

# 摩擦金属学

高彩桥 编著



# 摩 擦 金 属 学

高彩桥 编著

哈尔滨工业大学出版社

## 内 容 简 介

本书前三章是用金属学的观点分析了摩擦副的表面结构与接触特性;研究了各种常见的磨损形式,用金属学的原理详细地讨论了它们的影响因素;介绍了摩擦磨损的试验、研究方法与手段。第四章重点阐述了摩擦、磨损过程中的几个金属学问题。第五章分析了钢、铁、铜与铝的合金的磨损特点。第六章是改善金属材料耐磨性的各种表面强化技术。第七章是摩擦学问题的系统分析方法。

本书可作为高等工科院校有关专业的研究生及本科生的专用教材,也可供从事摩擦学理论研究、生产实践工作的同志们参考。

摩 擦 金 属 学

哈尔滨工业大学出版社出版

新华书店首都发行所发行

哈尔滨工业大学印刷厂印刷

\*

开本787×1092 1/32 印张9.625 插页2张 字数217 000

1988年3月第1版 1988年3月第1次印刷

印数1—5 000

ISBN 7-5603-0046-4/TG·3 定价:1.80元

## 编 者 的 话

众所周知，金属表层的组织与性能对摩擦磨损有重要影响。应当指出：在摩擦过程中金属表层的组织与性能有十分复杂的变化，这种动态变化对摩擦磨损的作用并不亚于试验前材料的组织与特性。诚然，要了解摩擦过程中表面的，甚至是近表面的变化信息是相当困难的。但是，不深入研究摩擦副表层在运动过程中的变化规律，我们就永远也弄不清楚磨损的机理。因此，研究摩擦磨损问题的目的，不仅是用以解释和理解有关的现象，如机器零件的磨损，刀具、量具与模具的磨损等，更重要的是能动地变革金属材料、热处理与摩擦磨损的内在联系，以便为摩擦构件正确地选用材料与加工工艺，提高零部件的可靠性，从而延长它们的使用寿命。

在本书的编写过程中，哈尔滨工业大学热处理教研室主任雷廷权教授给予了关怀与指导，编者表示衷心的感谢。王铀同志积极支持本书的编写工作，并完成了本书第三章及第五章的部分稿件。清华大学刘家浚教授，农机院周平安同志，北京矿院汪宁同志为编书提供了大量的最新资料。本书中引用的试验数据是许多同志辛勤劳动的结晶，他们是东安机械厂刘新明同志，哈尔滨第一机器厂李义林同志，石油化工研究院臧振镛同志。哈工大张泽国、伍岩、伊晓等同志也为本书作了许多工作。哈工大金属材料及热处理专业的电镜、金相及力学性能组的同志给予了热情的帮助。编者对他们表示深切的谢意。

高彩桥

# 目 录

编者的话

|                                           |       |
|-------------------------------------------|-------|
| <b>第一章 绪论</b> .....                       | (1)   |
| 一、 引言.....                                | (1)   |
| 二、 摩擦表面的形貌和相互接触.....                      | (5)   |
| <b>第二章 金属的磨损</b> .....                    | (15)  |
| 一、 磨损的分类.....                             | (15)  |
| 二、 粘着磨损.....                              | (16)  |
| 三、 磨料磨损.....                              | (39)  |
| 四、 接触疲劳.....                              | (51)  |
| 五、 腐蚀磨损及其他.....                           | (55)  |
| <b>第三章 磨损试验研究的方法</b> .....                | (61)  |
| 一、 磨损的试验方法.....                           | (61)  |
| 二、 磨损的研究方法.....                           | (71)  |
| <b>第四章 摩擦过程中的几个金属学问题</b> .....            | (119) |
| 一、 金属在摩擦磨损中的变形与断裂.....                    | (122) |
| 二、 金属的组织与性能对其摩擦磨损行为的影响<br>——静态的摩擦金属学..... | (140) |
| 三、 摩擦磨损过程中金属组织与性能的变化<br>——动态的摩擦金属学.....   | (171) |
| <b>第五章 金属材料的磨损</b> .....                  | (193) |
| 一、 钢材的耐磨性.....                            | (193) |
| 二、 铸铁的磨损.....                             | (221) |
| 三、 铜合金的磨损.....                            | (233) |
| 四、 铝合金的磨损.....                            | (240) |

