

立方氮化硼(cBN), 除了金刚石, 是两种最常用的超磨料之一, 用于磨削硬质材料, 如陶瓷或难以切割的金属合金, 如镍基航空合金。

在汽轮机零件的制造过程中, 为了提高生产效率, 常采用蠕进给磨削(CFG)条件下的电镀 cBN 砂轮。这种类型的车轮之所以被使用, 是因为与钻石相比, 它的化学稳定性和高导热性, 因为它保持形状的时间更长。然而, 这些车轮只有一个磨料层, 磨损可能导致振动和热问题。通过对砂轮表面的修整, 可以部分解决磨损的影响。碳化硅棒调理方法简单, 效果好, 在工业上得到广泛应用。然而, 在 CFG 过程中, 从车轮形貌和后期车轮性能方面了解电镀 cBN 车轮的这一调节过程的工作很少。本文首先对磨粒磨损的主要类型进行检测并提出测量方法;其次从磨粒磨损前后的磨粒形貌变化和磨粒功耗等方面分析磨粒磨损对磨粒磨损的影响。

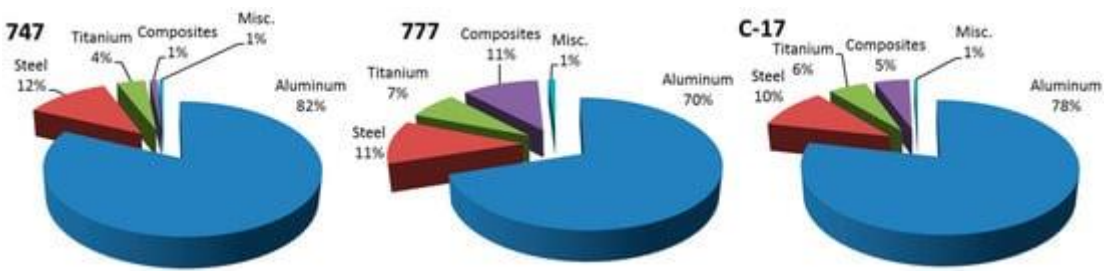


图 1 所示。波音 747、777 和 c - 17[1]所用结构材料的重量分布。

由于这些增强的性能, 这些材料制成的零件的制造过程需要在特殊条件下或使用特殊工具进行。此外, 发动机的部件往往具有复杂的几何形状, 这在夹紧系统和加工路径方面阻碍了过程。其中一个部件是喷嘴导叶(NGV)。涡轮定子的不同阶段是由不同尺寸的气体动力箱形成的。它的组成及其几何结构的前视图和后视图可以在图 2 中看到。此工件首先采用失蜡铸造。这一过程中留下的多余材料, 通常大于 1 毫米, 通过后续的磨削操作去除, 直到工件在形状和尺寸公差范围内。当需要移除的材料数量指向铣削作为一个更有效的过程, 这种材料的特性要求使用更强硬的工具, 如砂轮。



图 2。喷嘴导叶(NGV)及其组成。

磨削通常提供较低的材料去除率, 因此不适合航空工业提高生产率的要求。作为替代, 蠕变进给磨削(CFG)条件用于这些工件的磨削, 而不是传统的磨削条件。

当切削深度大于砂轮的晶粒突出高度[3]时, 属于蠕变进给磨削。与传统的磨削操作相比, 在 CFG 中, 切削深度通常在 0.5 mm 以上。切削速度提高到 120m /s, 进给速度降低到 240mm /min 以

下。因此，材料在一次或非常少的冲程中被去除，减少加工时间。

当对位时，接触长度增加，切屑变细变长，摩擦犁料的接触粒数增加，不利于实际切削粒数的增加。结果，热应力以及接触区的力都增加了。为了制造这些昂贵的无缺陷工件，正确选择砂轮对于尽量减少前面提到的不利影响是很重要的。

可修整轮广泛应用于 CFG 连续修整中，其目的是使修整轮的孔隙度、晶粒锐度和晶粒突出高度均在所要求的条件内。然而，这种方法需要很高的径向磨损，这是一个不便的磨削操作不涉及直线表面磨削。在 NGV 中研磨的所有表面中，有些需要车轮遵循特定的路径，这同时取决于工件和车轮的几何形状。如果砂轮的径向尺寸变化很大，不仅要不断调整所要遵循的路径和磨削参数，还要调整高压冷却系统所需的喷嘴位置。正如前面提到的，生产力在这个领域变得越来越重要。因此，使用非修整砂轮，如电镀砂轮，特别是当磨削不是一个直线表面磨削操作。

这些车轮由三个部件组成，即，一个钢轮毂，作为粘结材料的镍层，和磨料颗粒。了解这些工具的制造过程对了解其质量是必要的，因此，它的解释如下[5]。首先，钢轮毂几乎是最终形式的车轮，唯一的区别，与成品车轮相比，应该是对粘结和谷物的偏移。之后，可以对轮毂进行热处理，车轮的工作表面完全被磨粒覆盖。然后，电镀过程分两步进行，电解液将车轮(阴极)浸泡在含有 Ni、Ag、Cu、Au 或 Co(阳极)等金属盐的水溶液中。首先，它被浸泡在一个不动的浴缸里，谷物被稍微覆盖并固定在中心。其次，去除多余的颗粒，并将车轮浸泡在循环电解槽中，在那里可以达到所需的镀层厚度。晶粒和键之间的连接是机械的。因此，这些颗粒必须被覆盖到其大小的 50%。尽管由此产生的晶粒突出高度很低，但该过程是在低温( $\leq 60^{\circ}\text{C}$ )下进行的，从而避免了残余应力的存在。

这样，电镀的车轮只有一个磨料层。因此，为了提高砂轮的使用寿命，提高生产率和工具成本，超磨粒代替传统磨料使用。立方氮化硼(cBN)和金刚石是用于砂轮的两种超磨料。后者的硬度大约是前者的两倍，但它容易与 C1023 的一些成分发生化学反应，即镍、钴、钽和钛[3]。此外，在氧气的存在下，在  $650^{\circ}\text{C}$  以上的温度下，它被转化为石墨。

如前所述，CFG 的特点之一是摩擦增加导致接触区温度升高。高温合金的性能包括其本身在加工过程中的高温。综合而言，在当前情况下，接触区温度可能会增加  $650^{\circ}\text{C}$  的阈值。综上所述，在 C1023 ngv 的 CFG 工艺中采用了电镀 cBN 砂轮。

然而，由于它是一个不可修整的车轮，车轮表面的磨损状态在其寿命期间变化。主动切削晶粒密度随晶粒突出高度的减小而增大，从而使切屑厚度减小。这些现象可能最终导致磨削中常见的一种磨损，称为磨平[4]。这可以定义为在晶粒上出现平行于切削速度的平面。结果，法向力增加，以达到穿透材料所需的压力，同时导致切向力增加。引申而言，摩擦和犁耕更多，因此温度更高，力也更大。在某些情况下，这些现象会导致地面的关键故障，如热损伤、振动痕迹和尺寸不准确。

每一个地面的特殊特征使它们中的一些更容易受到这些现象的影响。这是内轨的情况，在图 3a 中用红色标记。该表面是用一个锥形砂轮磨削，其路径如图 3b 所示。

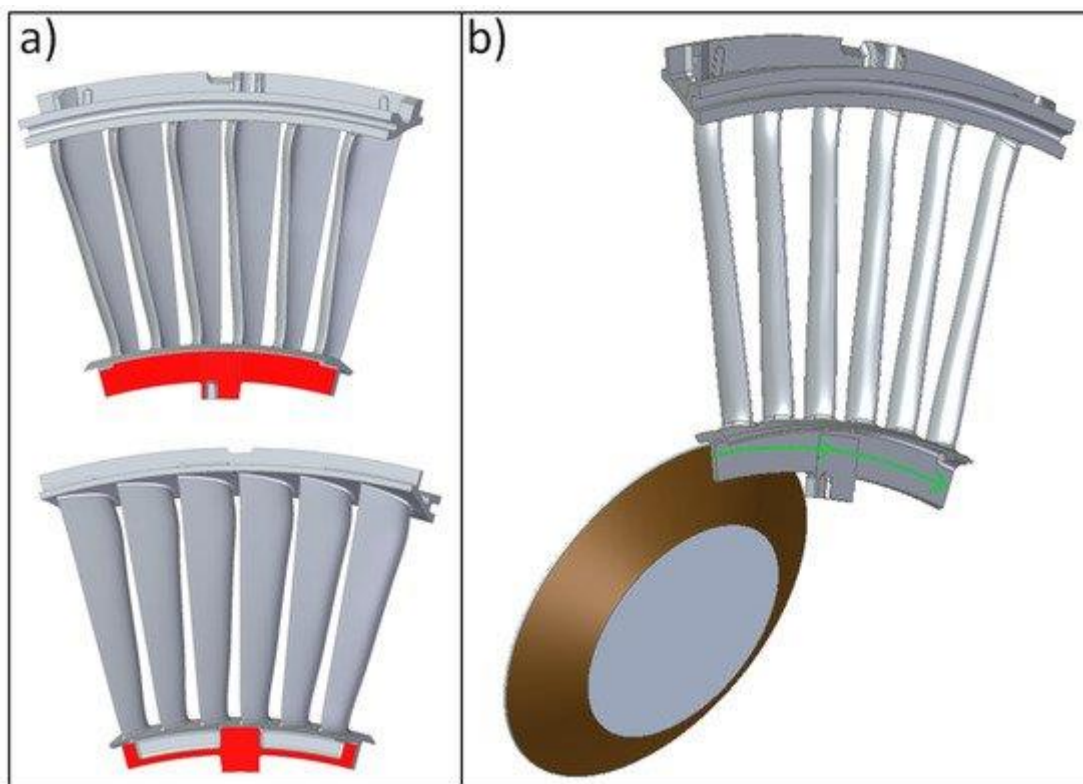


图 3。喷嘴导向叶片上的内轨和砂轮的几何形状。(a)内轨，在 NGV 上用红色标记；(b)内轨磨削操作的描述。砂轮的磨料表面用棕色标记，绿色箭头表示砂轮沿内轨的轨迹。由于磨削操作的结果，这个表面只能由另一侧支撑，而不能被刚性夹紧。此外，磨矿过程中产生的热量耗散物料体积小。由于车轮磨损增加，该表面很可能出现前面提到的振动痕迹和热损伤，如图 4 所示。

