

金属的磨损

〔苏〕M. M. 赫罗紹夫、M. A. 巴比契夫 著

机械工业出版社

原作者序

近年来，提高机器工作的可靠性和耐久性的问题有着日益重大的意义。解决这个问题方面的每一成就，都会促使新的机器更趋于完善，而使已有的机器具有更长的使用期限。因此，对于研究机器和材料的摩擦和磨损现象的问题日益重视是很自然的。

关于材料磨损的科学，现在还处于初期发展阶段，因为这个问题本身的性质只是在不久以前才开始明朗化。因此，系统的试验研究对于发展磨损方面的学科有着头等重要的意义。但是在实践中碰到的材料磨损现象是多种多样的；它们既与摩擦条件有关，又与所用材料的性质有关。因此在组织磨损方面的研究工作时，必须预先规定应当研究的课题范围。例如可以探讨提高某一种典型零件（如铁道车辆的车轮、内燃发动机的汽缸和活塞环）耐磨性的具体任务或研究某一种典型的磨损方式。

本书作者选择了后一种途径，基本上将自己的工作致力于磨粒磨损的研究。对大多数机器来说，特别是农业机械、筑路机械、矿山机械和运输机械，它们的特征是机器零件表面与硬的磨粒接触，产生磨损。

“磨粒磨损”这一术语还不能完全确定材料磨损时发生的过程及其形状；一般来说，除了硬的磨粒之外，在各种材料的不同使用条件下，还有许多因素会影响磨损过程。

在磨粒对金属作用的同时，摩擦热、浸蚀性介质、中间落有磨粒的两摩擦金属的性质、磨粒本身的性质等都能对金属的磨损有很大的影响。凡此种种，使机器零件在使用时，实际的工作条件发生很多变化；有时，这些条件对金属的磨损有着很大的影响。

因此，在从事磨粒磨损研究工作时，首先必须从这一联串复

杂而又彼此联系的问题中选择主要环节，从而开始研究提出的课题。作者选择没有上述附加影响时的金属磨粒磨损作为基本环节，以便分别研究这些附加影响的作用。这种方法是正确的。通过试验总结已发现的各种金属的耐磨性与外摩擦条件和金属本身的性质之间，存在一系列新的基本关系。在这个基础上提出了磨粒磨损的理论。

没有上述附加因素影响的磨粒磨损试验方法是一种新颖的材料试验方法。利用这种方法所获得的结果，与标志材料破坏强度的其它机械性能指标是符合的。

人们很自然地会提出这样的问题：从直接利用耐磨性这个金属的特征的可能性的观点来看，在排除了零件使用时出现的许多因素的影响的条件下测得的金属同固定磨粒摩擦时的耐磨性的实际意义如何？

作者所注意的是要解决比将所得的结果用于机器零件任何个别使用情况下的更为根本和更为复杂的问题。对于具有磨粒磨损形式的所有可能的场合来说，没有附加因素影响的磨粒磨损试验结果有着基本的意义；同时，正如讨论试验结果的意义的第二章末和其它几章中所指出的那样，在许多情况下这些结果实际上是可以被直接利用的。

本书中所述及的试验是在这几年内进行的。磨粒磨损试验方法制定于 1940 年；作者于 1941 年发表了第一次研究结果。但是在磨粒磨损方面的系统研究开始得更晚一些，这一系列工作的第一篇文章直到 1953 年才发表。

作者进行了一系列在理论上彼此有逻辑联系的试验研究工作。对每一项研究都需要拟定试验方法；几乎在每次研究中都出现过许多新的，有时是出乎意料的情况。在安排研究方法之后，就可以更全面地来研究拟定的问题了。但是作者在这里有意识地将本书限于阐明一些基本的问题。读者在本书中可以找到许多新

的试验方法（如磨粒磨损、擦伤、在有液体介质条件下的磨损、内应力的影响等）的详细说明，以及利用这些新方法进行一些试验的说明。作者认为，所有有关问题的研究易于继续进行和得到更完善的阐明，因为这些研究包含了已经拟定好和考验过的新方法，而且对许多可能进一步的研究已开始有所准备。