|            |                             |       |
|------------|-----------------------------|-------|
| <b>第六章</b> | <b>提高金属耐磨性的表面强化技术</b> ..... | (249) |
| 一、         | 渗碳.....                     | (250) |
| 二、         | 渗氮.....                     | (261) |
| 三、         | 渗硼.....                     | (270) |
| 四、         | 丰田工艺.....                   | (274) |
| 五、         | 气相沉积.....                   | (276) |
| 六、         | 渗硫与硫氮共渗.....                | (278) |
| 七、         | 氮氧共渗.....                   | (282) |
| <b>第七章</b> | <b>摩擦学中的系统分析方法</b> .....    | (286) |
| 一、         | 系统的结构、变量与转变.....            | (286) |
| 二、         | 数据卡.....                    | (294) |
| 三、         | 摩擦学系统分析的应用.....             | (300) |

# 第一章 绪 论

## 一、引 言

摩擦金属学是一门边缘学科。它是用金属学的原理（观点）、方法（手段）研究摩擦、磨损过程中发生的各种现象，探讨磨损的起因及其影响因素，指导设计时的选材与确定工艺，达到提高机械、仪器的零、部件的可靠性和延长使用寿命的目的。

延长机器和机构的使用寿命，提高它们工作的可靠性是一项十分重要的技术任务，并且具有重大的政治经济意义。其中一个重要方面就是设法减少磨损。越是重要的机器和机构，越是工作条件复杂的摩擦副（如航空与航天器械，低温、高温及特殊条件下工作的零、部件），寿命问题越突出。

霍林（Halling J）指出，世界能源约有一半是以不同形式消耗在克服机械零件对偶表面相互作用的摩擦上。由于摩擦所导致的磨损是机械设备失效的主要原因之一，在工业发达的国家里，国民经济总产值中约有一半是用于更换因磨损和类似情况而造成的废品。正因为如此，最近随着生产的发展和科学的进步，世界上工业技术发达的国家都在积极开展摩擦学的研究与应用。

摩擦磨损的研究与金属和材料学有着十分密切的关系，这不仅表现在磨损要浪费大量的材料，更重要的是综合利用摩擦学（摩擦、磨损与润滑）的知识能研制新材料、创立新

工艺。

美国国家材料政策委员会向美国国会提出了一份报告。文中指出<sup>[1]</sup> “由于摩擦磨损引起的损失，使美国经济每年支付 1000 亿美元的巨额资金，这项损失中的材料部分约为 200 亿美元。” 乔斯特 (H.P.Jost) 指出，根据英国的经验，只要花费不大的代价，减少 20% 的损失是很容易做到的。英国摩擦学研究中心的收支比为 300:1。正因为如此，美国机械工程师学会在一本名为《通过摩擦学节约能源的战略》的书中写道：美国交通、电力、加工、商业等部门耗能占美国的 80%，其中约有一半是没做功就损失掉的，1990 年这个数字可能达到 56%。文章指出<sup>[2]</sup>，自从蒸汽机发明的两个世纪以来，能源节约的重点是提高原动机热循环的效率。但是，近十多年的历史证明，现在这方面的潜力已很有限。文章认为今后节约能源的着重点应该是改善摩擦学技术，因为这样既能显著地节约原材料和减少动力损耗，还能提高机器的可靠性，延长服役时间，减少维修费用。

在材料利用方面，摩擦磨损现象有非常重要的意义。1975 年我国机械行业对十二个部门进行了摩擦磨损情况的调查，结果发现我国某些零部件的寿命远比国外先进产品低。1974 年我国汽车、拖拉机的用钢量，在新产品上的消耗 (51 万吨) 与维修配件上的消耗 (47 万吨) 几乎相等。这说明产品质量差，寿命短，因此设备可靠性差，效率低。

利用热处理，尤其是化学热处理能显著地改善材料表面的摩擦磨损抗力。例如表面超硬覆盖技术<sup>[5,6]</sup>，可使表层硬度提高到 HV3000~5000，即比淬火工具钢高 5~7 倍。用这种新工艺处理的零件和工具的寿命能成倍的增加。根据摩擦学原理创立的复合化学热处理新工艺<sup>[4]</sup>，使摩擦副之间



