

文章编号 1004-924X(2018)08-1994-18

## 三维表面粗糙度的表征和应用

何宝凤\*, 魏翠娥, 刘柄显, 丁思源, 石照耀

(北京工业大学 北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心, 北京 100124)

**摘要:**表面粗糙度会直接影响零部件的耐磨性、密封性以及抗腐蚀性等,是评定机械加工和产品质量的重要指标。现代科技水平的不断提高对零件表面性能的要求也日益严苛。传统的二维表面粗糙度的测量和表征已经不再能够满足技术发展的要求,三维表面粗糙度由于能够更加全面、真实地反映工件表面的状态而受到人们的重视,成为研究热点。本文回顾了三维表面粗糙度的发展历史,系统地介绍了三维表面粗糙度参数及标准的发展现状,分析了表面形貌与功能特性的联系,概述了三维粗糙度参数在制造业、生物医疗、摩擦学与材料科学等领域的广泛应用,并进一步指出了三维表面粗糙度表征和应用的发展方向。未来随着相关研究(比如,三维测量的溯源性、重复性、参数表征体系等问题)的深入以及三维表面测量手段的发展,三维表面粗糙度参数也将不断完善和推广,并更多地与实际功能相结合来预测并指导生产,确保工件的表面质量。

**关键词:**三维表面粗糙度;表面粗糙度参数;三维表面粗糙度表征;表面功能特性

**中图分类号:**TH161.14 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182608.1994

## Three-dimensional surface roughness characterization and application

HE Bao-feng\*, WEI Cui-e, LIU Bing-xian, DING Si-yuan, SHI Zhao-yao

(Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology and Instruments,  
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

\* Corresponding author, E-mail: baofenghe@aliyun.com.

**Abstract:** Surface roughness was an important indicator in the evaluation of a manufacturing process and a product's quality because it can directly affect the wear resistance, sealing performance, and corrosion resistance of parts. The surface quality was more demanding than ever before with the development of modern science and technology. Traditional two-dimensional surface roughness measurement and characterization can hardly meet the requirements, and therefore, three-dimensional measurement and characterization was becoming a research hotspot because it can comprehensively and truly reflect the surface topography. This study reviewed the development history of areal surface roughness, investigated the state-of-the-art areal surface roughness parameters and standards, systematically analyzed the relationship between surface topography and functional characteristics, and summarized the applications of areal surface roughness parameters in manufacturing, biomedical, tribology, materials science, etc. As the research advances (for example, the further study of traceability and repeatability of areal surface topography measurements, the parameters characterization system, and the maturity

收稿日期:2018-03-21;修订日期:2018-04-10.

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项资助(No. 2013YQ590395)

of additive manufacturing) and measurement techniques are developed, three-dimensional surface roughness parameters were sure to be completed and popularized in the future. It will better combine with the actual functions to predict the working performance and ensure the surface quality of the workpiece.

**Key words:** three-dimensional surface roughness; surface roughness parameters; three-dimensional surface roughness characterization; application; functional performance.

## 1 引言

在机械加工过程中,刀具与被加工工件表面之间存在的摩擦、切屑从工件表面分离时表层金属发生的塑性变形、工艺系统的高频振动等不可避免地会在工件表面留下微小的峰和谷状加工痕迹,构成了工件的表面形貌特征。表面形貌特征在科学研究和生产实践中占有重要地位,受到了学者的密切关注。表面粗糙度是表面形貌中的高频信息<sup>[1]</sup>,会直接影响零件的耐磨性、密封性、抗腐蚀性以及配合特性等,因此可以作为评定机械加工及产品质量的重要指标<sup>[2]</sup>。