作者在本书内考虑了苏联和其他国家在磨损（特别是磨粒磨损）方面早先进行过的研究。

目 录

原作者序

第一章 选择金属磨粒磨损试验室试验方案和条件的

依据	1
----	---

1. 磨粒磨损	1
2. 对砂纸摩擦时的试验室磨损试验方法的分析	6
3. 基于对砂轮摩擦的金属磨粒磨损试验方法	25
4. 基于同锉刀相摩擦时的金属磨粒磨损试验方法	28
5. 对选择金属磨粒磨损试验室试验方案的意见	37
6. 磨粒磨损试验室试验方法的批判性探讨的结果	41

第二章 在 X4-B 试验机上进行磨粒磨损试验的方法

1. 磨粒磨损试验用 X4-B 试验机	42
2. 试验步骤	47
3. 确定磨损量的方法	51
4. 摩擦表面的速度和单位载荷对磨损量的影响	53
5. 在氧化铝砂布上重复摩擦对磨损强度的影响	60
6. 有磨粒的表面的性能对磨损的影响	63
7. 试验结果的表示和折算到同样的摩擦条件的方法	64
8. 在 X4-B 试验机上测定摩擦力的方法	72
9. 所得结果的实际意义及其利用条件	73

第三章 工业纯金属和钢的抗磨粒磨损强度的研究

1. 工业纯金属的抗磨粒磨损强度	77
2. 钢的抗磨粒磨损强度	81

第四章 冷作硬化的金属和合金的抗磨粒磨损强度的

研究	90
----	----

1. 冷作硬化材料的试验	90
2. 所得结果的讨论	100

3. 高錳鋼抗磨粒磨損強度的研究	104
第五章 磨粒硬度對金屬抗磨強度影響的研究	108
1. 研究數據	108
2. 結果討論	112
3. 同其它關於磨粒硬度對金屬磨損影響的研究數據的 比較	114
4. 和不同磨研能力的顆粒作磨粒磨損時的相對耐磨性	119
5. 可用作金屬磨粒磨損時的磨粒的硬度數據	123
第六章 磨粒大小對金屬磨損的影響的研究	124
1. 研究數據	124
2. 金屬的磨損與磨粒尺寸的關係對結果的可比較性的影響	131
3. 所獲得的數據同其它研究磨粒尺寸對金屬磨損的影響的 數據的比較	133
第七章 組織不均勻的金屬材料和某些固溶體及共晶體 合金的抗磨粒磨損強度的研究	137
1. 研究任務	137
2. 關於組織不均勻材料的耐磨原理的初步見解	139
3. 單相多孔性材料的抗磨粒磨損強度	142
4. 有不同金屬比例的黃銅-鉛試樣的抗磨粒磨損強度	145
5. 過共晶鋁-硅二元合金的抗磨粒磨損強度	148
6. 退火炭鋼的抗磨粒磨損強度	151
7. 組織不均勻的材料試驗結果討論	153
8. 錫-鉛二元合金的抗磨粒磨損強度	156
9. 銅-鎳二元合金的抗磨粒磨損強度	159
10. 銅基二元合金的抗磨粒磨損強度	161
第八章 有液體介質時的金屬磨損試驗方法	164
1. 試驗方案的根據	164
2. X2-M 試驗機說明	169
3. 條件對試驗結果影響的研究	172
4. 在 X2-M 試驗機上採用的磨損試驗條件	183
5. 應用擬訂的試驗方法評定某些材料的耐磨性	190

