

表面粗糙度及其测量译文集

强锡富 毛起广 等编译

中国计量出版社

表面粗糙度及其测量译文集

强锡富
毛起广 等编译

中国计量出版社

内 容 提 要

本文集选编了近年来国际上各种文献中有关表面粗糙度的评定和测量的文章共 39 篇。内容分三部分：表面特性及评定参数；表面粗糙度测量方法和仪器及其精度分析；粗糙度测量的新技术及发展概况。比较全面地介绍了评价表面特征的新概念、新手段，反映了表面粗糙度测量技术发展的新动向。对于机械制造业设计、工艺、检查人员，计量测试工作者和大专院校有关专业师生都具有实用参考价值。

表面粗糙度及其测量译文集

强锡富 毛起广 等编译

责任编辑 朱桂兰

—#—

中国计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经营

—#—

开本 787×1092 1/16 印张 22 1/4

字数 544 千字 印数 1—6200

1987年4月第一版 1987年4月第一次印刷

统一书号 15210·536

定价 5.10 元

前 言

本译文集收集了近几年来英、美、苏、德、日等国和有关国际性会议的杂志、论文集、年报中所刊载的关于表面粗糙度及其测量方面的文章。内容的选取着重于介绍目前国际上在表面粗糙度的评定和测量方面的新概念、新手段，并介绍了当前通用的测量方法和仪器的精度分析，以及量值统一等方面所做的工作。

译文集内容大体上分为三部分：一、表面特征与评定参数。加工表面的质量对零件的使用功能，诸如滑动和滚动表面配合的耐磨性、密封性，连接件接触面的导电性、导热性，管道表面对液体或气体的阻力以及机构的精度、稳定性等等都有直接影响。而表面的特征和零件使用性能的关系需要通过相适应的评定参数来反映。国际上已开始从截面轮廓曲线的一维参数（幅度特性）评定走向二维参数（幅度和间距）的综合评价，并正在进一步探索表面形貌的三维表征方法和实用的意义。从反映工艺过程的特点、表面形成机理和零件使用状态出发，对表面轮廓的随机特性有较多的探讨，有关随机过程的统计分析方法已逐步应用到表面粗糙度的评定方法中，这些对我们当前和今后的工作都很有参考价值。二、粗糙度测量方法和仪器及其精度分析。除了较全面地概述现用的测量方法和仪器的特点、适用范围之外，还介绍了一些可弥补现用方法不足的测量手段，以扩大视野。有关常用测量仪器（尤其是触针式仪器）的精度、使用性能和校验方法的讨论，将有助于我们正确地运用和改进这些测量技术。三、粗糙度测量的新技术发展概况。在这方面选择了若干有代表性的论述，比较集中地介绍在线测量或加工过程中测量粗糙度的光学技术、表面形貌的三维测量系统以及超精加工表面的测量方法等，这些内容反映了在表面粗糙度测量领域中新的发展动向。

在表面粗糙度特征的评定和测量领域，近一时期内有比较广阔和深入的发展，可供选介的文献亦十分广泛。但由于篇幅所限，在建立系统的基础概念和扩展新技术知识两方面难以兼顾，加之我们的水平有限，所荐文章不一定都很合适，编译错误亦在所难免，敬希读者批评指正。

编译者 1982.9.

目 录

第一部分 有关表面特性及评定参数

1-1	表面粗糙度、表面完整性与功能特性的关系	(1)
1-2	用随机分析法研究加工表面粗糙度	(12)
1-3	按二维随机过程描述粗糙表面	(17)
1-4	表面粗糙度的评定参数及其相互关系	(25)
1-5	统一表面计量的新途径	(31)
1-6	研究表面粗糙度时所用的自相关函数的估算	(45)
1-7	评定轮廓主谐波节距的新参数	(59)
1-8	表面粗糙度的特征和测量	(61)

第二部分 有关表面粗糙度测量方法和仪器及其精度分析

2-1	表面粗糙度测量——概述	(77)
2-2	最新的表面粗糙度测量仪	(86)
2-3	光学轮廓仪	(95)
2-4	关于差分干涉测量	(101)
2-5	表面计量中的新突破	(105)
2-6	表面测量技术中用中线滤波器把粗糙度与波度和形状误差分离开	(110)
2-7	表面粗糙度测量领域的计量统一问题	(114)
2-8	表面粗糙度测量领域的国家专用基准器和全国检定系统	(118)
2-9	表面微观结构测量仪器的校验	(124)
2-10	用干涉法测得的阶梯检验触针式表面轮廓仪的不确定度	(131)
2-11	用触针式仪器测量粗糙度参数时的误差	(142)
2-12	在中线平均粗糙度测量中测量精度和测量长度的关系 (平面磨削表面、圆柱车削表面的情况)	(146)
2-13	轮廓仪触针对被测表面的作用	(159)
2-14	轮廓仪触针半径引起的测量误差的修正	(161)
2-15	某些典型机加工表面的粗糙度参数的变化	(165)
2-16	表面轮廓信号 a/a 转换的采样误差	(175)
2-17	一种用于表面测量的具有宽动态范围的新型触针式仪器	(180)

第三部分 有关粗糙度测量的新技术及发展概况

3-1	粗糙度测量领域内的研究和发展	(189)
3-2	用触针式仪器测量三维粗糙度	(222)