表面粗糙度的测量和表征已有 100 多年的历史,现在已经成为制造业必不可少的一部分<sup>[3]</sup>。表面粗糙度与机械零部件表面性能的联系是从 1918 年飞机的设计中加工痕迹对疲劳强度的影响开始受到关注<sup>[4]</sup>,但由于测量困难和定量评定手段的缺乏,当时只能根据主观目测来确定和估计粗糙度对疲劳强度的影响。上世纪 20 年代末至 30 年代,德、美、英等国的专家研制出了轮廓记录仪和轮廓仪等接触式测量仪器以及以光切式显微镜和干涉显微镜为代表的非接触式测量仪器,使得表面粗糙度的定量评定得以实现<sup>[4]</sup>。1929 年,德国人 G. Schmalz 首次提出了表面微观形貌评定参数和测量基准线的概念<sup>[5]</sup>,堪称表面粗糙度研究史上的一次飞跃。此后,评定参数得到了深入的研究,标志着表面粗糙度的研究开始进入量化时代。美国的 E. J. Abbott 采用了距表面轮廓峰顶的深度和支承长度率曲线对表面粗糙度<sup>[5]</sup>与性能之间的联系进行表征。为了表彰他的研究贡献,轮廓支承长度率曲线被命名为 Abbott 曲线,作为二维参数的主要指标,一直沿用至今。

二维粗糙度的表征从无到有,已经逐渐得到了人们的认可,并广泛地用于科学分析和工程实践中。随着光学和图像处理能力的提高,表面形

貌的表征已经从二维形状误差、波纹度、粗糙度按照特定频率范围分离成分进行单项分析逐渐过渡到三维表面特征的综合评定,并制定了一系列三维表征参数。三维参数反映的是一定面积区域上的表面形貌特征,可以弥补二维参数统计性差、测量值偏差大、信息片面性等的不足,更接近真实表面情况。

本文首先回顾了三维表面粗糙度的发展历史,系统地介绍了三维表面粗糙度参数及标准的发展现状,其次详细列举了 ISO 25178 中常见三维表面参数的分类及定义,随后比较了三维表面粗糙度常用的测量方法,接着分析了表面形貌与功能特性的联系,概述了三维表面粗糙度参数在制造业、生物医学、摩擦学与材料科学等领域的广泛应用,最后进一步指出了三维表面粗糙度表征和应用的发展方向。

## 2 三维表面粗糙度的发展

三维表面粗糙度是在传统二维表面粗糙度无法满足日益发展的精密测量和应用受到限制的基础上产生和发展起来的,是表面粗糙度发展史上的重要里程碑。

### 2.1 二维表面粗糙度的发展

表面粗糙度标准的制订和完善是粗糙度参数得以发展的前提。1936 年,Schmaltz 提出了表面粗糙度评定参数标准化的建议<sup>[4]</sup>。上世纪 40 年代世界各国陆续颁布相应的国家标准以后,表面粗糙度评定参数才开始真正被广泛接受。

美国在 1940 年制订了关于粗糙度的国家标准,之后经过修订成为现在的 ANSI/ASME B46.1-1988《表面结构表面粗糙度、表面波纹度和加工纹理》。1945 年,前苏联也颁布了粗糙度标准,后修订为 GOCT2789-1973《表面粗糙度参数和特征》,其中规定了 6 个评定参数。尽管各国标准中规定的具体参数千差万别,但都采用了中线制作

为表面粗糙度参数值的评定基准线,并且主要参数均为  $Ra$ (或  $Rq$ )<sup>[4]</sup>。

在我国早先的国家标准中,表面粗糙度术语被称作光洁度,直到 1983 年颁布的 GB3505-83《表面粗糙度术语表面及其参数》、GB1031-83《表面粗糙度参数及其数值》和 GB131-83《机械制图表面粗糙度代号及其注法》替代了光洁度的旧标准<sup>[6]</sup>,使得标准术语由光洁度向粗糙度转变。

