(30/40)金刚石。只有这样, 才可保证耐磨度与功耗之比最佳。如果对难解理花岗石, 采用太粗粒度金刚石, 虽然锯切过程中由于单颗磨粒切厚增加, 使花岗石破裂更容易进行, 功耗会进一步降低, 但金刚石因承受负荷大, 为达到金刚石的最佳破碎路径[6], 须提高金刚石品级并增强结合剂对金刚石的把持力。这样节块成本显然提高了。如果要保持成本不变, 就会导致节块耐磨度大大降低。若使用太细粒度金刚石, 则会造成花岗石在断裂过程中塑性变形比例增加, 锯切功耗增加, 摩擦热急剧上升, 急剧增高的热量一方面使得金刚石的强度下降, 另一方面使金刚石与胎体间因热膨胀系数的不同而产生结合面开裂, 造成金刚石脱落, 二者均会造成锯片耐磨度大大下降。

b. 品级、浓度的影响

浓度的影响在图3所示锯片1、3数据中已经体现出来: 和锯片2相比, 锯片1中的金刚石浓度较低, 所以锯片耐磨度低。由于浓度低, 每颗金刚石磨粒的切削负荷加大, 花岗石解理破碎更容易进行, 因此功耗也低。对应的节块表面金刚石宏观破碎较多, 完整晶形比例降低。但若浓度太低, 则宏观破碎会剧增, 造成出刃高度不足(参见图1(h)), 使功耗反而增加。相反, 对锯片3, 因浓度太高, 单颗磨粒切除负荷减小, 花岗石解理破碎的进行较锯片1困难, 故金刚石与花岗石间的摩擦大大增加, 功耗增加。同时, 摩擦的增加导致摩擦热增加, 热量通过金刚石磨粒传导给结合剂, 造成金刚石-结合剂界面产生热应力, 进而导致金刚石脱落。所以, 此时节块耐磨性反而下降。

金刚石品级的影响可由锯片7和9的锯切性能加以说明: 和锯片7相比, 锯片9由于使用了较高品级的金刚石, 承载能力大大加强, 所以即使在较低浓度情况下, 其完整晶形率仍较高, 而宏观破碎比例较低。由于完整晶形多, 浓度低, 单颗磨粒负荷大, 故花岗石解理容易, 锯片耐磨度高, 功耗低。但这里应指出, 金刚石的品级应与结合剂的选择相匹配, 从锯片6、7、8、9的比较已不难看出, 这点下面将做更详细探讨。

2.2.2　结合剂性能的影响

结合剂的作用是把持金刚石, 使其充分完成切削工作。因而其耐磨度必须与金刚石的磨损速度相匹配。相对所用金刚石而言, 锯片6的结合剂太硬, 无法保持有效出刃高度, 金刚石首先磨钝, 切削能力变差, 功耗增加, 进而导致金刚石脱落增加。出刃高度降低到一定程度后, 花岗石对结合剂的耕犁作用加剧, 直到达到新的出刃高度。这样结合剂就有一段时间是在基本不起切削作用的情况下被花岗石磨蚀掉的, 因此, 节块耐磨性能亦大大下降。同样的结合剂系统, 由于采用了高品级金刚石(锯片9), 金刚石和结合剂的磨损速度匹配适当, 因此, 有效出刃高度得以长期维持, 既获得高的耐磨度又保持了较低的功耗。

若结合剂较软, 如锯片2和锯片7相比, 锯片2的结合剂较软, 此时由于结合力较弱, 金刚石遇到较难切割部分时脱落也相对容易些。因此, 功耗较低, 切削较轻快, 但耐磨度也有所下降。但是若结合剂太软(如锯片8), 则会导致大量脱落而使实际参与切削的金刚石颗粒数大大减少, 导致宏观破碎率大增, 甚至丧失切削能力。此时, 不但耐磨性大大降低, 功耗也会增

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(a) 锯片7节块断口(Fracture surface of segment on sawblade 7) (b) 锯片8节块断口(Fracture surface of segment on sawblade 8) (c) 锯片8节块断口上金刚石(Diamond on fracture surface of segment on sawblade 8)

图4 两种结合剂节块的断口形貌 Fig. 4 Fracture surfaces corresponding to two bonds

加。图4是两种结合剂节块的断口形貌。可看出,锯片8的结合剂中粉末颗粒间晶界清楚,晶粒粗大,因而对结合剂的结合力弱。而锯片7的结合剂致密且有明显的韧窝断裂痕迹,故结合力强,从断口上金刚石表面放大照片看,金刚石表面有轻微腐蚀痕迹,说明在烧结过程中与结合剂之间发生了化学腐蚀轻度石墨化。