3—3	表面粗糙度的三维测量法	(229)
3—4	三维表面扫描用的综合数字系统	(234)
3—5	用于表面形貌在线测量的光学技术	(245)
3—6	用双光束法在机械加工过程中测量表面粗糙度	(276)
3—7	应用相干光对表面粗糙度实现光学在线测量	(282)
3—8	表面粗糙度的在线测量	(287)
3—9	用光学纤维传感器在加工过程中测量表面粗糙度	(294)
3—10	用光学富里哀光谱分析仪测量表面粗糙度	(304)
3—11	已加工表面上光的散射	(312)
3—12	光切法高速测量及其应用	(326)
3—13	高精抛光、镜面精加工表面的粗糙度测量	(331)
3—14	用微波测量表面粗糙度	(339)

1-1 表面粗糙度、表面完整性 与功能特性的关系

M.F.Devries 等 [美]

【提要】作者们对表面粗糙度和表面完整性与功能特性的关系进行了工业调查，对经营多种产品和规格的美国的18个公司和政府机构进行了私人访问。调查的目的是收集典型事例和确定需要研究的领域。在调查中得到了在典型应用中表面粗糙度的要求、表面完整性和表面特征方面的大量数据。这些资料的重点包含在这篇论文所报告的13个事例研究中。在共同的领域里得出了一些普遍性的结论，确定了几种工业共同关心的、和建议作进一步研究的许多有关表面问题的领域。

一、绪 言

在1975年秋和1976年春，作者们访问了许多美国公司，以便收集这篇论文根据的资料。这一活动是以前工作的继续，宗旨在于确定哪些资料对找出表面粗糙度和表面变化与功能特性的关系是有用的。

这种刨根问底式调查的目的是为了通过私人访问，从综合经营多种产品和规格的各类公司获得资料。附录列举了被访问的公司，他们在这一计划中的协作大大超过了我们的预想，对此我们非常感激。准备了调查提纲，并作为私人访问的基础。但是，在许多情况下，讨论的内容超出了对问题所提出的狭窄的说明范围。

在这个调查中提出了四个主要问题：

1. 有关表面粗糙度和表面冶金学与你们产品的功能特性方面的关系，你们有什么数据资料？

2. 你们产品的表面粗糙度和表面完整性的技术要求是什么？制订这些技术要求的根据是什么？也就是说：(a)这些技术要求是基于你们实验室或现场的经验数据基础上的吗？(b)这些技术是基于教科书或公司手册的传统数据基础上的吗？

3. 在测量表面粗糙度和表面完整性时，你们使用哪些设备和技术？在生产中或在实验室中使用这些设备吗？

4. 在表面特征的领域里，即在表面粗糙度、表面冶金学和表面完整性方面，需要什么型式的研究？

调查的目的之一是收集有关表面特征与功能特性之间关系的典型事例，得到了13个事例并在本文中作了概括；调查的第二个目的是收集在工业上是非常重要的有关表面要求的技术资料和确定需要研究的领域。其它的一些资料也要收集，即各种工业应用的标准和使用的表面测量设备的类型。

本论文的格式如下：在下一节中，汇报了许多有关表面特征的状况和它与功能特性的关系的普遍结论，接下去是说明功能特性和表面特征之间相互关系的有代表性的13个事例。论文的结尾是来自被访问的工业部门的建议，他们认为要在很大的范围内对表面特征和它与功能特性的关系进行必要的研究。

二、调查的一般结论

1. 公司越大，且与航空工业的关系越密切，就越可能找到有关表面粗糙度和表面完整性要求方面的详细例子和其它文件。

2. 在工业中，表面粗糙度测量设备，可在很大的范围内适用；但是，对于以控制高精表面光洁度为目的的检测和确定某给定表面是否能满足特殊的技术要求时，它的用途受到很大的限制。

3. 用肉眼观测表面粗糙度是控制质量的最普通的技术。如果表面粗糙度值 AA 大于 $63 \mu\text{in}$ ($1.6 \mu\text{m } R_a$)，则很少使用测量设备；通常，在粗糙度值 AA 大于 $125 \mu\text{in}$ ($3.2 \mu\text{m } R_a$) 的表面上很少作粗糙度测量了。

4. 对触针仪器的恰当操作和它测量出表面参数的特性的能力有某些联系，特别是用机械加工方法以外的方法(例如：压铸表面、喷砂表面和由非传统机械加工的操作方法)加工表面时，尤其如此。

5. 大多数公司都有根据美国国家标准局的 B46.1-1962 标准而制订的表面粗糙度标准*。这个国家标准是今天美国官方接受的唯一的表面轮廓特征标准，它规定使用金刚石触针式仪器进行测量。在 ANSIB46.1 中定义的主要的表面微观结构特征是：

表面微观结构：形成表面图形相对于名义表面的周期或随机偏差。它包括粗糙度、波度、加工纹理方向和表面缺陷。

粗糙度：表面微观结构中较精细的微观不规则性，通常包括横向进刀痕迹等生产方法所产生的那些不规则性。

粗糙度高度：垂直于中线测得的算术平均偏差，单位为 μin 。

粗糙度宽度：平行于名义表面方向上连续峰顶间的距离，单位为 in。

粗糙度宽度的截止值 (Cut-off)：计入粗糙度高度测量值的表面周期微观不规则性的最大节距。它必须总是大于粗糙度宽度。标准值是：0.003"、0.010"、0.030"、0.100"、0.300" 和 1"。