根据定义,表面粗糙度参数可以分为一维参数、二维参数和三维参数。一维参数主要由纵向(高度)和横向(波距)两类参数组成<sup>[7]</sup>。二维参数是在轮廓线上进行评定,可以综合反映纵向高度和横向距离之间的关系。一维和二维参数只反映表面某一直线方向的特征,无法代表整个表面,而三维评定则是选取一小块面积区域进行测量,涵盖  $x, y, z$  三个维度的坐标信息<sup>[8]</sup>。GB3505-83 受到当时技术水平的限制,只规定了 7 项表面粗糙度参数并且全部为一维参数,只能够单纯描述表面粗糙度的峰在高度方向的变化<sup>[9]</sup>。后来,我国参照国际标准对其进行了修订和扩充,相继颁布了 GB/T 131-1993《机械制图 表面粗糙度符号、代号及其注法》、GB/T 1031-1995《表面粗糙度参数及其数值》和 GB/T 3505-2000《表面结构的术语、定义及参数》,将表面粗糙度参数扩展到二维,从微观形貌的高度、间距和形状等方面的特征描述进行了定义。

虽然二维表面粗糙度的测量和表征在一段时间内得到了广泛的应用,但是基于轮廓特征的二维评定得到的结果是相对片面的,其所能反映的表面信息具有很大程度的局限性。三维表面粗糙度能够更加全面、真实地反映零件表面特征,并与表面功能建立起更紧密的联系,因此三维表面粗糙度的测量和表征获得了广泛的关注。

## 2.2 三维表面粗糙度的发展

时代的发展和科技水平的提升对零部件表面的测量和表征提出了更高的要求。传统的二维测量和表征已经不再能够满足工业发展的需求,而三维测量由原来的在表面轮廓上取样扩展到表面区域取样来更加真实全面的反映表面空间形貌特征。因此近年来表面粗糙度的测量和表征逐渐由二维向三维过渡。

三维表面形貌最早可以追溯到 20 世纪 70 年代 Grieve 等人设计了简单的操作系统用于记录

平行的轮廓曲线和绘制等高线图<sup>[10]</sup>。上世纪 80 年代,个人计算机的出现和普及使得空间分析成为可能,从而加快了三维表面形貌分析的发展<sup>[11]</sup>。

上世纪 90 年代,以英国伯明翰大学为首的研究团队在三维表面粗糙度表征方法的发展上得到了欧洲共同体的大力支持<sup>[12]</sup>。1993 年,伯明翰 14 参数(Birmingham 14 Parameters)的提出奠定了三维参数发展的基础,提供了一套基本的三维表面粗糙度评定标准<sup>[13]</sup>。

由于国际标准化组织中 ISO/TC 3“极限与配合”、TC 10/SC 5“尺寸和公差的表示法”、TC 57“表面特征及其计量学”以及在他们的基础上成立的“联合协调工作组”工作项目的交叉重叠,无法满足当时的发展需求<sup>[14]</sup>。因此,1996 年 6 月 14 日,成立了国际标准组织技术委员会 ISO/TC 213,专门负责表面形貌标准规范的修订。为了便于合作与管理,缩短决策到实施过程的时间,TC 213 在初期设立了 9 个提案咨询组(AG)、11 个工作组(WG),在这两个组织之间实行平行组织结构,AG 负责立项之前的研究,提出立项建议并定期检查工作进度;WG 负责已立项标准的制订以及修订工作<sup>[15]</sup>。

计算机和电子行业的飞速发展,使得科研人员开发了大量的表面粗糙度参数。然而,这些参数不仅在应用中呈现较大的局限性,而且其中很多参数从最根本的定义上看就存在许多不严密之处。参数的数量还在不断增殖,据统计,截止到 1980 年,表面粗糙度参数已达到一百多种。著名的表面计量学大师 D. J. Whitehouse 形象地将这一现象比作“参数爆炸”<sup>[16]</sup>。为避免“参数爆炸”的程度的进一步加深以及尽可能地减少三维表面粗糙度参数的数量,1998 年,欧共体资助了两个表面计量方面的大型研究项目,分别是由英国布鲁内尔大学牵头的 AUTOSURF 项目和英国哈德斯菲尔德大学牵头的 SURFSTAND 项目,为三维表面测量与评定标准的制订提供理论基础<sup>[17]</sup>。同年,大型表面计量研究项目中的由伯明翰大学负责的 STM4 项目定义了(14+3)参数体系,系统地完善了三维表面参数的标准体系<sup>[18]</sup>。