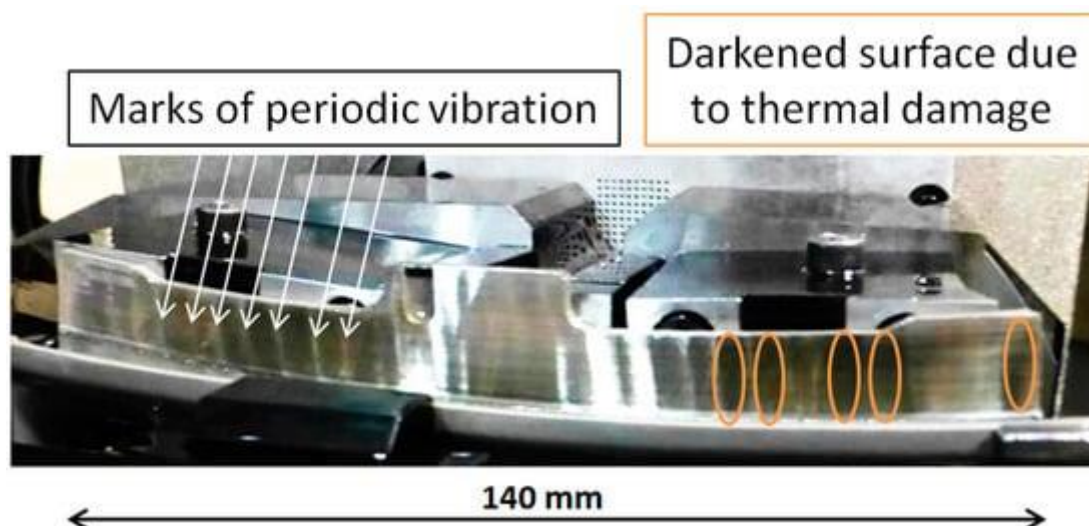


图 4。振动的痕迹用割裂的矩形标记，热损伤区域用橙色的椭圆形标记。

然而，尽管电镀车轮是不可修整的事实，它们的表面可以部分恢复切削能力。已开发了许多方法来调节车轮表面。机械修整方法简单，没有专用设备，采用固定修整工具进行机械修整是一种广泛使用的方法。正如 Wegener et al.[6]所解释的，块锐化是一种特别用于单层 cBN 砂轮的方法，其中陶瓷或树脂结合的氧化铝或碳化硅(SiC)制成的棒被压在砂轮上。接触宽度通常覆盖整个砂轮宽度，适用于两种不同的配置。一方面，恒定的径向速度可以更好地控制砂轮形貌，但

会在接触开始时产生较大的力峰值。另一方面，恒定的法向(径向)力可能需要更多的时间，但这些力峰值是可以避免的，这是至关重要的单层车轮，因为它们可能导致谷物拉出。

这样可以将砂轮磨尖，避免后续工件出现之前的问题。然而，对车轮的实际影响需要研究和了解，以便了解它如何影响车轮寿命。

本文对不同磨损状态下的砂轮表面进行了分析，以表征沿寿命方向的磨损类型，并提出一些粗糙度参数来量化磨损类型。一旦描述了引起振动和热问题的磨损类型，就研究了调节过程的效果，以了解它如何改变车轮地形，以及这种修改如何长期影响车轮性能。

#### 1.1. 技术水平

1.2. 不同的测量车轮地形的的方法已经发展起来。一些作者[7,8,9,10,11]研究了在线方法。Brinksmeier 和 Werner[7]通过对刚玉砂轮进行激光三角测量，获得了砂轮表面二维粗糙度参数。Furutani et al.[8]通过压力传感器测量了陶瓷氧化铝砂轮的径向磨损、钝化和负载。他们记录了切割流体在接触到车轮表面后的静水压力，传感器和车轮之间有一个特定的间隙。后来在[9]中，他们成功地使用了相同的设置来补偿表面磨削的磨削深度。Sutowski et al.[10]和 Liao et al.[11]利用声发射检测颗粒的钝化状态。

本文对电镀 cBN 砂轮进行了研究。工件为上述 NGV，材质为 C1023。这个过程是在五轴磨床上进行的，运动学要求是复杂的。此外，根据磨削的几何形状，砂轮和工件的同时运动是必要的。另外，通过两组喷嘴使用大量的高压油基切削液，一组喷嘴在接触前润滑接触区，另一组喷嘴在接触后清洗砂轮。因此，由于光学、声学或压力传感器的特殊条件，前面解释的方法被忽略了。此外，其中一些方法侧重于测量车轮表面的特定现象，而不是使用国际标准化组织(ISO) 25178 标准收集的标准化空间粗糙度参数。

关于脱机方法，他们允许有一个更深的车轮表面的知识。接触式测量装置，即触针轮廓仪，被用来直接在车轮表面或表面复制品上表征车轮表面。由于触控笔轮廓仪的物理性质，钻石尖端很难到达表面最深的山谷，在某些情况下，一些信息会丢失。这叫做卷积误差。Blunt 和 Ebdon[12]采用了这种技术，用于测量陶瓷氧化铝砂轮的表面。由于前面解释的卷积误差，他们在车轮表面进行测量。保证了颗粒尖端对应信息的获取。在分析了他们的结果后，他们建立了获得颗粒密度的最佳样品间距(见公式(1))。其中， $SS_{opt}$  为最佳样品间距， $d_g$  为平均粒径。

$$\frac{d_g}{4} \leq SS_{opt} \leq \frac{d_g}{3}.$$

Butler 等人[13]使用了相同的测量策略和车轮类型，也应用了最佳样本间距表达式。他们研究了不同磨损状态后的砂轮表面，并能够将磨损状态与砂轮寿命期间的磨削力关联起来。

利用光学器件成功地对电镀 cBN 砂轮进行了表征。Shi 和 Malkin[14]使用光学显微镜测定了轴承钢内外圆磨削过程中电镀 cBN 砂轮上的磨损平面面积、活性晶粒密度和晶粒拉出。然而，由于无法获取砂轮表面的任何粗糙度参数，因此，没有磨平的晶粒状态仍然是未知的。Upadhyaya 和 Fiecoat[15]还使用光学显微镜测量不锈钢 CFG 中的颗粒拉出。随后，Guo 等[16]等人在镍基高温合金的表面磨削中，用相同的方法在同一类型的车轮上发现了晶粒断裂、晶粒拉出和磨平现象。然而，他们只量化了磨损平坦面积百分比，而没有考虑断裂晶粒。Ding 等人通过光学和扫描电子显微镜对镍基高温合金的 CFG 操作中的磨损、微观断裂和宏观断裂进行了量化。Yu et al.[18]利用数字显微镜对电镀 cBN 砂轮表面进行了三维测量，以获得晶粒高度分布。他们将这些信息用于镍基高温合

金磨削过程中的砂轮寿命模型。

虽然之前所回顾的大部分工作都集中在相同的砂轮、工件材料和磨削工艺上,但没有人像 Butler et al.[13]和 Ye et al.[19]那样对砂轮表面的粗糙度参数进行评估。第一项研究的作者建立了 Sds(峰顶密度)、Ssc(平均峰顶曲率)和 Sq(均方根粗糙度)作为最适合的表征氧化铝砂轮在钢表面磨削中的砂轮磨损的参数。在另一项研究中, Ye 等人将无限焦测量技术应用于金刚石车轮的三维数字化。他们建立了用于量化砂轮表面磨损的 ISO 25178 标准的 Spd(单位面积峰值数)、Sha(平均山丘面积)和 Shv(平均山丘体积)参数。

主要的磨损类型不仅取决于砂轮的特性,还取决于工件的材料和磨削参数。电镀 cBN 砂轮在镍基高温合金 CFG 过程中的磨损并没有通过粗糙度参数进行表征和量化。这项工作的第一部分通过离线光学方法和支持 ISO 25178 标准来解决这一问题。

### 1.1.2. 电镀 cBN 砂轮调理

特别是在电镀超硬磨料砂轮的修整方面,特别是在消除超硬磨料砂轮的跳动和修整晶粒方面做了大量的工作。由于它们是单层轮子,它们呈现出特定的特征,使它们的条件作用过程与其他轮子不同。较高硬度的颗粒通常需要非常特殊的研磨材料或方法,如果他们是通过接触修整器。然而,金属键合允许使用非传统的调节方法,如激光或甚至利用金属电性能的方法。此外,在这些车轮中,必须精确地控制过程,否则,结合层可能会严重损坏或晶粒突出高度过度下降。由于只有一层磨蚀层,这些缺陷不可能通过后续的条件加以纠正。下面将介绍最新的工作和对每种方法的进一步解释。

Ghosh 和 Chattopadhyay 在 touch dressing 的基础上连续发布了两幅作品[20,21]。该方法适用于单层砂轮,最大限度地减少了砂轮的跳动,实现了磨粒的锐化。在这种方法中,碳化硅或金刚石块使用浅深度切割,在微米范围内,以便仅接触到晶粒尖端。在第一个工作[20]中,他们研究了修整不同晶粒分布模式的钎焊 cBN 砂轮对表面精加工和磨削力的影响。修整工具是由在块上钎焊的扁平金刚石形成的。他们得出结论,在修整砂轮表面后,所有晶粒类型的工件粗糙度 Ra、Rz 和 Rmax 都相似,但对于晶粒密度较低的砂轮,由于提供了更多的磨粒间切屑空间, Ra = 1  $\mu$ m 相对于 1.5  $\mu$ m,因此略好一些。对于力值,他们也验证了晶粒微断裂,而不是磨损平坦的外观作为结果的过程。后来,他们对不同粒径的晶粒进行了[21]相同的研究,得到了相似的结果。粗颗粒和细颗粒的表面粗糙度相似,而粗颗粒由于晶粒分离,磨削性能仍较好。

Zhao 和 Guo[22]最近对电镀金刚石砂轮连续采用了三种不同的砂轮调理方法,以提高其在光学眼镜超精密磨削中的性能。首先,他们使用了一种金属结合剂金刚石杯形砂轮,其晶粒尺寸比砂轮更小,有两个目的:最大限度地减少跳动,并将晶粒压平到结合剂层水平,以提高光洁度。其次,他们提出了去除粘接材料薄层的电解过程修整(ELID)方法。这样,就实现了小粒的突出高度。最后,他们使用氧化铝棒去除由 ELID 工艺产生的氧化层。

Kitzig et al.[23]将超声波辅助修整(UAD)应用于电镀砂轮。该方法已广泛应用于陶瓷砂轮和树脂结合剂砂轮的修整,但不适用于单层砂轮。在法向力(从 15 N 增加到 55 N)和力比(从 2 增加到 3.5)急剧增加的情况下,采用该方法修整粗粒砂轮(D251),获得了与细粒砂轮(D46 和 D181)相当的表面粗糙度值。

激光触摸修整广泛应用于多层砂轮的修整，doold 等人[24]利用皮秒激光源对电镀金刚石砂轮进行修整，将其引入到单层砂轮的修整中。他们比较了激光触摸修整砂轮和机械触摸修整砂轮对 SiC 砂轮的修整效果。他们实现了较低的修整力，车轮以前是通过激光触摸修整。另外，用 Ra 和 Rz 来评估修整后的车轮磨损，机械修整后的车轮磨损值较低，因此效果较好。

最近 Pfaff et al.[25]在电镀 cBN 车轮上使用了 LTD，没有造成热损伤。他们比较了 LTD 和常规修整在磨削力，工件粗糙度和车轮的峰值承载比。磨削 100Cr6 钢后的力测量结果表明，由于晶粒突出高度不均匀，常规修整砂轮的力值较低，这也导致表面光洁度较差，砂轮磨损较大。