第九章 在摩擦表面上有水时钢的抗磨强度的研究	194
1. 在有某几种水溶液的情况下鋼同很光滑的硬圓盘相摩擦时的磨損試驗	194
2. 鋼在有水时的磨粒磨損試驗	198
3. 水介质的性能对犁鏵鋼磨損的影响	199
4. 所得結果的討論	205
第十章 高硬度金属材料的磨損研究	208
1. 硅和鍍的抗磨粒磨損强度的研究	208
2. 鍍鉻层的耐磨性和硬度的研究	211
3. 鍍鉄层的耐磨性和硬度的研究	215
4. 硬质合金的抗磨粒磨損强度的研究	219
5. 用电解渗硼处理法强化的鋼的磨粒磨損研究	227
6. 用气体介质热扩散渗鉻法强化的鋼的磨粒磨損研究	228
第十一章 轴承用铸铁和轴承合金的抗磨粒磨損强度的研究	237
1. 鑄鉄的抗磨粒磨損强度的研究	237
2. 巴比特合金和其它軸承合金的抗磨粒磨損强度的研究	242
第十二章 第一类內应力(残余应力)对金属抗磨粒磨損强度和金属在氧化介质中摩擦时的耐磨粒磨損性的影响的研究	249
1. 研究工作的安排	249
2. 同磨粒表面相摩擦时的磨損試驗	250
3. 在活性液体介质中的磨損試驗	263
第十三章 矿物的抗磨粒磨損强度	274
第十四章 金属材料在 X4-B 试验机上磨損試驗所获得的结果与其它相类似的同固定磨粒相摩擦时磨損的研究结果的比较	281
1. 試驗結果比較的意义	281
2. 索罗科-諾維茨卡娅所进行的炭鋼磨粒磨損研究	283
3. 伊昂諾夫所进行的炭鋼磨粒磨損研究	285

4. 捷年巴烏姆和古捷尔曼所进行的鋼的磨粒磨損研究288
5. 米克尔斯和伊奧維齊烏在磨粒磨損試驗方法方面所进行的
研究291
6. 在材料与工艺研究所(捷克斯洛伐克)进行的鋼和各种合
金的磨粒磨損研究298
7. 湯恩所进行的金屬和鋼的磨粒磨損研究302
8. 罗森所进行的中炭鋼的磨粒磨損試驗305
9. 按照赫伊沃尔德的方法研究金屬材料的磨粒磨損306

第十五章 布氏磨粒磨損試驗法及其类似的試驗方案311

1. 布氏磨損試驗法和布氏所得的結果311
2. 罗森堡依照布利內耳法进行的鋼的抗磨粒磨損强度的研究317
3. 应用布氏方法来評定圓盘型圓盘的耐磨性321
4. 布氏磨粒磨損試驗法的其它方案322

第十六章 用带动磨粒的圓盘磨出月牙洼的方法来研究磨

粒磨損324

1. 研究任务324
2. B型試驗机說明325
3. 測定磨損量的方法327
4. 磨出的月牙洼体积与載荷大小和試驗時間的关系330
5. 磨出的月牙洼体积与供給圓盘的磨粒数量之間的关系332
6. 磨粒尺寸对磨出的月牙洼体积的影响333
7. 磨粒硬度对磨出的月牙洼体积的影响334
8. 在B型試驗机上重复試驗对試驗結果的影响336
9. 通用的磨損試驗条件339
10. 圓盘材料的性能对不同硬度的鋼試样的磨損的影响340
11. 工业純金屬和退火鋼在B型試驗机上的磨損試驗344
12. 热处理的Y8鋼在B型試驗机上的磨損試驗347
13. 获得的結果与其它研究結果的比較349
14. 利用布氏法的根据354

第十七章 金屬擦伤的研究356

1. 研究任务356

2. 利用比氏試驗机的擦划試驗法	357
3. 用立方体的尖角压入和擦划时的几何关系和硬度值的表达	359
4. 擦划硬度和压入硬度試驗結果的比較	362
5. 擦划硬度与磨粒磨損試驗結果的比較	370
6. 擦划时切向力的試驗測定方法	372
7. 擦划时的切向力	375
第十八章 磨粒磨損的理论问题	384
1. 相对耐磨性与摩擦功	384
2. 固定磨粒对塑性金屬的磨損机理	388
3. 将磨粒磨損时的相对耐磨性作为金屬强度性能的特征	398
4. 相对耐磨性与特性温度和晶格結構的关系	405
5. 相对耐磨性与彈性模数	411
6. 磨粒磨損的理论基础	415
参考文献	419

第一章 選擇金屬磨粒磨損試驗室 試驗方案和条件的依据

1 磨粒磨損

“磨粒磨損”这一术语用以表示机械零件由于非金属固体（一般为硬的矿物颗粒）在其表面上的相对运动作用而引起的磨損。在使用中，机械零件会遇到各种各样的条件，决定这些固体对金属的作用。