2002 年,AUTOSURF 项目进一步提出的参数补充到伯明翰 14 参数中<sup>[12]</sup>。同年,ISO/TC

213 成立了一个工作小组 WG 16 来处理表面结构测量方法三维标准。WG 16 制定了一些初步标准,包括了术语和参数的定义、校核方法、文件规格和仪器特性。

2003 年,“绿皮书”出版了 SURFSTAND 项目的详细研究成果<sup>[19]</sup>。此后,随着微型计算机软硬件、先进测量与分析技术的快速发展,三维表面粗糙度参数的研究得到了许多学者的关注并取得了快速的发展。对于三维表面粗糙度参数的测量和分析方法的标准化的基础性研究工作也得到了开展。

2005 年,ISO/TC 213 在粗糙度标准草案 ISO/TC 213N756 中将三维粗糙度参数划分为 5 组:高度参数、体积参数、功能参数、混合参数以及

空间参数,共计 23 个参数。2010 年 ISO/TC 213 发布了产品几何技术规范标准 ISO 25178 (Dimensional Geometrical Product Specification - Surface texture; areal),主要作用在于:(1)定义其他地方不常用的术语及参数;(2)介绍一种证明仪器可以安全使用并达到其技术规范的方法;(3)仪器安装后的性能验证<sup>[20]</sup>。表 1 对三维表面粗糙度发展史上的主要参数体系以及各体系定义的三维表面参数进行了归纳(表格中的空白表示没有此项内容),并用不同颜色对各个参数体系加以区分。纵向可以比较不同参数体系的分类情况,横向能够对比每类参数在数量及表征符号方面的差异。

表 1 三维表面粗糙度参数体系

Tab.1 The system of areal surface roughness parameters

类别 \ 体系	伯明翰 14 参数	STM4 项目定义的 (14+3)体系	ISO/TC 213N756	ISO25178
高度参数	$Sq, Sz, Ssk, Sku$	$Sq, Sz, Ssk, Sku$	$Sa, Sq, Ssk, Sku, Sp, Sv, Sz$	$Sa, Sq, Ssk, Sku, Sp, Sv, Sz$
间距参数	$Sds, Str, Sal, Std$	$Sds, Str, Sal, Std$	$Sds, Str, Sal, Std$	$Str, Sal$
混合参数	$S\Delta q, Ssc, Sdr$	$S\Delta q, Ssc, Sdr$	$Sdq, Ssc, Sdr$	$Sdq, Sdr$
功能参数	$Sbi, Sci, Svi$	$Sbi, Sci, Svi, Sm, Sc, Sv$	$Smr, Sdc, Smc$	$Sxp, Smr, Sdc, Vv, Vvv, Vvc, Vm, Vmp, Vmc$
体积参数			$Vv, Vvv, Vvc, Vm, Vmp, Vmc$	
特征参数				$Spd, Spc, S10z, S5p, S5v, Sda, Sha, Sdv, Shv$
其他参数				$Std$

如表 1 所示,每一列为同一个参数体系,通过对比,可以看出著名的伯明翰 14 参数定义了 14 个基本的三维参数,包括 4 个高度参数、4 个间距参数、3 个混合参数和 3 个功能参数;而后来的 14+3 体系又在这 14 个基本参数的基础上添加了 3 个功能参数,分别是材料体积  $Sm$ ,核心区体积  $Sc$  和深谷区体积  $Sv$ 。ISO/TC 213N756 较之前的参数体系发生了很大的改变,首先是将高度参数由原来的 4 个扩展到了 7 个,增加了表面的算术平均高度  $Sa$ ,表面最大波峰高度  $Sp$  和表面最大波谷深度  $Sv$ ;间距参数与原来相同;混合参数中的表面均方根斜率符号由  $S\Delta q$  改成了  $Sdq$ ;功能参数舍弃了之前的参数,重新定义了 3 个新的参数,即表面支承面积比  $Smr$ ,表面支承面积比的高度  $Sdc$  和区域表面的高度差  $Smc$ 。此外,ISO/