的摩擦系数能减少 $1/2 \sim 2/3$ ，摩擦构件工作平稳，无噪音，磨损率减少一个数量级。近年来研究各种材料、各种热处理工艺耐磨性的工作不断增多。虽然摩擦磨损方面的研究工作有很多困难（象基础理论不成熟，影响因素多，现象难以暴露等），又是一门多学科的综合课题，但是，目前由于各国的极大重视，投入了大量的人力与物力，已使它成为当今世界上发展最快的学科之一。

摩擦磨损的研究趋势明显的倾向于微观机理及冶金本质方向。表层及磨屑的成分与结构分析，表层、二次淬火、二次回火的研究等都与材料及热处理有密切关系。因此，我们的任务就不只是运用摩擦学的已有知识，而且要在实践中推动摩擦学向前发展。

现在金属材料在科学技术和人类生活中仍然是一种基本材料，因此，提高金属材料、金属制品的耐磨性具有重大的技术经济意义。可是，对这样重要的问题长期以来研究得很不充分，至今尚缺乏一本有关金属材料磨损机理与改善耐磨性措施的系统著作。摩擦、磨损现象的复杂性及其微观特征为这一问题的解决带来了许多困难。由于生产水平和科学技术发展的限制，虽然在几百年之前关于摩擦的研究就开始了，可是，人们首先注意的只是摩擦副的机械接触和机械应力。过去认为材料的成分是耐磨性的主要影响因素，几乎忽略了组织对耐磨性的影响，更没有考虑摩擦、磨损过程中的组织变化。

本世纪40~50年代有人用金相方法研究磨损过程，企图将耐磨性与磨损前的组织进行比较。后来才研究金属表面的组织与性能在摩擦过程中的变化。可是，摩擦产物的弥散度很高，用光学显微镜和一般化学分析方法很难了解其细节。后

来采用 X 线衍射仪、电子显微镜、电子衍射及放射性同位素等新技术探索摩擦时金属表面与次表层的一些组织、状态变化。近年来，由于研究表面仪器的进展迅速，象俄歇电子能谱仪、X 线电子能谱仪、低速电子衍射仪等许多新技术的出现，使金属摩擦表面上一些微观的成分、组织变化的研究成为可能。例如 俄歇电子能谱仪，可以分析表面 1~10 个原子层 ( $3\sim 30\text{\AA}$ ) 的成分变化。可以分析原子序数 3 号以上的所有元素，灵敏度为 0.1% 单原子层。

今天，金属摩擦表面的研究不仅限于组织的静态分析和光学显微镜的一般金相组织分析，而是深入到表层极薄的组织中研究温度等各种因素的影响，研究磨损的基本成因及其影响因素。

不难设想，深入开展摩擦磨损过程中的形变与相变规律的探讨，对突破摩擦磨损中的一些关键性课题将会做出非常积极的贡献。

综上所述，可以看出：

a. 随着近代工业的发展，机器设备的功率、速率、精度等参数不断提高，生产的连续性和自动化水平日益增加，致使特殊工况下的金属零件的耐磨性问题十分突出，因此，这个课题受到了普遍的重视。

b. 研究金属材料的摩擦学问题有着显著的技术经济效益。运用现有的摩擦学知识与经验在化费不大的条件下，可以为国民经济提供巨额的收益，收益与投资之比不仅是几倍、几十倍，甚至是几百倍。

c. 现代科学研究手段的不断完善，人类认识金属摩擦过程的一些障碍正在或者已经被克服。目前微、薄膜的成分、状态分析技术，金属组织、成分的动态（快速）分析技

术的完善，为这门科学的发展创造了条件。

d. 因为许多国家认识到这个问题的重要性，所以相继投入大量的人力、物力，为其突飞猛进地发展奠定了物质基础。

由于开展技术交流，尤其是国际间的技术交流，使有关信息成倍地增加，在这种条件下，摩擦磨损现象的研究在全世界正在大力开展。同时利用现有的理论和技术已解决了大量的技术与经济问题。

从70年代中期以来，我国的科技事业有了巨大的变化，各项事业如逢早春，科技人员奋发图强。在金属摩擦磨损领域内，老一辈科学家在磨损机理、耐磨材料等方面做出了可贵的贡献。中年科技工作者在接触疲劳、磨料磨损、微动磨损以及选择转移、固体润滑等方面取得了许多成绩。还有一批年轻的学者更是生气勃勃、踏踏实实地工作着。