波度：通常比粗糙度宽度的截止值更宽的表面微观结构的大节距成分。

波度高度：峰-谷距离，单位为 in。

波度宽度：连续的波度峰顶或谷底间的距离，单位为 in。

加工纹理方向：主要表面图形的走向。

6. 许多公司对设计师们和工艺工程师们都颁发技术指南，这些指南将尺寸公差、表面粗糙度和对各种机加工操作提出的普遍适用及可能的表面粗糙度联系在一起。当遇到严格的尺寸公差时，因为它们是同时发展的，所以能经常很简单地得到比技术要求更好的粗糙度。另

* 现已修订为 B46.1-1978，并采用国际单位制。

一些公司将期望的表面粗糙度列入被加工零件的功能之中。

7. 尽管在功能上说不是必需的,但机械加工表面的美观或装饰性的外观仍是很重要的。除非有另外的技术要求,许多公司在图纸上都规定 AA 是 $125\mu\text{in}$ ($R_a3.2\mu\text{m}$)。

8. 特殊的工业普遍采用特殊的标准,例如食品加工工业、注模工业和金属薄板工业等。由于特殊的理由往往要建立这些标准。例如:在食品加工工业中,鉴于卫生的缘故,接触食品的表面粗糙度通常必需比 $32\mu\text{in}$ 更好些。

9. 为了能得到比通常的触针式仪器更多的特征参数,看来还要做很多工作,并且有些工作已经开始了。在金属薄板特性中除表面粗糙度外,还利用峰点数就是一例。在表征由非传统机械加工形成的表面特性时,还要做些工作。

10. 在钢齿轮淬火后的磨削加工中的主要问题之一是避免表面的损伤。最普遍的损伤形式是在齿面上的微观裂纹和形成未回火或过度回火的马氏体。齿轮的报废几乎都是微观裂纹所引起的。未回火的或过度回火的马氏体的出现,在航空应用中往往导致拒收齿轮。然而,对于其它应用的齿轮有时用精研之类的加工方法重新加工以便除去不需要的马氏体层。

11. 在淬火钢的表面磨削,或渗碳钢螺杆的磨削、或淬火钢机床滑动导轨的磨削加工中,经常会产生包括裂纹、未回火或过度回火的马氏体在内的表面损伤。

12. 表面完整性的考虑在飞机零件的设计和制造中起着重要的作用。某些普遍的表面完整性问题和应用有:

- 利用穿透式探测技术,例如磁力探伤或荧光探伤法,或利用超声波或其它非破坏性检测技术对零件作100%的裂纹检查。

- 报废所有的有裂纹齿轮和其它关键零件。

- 对许多高强度零件作喷丸硬化或喷玻璃球硬化处理以便改善疲劳性能以及使微振磨损和腐蚀减至最小。

- 因应力侵蚀导致许多零件破坏。其中包括马氏体不锈钢和钛质零件。为了防止应力侵蚀事故已研制出许多特种工艺技术。

- 一些公司已制订了技术要求,对由金属去除工艺加工的表面变形规定了可接受的公差。

三、典型事例

事例1 汽车钢板

汽车用钢板的重要表面特性之一是峰点数,它决定金属板的喷涂特性。目前汽车喷涂的趋向是将涂层厚度从 0.008in (0.20mm)减少到 0.001in (0.025mm)。峰点数的控制对于在表面喷涂一薄层涂料来说是极其重要的,并且它也影响喷涂表面的总的外观。对于冲压工序的润滑控制、刷铝的外观或美感,以及液压活塞和曲轴的刮伤控制来说,也需要了解峰点数。

用淬火钢球喷射经回火处理的轧钢机滚筒,以便使用于汽车壳体的冷轧加工的钢板表面产生期望的微观结构。从已喷丸处理的回火轧钢滚筒中出来的钢板,其表面粗糙度约为 $45\mu\text{inAA}$ ($1.3\mu\text{m} R_a$),每英寸的峰点数有200个。钢板经2到20次轧制以后,钢板的表面粗糙度达到 $35\mu\text{inAA}$ ($0.9\mu\text{m} R_a$)左右,每英寸峰点数为110个。然后对轧钢机的回火滚筒重新喷丸加工以保证特定的表面粗糙度和峰点数。

如果钢板表面光洁度太好，例如 $20\mu\text{inAA}$ ($0.5\mu\text{mR}_a$) 或更好些，那么在装箱回火处理时，钢板将在卷曲的情况下发生冷焊合。要仔细地控制表面粗糙度和峰点数以便在以后的涂漆工序中能得到满意的外观和涂层。

在汽车工程师协会的标准 SAE、J911 中详细规定了冷轧钢板的表面微观结构的测量，该标准推荐了表面粗糙度测量和每英寸峰点数计数的工艺规程。

事例2 支承表面——汽车工业

活塞销的粗糙度和几何精度：为使配合衬套有足够的寿命，活塞销的轴向和径向的表面粗糙度值必须小于 $5\mu\text{inAA}$ ($0.125\mu\text{mR}_a$)。高载荷的活塞严格地要求有较光滑的表面。同时要求严格控制径向和轴向的几何精度。