需要指出的是，在前面引用的工作中，机械、UAD 和非接触方法被用于不同的目的，如在保持晶粒表面粗糙的同时均衡晶粒突出高度，为了更好的抛光而压扁晶粒，以及清洗结合层。然而，之前引用的作品中，并没有对触摸修整后的车轮进行长期的性能研究。本工作通过对比处理前后车轮形貌，提出空间粗糙度参数，以了解晶粒所受的形貌变化。此外，还以功率消耗为指标评价了砂轮寿命对磨削性能的影响。

## 2. 材料和方法

### 2. 1. CFG 过程中车轮表面的表征

进行车轮形貌分析有两个目的。其中之一是通过分析车轮经过不同数量的累积材料去除后，Vw，来表征车轮寿命期间的磨损，以达到不同的磨损状态。第二个目的是了解和评估调理的效果，通过分析车轮在这一过程前后。

使用光学器件离线进行表征。使用 5 倍放大的 Leica DCM 3D®(Leica microsystems AG, Wetzlar, Germany)共聚焦显微镜对车轮表面进行数字化，定量表征车轮磨损。随后使用 Leicamap®(Leica microsystems AG, Wetzlar, Germany)和 Talymap®(Taylor Hobson, Leicester, UK)商业软件获取三维空间粗糙度参数以及 abbott - firestone 曲线等图表。其中一些如图 5 所示。每个轮子沿着圆周有六个不同的区域。为了获得代表整个车轮状态的平均值，这些区域彼此间的间隔是相等的。

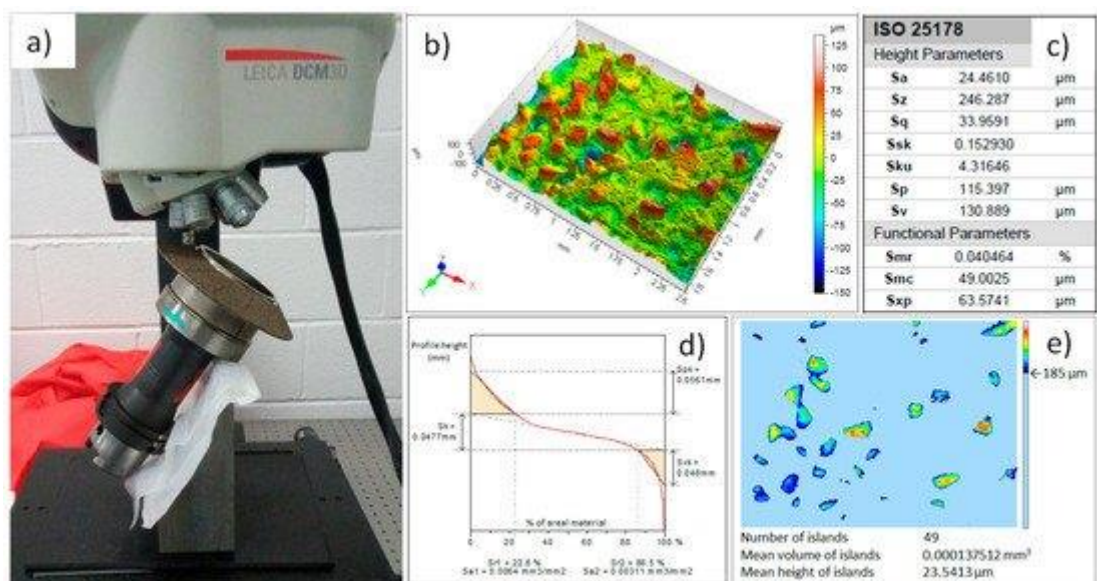


图 5。(a)在共聚焦显微镜下数字化的 HSK 夹紧系统砂轮。(b)通过 Leicamap®显示的砂轮表

面。(c)粗糙度参数符合 ISO 25178 标准。(d) abbotfirestone 曲线或材料承载的面积曲线, 可以获得功能参数。(e)数字化表面的切片, 在这里可以集中分析晶粒尖端。

相比之下, 徕卡 DSM 300®(徕卡微系统公司, Wetzlar, 德国)的宏观显微镜用于拍摄车轮表面的真实照片。这些图像被用作数字化的补充信息。通过这些图片, 可以观察到车轮表面的实际状态, 并可以评估存在粘滞材料的不同现象。在某些情况下, 为了补充信息, 也使用了扫描电子显微镜(SEM) Jeol 6400®(Jeol Ltd, 东京, 日本)。

## 2.2. 粗糙度参数分析

在 ISO 25178 标准中有许多粗糙度参数。它们中的每一个都得到了恰当的定义, 其应用取决于应该分析的现象。除上述参数外, 还可以通过分析软件进行数字化计算, 如前一节所述。在给定这些参数的情况下, 为了选择最具代表性的参数来测量磨损类型, 本文采用了一种统计方法, 即平均和标准差法。下面几行将介绍该方法, 在 Leach[26]编写的书中对此进行了更广泛的解释。

需要注意的是, 这种方法适用于区分样品的两种状态(类)。对于多类情况, 应选择其他数学方法。

给定同一规格砂轮的两种不同的磨损状态, 未使用(N)和完全磨损(W), 重要的是要知道哪个参数或参数组合最适合从数值上区分这两种状态。

第一步是为每个样本创建特征向量。特征向量包含样本 n 从 s1 到 sm 的所有不同参数, 如式(2)-(4)所示。

$$p^{N1} = (s_1^{N1}, s_2^{N1}, \dots, s_m^{N1}) \quad p^{W1} = (s_1^{W1}, s_2^{W1}, \dots, s_m^{W1}). \quad (2)$$

$$p^{N2} = (s_1^{N2}, s_2^{N2}, \dots, s_m^{N2}) \quad p^{W2} = (s_1^{W2}, s_2^{W2}, \dots, s_m^{W2}) \quad (3)$$

$$p^{Nn} = (s_1^{Nn}, s_2^{Nn}, \dots, s_m^{Nn}) \quad p^{Wn} = (s_1^{Wn}, s_2^{Wn}, \dots, s_m^{Wn}) \quad (4)$$

然后, 将同类的所有 si 参数集合在一起。这样, 每个 si 参数的结果就是两个参数向量, 每个类一个。如式(5)所示。

$$s_i^N = (s_i^{N1}, s_i^{N2}, \dots, s_i^{Nn}) \quad s_i^W = (s_i^{W1}, s_i^{W2}, \dots, s_i^{Wn}) \quad (5)$$

对于每个向量, 分别用式(6)和式(7)计算均值和标准差。

$$\mu_i^N = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n s_i^{Nk} \quad \mu_i^W = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n s_i^{Wk} \quad (6)$$

$$\sigma_i^N = \sqrt{\text{var}(s_i^N)} \quad \sigma_i^W = \sqrt{\text{var}(s_i^W)} \quad (7)$$

下一步，根据式(8)，利用覆盖系数 k 计算新轮和磨损轮的间隔。

$$I_i^N = \mu_i^N \pm k\sigma_i^N \quad I_i^W = \mu_i^W \pm k\sigma_i^W \quad (8)$$

k 的值表示正态分布曲线根据概率密度函数的置信度，对应于曲线覆盖的各类样本的百分比。在这项工作中，k 使用了以下值。

k = 1: 68%。

k = 2: 95%。

k = 3: 对应 99.7%。

这两个正态分布可以完全分离，也可以不分离。如果它们之间有重叠，就会有一个参数值带，在这个值带中，车轮可以同时被划分为新的和磨损的，从而导致不明确的结论。因此，如果正态分布曲线是间断的，可以认为一个参数适合于对车轮进行分类。

然而，呈现间断分布的参数对车轮磨损状态的分类也具有不同的适宜程度。参数的适宜性称为显著性，通过式(9)计算，其中  $d(I_i^N, I_i^W)$  为最高区间的最低点与最低区间的最高点之差，除以两个平均值之间的平均值。

$$S_i = \frac{d(I_i^N, I_i^W)}{\frac{1}{2}(\mu_i^N + \mu_i^W)} \quad (9)$$

高  $S_i$  表示该参数可以作为车轮磨损的代表，而负  $S_i$  则表示正态分布曲线重叠。因此，必须选择硅含量最高的参数作为最能代表车轮磨损的参数。然而，值得注意的是， $S_i$  不仅取决于平均值之间的距离，还取决于覆盖因子导致的标准偏差。这样，如果一个具有高标准差的参数的平均值距离最远，那么它可能在低覆盖系数下具有最高的  $S_i$ ，但如果应用高置信水平，它可能导致负  $S_i$ 。

一旦获得了最重要的参数，就必须计算识别新车轮和磨损车轮的阈值  $\tau$ 。如果区间之间有重叠，则阈值匹配两个高斯分布的交点。阈值由式(10)可得。

$$\frac{(\tau - \mu_i^W)}{2\sigma_i^W} - \frac{(\tau - \mu_i^N)}{2\sigma_i^N} = \frac{\sigma_i^N}{\sigma_i^W} \quad (10)$$

在同一工作中，作者还提出了一个替代方法的两类情况。这种方法被称为相关系数法，其鲁棒性较差。在这种方法中，必须使用式(11)来计算所谓的相关系数：

$$r_{GB}(s_i) = \frac{\sum_{j=1}^n (s_i^{N,j} - \mu^N) (s_i^{W,j} - \mu^W)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (s_i^{N,j} - \mu^N)^2 \sum_{j=1}^n (s_i^{W,j} - \mu^W)^2}}. \quad (11)$$

其中  $s_i$  为待评估的参数， $\mu$  为该参数的均值， $n$  为样本个数。如果得到的  $r_{GB}$  接近于 1，则可以使用相应的参数作为分类器。如果它接近于零，则必须使用另一个参数。

由于其与统计学基础的联系，本文首先采用平均和标准差法。将相关系数作为一种替代方法，用于平均值和标准差法的无效结果。

### 2.3. 轮调节

Wegener 等人[6]的调质过程分类，采用固定工具的机械调质，即碳化硅棒，恢复切削能力。采用这种方法的主要原因是不需要特定的设备。调节是在前面提到的热和尺寸问题之后进行的。从砂轮形貌和不同磨削参数下的功率消耗等方面评价了调节效果。

为了评估调理过程的效果，我们计划了四种不同的 CFG 操作，每一种操作都有不同的等效切屑厚度( $h_{eq}$ )(见公式(12))。

$$h_{eq} = a_e \frac{v_w}{v_s} \quad (12)$$

等效切屑厚度是一个常用的磨矿分级参数， $a_e$  是切割深度， $v_w$  是进给速度， $v_s$  是切割速度。表 1 显示了收集到的本研究的详细信息。Test1 和 Test2 是粗加工操作，Test3 和 Test4 是半精加工操作。从测试 1 到测试 4，连续进行，直到工件再次出现问题。然后对修整前后的砂轮进行了表征。在每次测试中，都会测量功耗。将车轮寿命期间功率的变化作为 CFG 工艺调节效率的指标。此外，使用不同的  $h_{eq}$ ，可以评估不同 CFG 操作对调理的敏感性。

表 1。详细研究了调理过程。cBN:立方氮化硼;  $H_{eq}$ :等效切屑厚度; SiC:碳化硅。

**Table 1.** The details of the study for the conditioning process. cBN: cubic boron nitride;  $h_{eq}$ : equivalent chip thickness; SiC: silicon carbide.