在设备方面我们还不算先进，可是近年来自行制造和进口了相当数量的通用和专用设备。全国已有相当数量的研究单位开展了这方面的研究工作。

国家对摩擦磨损机理的研究十分重视，不但把这项工作正式列入五年计划和长远规划，并且拨出巨款支持有关单位开展摩擦磨损的基础研究工作。

我们坚信，在党的关怀下，在国家和人民的大力支持下，在不久的将来，在理论研究和实际应用方面一定会取得更大的进步。

## 二、摩擦表面的形貌和相互接触

著名的学者鲍登 (Bowden F.P.) 和泰伯 (Tabor D.) 在《摩擦学入门》一书中写道：“如果我们不知道两个表面

放在一起时的接触情况，我们将永远也弄不清摩擦是怎么产生的。为了弄清这一点，我们必须研究摩擦表面的形状和轮廓。”

经过机械或者其它方法（如电加工等）加工的金属表面，实际上并不是完全光滑平整的。在机械加工时切屑形成过程的许多现象（例如塑性变形，震动等），使工件表面留下许许多多的加工痕迹，通常称为刀痕或加工纹理。粗加工的表面用肉眼就能看出表面上有起伏不平的加工痕迹；精加工表面用肉眼看似似乎是很平滑的，可是用放大镜或用仪器观察时，仍然是峰谷相间的。工件表面的平整程度常用粗糙度来表示，各种机械加工方法的表面特征与粗糙度的情况如表1-1所示。

表 1-1 各种加工方法的表面特征及其粗糙度

| 加工方法    | 表面微观特征    | Ra( $\mu\text{m}$ ) | Rz( $\mu\text{m}$ ) |
|---------|-----------|---------------------|---------------------|
| 粗车、粗刨   | 微见刀痕      | $\leq 20$           | $\leq 80$           |
| 车、铣     | 微见加工痕迹    | $\leq 10$           | $\leq 40$           |
| 镗、粗刮    | 微见加工痕迹    | $\leq 5$            | $\leq 20$           |
| 磨、拉     | 看不清加工痕迹   | $\leq 2.5$          | $\leq 10$           |
| 精绞、滚压   | 可辨加工痕迹方向  | $\leq 1.25$         | $\leq 6.3$          |
| 精镗、刮    | 微辨加工痕迹方向  | $\leq 0.63$         | $\leq 3.2$          |
| 珩磨、研磨   | 不可辨加工痕迹方向 | $\leq 0.32$         | $\leq 1.6$          |
| 精磨、抛光   | 暗光泽面      | $\leq 0.16$         | $\leq 0.8$          |
| 超精磨、精抛  | 亮光泽面      | $\leq 0.08$         | $\leq 0.4$          |
| 镜石磨、超精抛 | 镜面        | $\leq 0.01$         | $\leq 0.05$         |

为了正确反映表面粗糙度可以采用不同的参数。这些参数可归纳为高度特性参数、间距特性参数和形状特性参数。高度特性参数是常用的。它有二个指标。

(1) 轮廓算术平均偏差：是取样长度内轮廓偏差绝对

值的算术平均值。用 $R_a$ 表示

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Y| dx$$

或近似地写为

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i|$$

式中  $Y$ ——轮廓偏差；

$Y_i$ ——第 $i$ 点的轮廓偏距 ( $i=1, 2, 3, \dots$ )。

(2) 微观不平度十点高度：是在取样长度内5个最大的轮廓峰高的平均值与5个最大的轮廓谷深的平均值之和。用 $R_z$ 表示

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 Y_{pi} + \sum_{i=1}^5 Y_{vi}}{5}$$

式中  $Y_{pi}$ ——第 $i$ 个最大的轮廓峰高；

$Y_{vi}$ ——第 $i$ 个最大的轮廓谷深。

表面的高度特性参数与旧国标中光洁度 (GB1031-68) 之间的关系如表1-2所示。

$R_a$ 与 $R_z$ 不能提供表面形貌的形状、尺寸和坡度等细节情况。换句话说， $R_a$ 、 $R_z$ 相同的表面，表面形貌的形状、尺寸和坡度可能是各种各样的。图1-1是高度特性参数相同的各种表面形貌。但是 $R_a$ 、 $R_z$ 对同一种加工制造同一类表面时是有意义的。