曲轴支承轴颈的表面：为确保支承寿命，在轴颈上的凸起数 N 和凸起的幅值 A 之间建立了一种关系。当 N 增加时，幅值 A (单位为 μm) 必须减小，使得 N 和 A 的乘积不超过一实验确定的常数。

根据支承的载荷来确定这个常数，较高的载荷要求较小的常数。同时，表面粗糙度必须不超过 $12\mu\text{inAA}$ ($0.3\mu\text{mR}_a$)。轴颈的轴向几何精度偏离直线的凹凸偏差，要求不超过 $200\mu\text{in}$ ($5\mu\text{m}$)。

为了适应这些技术要求，需要依次作车、磨和抛光加工。

事例3 支承表面——机床

刮研仍是机床导轨和支承面重要的光整加工方法之一。刮研滑道能改善承载特性、防止堵塞，将爬行减至最小，有时也有美化的作用。某公司基本上遵循 DIN 标准作手工刮研作业。这个标准根据每平方英寸的接触点数将表面质量分成五个等级。一级表面的接触点数最多，每平方英寸 22~24 个，用于高质量机床滑行表面和导轨。五级表面的接触点数量少，每平方英寸 1~2 个，用于不改变位置的装配表面。轴的支承面也要刮研到 75% 是真正的支承面，这在轴静止时积聚润滑油是很有必要的。在所有产品上的刮研操作都是基于试验方案或现场经验上的。

为了比较，另一个机床公司产品的刮研表面采用 4 级制。其四个等级的粗糙度在每平方英寸上相应的支承点数分别为：

1级： 每平方英寸 1~4 个点

2级： 每平方英寸 5~9 个点

3级： 每平方英寸 10~15 个点

4级： 每平方英寸 16~22 个点

在刮研前用铣削或刨削将每个表面加工成粗糙度为 $125\mu\text{inAA}$ ($3.2\mu\text{mR}_a$)。

在第一个公司里，相当多的滑动导轨表面是采用磨削加工的。对所有经磨削加工的铸件首先经热处理消除应力。有一个时期，曾试图用振动法消除应力，但发现不太满意。软导轨的表面粗糙度加工到 $29\mu\text{inAA}$ ($0.7\mu\text{mR}_a$)。淬火导轨加工到 $14\mu\text{inAA}$ ($0.4\mu\text{mR}_a$)。目前，该公司还没有确定磨削加工的导轨的最好的纹理方向。它们的大多数数控机床采用带有滚动部件的淬火导轨来代替滑动导轨。

在另一个公司里，为他们的车床加工了淬火的磨削加工的可换式导轨。他们将这些导轨称为“剪条钢”。这些条钢由 5160 号钢制成。导轨的最小横截面是 $0.31\text{in} \times 1.31\text{in}$ ($7.9\text{mm} \times 32.3\text{mm}$)、长度为 15 英尺 (4.57m)，而最大横截面是 $1.75\text{in} \times 5\text{in}$ ($44.5\text{mm} \times 127\text{mm}$)，

长为15英尺(4.57m)。将这些导轨的三个面感应淬火到RC为58~60。这些导轨的平行性公差为0.0002in(0.005mm)、厚度公差为0.005in(0.127mm)。偶尔,在磨削加工中会出现裂纹使条钢报废。将这些条钢贴在车床基座的刨削加工的导轨上,并通过在“剪条钢”软的下表面上开的孔用螺钉固紧。

支承在淬火的床身导轨上的工作台导轨,在特殊的刨床上进行刨削加工达到其尺寸和精度。工作台是铸铁的,用高速钢刮刀对导轨的整个宽度作成形切削的方法进行精刨。在精刨时,每次行程的吃刀深度为0.0003~0.0006in(0.008~0.015mm),接着再以零吃刀量作2~3次清洁性刨削。然后对工作台导轨进行刮研以便与淬火的磨削加工的导轨相配合。

在较大的车床上,工作台导轨面覆盖一层高强度胶木带。这胶木带的厚度为1/4in(6.4mm),且用环氧树脂粘合剂将它胶合到刨加工的工作台导轨上。然后用上述相同的刨床刀具刨平胶木带。刨完以后,用手工刮研胶木表面以便与淬火的床身的配合导轨相配合。在所有的数控车床上,工作台和滑动托架都用滚珠丝杆来驱动。数控车床上工作台和滑动托架的导轨覆盖一层Turcite带。将这些Turcite带用环氧树脂粘合剂粘到工作台和滑动托架的导轨上,然后再按上述对胶木带那样进行刨削加工和手工刮研。

事例4 压铸件

压铸件的阀座通常是进行机械加工的,但由于轮廓仪传感器的几何尺寸使得用轮廓仪基本上不能测量阀座的复合曲面,因而出现了实际测量问题。这样,用肉眼观测阀座是有代表性的。

液压连杆的活塞工作面以及“O”型密封环表面,在“O”型环槽口的加工中,主要由于存在颤痕和孔隙,经常出现问题。

流体静力传递的内表面的技术要求是:AA为57 μ in(1.4 μ mR_a)、平面度为0.002in(0.05mm)。这表面与一抛光隔板相配。选择AA值为57 μ in(R_a为1.4 μ m),因为这表面一般用单一机加工工序就能经济地获得,且可使隔板不摆动和不改变位置。