Wheel diameter	150 mm			
cBN grain size	250 $\mu\text{m}$			
Grain density	$\sim 14$ grains/ $\text{cm}^2$			
Workpiece material	C1023 (nickel base superalloy)			
Grinding speed	80 m/s			
Test name	Test1	Test2	Test3	Test4
Depth of cut (mm)	0.4	0.3	0.15	0.15
Feed rate (mm/min)	630	605	850	1040
$h_{eq}$ ( $\mu\text{m}$ )	3.15	2.27	1.6	1.95
Cutting fluid	Oil-based high pressure			
SiC grain size	68 $\mu\text{m}$			

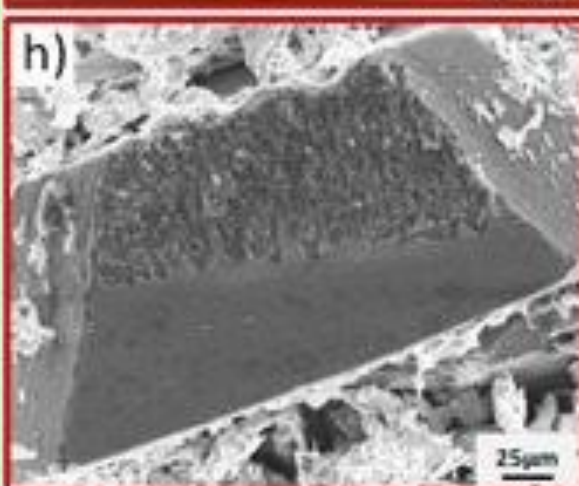
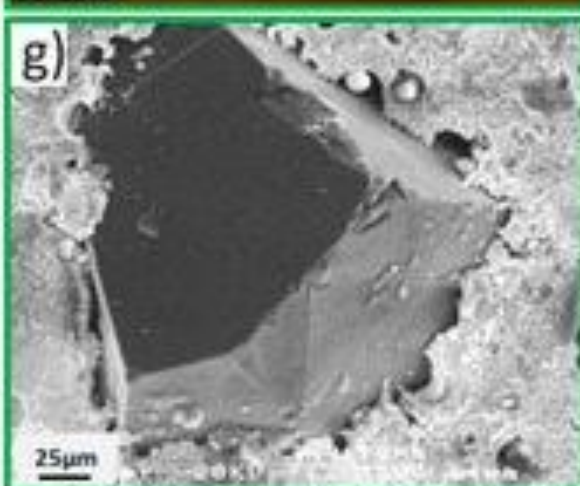
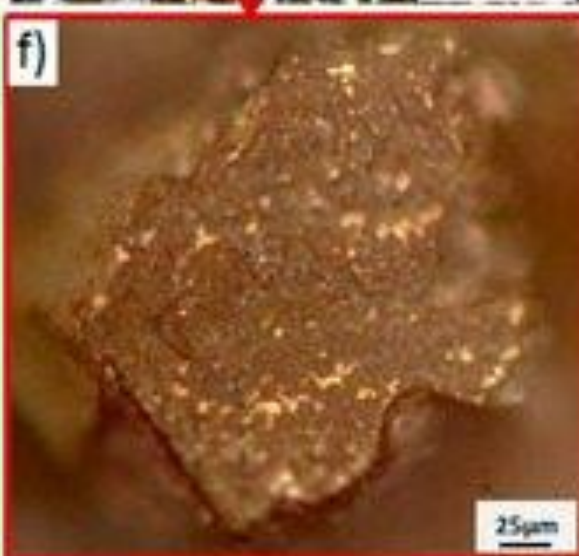
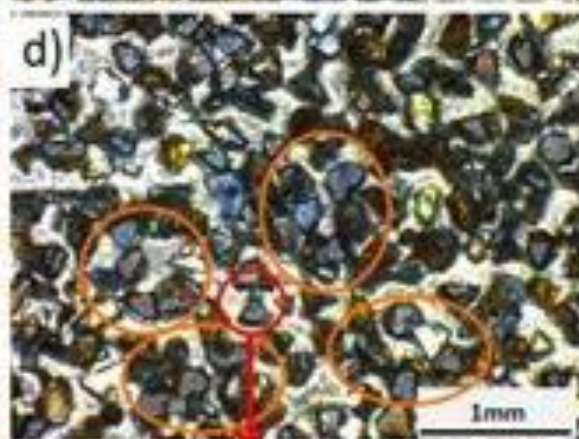
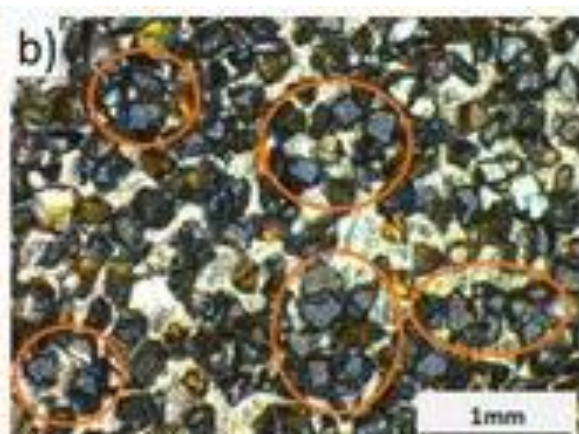
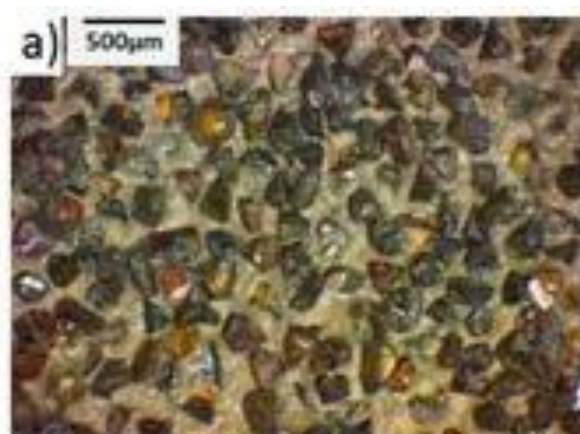
## . 结果

### 3. 1. 车轮磨损分析

观察砂轮经过五种不同的磨损状态，即全新砂轮(0级)，用 SiC 棒修整后(0+级)，磨削后 122 cm<sup>3</sup>(1级)，磨削后 5070 cm<sup>3</sup>(2级)，磨削后的体积为 8112 cm<sup>3</sup>(3级)。根据工业经验，最后一种状态下去除的材料体积与车轮寿命的结束相对应。

#### 3.1.1. 定性分析

首先，利用光学图像检测磨损类型；图 6a,c 为 0 级车轮对比图，图 6b,d 为 3 级车轮对比图。在整个表面均检测到磨损扁面，而其他磨损类型如颗粒拉出和车轮加载未发现。橙色的圆圈表示一些穿平底鞋的例子。需要指出的是，在属于新晶粒表面的晶粒上也发现了平坦的表面，尽管它们并不平行于 vs(见图 6g)。然而，用更高的放大率，他们之间的差异可以清楚地看到。新砂轮上的平晶粒呈镜面状，如图 6e,g 所示，而旧砂轮上的平晶粒由于与工件的相互作用呈粗糙表面，如图 6f,h 所示。



0 级车轮表面。(b,d): 3 级车轮的表面。橙色的有一些平底鞋。(e,g):用光学宏显微镜和扫描电子显微镜(SEM)分别观察到两个镜面状平面颗粒。(f,h):用光学显微镜和扫描电镜观察到两个粗糙的平面晶粒, 命名为磨面。

由此可见, 磨平是主要的磨损类型, 是造成磨平过程中出现问题的主要原因。

### 3.1.2. 定量分析

一旦检测到磨损类型, 就选择 ISO 25178 标准的空间粗糙度参数。由于该标准包含的参数较多, 为了优化努力, 选择了高度参数和功能参数。这两组参数是空间粗糙度分析中最常用的参数, 解释如下:

高度参数:

**Sa。**

这个参数称为平均粗糙度。它提供了表面的全面测量。

平方。

这个参数叫做均方根粗糙度, 它相当于高度的标准差。

**Sp。**

这是在平均线上的最大峰值高度。

深圳。

这是表面的最大高度。

**Sv。**

这叫做平均线下的最大谷深。

构造论。

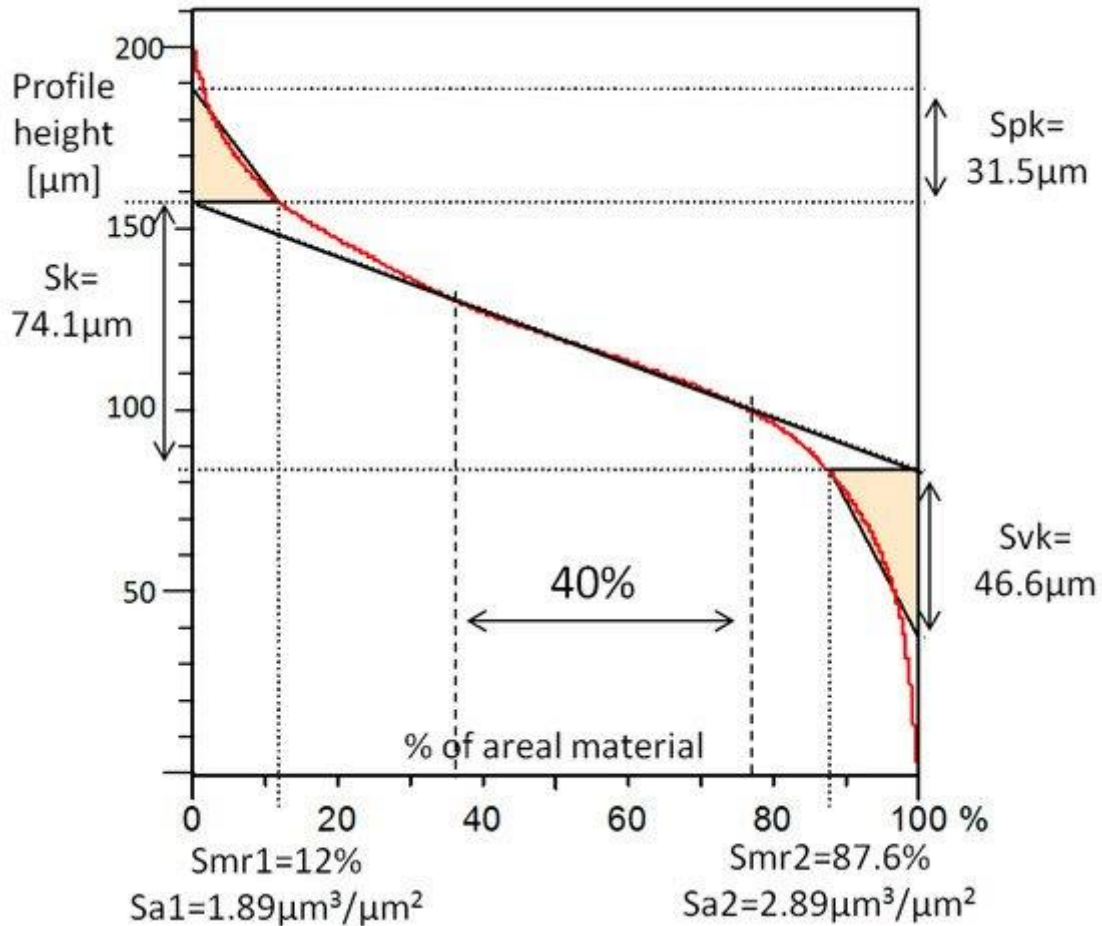
这个参数称为偏度, 它是轮廓对称的量度。当峰比谷更占优势时, 剖面 **Ssk** 值为正, 而谷占主导的面 **Ssk** 值为负。