金属零件可能同成分均匀的固体（例如矿石）、结成整块的硬颗粒物（砂粒）的固体群、或成分不均匀的含有硬的矿物杂质（煤中的坚石）的固体发生摩擦。在这些情况下，使金属磨損的硬粒彼此不作相对移动，它们将在金属上留下压痕或切出擦痕。当金属与硬的岩石、矿石、含有矿岩的煤相摩擦时，或者切削很硬的冻土时经常会碰到这样的磨粒磨損，尤其是挖土机和采掘机挖斗的铲齿、刮板输送机的刮板和其中有运动着的硬矿石块沿着金属滑动的其它运输机器、加工岩石的工具等。在所有这些情况下，比金属硬而能擦伤金属的矿物，或者固定在不太硬而有足够强度的基体上的一些硬矿粒对金属发生磨損作用。

在其它应用上也有相类似的磨損条件，例如轴的轴颈和用较软的金属制成的嵌有硬的磨粒（那怕是暂时的）的轴承相配合。当硬而很粗糙的轴颈同轴承摩擦时，在巴比特合金上发生同样的磨損条件。

根据金属破坏的特征，用砂布、油石、砂轮磨削以及用锉刀加工都是属于这种形式的磨損。

硬的矿物颗粒并不总是凝结成整块的物体，可能是不结实的粘结物质（例如砂子、土壤、散松土）。当金属在这样的介质中摩擦时，个别的硬颗粒会作相对移动。将这种硬颗粒压入金属中的力取决于物质群的强度和颗粒的大小。在这样的条件下，金属上可能产生擦伤或者发生抛光作用。在后者情况下，摩擦时引起的磨损仅发生于薄的表面层范围内，这薄层是由于金属与空气中的氧或和存在于摩擦表面上的其它介质相互作用而形成的。

像流体那样运动着的硬粒或被气流、液流带动的硬粒都会引起磨损。磨损的形式取决于下列的颗粒的运动情况：а）磨粒流（例如：抛砂成型机和喷砂装置上喷嘴的磨损）；б）气流中的磨粒（例如气动运输装置和气动送料装置上的管道和各种零件、排风机叶片、节热器的管子和锅炉上的其它零件的磨损）；в）液流中的磨粒（例如：水力冲泥机的泵叶和管道、水力送料装置的管道和零件、水轮机上的导向叶片和转子叶片、潘尔登水轮机上的转子叶片和喷嘴的磨损）。

硬的颗粒能够处于两个在载荷作用下、有相对运动的金属表面之间。在这种情况下，磨粒沿每个零件表面的移动取决于这些零件的硬度的比值。当硬度相差很大时，磨粒被深深地压入较软的表面（嵌入），使它变成固定不动的颗粒，并随着较软的表面一起运动，磨损较硬的零件。当金属表面之间有磨粒时，载荷将通过磨粒传递。如磨粒的强度不够，磨粒将被压碎。

由于两个零件中间落入磨粒而引起机器零件的磨损，是很多机器使用寿命不长的主要原因。这就要求制订出防止磨粒掉入摩擦表面的方法，例如：在汽车和拖拉机上，广泛应用空气滤清器、机油滤清器、离心式机油滤清器、油封和其它密封装置等等。可以举出一个还没有获得解决的防止磨粒磨损的实例：在直接喷入煤粉的内燃机上，还未能找出保证气缸活塞组零件具有相当长的使用寿命的方法。因而这种发动机至今未能获得实际应用。

加工矿石、岩石和矿物的粉碎机和碾磨机上的零件会发生磨粒磨损。在各种不同的机器上，由于附加影响的因素，金属与被粉碎的材料的摩擦条件和相互作用是不同的。例如：在咬阻式、锥式和轧辊式粉碎机上，工作零件承受高度集中的接触载荷；在搓砂机和其它冲击粉碎机上，接触载荷是冲击式的；而振动式碎矿机的特征是金属转磨件对被加工材料作很小的频繁的相对移动。