事例5 电器零件

轴承、轴颈:必须将小电机上的轴颈轴控制在AA为12~18 μ in(0.3~0.5 μ mR_a)范围内。如果粗糙度超过18 μ inAA,那么轴作用在浇铅轴衬上就像锉刀一样,使得电机过早损坏。当表面粗糙度变得更好时,轴颈中的润滑作用将降低,因此保证表面粗糙度数值的低限也是很重要的。因为轴颈轴是在无心磨床上加工的,因此对它的棱圆度也要限制。当不能立即测出“监护”过程的变化和表面粗糙度的变化而使表面粗糙度进入20~25 μ inAA(0.5~0.6 μ mR_a)范围内时,将使许多场合的高炉鼓风机出现故障和要求大修。

整流子-电刷的交界面:要求直流电机的整流子和电刷的非常光滑的配合面有长的寿命。然而,如果整流子的表面加工得过于光滑,电刷就不能很好地跑合。因此,整流子应具有给定的表面粗糙度值,这样就可使整流子跑合,但然后就能将它的表面光洁度提高,使之磨损为最小。对于刚开始跑合的电刷,发现最好的起始表面粗糙度约为15 μ inAA。

半导体元件:高功率半导体器件要求好的表面粗糙度和平面度,对好的电、热接触要求小于50 μ inAA(1.25 μ mR_a)。

事例6 食品加工设备

鉴于卫生的原因,食品微粒不允许聚积在凹坑、裂缝、尖角等里面,所以食品加工工业对表面粗糙度和预定的特性都有许多自己的标准。典型地,对任何与食品接触的表面都要求

32 μ inAA (0.8 μ mR_a) 或更好些。有代表性的标准包括私人机构3A 牛奶场标准和 USDA-FDA (食品和药品管理局) 提出的那些标准。在食品加工设备可以销售之前, 图纸和技术要求必须经 USDA 批准。其它的工业标准有烘烤设备的 BISSC 标准。此外, 国家的某些地区对于必须满足供应的与食品相接触的表面, 尽管其倾向性有所不同, 但也有自己特殊的要求或标准。这些标准也为审美目的服务。

食品加工设备中的四个典型部件可以形象地说明表面粗糙度与功能特性之间的关系。

圆筒组件: 这是用于实验室类型刮板式热交换装置的一个部件。将镍质圆筒珩磨到8 μ inAA (0.2 μ mR_a) 的粗糙度, 再电镀上硬铬并抛光到高光泽的光洁度。选用高光洁度的理由是, 刮板叶片应有耐磨损能力以及卫生的要求。

挡板组件: 挡板组件是用于雪糕冷冻机中的一个部件, 且在镀铬的镍圆筒中旋转。将刮板叶片 (见下面) 固定在挡板组件上。“O”型环的凹槽内和车削加工的支承直径, 加工的粗糙度为32 μ inAA (0.8 μ mR_a)。非关键性的表面粗糙度为125 μ inAA (3.2 μ mR_a), 以满足卫生的要求。

刮板叶片: 这种零件固定在挡板组件上, 在镀铬的镍圆筒中它对产品起着捣棒和刮板的作用。七号机的光整加工使410型不锈钢叶片具有很高级的耐腐蚀和耐磨损特性。这是在精磨加工的表面上抛光而产生的高反射率的光洁度。

连接组件 (密封件): 这种零件安装在挡板组件的二个端部, 硬质合金 (碳化钨) 的回转密封件防止产品从圆筒中泄漏出来。在碳化钨表面上抛光加工, 粗糙度达8 μ inAA (0.2 μ mR_a)、平面度为2条干涉带。

对于某些必需热处理的 (400系列) 不锈钢, 其表面粗糙度必须比在较耐腐蚀的材料上 (300系列) 可允许的表面粗糙度要好些。他们发现耐腐蚀性正比于表面粗糙度。就耐腐蚀性而言, 在400系列材料表面上的镜面粗糙度基本上等同于在300系列材料表面上的32 μ inAA (0.8 μ mR_a) 的粗糙度。

事例7 测量设备

当用气动量仪检查尺寸时, 发现表面粗糙度会影响量仪的精度。超过32 μ inAA (0.8 μ mR_a) 的表面粗糙度将引起过度泄漏, 且产生明显的测量误差。

对用于 Bendix 公司的轮廓编码器的工作台的滚珠轴承的轴, 要进行磨削加工并抛光到1~2 μ inAA (0.025~0.05 μ mR_a) 的表面粗糙度。

利用平板玻璃作为 Bendix 二坐标测量机的气垫支承导轨。这种平板玻璃的粗糙度在2 μ inAA (0.05 μ mR_a) 以下——通常在1 μ in 以下。用在水中研磨的方法而不用进一步的抛光就可使平板玻璃达到这种粗糙度。

从许多的制造厂中收集了有关量块的表面粗糙度的数据表明, 表面粗糙度可在0.3~0.5 μ inAA (0.0075~0.0125 μ mR_a) 范围内变动。

事例8 齿轮

较好的粗糙度可改善齿轮的寿命。对于齿轮齿面来说, 理想的表面粗糙度是10~12 μ inAA (0.25~0.3 μ mR_a)。

对钢制齿轮用以下几种技术进行表面硬化和精加工处理:

(1) Delapina 方法 (这是一台将零件完全沉浸在水溶液中、一次一个地对相邻齿的二个侧面作感应式淬火的机器)。经 Delapina 处理以后, 对齿轮作珩磨, 加工量为0.0002~