**Sa** 和 **Sq** 被广泛用于行业评估, 以快速和简单的方式, 在可比程序下制造的零件的完成; **Sp**、**Sz** 和 **Sv** 提供了剖面上下限的信息; 最后, **Ssk** 给出了材料沿剖面高度的分布。

功能参数:

**Spk。**

从阿伯特-费尔斯通曲线计算的减少峰高度。这是图 7 中在 **Sk** 上方绘制的三角形的高度。三角形的面积与 **Sk** 上限以上的红色曲线所覆盖的面积相同。考虑到三角形的底部为 **Smr1**, 调整了三角形的高度, 使两者的面积相同。

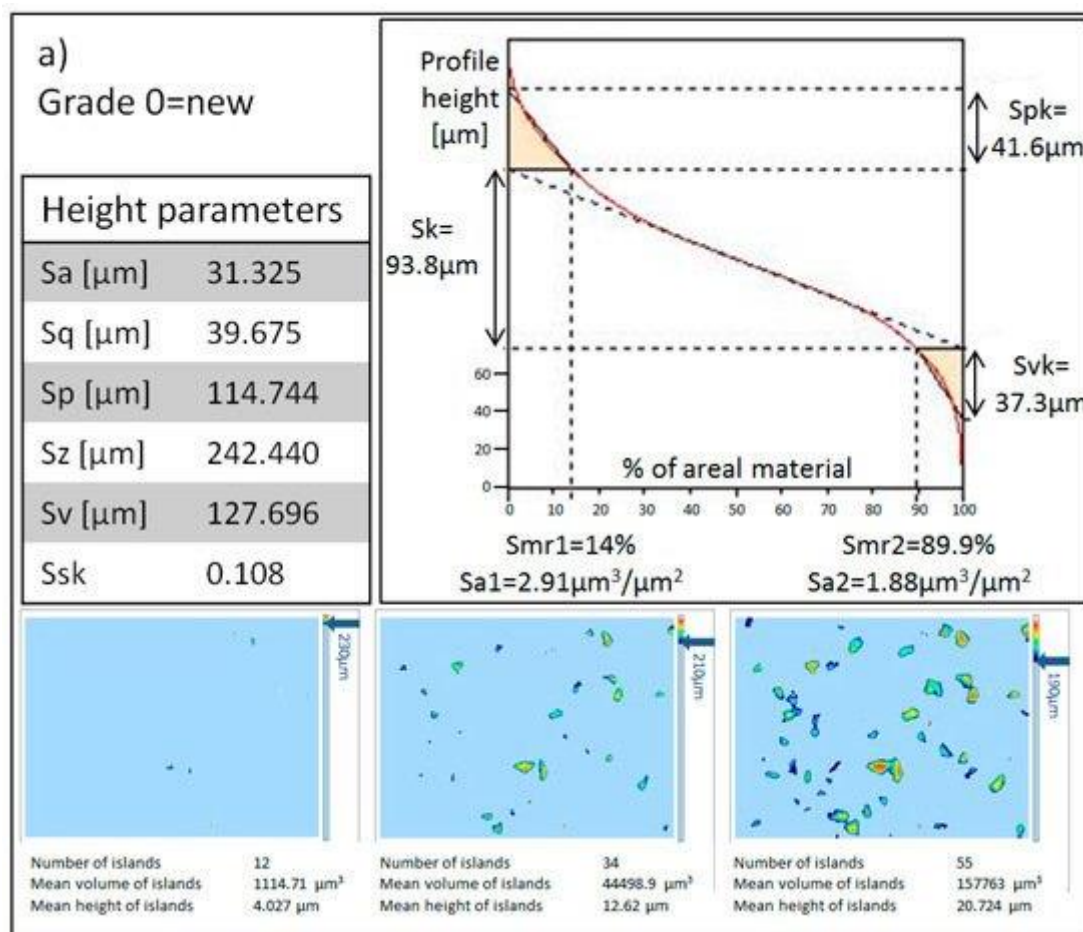


- 图 7。Abbott-Firestone 曲线。
- $S_k$ 。
- 岩心粗糙度，通过等效直线计算。根据 ISO 25178 标准，等效直线是将 **abbottfirestone** 曲线切割成两点的斜率最低的直线，这两点之间的距离为材料的 40%。如果有超过一条线具有相同的最小斜率，则必须选择接近材料 0% 的等效线，即左垂直轴。参见图 7 中的示例。
- $S_{vk}$ 。
- 减少山谷深度，计算方法类似于  $S_{pk}$ 。在这种情况下，必须调整三角形的高度，以获得与红色曲线和  $S_k$  最低限度之间的剩余面积相同的面积。
- $S_{mr1}$ 。
- 峰值物质部分，表示面积物质在  $S_k$  上限的百分比。
- $S_{mr2}$ 。
- 山谷物质部分，表示面积物质在  $S_k$  下限的百分比。
- $S_{a1}$ 。
- 上部区域[27]。这是  $S_{pk}$  和  $S_r1$  形成的三角形的面积。这个参数的物理意义是  $S_k$  以上单位材料表面的材料体积。
- $S_{a2}$ 。

- 较低的区域。这是由  $S_{vk}$  和  $S_{r2}$  组成的三角形的面积。与  $S_{a1}$  类似，该参数的物理意义是  $S_k$  以下单位孔洞表面的孔洞空间体积。

所有的功能参数及其与  $abbottl - firestone$  曲线的对应关系如图 7 所示。  $S_{pk}$ 、 $S_{mr1}$  和  $S_{a1}$  提供了剖面上部材料分布的信息； $S_{vk}$ 、 $S_{mr2}$ 、 $S_{a2}$  提供下方空洞信息；最后， $S_k$  受材料沿剖面高度总体分布的影响。

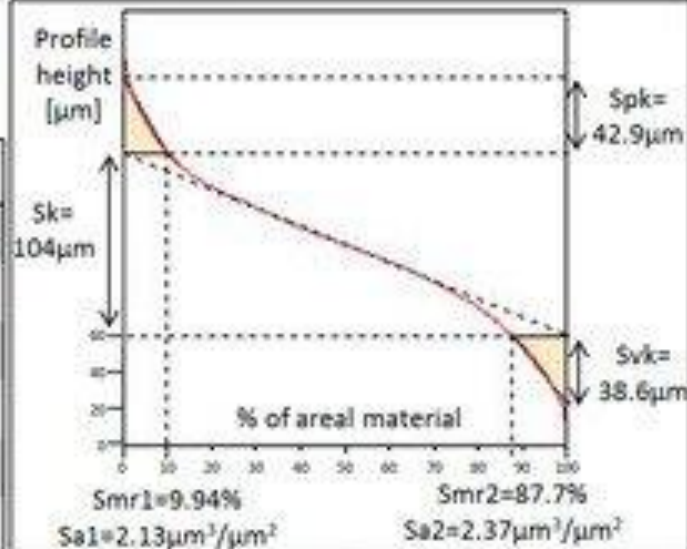
所有这些参数都是针对沿车轮周长 6 个不同区域的 5 个不同磨损等级，即每  $60^\circ$  一次。图 8 显示了每个年级的学习总结。在图 8a 至图 8e 的每一幅图中，分别描述了以下数据：带有高度参数的参数表；具有函数参数的  $abbottfirestone$  曲线；在它们下面，有三张图片是光学比较，而不是数字比较。第一张(左)为数字化切片后表面三维数字化的上视图，水平面位于最高点以下  $10\mu m$ ；第二张(中间)为  $30\mu m$  的切片；最后一张图(右)显示的是位于最高点以下  $50\mu m$  的切片。



b)  
Grade 0+=dressed

Height parameters

Sa [ $\mu\text{m}$ ]	33.078
Sq [ $\mu\text{m}$ ]	41.633
Sp [ $\mu\text{m}$ ]	121.368
Sz [ $\mu\text{m}$ ]	245.520
Sv [ $\mu\text{m}$ ]	124.151
Ssk	0.003



Number of islands: 76  
Mean volume of islands: 5969.07  $\mu\text{m}^3$   
Mean height of islands: 8.67 $\mu\text{m}$



Number of islands: 87  
Mean volume of islands: 31204.6  $\mu\text{m}^3$   
Mean height of islands: 13.813  $\mu\text{m}$

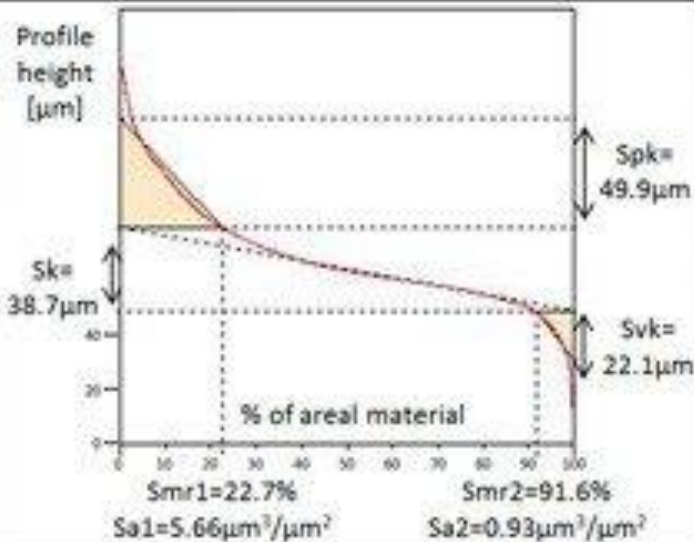


Number of islands: 82  
Mean volume of islands: 131134  $\mu\text{m}^3$   
Mean height of islands: 21.067  $\mu\text{m}$

c)  
Grade 1=122 $\text{cm}^3$

Height parameters

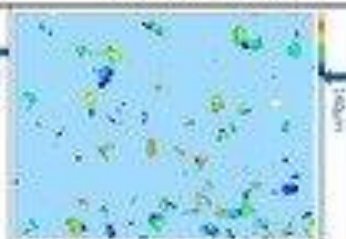
Sa [ $\mu\text{m}$ ]	21.617
Sq [ $\mu\text{m}$ ]	28.746
Sp [ $\mu\text{m}$ ]	106.375
Sz [ $\mu\text{m}$ ]	193.564
Sv [ $\mu\text{m}$ ]	87.189
Ssk	0.836