在上述各种各样的磨粒磨损过程中，磨粒、被磨损的金属和周围介质的性质等一些因素都可以影响金属的磨损量。

磨粒和金属的硬度比以及磨粒的强度、大小和形状有很大的意义。

矿物同金属相摩擦时，伴随着不同程度的发热，因此金属的抗磨强度并不决定于它的原始性能，而是决定于由于摩擦发热或预热后获得的性能。在钢制零件的摩擦表面上发现的白色相区域，是由于瞬间局部加热到超过临界温度而产生的局部淬火的标志，这说明摩擦热是相当高的。例如在犁铧的工作表面上可以观察到局部二次淬火的区域，这说明犁铧同土壤中的石块摩擦时发出的热引起了局部高温。

磨粒磨损时，金属表面层发生冷作硬化现象。某些钢在发生强烈的塑性变形时，可观察到很大的强化作用和耐磨性的提高。

显然，由于影响磨损的因素的多样性和磨损过程的复杂性，使得在解决：a) 选择降低机器磨损的方法和б) 研究磨损的过程这两个主要问题时发生了困难。

在机械制造的实践中已经制定了解决第一个问题的方法；尤其是拟定了检验在利用新材料、新的加工工艺、新的润滑剂以及改变摩擦条件等后获得的耐磨性的试验室试验方法。这些试验应当在试验室试验装置上，模拟相应的零件在实际使用中摩擦表面上的那些主要工作条件。在苏联文献[1~3]中阐明了在安排这样的试验室试验时的原则问题。已经有了能够用以校验试验室试

驗結果的正確性的方法，即進行零件的使用試驗，而在試驗時應遵照規定的設施。

第二個問題為研究磨損的現象和規律性，例如在磨粒磨損的情況下就有許多種型式的磨損。要解決這一問題就更複雜了。作者着手本書所述研究的目的，並不是為了說明某一種型式的金屬磨粒磨損的現象和規律性，而是為了尋找即使不是全部，至少也是某幾種型式的金屬磨粒磨損共同的基本規律。為了解決這個問題，提出了下列一些觀點。

首先認為，雖然影響金屬磨粒磨損的因素很多，但是對於各種不同型式的磨損來說，表面破壞的機械特征是共同的。因此研究磨粒磨損時，撇開擁有其它因素（如硬粒的相對運動速度、金屬發熱、外界活性介質的作用等）的附加影響（單獨的或共同的），而研究在這些機械過程中發生的現象和規律性是合理的。

其次，對許多型式的磨粒磨損說來，顯微切削（即是由於磨粒的擦劃作用，有顯微切屑從金屬上切削下來）是決定磨損過程的機械作用中的重要部分。同時，認為並不是所有在載荷作用下與金屬表面相接觸的磨粒都能參與切削，其中大多數的磨粒留下塑性壓出的道痕；只是它們尖棱偶然地處於有利於切削的位置的那些磨粒才參與切削，正是這些顆粒與金屬的相互作用產生了磨損。鋼同砂紙摩擦時獲得的磨損產物中發現有一般形狀的、而且尺寸極為微小的螺旋形的顯微切屑。這是在這種情況下存在有切削過程的無可爭辯的例證。

如果注意到磨粒的結晶組織和磨粒具有尖棱，被磨粒切削的可能性是完全能理解的。切削可以在負的切削角的場合下進行；由於這樣，在硬而脆的金屬上發生塑性變形和切下切屑是可能的。

對於其它型式的磨粒磨損，我們還沒有闡明金屬破壞机理的直觀數據。由於這樣，提出了兩種假說。第一種假說（克拉格利斯基提出）認為：在任何的磨粒磨損的場合下，金屬的破壞机理

是脆性的，是由于磨粒在同一个微观体积范围内发生反复的塑性变形（“重复变形”）和冷作硬化而引起的。另一种假说（利沃夫提出）认为：由于塑性材料多次被磨粒擦划，形成擦痕边上的凸起，转入脆性（或预破坏）状态而发生磨损。后一种假说是针对切削土壤的筑路机器的工作零件的磨损情况而提出的。这两种假说在第十八章中将更详细地加以说明。