0.0003in (0.005~0.008mm)。珩磨头是按“国家标准拉刀”制作的钢滚刀为模子做成的研磨齿轮的形状。珩磨头的直径是9in (229mm)，其转速相对于齿轮约为270r/min。

(2) 渗碳、淬火和磨削。

(3) 渗氮和珩磨。

对所有的淬火齿轮都要用硝酸乙醇腐蚀液或过硫酸氨溶液进行酸洗。对飞机零件，如果在酸洗后发现任何未回火的或过度回火的马氏体痕迹，就要报废。卡车的传动齿轮可以重新珩磨以便除去回火层。在磨削加工的轴颈的“冲击”凸肩上，往往会发现裂纹或回火层。这些凸肩是用砂轮边磨削加工的零件的表面。再说一遍，对所有的飞机零件应报废而对卡车的传动零件应重新磨加工一遍以便除掉这种缺陷。

对所有关键性部件都要用磁力探伤法或荧光探伤法作裂纹检查。对飞机零件要100%检查而对传动零件可用质量控制的取样技术进行检查。任何有裂纹的齿轮都要报废。

事例9 喷气发动机部件

多年来几乎是对喷气发动机的每个部件都制订出了表面粗糙度数据。对每个主要部件在设计标准指导书的各章节中都记载有这些数据。此外，也制订了表面冶金学和表面完整性的技术要求，以便使发动机部件保证强度、工程特性和可靠性。

压缩机叶片和螺旋桨翼的表面粗糙度要求，主要是根据空气动力试验来确定。对粗糙度等级不同的翼面的压缩机的功能作比较，就得到了数据的极限值。当然，在规定要求的粗糙度值时，象零件的耐久极限一样，空气动力学性能是主要的因素。

在许多相互配合的法兰盘上详细规定了具体的表面粗糙度值。经常对这些法兰盘作喷砂处理以便得到所控制的表面粗糙度。可控粗糙度可作为某些螺栓连接表面的滑移控制手段。

对许多飞机零件规定用超声探伤法作裂纹检查。为了得到可靠的超声波检查的读数，零件的表面粗糙度是很重要的，在某些情况下，可能没有限制性要求。

在喷气发动机中，氧化是非常重要的问题之一。在发动机的燃烧器和透平部件中的大多数热零件上都采用涂层。在上涂层以前，对这些部件中的所有零件几乎都进行喷砂处理。涂层通常要足够厚，以形成其自己的表面粗糙度。对于要求高精度的场合，要对某些喷涂的零件进行磨削加工以控制其尺寸。

许多零件要作喷丸处理以改善疲劳强度。为此目的，如果它们是在低于1000°F(538℃)场合中应用的话，也可对某些以铸铁为基底的热阻合金作喷丸处理。超过上述这个温度，可能会出现软化或再结晶现象。喷丸处理的镍基合金也较能抗应力消除和抗软化。

对叶片的燕尾槽（特别是在钛叶片上）作喷玻璃球处理，可改善疲劳强度极限和将侵蚀和腐蚀减至最小。

当高应力的钛零件与银和锌接触时，中温时在其中就可能出现应力腐蚀式的疲劳。

通常，在应力腐蚀断裂领域里，对具体问题需要逐个地解决。作为可应用的手段，在淬火以后，在1050°F(566℃)或更高的温度下回火，并在依次的精密机械加工操作以后作应力消除，可将马氏体不锈钢中的应力腐蚀断裂减至最小。

事例10 连接强度，金属和木材的连接

当21-6-9不锈钢和钛在温度高达500℃和压力高达10000psi(磅力每平方英寸)情况下连接时，将导致很差的连接强度。应当注意的是，抛光产生的特性将引起很差的连接强度。已感觉到，很差的连接强度是与在不锈钢表面上镀层以前的表面粗糙度有关的。

在木材连接的领域里，目前的一个课题是比较磨加工(即用砂布磨光的)的表面和用刀刨出来的表面的胶粘连接的强度。机械加工的表面是在许多不同加工条件(吃刀量、速度等)下制造出来的。用触针技术记录表面的表面粗糙度。进行了剪切、张力和周期应力的试验。在试验前，对试样作了许多次周期性的浸湿和干燥。对于简单的剪切试验，表面预加工看来不是一个因素，然而，对于周期应力试验，砂磨加工的表面出现较差的强度，而机械加工的表面有较好的强度。对此产生的原因尚不了解，因而要作进一步的试验。

另一课题是有关表面的钝化问题。当在高温下将木材干燥时，将发生某些影响胶粘性能的物理和化学变化。在高温时，木材快速干燥，但可胶粘性差；而在低温时，木材干燥速度较慢，但具有良好的可胶粘特性。这就产生了经济观点。对此现象尚无已知的道理或解释；目前存在一些不同的想法，其中有人认为这可能是与粗糙度有关的表面现象。