图1-2是粗磨与电沉积表面的形貌，用肉眼观察时这两种表面都很光滑，但在扫描电镜下，它们是十分粗糙的。由此不难得出一个重要的概念，即用一般方法加工后的表面，它的微观形貌都不是平滑的，而是有峰、有谷，峰谷相间。它们直接接触的面积是很小的。

表 1-2 粗糙度与光洁度的关系<sup>[7]</sup>

| 光洁度等级         | $R_a(\mu\text{m})$ | $R_z(\mu\text{m})$ | 基准长度 (mm) |
|---------------|--------------------|--------------------|-----------|
| $\nabla_1$    | 50                 | 320                | 8         |
| $\nabla_2$    | 25                 | 160                |           |
| $\nabla_3$    | 12.5               | 80                 |           |
| $\nabla_4$    | 6.3                | 40                 | 2.5       |
| $\nabla_5$    | 3.2                | 20                 |           |
| $\nabla_6$    | 1.6                | 10                 |           |
| $\nabla_7$    | 0.8                | 6.3                | 0.8       |
| $\nabla_8$    | 0.4                | 3.2                |           |
| $\nabla_9$    | 0.2                | 1.6                | 0.25      |
| $\nabla_{10}$ | 0.1                | 0.8                |           |
| $\nabla_{11}$ | 0.05               | 0.4                |           |
| $\nabla_{12}$ | 0.025              | 0.2                |           |
| $\nabla_{13}$ | 0.012              | 0.1                | 0.08      |
| $\nabla_{14}$ | 0.006              | 0.05               |           |

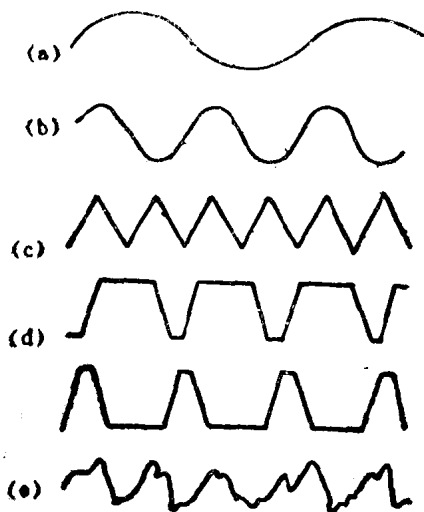


图 1-1 高度特性参数相同的各种表面形貌

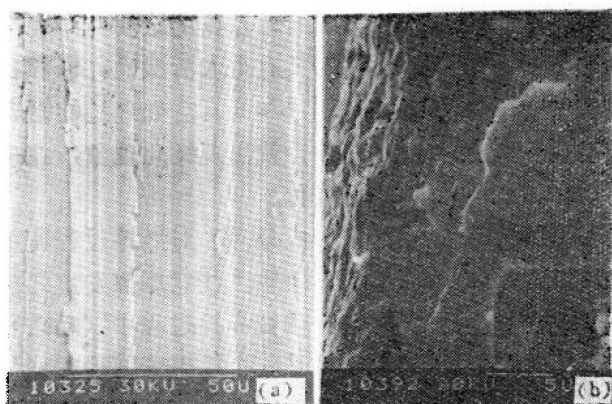


图 1-2 金属表面形貌  
(a) 磨削加工后； (b) 电沉积表面

金属被加工表面的组织、性能与加工方法有密切关系。车削加工时材料在车刀的前面发生剧烈的塑性变形，这里的晶粒显著碎化。通常，组织遭到破坏（冷作、织构及相变等）的深度有几十  $\mu\text{m}$ ，粗加工时可达几百  $\mu\text{m}$ 。磨削时也有类似现象发生。摩擦过程中金属表面的变形层厚度与滑动速度有关，提高滑动速度，变形层厚度变薄。黄铜在不同加工条件下的变形层深度列于表 1-3。在真空条件下或在金属