显然，在磨粒磨损时，金属破坏机理可能是不同的。例如，在磨粒流中磨损时，破坏特性取决于磨粒的运动方向与金属表面构成的角度。当磨粒垂直冲击（冲击角 90° ）时，金属表面层的破坏是由于反复变形的结果；当磨粒冲击角小于 90° 时，由于磨粒的擦划作用产生磨损，而且在这种情况下其磨损比垂直冲击时要严重得多。

我们认为，磨粒切削金属不仅可能发生于同固定磨粒相摩擦的情况下（这时切削作用很清楚），而且可能发生于某些其他型式的磨粒磨损的情况下，同时正是这个切削过程决定了金属的剥离——即磨损。将这个论点作为原始假设，我们选择了同固定磨粒相摩擦的金属磨损试验室试验方法作为进行研究的基本方法。

研究金属同固定磨粒的磨损有下列优点：（1）能够精确地知道金属对磨粒的摩擦行程；（2）在同金属相互作用的过程中，磨粒既不转动、也不滚动，只可能变钝、折断或者开裂；（3）可以研究影响磨损的某些因素，例如通过磨粒传递的载荷（这是困难的，例如当在磨粒群体中磨损时），或者某一种被磨损材料的性能的影响（这同样是困难的，例如当磨粒在两个金属之间造成磨损时，这时候这两个金属的硬度比值是影响磨损的因素）。

在开始工作之前，我们研究了文献中其他研究人员的试验。看来，关于这一方面所有的问题阐述得很不够。

磨粒磨损型式的分类采用了洛连茨〔4〕的建议（看来，是他首先提出的）：

- 1) 由固定磨粒（整塊磨料和有磨粒的表面）引起的磨損；
- 2) 由不固定的（自由的）磨粒（在磨粒群體中、有磨粒的介質中和磨粒薄層的情況下）引起的磨損。

晚些時候在德國採用了磨粒磨損的分類，並且訂入德國工業標準 DIN 草案中〔5〕。

在 1955 年出版的韋林格爾和烏埃茨的專題論文中〔6〕，敘述了分別在滑動、液流和氣流條件下磨粒磨損的研究結果。

必須指出：無論在德國工業標準 DIN 內，或者在上述德國作者的著作中，均未採用“磨粒磨損”這一術語，而是用“在顆粒物質作用下的磨損”來代替這個術語。

在文獻中，有關磨粒磨損型式的劃分的一般問題和闡述磨損過程機理的著作是很少的；只是發表了一系列個別型式磨粒磨損的試驗研究。按照上述的、關於選擇金屬同有磨粒的表面的磨損試驗方案的觀點，我們對這種方案的研究工作予以很大的注意。

大家知道，在按金屬同固定磨粒的摩擦方案進行磨粒磨損試驗時應用的磨研表面有三種，即砂紙、磨石和銼刀，可以從中選擇。

在本章的下一節中，引述了與這三種磨研表面摩擦時的磨損試驗的所有研究方法和研究結果的分析。

2 對砂紙摩擦時的試驗室磨損試驗方法的分析

魯賓所進行的鋼的磨粒磨損研究 1910 年法國金屬學家魯賓發表了關於鋼的磨粒磨損的研究〔7〕。看來，這是第一個利用砂紙作為摩擦表面所進行的研究。他在早先所完成的研究工作中〔8〕發現，對這種試驗，利用砂輪（磨損產物會堵塞孔隙，從而逐漸減低砂輪的磨研能力）和洒在金屬盤上的磨粒粉是不合適的。魯賓基於上述研究工作所獲得的經驗，認為應用砂紙是合理的。

魯賓的試驗機的主要部分是一裝在垂直軸上的圓盤，圓盤的

平面上覆有砂纸,圆柱状试样的端面紧压于圆盘的平面上(图1)。试样直径为15毫米,其轴线对圆盘轴线的距离为72.5毫米。可以测量摩擦力。试样上钻有安放热电偶用的孔。

按照在150转/分的圆盘转速下试样的重量损失来计算磨损(试样通过200米长的摩擦行程后)。每次试验由三个依次,试验时间均为一分钟的试验阶段组成。每一试验阶段后,以一毫克的精度称出试样重量。作者指出,在应用这种试验方法时,所有这三个试