事例11 生命维持设备

医疗设备外露表面的表面粗糙度要求，常常是根据外观为基础而选择的。然而，有很多元件，它们的表面粗糙度和功能特性之间有很密切的关系。幼儿呼吸器就是其中之一。这个产品基本上是一种快速循环、小容量的空气泵，对它已完成了广泛的发展计划。实验中的关键参数是空气泵汽缸内壁的表面粗糙度。活塞用聚四氟乙烯密封圈控制泄漏。根据不同的密封材料、密封剂和密封方法作过的检查试验发现，如果汽缸的表面粗糙度太粗——超过 $8\mu\text{inAA}$ ($0.2\mu\text{mR}_a$)，则密封圈将迅速地磨损而引起过量泄漏。另一方面，如果表面粗糙度为 $4\mu\text{in}$ 或更小，则由于密封圈与汽缸壁间的摩擦而发生过热现象，使聚四氟乙烯密封圈遭到局部熔化而导致呼吸器损坏。

机械连接的表面粗糙度也是很重要的因素。例如，粗车螺纹时所产生的、没有清除的小颗粒，能进入内燃机的液体回路或流量计中。结论是在关键性应用场合应使用带有密封圈的直螺纹(而不用管螺纹)。

事例12 密封表面

汽缸端部的表面粗糙度：根据所用的端部密封垫的形式，端部密封表面所规定的粗糙度可以是 $180\sim 220\mu\text{inAA}$ ($4.5\sim 5.5\mu\text{mR}_a$)或 $40\sim 50\mu\text{inAA}$ ($1\sim 1.25\mu\text{mR}_a$)。每个表面都要求不同的加工顺序。

法兰盘密封的轴表面：法兰盘密封应用中的轴可以极其光滑或极其粗糙。建议轴的粗糙度值为 $10\sim 20\mu\text{inAA}$ ($0.25\sim 0.5\mu\text{mR}_a$)。规定在切入法磨削(横向进给磨削)加工以后进行蒸汽喷吹，以便得到良好的轴的特性。

阀门密封：活门阀和止回阀要用平板底座和平板闸门或舌板，这样，在关闭阀门时泄漏速率是极小的。低泄漏阀要求表面具有 $2\sim 6\mu\text{inAA}$ ($0.05\sim 0.15\mu\text{mR}_a$)的表面粗糙度，且该表面在整个密封区域上是平的。平面度应小于 $50\mu\text{in}$ ($1.25\mu\text{m}$)。需要硬的表面使磨损减至最小。无论如何这些零件必须没有裂纹，否则阀门不能使用。

事例13 模具和冲模

模具工业几乎仅依赖于由“塑料工业公司”和“塑料工程师协会”批准的一套模具粗糙度比较块。这套比较块对制订技术条件和按要求加工出模具粗糙度提供比较标准。这套工具中有六种抛光剂，它们是：

No.1—8000粒度 (* $3\mu\text{m}$ 范围) 金刚砂

No.2—1200粒度 (* $15\mu\text{m}$ 范围) 金刚砂

No.3—320金刚砂布

No.4—280油石

No.5—240干喷砂 (5 in 距离、100bf/in²)

No.6—24粒度、干喷砂 (3 in 距离、100bf/in)

塑料模具工业对粗糙度的要求，与通常的机械工业的要求不同。在制成的塑料零件中大量要求各种形式的纹路结构的表面，例如：人造木纹、人造革、各种交叉影线结构等。当规定这些要求时，模具制造厂商将模具运给加工这种工件的专家。

四、作为调查结果所提议的研究领域

1. 金属薄板表面特性

A. 在汽车和薄板工业中，尽管对表面粗糙度和峰点数确定标准问题已做了大量工作，但遇到的问题之一是对峰点数的读数缺乏一致性。特别是对仪器作峰点数测量的校准看来是个问题。

B. 如上所述，美国的钢铁工业和汽车工业正非常努力地进行着金属薄板的表面粗糙度要求的研究。目前，除表面粗糙度以外，峰点数对于金属薄板滚筒和加工的金属薄板来说，似乎是非常重要的特性。汽车工程师协会 (SAE) 有一个正在修订金属薄板粗糙度 (SAE J911) 技术标准的委员会。

提议的研究领域：在所有国家中调查金属薄板的特性。

2. 全面理解表面粗糙度或微观结构的特征

A. 已经注意到在肉眼验收和轮廓仪读数之间缺乏良好的关系。用轮廓仪测量所给定的表面粗糙度的测试图将产生期望的数值，但它们的表面光整性可能非常差。一个特殊问题是机械加工表面的轮廓仪读数和外观之间的差别。用0.030和0.100 in的切除长度测量二个机加工表面，其中一个表面是单次走刀切削加工的，另一个表面是同时二次走刀切削加工的。它们的读数值是相似的，但二个表面的外观却大不相同。这现象取决于材料（铝是很易显示这种缺陷的一种材料）和照明条件。

B. 应注意的是，对于同样走刀的接触面，铸铁表面上粗糙度63~125 μ inAA (1.6~3.2 μ mR_a) 类似于钢表面上的32~63 μ inAA (0.8~1.6 μ mR_a) 值。然而，在铸铁上125 μ inAA的粗糙度看上去很好，但在钢表面上同样的粗糙度值看上去并不那么好。

C. 用多参数探测方法研究表面特征，为解决铸造表面定量评定标准创造条件。

D. 要研究制气孔标准，特别是对外表面可能是满意的、但在表面下存在气孔的压铸零件。这些零件往往要作磨削加工、抛光，然后电镀。在这种制造工艺中，会使缺陷暴露无遗。这可扩展到塑料制品以便建立制造零件中允许缺陷的标准，也可作为确定质量标准的一个手段。