此外,结合剂的屈服极限也是影响金刚石工作过程的重要因素。如图1(i),切削阻力大时,由于结合剂首先发生塑性变形,致使金刚石发生滑移,这也是使用软结合剂系统易保持锋利的原因之一。

2.2.3 花岗石种类的影响

从图3中锯片2、4、5的锯切性能数据可看出,花岗石对锯切性能影响极大。切割中国红之类石英含量高、解理困难的花岗石,金刚石宏观破碎率高,完整晶形少。因此,锯切较难进行,功耗大,结合剂耕犁严重。而切割G603之类石英含量低、斜长石和云母含量高的花岗石,解理容易,切割过程较易进行。因此,完整晶形和微破碎多,金属结合剂主要由冲蚀引起,因此,耐磨度高且功耗低。

2.3 磨削、抛光过程中金刚石与花岗石的摩擦特点与对策

在上面的讨论中已经提到,花岗石解理程度与金刚石的粒度和切削深度有密切关系。磨削和抛光过程中,为了获得理想的Ra和光泽度的表面,常常采用较细粒度的金刚石,因此,磨、抛过程中花岗石主要以磨耗形式被去除,磨、抛过程中伴有较多塑性变形(如图5所示)。这样就造成了切削比能的增加,从而引起摩擦发热量的增加,进而导致磨粒脱落现象严重(参见图1(d))。针对这一现象,本文采用了表面镀附Ti合金的金刚石[7],增加了结合剂对金刚石磨粒的

图5 磨、抛后的花岗石形貌

Fig. 5 SEM photographs of ground and polished granite surface

图6 采用镀膜后,磨块使用后的形貌

Fig. 6 SEM photographs of film coated diamonds used in grinding discs

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

化学键合力; 此外, 镀膜还可缓冲热量传递给结合剂, 从而达到减少脱落的目的(图6是采用镀膜后, 磨块使用后的形貌)。在金刚石的使用方面, 因切除负荷较轻, 不需要抗压强度太高, 而要选用耐磨性强的金刚石为宜。

3 结　　论

(1)　金刚石在去除花岗石的同时, 挤压的作用引起花岗石的脆性断裂, 在花岗石中存在各种缺陷、应力集中, 使得裂纹因而成长, 导致脆性破坏。金刚石在经受和花岗石的直接磨擦、磨损的同时, 还要受到花岗石切削碎屑的冲击和磨蚀。而作为起固位金刚石作用的金属结合剂的磨损, 则是花岗石切削碎屑在切削液的带动下冲击、磨蚀作用所造成。

(2)　金刚石颗粒与金属合金(结合剂)耐磨性匹配合适, 有效出刃高度则可以得到长期维持, 即可获得高的耐磨度又可保持较低的功耗。

(3)　磨削和抛光过程中, 为了获得理想的Ra 和光泽度的表面, 常常采用较细粒度的金刚石, 使花岗石产生塑性变形。此时, 在金刚石表面镀附Ti 合金, 可增加结合剂对金刚石磨粒的化学键合力; 此外, 镀膜还可缓冲热量传递给结合剂, 从而达到减少脱落和提高磨削比的目的。

参 考 文 献

1 LIAO Y S. Wear characteristics of sintered diamond composite during circular sawing. Wear, 1992, 157: 325～337

2 Ertingshausen W. Wear processes in sawing hard stone. IDR, 1985, 50: 254～258

3 王零森, 黄培云. 特种陶瓷. 湖南: 中南工业大学出版社, 1994. 128～130

4 Purtscheller F. Workability of natural stones and cutting with diamond discs. DIAMANTE APPLICAZION & TECNOLOGIA, 1994, 2: 134～149

5 徐滨士. 表面工程与维修. 北京: 机械工业出版社, 1996

6 Xu X P, *et al*. Influences of diamond selection on the process of sawing and grinding of stone. Proceedings of ICPE'96 and SJUT Conference, 1996. 10. China, Northeastern University Press, 1996. 107～113

7 王艳辉, 王明智, 关长斌, 等. Ti 镀层对金刚石-铜基合金复合材料界面结构和性能的影响. 复合材料学报, 1993, 10(2): 107～112

WEAR MECHANISM OF DIAMOND-ALLOY COMPOSITE FOR SAWING OF GRANITES

Xu Xipeng　Shen Jianyun　Huang Hui　Luo Canbin

(Department of Mechanical Engineering, National Huaqiao University, Quanzhou 362011 China)

Abstract　Wear of diamond-alloy composite segments under various conditions is observed through a lot of experiments on the basis of previous researches on segment wear. Influences of granites, diamonds and metal bonds on wear characteristics of diamond segments have been discussed. In the end, wear characteristics of diamonds during grinding and polishing granites have been analyzed and measures to deal with the problems have also been put forward.

Key words　granite, sawing, diamond, composite segment, wear

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net