Number of islands: 54  
Mean volume of islands: 3429.32  $\mu\text{m}^3$   
Mean height of islands: 6.345  $\mu\text{m}$



Number of islands: 104  
Mean volume of islands: 26795.1  $\mu\text{m}^3$   
Mean height of islands: 13.817  $\mu\text{m}$



Number of islands: 163  
Mean volume of islands: 95190.1  $\mu\text{m}^3$   
Mean height of islands: 19.627  $\mu\text{m}$

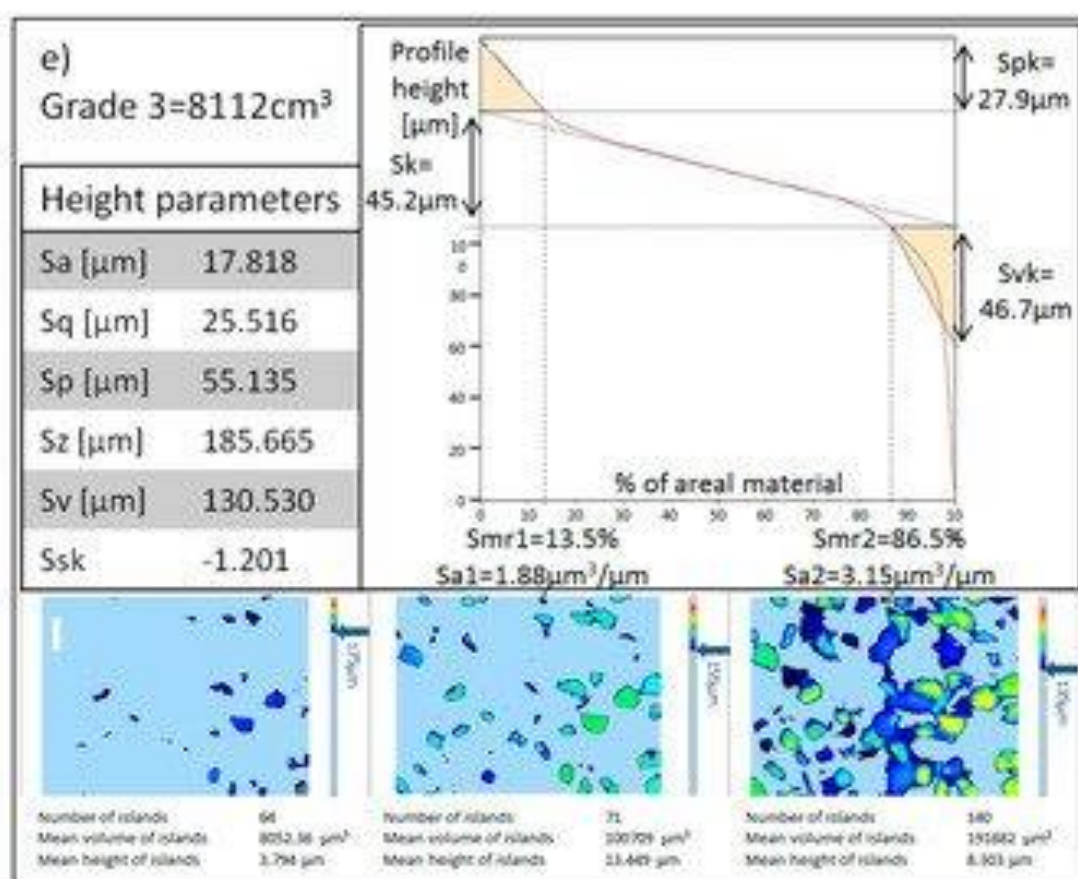
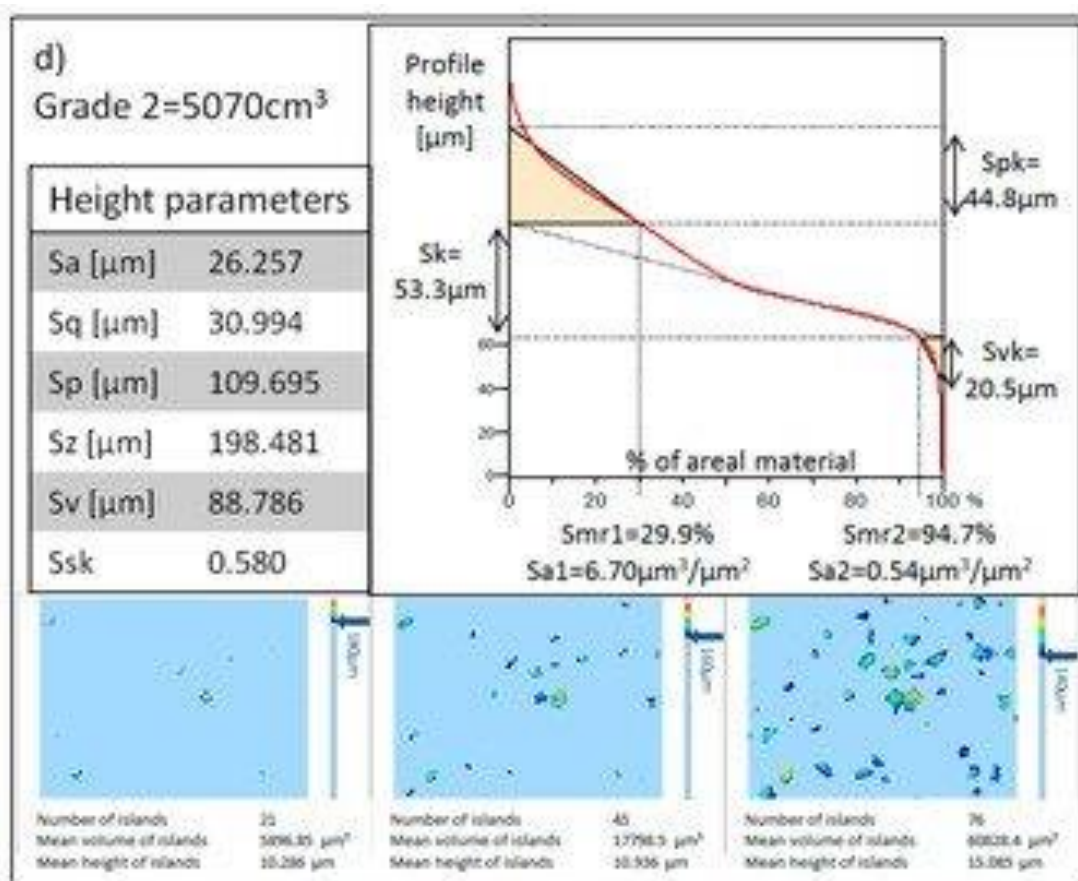


图 8。在车轮的每个等级中所进行的研究的一个例子。(a-e)中的子图分别对应 0 至 3 级。在(a-e)的每个数字中有以下内容:等级名称和相应的累积材料去除;带有高度参数值的表格;abbottfirestone 图及功能参数;最后是数字切片的三张不同高度的表面照片,分别是在表面最高点以下 10μm(左)、30μm(中)和 50μm(右)。

由图 8a,b 对比可知,对新砂轮进行的修整工艺并没有起到重要的作用。最显著的变化是由于晶粒尖端发生微断裂导致的晶粒数量增加,这在切片中可以看到。在图 8c 中,在 abbottfirestone 曲线中,可以看到剖面高度有所下降,但上部仍与之前相似,说明颗粒较为尖锐。图 8d 是数值结果的对比,但在切片的最后可以看到,大部分晶粒具有相同的突出高度,可以绘制为磨损平面的开始。最后,图 8e 的 abbottl - firestone 曲线显示,由于磨平层的存在,剖面的上半部分出现了明显的下降。这一结论可以通过切片的图片得到证实。

然而,大量的参数需要一个特定的方法来比较和确定已经检测到的磨损类型的最具代表性的参数。一个参数一个参数的比较将导致繁琐的工作,结果可能不准确。作为一种替代方法,本工作中使用了先前解释的统计方法,以更好地评价所有参数。

为了更好地调整阈值,在本例中,对 2 级车轮和 3 级车轮进行了比较。在表 2 中,根据各参数的显著性,从高到低进行排序。需要指出的是,使用了三个不同的置信水平,每个水平导致每个参数的不同显著性值,从而导致不同的安排。

表 2。各参数在不同置信水平下的显著性,用于车轮磨损的研究。

Table 2. The significance of each parameter under different levels of confidence for the study of wheel wear.					
k = 1		k = 2		k = 3	
Parameters	Significance	Parameters	Significance	Parameters	Significance
S <sub>sk</sub> (-)	6.396	S <sub>sk</sub>	4.776	S <sub>sk</sub>	3.157
S <sub>a1</sub> (μm <sup>3</sup> /mm <sup>2</sup> )	1.143	S <sub>a1</sub>	0.642	S <sub>mr1</sub>	0.384
S <sub>a2</sub> (μm <sup>3</sup> /mm <sup>2</sup> )	1.010	S <sub>mr1</sub>	0.610	S <sub>vk</sub>	0.262
S <sub>mr1</sub> (%)	0.837	S <sub>a2</sub>	0.514	S <sub>p</sub>	0.230
S <sub>pk</sub> (μm)	0.630	S <sub>vk</sub>	0.444	S <sub>a1</sub>	0.140
S <sub>vk</sub> (μm)	0.625	S <sub>p</sub>	0.400	S <sub>a2</sub>	0.018
S <sub>p</sub> (μm)	0.570	S <sub>pk</sub>	0.127	S <sub>mr2</sub>	-0.021
S <sub>a</sub> (μm)	0.111	S <sub>mr2</sub>	0.033	S <sub>a</sub>	-0.179
S <sub>mr2</sub> (%)	0.087	S <sub>q</sub>	-0.130	S <sub>z</sub>	-0.329
S <sub>z</sub> (μm)	0.058	S <sub>z</sub>	-0.136	S <sub>pk</sub>	-0.375
S <sub>q</sub> (μm)	0.013	S <sub>v</sub>	-0.323	S <sub>v</sub>	-0.559
S <sub>v</sub> (μm)	-0.088	S <sub>ku</sub>	-0.329	S <sub>k</sub>	-0.753
S <sub>k</sub> (μm)	-0.232	S <sub>k</sub>	-0.492	S <sub>ku</sub>	-0.761

在每个置信水平下,偏度是检测电镀 cBN 砂轮磨损面最显著的参数。判别阈值设为-0.058,表示谷区占优势。斜度沿车轮寿命的演变如图 9 所示。应该提到的是,0+级的符号体积为 10 mm<sup>3</sup>,用于将 0 级的点与 0 级的点分开。