E. 感到很有必要把表面的三维特性作为将来工作的一个领域。此外，在木材中，还存在由不同加工方法引起的不同程度的表面损伤的表面完整性问题。

F. 在用不同粒度的金刚石砂纸打磨过的模板上使用触针式仪器时，有时不能给出一致的结果。仪器给出的数值表示不出与打磨砂纸粒度的尺寸有明显的关系。

G. 必须找出由非传统加工方法产生的表面粗糙度与由传统加工方法产生的表面粗糙

度之间的关系。触针式仪器不适宜用于非传统加工的表面。必须研制车间用的测量表面微观结构的新的和简单的技术。

H. 表面粗糙度和平面度要求必须区别开来。由于颤动和(或)刀具偏斜引起的波度,对配合和其它功能往往会产生很大的影响。需要按实际要求进行测定和提供条件。

提议的研究领域:如上所述,很明显,对许多工业用户,触针仪器已不能满意地描述表面特征。建议考虑研制另外的表面特征测量仪器以满足世界范围内特殊工业的特殊需要。

3. 改进的触针式仪器

A. 要注意触针式仪器划伤软工件的问题。

B. 对基本触针仪器作改进以便消除触针划伤软金属表面的影响或将这些影响减至最小。他们的经验是:由于后面的读数受触针以前划伤的影响,在锌压铸表面上必须取第一次滑行的读数。在测量铝压铸的表面粗糙度时,在某种程度上也暴露出这个问题。这个问题基本上就是触针的压力太大的问题。

建议研究领域:改进触针式仪器以适应软材料。

4. 渗碳螺钉的疲劳

A. 渗碳螺钉:需要有个试验程序来检测在重复载荷下由疲劳引起的破坏。

5. 非破坏性检测方法

A. 需要可靠的非破坏性测试方法来评定可能在某些生产过程中造成的表面变化。

6. 表面完整性测量仪

A. 需要一些仪器来测定表面变化和疏松材料之间的差异。这在截面非常薄的金属零件的制造中是非常重要的。在喷气发动机中,许多零件只有0.040in(1mm)那样厚。对于表面层的显微硬度和深度的测定、残余应力的测定、金相变化的特性和厚度以及细微裂纹的测定,都特别需要设备。

7. 由不同方法加工的粗糙度相近的表面的性能数据

A. 期望用数据来比较由不同金属切削工艺加工的数值上接近的表面的性能。

8. 选择磨削加工的参数以避免不理想的表面完整性影响

A. 球螺杆和螺母:制定磨削加工的参数使未回火的和过度回火的马氏体的形成尽量减少。

B. 表面淬火和磨削加工的齿轮齿面上往往会产生裂缝。这种磨削加工是无润滑液的,在磨过的齿面上往往出现横向裂缝。应当研究减少或消除裂缝的磨削加工技术和磨削条件。

C. 用成形砂轮或齿轮范成磨削法来磨削渗碳齿轮。目前,有关磨削加工参数与产生裂纹倾向之间的关系方面的资料很少。

较软的齿轮是用4340或4140钢制成的且淬火和回火到280~320BHN(布氏硬度)。用滚刀或成形刀具切削加工。这里的主要问题是颤痕和撕裂。使用这种特殊齿轮的场合,允许有上限为10%的颤痕和撕裂。

建议研究的领域:(a)确定齿轮加工参数与产生裂纹倾向和表面微观结构之间的关系。

(b)确定带有裂纹或其它形式表面损伤的齿是否可用于给定的使用场合。

9. Turcite 轴承

A. 对 Turcite 轴承需要进行以下几项研究:

a. 磨加工纹理方向的影响;

- b. 摩擦系数;
- c. 润滑种类;
- d. 单位载荷。

五、其他资料来源

另外还有二个与我们调查中所包括的资料有密切联系的资料来源。在国家标准局刊物中Dr. Russell, D. Young的文章包含有最新的资料。在他的报告中,就金属加工工业中与表面粗糙度的功能和科技应用有牵连的十个典型的领域作了简单的讨论。选择这些领域是由于对其测量问题普遍的兴趣或因国家标准局的卷入。Dr. Young 讨论的这些领域是:

- 牛奶场和食品工业的存储和分配容器;
- 外科用的移植物的表面粗糙度;
- 印刷插图;
- 汽车马达、变速箱和闸轮的表面粗糙度要求;
- 表面粗糙度和汽车汽油的消耗量;
- 电机的效率;
- 轴和径向密封法兰盘的表面粗糙度;
- 表面的喷涂能力——新的粉末涂层;
- 电铸——高光洁表面的复制;
- 电子工业中的表面要求。

在国家标准局报告中的资料补充了我们论文中所报告的内容。

与本文开头部分有关的第二个资料来源是来自伯明翰大学,由 Henry Kaliszer 教授撰写的磨削表面质量和它的评定的调查结果的报告。在这篇调查报告中,来自欧洲和日本的划分为机床结构、轴承制造、汽车工业、航空和通用工程类别的三十几个公司反映了不少调查意见。尽管这个报告并没记载特殊的事例,但给出了工业领域的发展趋向,它证实了论文中的一些普遍结论。

附录 (略)

被调查的公司 (略)

强锡富、高龙宝 译自 《Annals of the CIRP》

1976, 25/2, p.569~573