表 1-3 加工工艺与表面损伤<sup>[3]</sup>

| 加 工 方 法                      | 深度 ( $\mu\text{m}$ ) |      |      |
|------------------------------|----------------------|------|------|
|                              | 划痕                   | 显著变形 | 总变形层 |
| 手 锯                          | 100                  | 55   | 750  |
| 粗 铰                          | 70                   | 50   | 450  |
| 用 200 #sic 砂纸磨               | 2                    | 7.5  | 77   |
| 用 400 #sic 砂纸磨               | 1.5                  | 6.5  | 43   |
| 用 600 #sic 砂纸磨               | 0.8                  | 5.0  | 22   |
| 用 10~20 $\mu\text{m}$ 的金刚石抛光 | 0.3                  | 3.0  | 11   |
| 用 4~8 $\mu\text{m}$ 的金刚石抛光   | 0.08                 | 0.17 | 1.0  |
| 用 0.1~1 $\mu\text{m}$ 的金刚石抛光 | 0.05                 | 0.1  | 0.7  |

表面膜被破坏时将出现纯净表面。裸露的金属纯净表面上原子处于不平衡状态，因此它们具有很大活泼性，极易与其它原子化合或吸附。例如经 $10^{-8}$ Pa高真空处理过的钢表面，在 $10^{-6}$ Pa的室温条件下，一秒钟就出现氧化现象，在一个大气压的空气中经 $10^{-9}$ 秒即可氧化。

材料表面的状态（形貌、成分等）对摩擦过程有重要的影响，这里必须指出：我们不但应当注意摩擦发生之前（原始）的表面状态，而且还应当重视摩擦过程中（动态）表面的变化。机器或零件的走合就是一个动态表面形貌变化的实例。

工程用的金属表面，多数都经过车、铣、刨削之后再行用，有的还要进行磨削和抛光。因此，表层材料发生严重的硬化。活泼的金属在变形层上面还将形成氧化膜，氧化膜上面又常有吸附和污染物。从金属基体到表面各层的大致结构如图1-3所示。

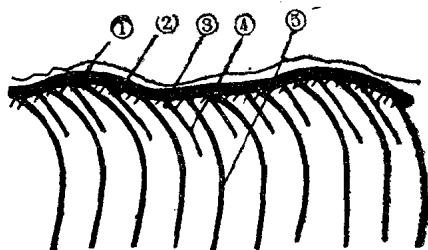


图 1-3 磨削和抛光后的表面在空气中的情况

- ①氧化膜  $200\text{\AA}$ ；②抛光层  $1000\text{\AA}$ ；③强烈变形层  $1 \times 10^4\text{\AA}$ ；  
④严重变形层  $5 \times 10^4\text{\AA}$ ；⑤基体

其中污染膜、吸附膜和氧化膜称为外表层，加工硬化层和金属基体称为内表层。



此外还有几十  $\text{\AA}$  的吸附膜和几百  $\text{\AA}$  的污染膜。

可见，实际的金属表面既不平滑，又不是单纯的。

摩擦副表面的接触状态是研究摩擦磨损现象的基础，真实接触点上的组织、状态、性能、应力与温度等是影响金属摩擦磨损的活跃因素，摩擦时金属的各种变化首先是在这里发生的。

图 1-4 是一对金属摩擦副的局部放大。可以看出，在载荷  $N$  的作用下，两个相互接触的表面不是全面接触，实际上只是在某些突出微峰 (Asperths) 处接触。那里的应力增加时不但能引起弹性变形，而且造成局部的塑性流动，致使接触处的真实接触面积增大，真实接触点增多。表 1-4 是钢板在不同正压力下的真实接触情况。这里的数

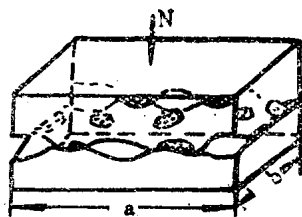


图 1-4 摩擦表面的真实接触情况

表 1-4 载荷与接触的关系

| 载荷<br>kg | 真实接触<br>面积 $\text{mm}^2$ | 真实接触面积与名义接触面积之比 | 接触点数 | 接触点的平均半径<br>mm |
|----------|--------------------------|-----------------|------|----------------|
| 500      | 5                        | 1/400           | 35   | 0.21           |
| 100      | 1                        | 1/2000          | 22   | 0.12           |
| 20       | 0.2                      | 1/10000         | 9    | 0.09           |
| 5        | 0.05                     | 1/40000         | 5    | 0.06           |
| 2        | 0.02                     | 1/100000        | 3    | 0.05           |

摩擦力与表面积无关的正确性。粘着摩擦理论指出，摩擦力与真实接触面积成正比，与名义面积大小无关，真实接触面