**Figure 9.** The  $S_{sk}$  value corresponding with the five wear states of the wheel.

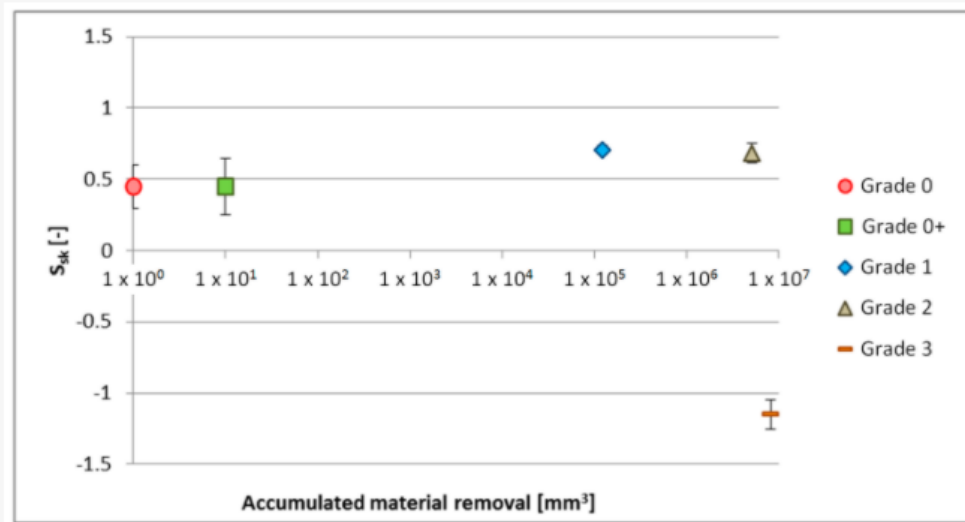


图 9。  $S_{sk}$  值对应于车轮的五种磨损状态。

从图 9 可以得出结论，磨损平面开始占主导地位的车轮寿命结束。尽管如此，下面将讨论整个图的不同方面。1 级和 2 级偏度的小幅上升意味着峰值比低谷稍微占优势。这可以追溯到晶粒尖端的渐进微断裂和动态[4]中静态晶粒的渐进转变的结果。图 10 中收集了一些未接触的颗粒在破碎颗粒旁边的例子。而 2 级和 3 级之间偏度值的奇值变化则是由于 3 级磨平片的显著优势造成的。需要注意的是，3 级的累积材料去除量是 2 级的 1.6 倍，磨损过程不必遵循线性表达式。如果研究是在 2 级和 3 级之间的中间磨损状态下进行的，这种变化将会更渐进。

**Figure 10.** The SEM pictures of fractured grains next to untouched grains.

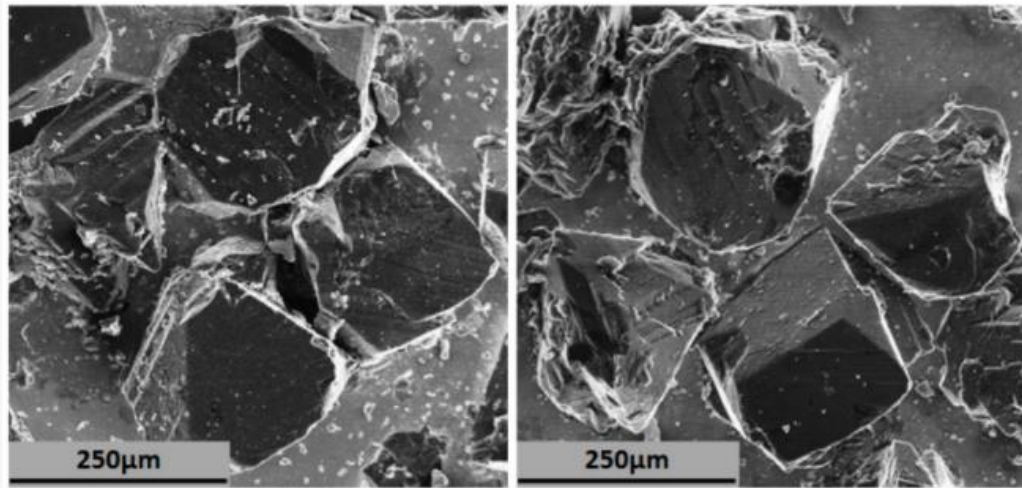


图 10。断裂晶粒与未接触晶粒相邻的 SEM 照片。

### 3. 2. 轮调节分析

#### 3.2.1 之上。地形分析

使用相同的参数测量车轮调理后的车轮地形变化，必须仔细分析。为了恢复由于晶粒变平而失去的切削能力，车轮表面进行了修整。然而，由于在电镀车轮中只有一层磨料层，晶粒表面只能进行细微的修改。因此，我们将平均和标准差法再次应用于调整方法前后的车轮，以看到这种微小变化最具代表性的参数，从而了解调整过程的效果。

与前面的分析类似，表 3 按照显著性从高到低的顺序排列了各参数。

表 3。各参数在不同置信水平下的显著性，用于车轮调节的研究。

**Table 3.** The significance of each parameter under different levels of confidence for the study of wheel conditioning.

k = 1		k = 2		k = 3	
Parameters	Significance	Parameters	Significance	Parameters	Significance
$S_V$	0.074	$S_Z$	-0.064	$S_{mr2}$	-0.102
$S_Z$	0.060	$S_{mr2}$	-0.066	$S_Z$	-0.188
$S_p$	-0.020	$S_{ku}$	-0.112	$S_V$	-0.238
$S_{mr2}$	-0.031	$S_p$	-0.166	$S_p$	-0.311
$S_{pk}$	-0.079	$S_{pk}$	-0.277	$S_{pk}$	-0.474
$S_q$	-0.154	$S_q$	-0.334	$S_q$	-0.515
$S_a$	-0.158	$S_a$	-0.359	$S_a$	-0.560
$S_{vk}$	-0.194	$S_{mr1}$	-0.482	$S_{mr1}$	-0.754
$S_{mr1}$	-0.210	$S_k$	-0.488	$S_k$	-0.757
$S_k$	-0.219	$S_{vk}$	-0.520	$S_{vk}$	-0.845
$S_{a2}$	-0.304	$S_{a2}$	-0.784	$S_{a2}$	-1.263
$S_{a1}$	-0.626	$S_{a1}$	-1.412	$S_{a1}$	-2.198
$S_{sk}$	-1.351	$S_{sk}$	-4.000	$S_{sk}$	-6.650

与表 2 相比，条件分析得到的显著性值更低，只有在置信度为 1 时为正。这是因为车轮地形的变化太微小，无法被提出的方法检测到。因此，在大多数情况下，不同置信水平计算的区间重叠，导致负显著性值。

由于平均法和标准偏差法所得结果不理想，因此采用相关系数作为替代方法。rGB 系数的计算结果如表 4 所示，参数由高到低排列。

**表 4。** 各参数的相关系数用于车轮调节的研究。

**Table 4.** The correlation coefficient of each parameter for the study of wheel conditioning.

Parameters	rGB
$S_a$	0.812
$S_k$	0.800
$S_Z$	0.744
$S_{mr1}$	0.739
$S_{vk}$	0.685
$S_{mr2}$	0.632
$S_q$	0.625
$S_V$	0.448
$S_p$	0.164
$S_{a1}$	0.126
$S_{sk}$	-0.095
$S_{pk}$	-0.129
$S_{a2}$	-0.211

Sa 是系数最高的参数，为 0.812，最具有代表性。然而，它提供了关于地表的不完全信息。例如，给定两个相等但相反的曲面，也就是说，第一个曲面的谷对应于第二个曲面的峰，反之亦然，它们的 Sa 值是相同的。因此，提供概要文件的单一信息的参数将是有帮助的。考虑到 rGB 最高的第二个参数是 Sk，且它们系数之间的差异很小(Sa 为 0.812,Sk 为 0.800)，可以选择这一参数作为一个互补的、更有意义的粗糙度参数。此外，Sk 提供了沿剖面高度的物质分布信息，它对峰顶、岩心或山谷的变化都很敏感。综上所述，我们选择 Sk 和 Sa 作为最具代表性和最有意义的调理过程中谷物所遭受的变化参数

调理前的 Sk 平均值低于调理后，调理前为 55.2  $\mu\text{m}$ ，调理后为 58  $\mu\text{m}$ 。这意味着等量线的斜率在调理后增大。这可以追溯到锐化的结果，因为有一个较低的百分比的材料位于剖面的最高部

分。这一现象的一个例子可以在图 11 中看到，其中比较了尖锐表面(左)和钝表面(右)的 **abbottfirestone** 曲线。在锐面中，概率密度函数是对称的，等值线的斜率会高于钝面，在钝面中概率密度函数向上移位。因此，尖锐的表面会比钝的表面有更高的  $Sk$ 。两个图之间的比例差异是由两个剖面的高度差异造成的。锋利的对应于 0 级车轮和钝的 3 级车轮，具有较低的谷物突出高度。

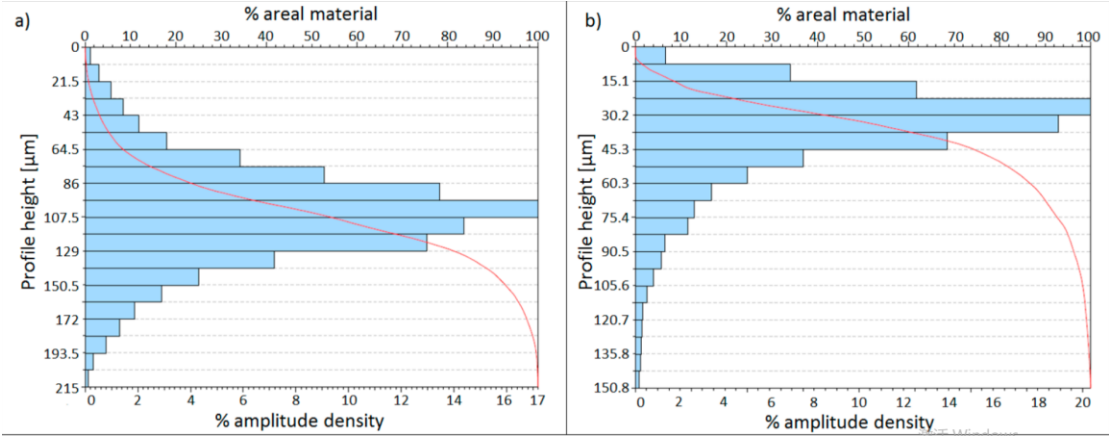


图 11。(a)尖锐表面的 **abbottfirestone** 曲线;(b)钝表面的 **abbottfirestone** 曲线。

此外， $Sa$  的平均值(调整前为  $22\text{ }\mu\text{m}$ ，调整后为  $23\text{ }\mu\text{m}$ )的增加，证实了调整后表面粗糙的存在，也证实了车轮所遭受的变化是多么细微。

### 3.2.2. 电力消耗

通过四种不同的磨矿参数组合，从粗磨到精磨，研究了调质对功率消耗的影响，详见表 1。

图 12 中的图表显示了用黑色圆圈标记的两个条件作用过程的效果。在每一次试验之后，由于先前解释的磨粒，功率消耗突然下降。然而，信号会迅速地增加，这比假设条件作用前的相同进展时信号所经历的增加要高。这可以在图 13 中看到，通过最小二乘法扩展第一个条件的曲线。扩展的曲线用虚线表示。

**Figure 12.** The power consumption of the four tests during the first  $600\text{ cm}^3$  of removed material. The black circles mark the two conditioning processes.