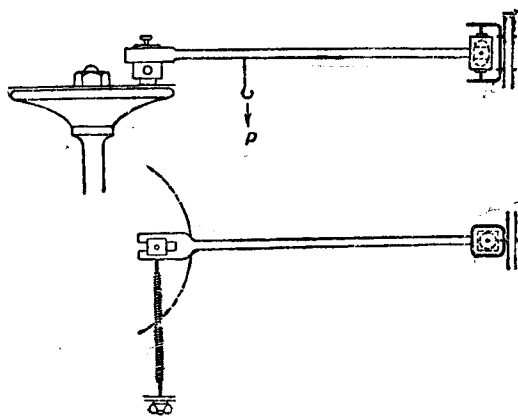


图1 鲁宾应用的磨粒磨损试验机示意图。

验阶段都是在砂纸的同一地段进行摩擦,这不仅可以观察到试样的磨损,而且可以观察到后者对砂纸磨研能力的降低的影响。对新试验要用新的砂纸。作者在他的基本试验中采用由在同一砂纸表面上进行一分钟试验组成的三个循序试验阶段的磨损总和作为磨损大小的指标,称为磨损量。在1公斤/厘米²单位载荷下进行试验(这个载荷是根据实验选择的)。砂纸的质量会影响重复试验时结果的分散度。当试验软钢和应用同种牌号金刚砂砂纸时,分散度约为2~4%;当应用不同牌号金刚砂砂纸和试验普通钢时,分散度为10%;而在试验很硬的淬火锅时,则达15%。

曾经试验了各种状态的碳钢、合金钢、铸铁和有色金属(共约120个试样)。对于用作磨粒磨损试验的材料测定了布氏硬度和擦痕宽度(用擦划法试验硬度时),以及进行了压缩试验。在这个研究工作中,对磨粒磨损试验方法本身的精确化予以很大的注意。

用各種不同材料校核了單位載荷對磨損的影響。發現當單位載荷大於 1.5 公斤/厘米^2 時，砂紙的磨粒層破壞得很厲害。

在 $0.5 \sim 1.5 \text{ 公斤/厘米}^2$ 的單位載荷範圍內，校核了單位載荷與磨損量的關係。對不同硬度的鋼和不同品種的砂紙，這個關係是不一樣的。對軟鋼，發現磨損量與單位載荷成正比關係；對硬鋼就看不到這樣的關係。這與不同硬度的鋼對磨粒層破壞程度的不同影響有直接關係。

下面所援引的數據說明試樣金屬與砂紙的相互作用。

六種鋼的成分和狀態如表 1 所示。圖 2 為六種鋼進行依次持續試驗 1 分鐘的磨損試驗結果。試驗條件如下：圓盤轉速為 150 轉/分 ；單位載荷為 1 公斤/厘米^2 ；摩擦軌道的平均直徑為 150 毫米 ；試樣直徑為 15 毫米 ；同一公司的 3 號金剛砂砂紙。圖 2 曲線上的磨損量是每分鐘試驗的平均值。這就可以應用外推法確定在試驗開始時的最初的磨損速度。

從表 1 和圖 2 可以看到，試樣的硬度愈高，重複試驗時的磨損就愈小，亦即砂紙的磨粒表面破壞得愈厲害。魯賓不去改變他自己的試驗方法和減小這個因素的影響，卻選擇了不正確的表達試驗結果的方法，將三分鐘後的磨損量當作結果（表 2，這些磨損量系指 1 厘米^2 試樣截面上的磨損量）。在比較最初一分鐘後試驗鋼材的磨損對三分鐘後磨損的比值時，這種反映磨損的條件性就很明顯了。在這兩種情況下，我們均以含炭 0.12% 未處理過的 I 號鋼的磨損作為 100% 。

由表 2 中的數據可以看出，I 號鋼最初一分鐘試驗後的磨損量比 VI 號鋼大 2.2 倍，在試驗三分鐘後則大四倍。

當比較各種不同鋼材的相對磨損速度的變化時，這就更明顯地可看到。根據圖 2 我們繪制了圖 3。圖中縱座標為相對磨損速度，橫座標為試驗持續時間。對於三種相比較的鋼材中，每一種鋼材均以初始磨損速度（用外推法求得的）作為 100% （鋼的代