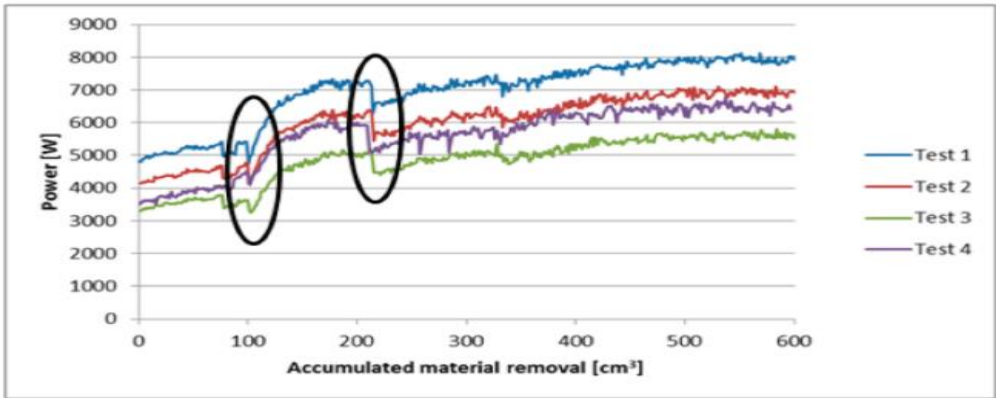


图 12。在移除材料的前 600 立方厘米期间，四次测试的功耗。黑色的圆圈标志着两个条件作用

过程。

**Figure 13.** The power consumption of the four tests during the first 600 cm<sup>3</sup> of removed material. The lines in dots are the extensions of the curve before the first conditioning.

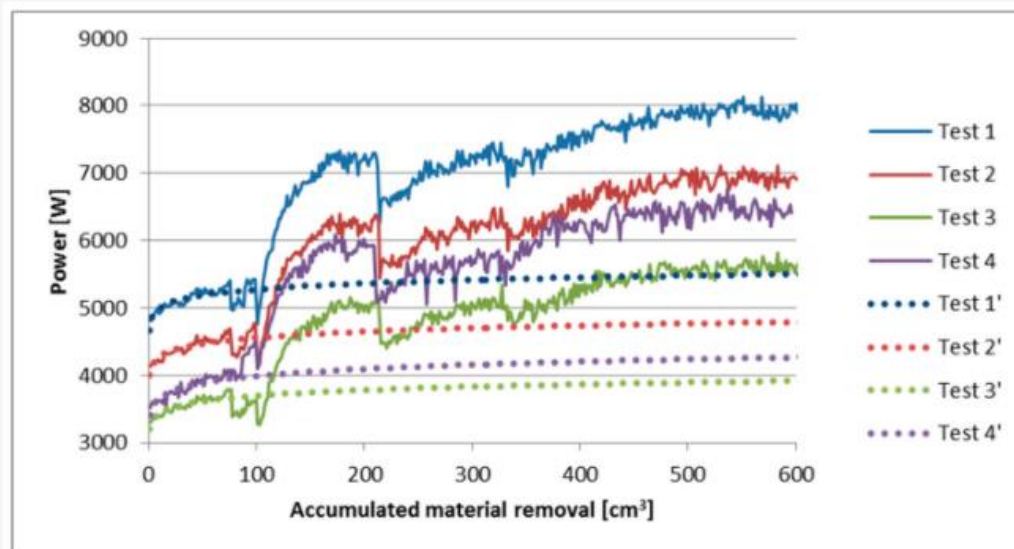


图 13。在移除材料的前 600 立方厘米期间，四次测试的功耗。点上的线是第一个条件作用前曲线的延伸。

考虑到功率消耗曲线级数的变化，可以得出，尽管磨粒，但车轮整体磨损状态加快。这是由于晶粒尖端的减弱，很快导致了晶粒高度的降低和主动切削晶粒的增加，并最终再次出现磨平。

此外，通过图 14 可以确定，在第一次调节后，车轮达到了稳定的磨损状态，后续的调节过程没有改变曲线的前进。在图 14 中，第一种和第二种条件之间的功率曲线被划了线。在第二次锐化引起的下降之后，这些线最终与它们相应的功率信号相匹配。因此，在恢复以前的磨损状态之前，调节只能暂时改变车轮的地形。

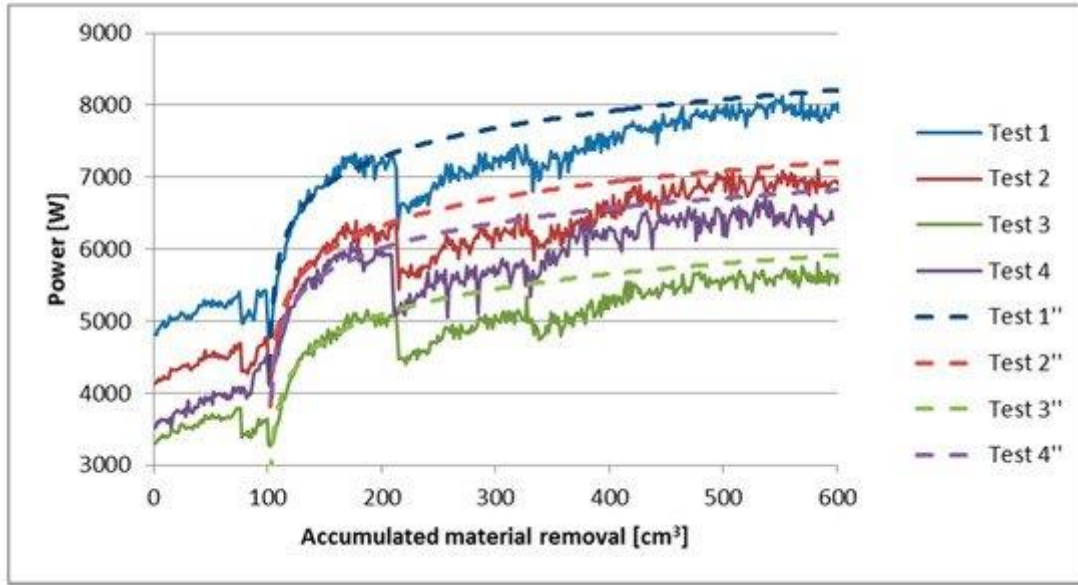


图 14。在移除材料的前 600 立方厘米期间，四次测试的功耗。割裂的线条是第一个条件作用前曲线的延伸。

对于不同的参数组合提出的分析，在不同的操作条件下可以看到相似的敏感性。要对这一现象有充分的了解，就有必要对实际的切屑厚度有个感觉。由于考虑了切削速度、进给速度和切削深度的影响， $H_{eq}$  是一种广泛应用的磨削分级参数。然而，式(12)的结果并不是实际切屑厚度的大小，虽然它是以  $\mu m$  为单位给出的。实际切屑厚度的计算( $h_{cu}$ )是许多作者研究的课题。然而，这不在本工作的范围内，因此使用 Malkin[28]提出的矩形切屑形状的平均切屑厚度的表达式来进行解释。如式(13):

$$\overline{h_{cu}} = \sqrt{\frac{v_w}{v_s} \cdot \frac{6}{C \cdot r} \sqrt{\frac{a_e}{d_e}}} \quad (13)$$

$C$  为活性晶粒密度， $r$  为切屑槽宽度与切屑槽厚度之比， $d_e$  为等效砂轮直径，对于直磨作业，等于砂轮直径。大众， $v_s$ ，和  $a_e$  在此工作之前解释。 $C$  和  $r$  都是很难计算的参数，因为它们取决于车轮的规格、车轮的磨损和磨削参数。在这种情况下， $r$  值等于 10[29]和高活性颗粒密度将用于表示车轮的磨损状态。考虑到车轮的颗粒密度(见表 1)和颗粒高度的均匀性(图 8e)，我们采用的有效颗粒密度为 12 粒/mm<sup>2</sup>。从 Test1 到 Test4 测试的平均切屑厚度结果如下:

- Test1 = 0.58  $\mu m$ ;
  - Test2 = 0.53  $\mu m$ ;
  - Test3 = 0.53  $\mu m$ ;
  - Test4 = 0.58  $\mu m$
- 从结果可以看出，四种试验的平均切屑厚度不存在显著差异。因此，由于晶粒和工件材料之间的相互作用发生在相同的深度，所有的测试对调节过程都很敏感。

- 应该提到的是，这项工作是在工业框架下进行的。 [这就是为什么计划使用不同 heq 的操作，而不是使用不同的 hcu。](#)
- 4. 结论
- 分析了 C1023 航空部件中程磨削过程中，电镀 cBN 砂轮在不同磨损状态下的表面形貌。在砂轮的高级磨损状态下，发现磨平是主要的磨损类型。这也是在 NGV 的某些特定部分检测到的问题的原因。
- 对不同磨损状态下砂轮形貌数字化得到的粗糙度参数采用平均和标准差法。 [该方法获得了最具代表性的磨痕识别参数和磨痕分级阈值。](#) Ssk 的结果是最显著的参数，根据经验经验，阈值设置为-0.058。
- 根据车轮地形和功率消耗，对用于解决 NGV 某些特定区域磨损问题的调节过程进行了评估。

为此，对调整前后的车轮进行了数字化处理，并对结果采用了平均和标准差法。 [但由于修正量太小，本方法无法检测到，故采用相关系数法。](#) Sa 和 Sk 是条件作用引起变化的最显著参数。一方面，Ra 平均值的增加证实了调理后的表面更加粗糙。另一方面，Sk 平均值的增加是由于谷物的锐化和相应的等值线斜率的增加造成的。

通过功率消耗分析，确定了谷物的锐化，因为每次调整后，功率消耗降低。然而，也观察到车轮的磨损状态是加速的条件。在调节之前的曲线所描绘的进程被扩展到与实际的功率消耗进行比较。结果表明，实际功耗明显超过了扩展曲线。

然而，在第一次条件反射之后，尽管再次条件反射，能量信号还是回到了同样的进程。这是因为被动颗粒变成主动颗粒的短暂状态被条件所取代。因此，从那时起，在车轮恢复到类似的磨损状态之前，调节只是暂时地修改了晶粒的尖端。

最后，在四种不同的 heq 值下，车轮的功率消耗行为是相同的。这意味着晶粒与工件之间的接触发生在非常浅的深度，而调节对粗加工和精加工的影响同样明显，这可以由式(13)的结果证实。

作者的贡献

h. b. 进行了实验。 [对车轮进行了地形分析。](#) H.G. 统计分析了粗糙度参数。 no . 写的手稿。 医学博士指导了这项工作并修改了文章。