TC 213N756 还增加了 6 个体积参数,然而,在 2010 年出版的 ISO25178 中,这 6 个体积参数虽然完全被保留下来但却划分到功能参数一组。同时,功能参数中的支承面积比  $p$  和  $q$  之间的高度差  $Smc$  改为了  $Sxp$ 。混合参数中的表面算术平均峰曲率  $Ssc$  被舍弃,表面纹理方向  $Std$  从间距参数中被分离出来,单独作为一组。当然,ISO25178 与之前参数的标准体系相比,最大的不同之处还是 9 个特征参数的提出,专门用于描述三维表面形貌特征。

我国根据 ISO25178 系列标准也制定了国家区域法测量零部件表面结构的技术规范 GB/T 33523《产品几何技术规范(GPS)表面结构 区域法》,并于 2017 年 9 月 1 日开始实施<sup>[21]</sup>,如表 2 所示,该技术规范主要包括以下几个部分。

表 2 GB/T 33523《产品几何技术规范(GPS) 表面结构区域法》

Tab. 2 GB/T 33523 “Dimensional Geometrical Product Specification-Surface texture: areal”

GB/T 33523 系列	标题
GB/T 33523. 2-2017	术语、定义及表面结构参数
GB/T 33523. 3-2017	规范操作集
GB/T 33523. 6-2017	表面结构测量方法的分类
GB/T 33523. 7-2017	软件测量标准
GB/T 33523. 601-2017	接触(触针)式仪器的标称特性
GB/T 33523. 602-2017	非接触(共聚焦色差探针)式仪器的标称特性
GB/T 33523. 603-2017	非接触(相移干涉显微镜)式仪器的标称特性
GB/T 33523. 604-2017	非接触(相干扫描干涉)式仪器的标称特性
GB/T 33523. 605-2017	非接触(点自动对焦)式仪器的标称特性
GB/T 33523. 701-2017	接触(触针)式仪器的校准及测量标准

GB/T 33523 的 2、3、6、7 部分分别对三维测量的基本要素进行限定,具体包括参数、术语、操作、软件及测量方法等方面;601 和 701 部分规定了接触式测量仪器的特性和测量标准;6xx (602-605) 系列针对不同的非接触式测量仪的标称特性做出了单独的规定。

受到 Whitehouse 教授提出的“参数爆炸”观点的启发,诺丁汉大学的 Leach 教授和 Zygo 公司的 Groot 针对目前 ISO 25178 系列子文件不断增殖的现象提出了“标准爆炸”的论点,预计将来 ISO 25178 系列标准或将产生 30 多个独立的子标准<sup>[22]</sup>。

### 3 三维表面粗糙度参数的定义

不同于二维表面形貌的表征,三维表面形貌的表征是依据有限尺度表面类型而统一定义参数,并没有以 3 组不同的参数来分别表征轮廓、波纹度和粗糙度。例如,均方根偏差在三维参数中只有  $Sq$  这一个参数,它具体代表的含义取决于滤波时所采用的有限尺度表面的类型,而不再以轮廓参数  $Pq$ ,波纹度参数  $Wq$ ,粗糙度参数  $Rq$  进行区分<sup>[23]</sup>。

ISO 25178 将三维参数分成 6 组,主要包括:高度参数、间距参数、混合参数、功能参数和特征参数和其他参数,如图 1 所示。此外,还有未列出的部分特征参数,如  $Sk$  系列则是针对具有分层特征的表面根据面积材料比函数定义的三维参数。

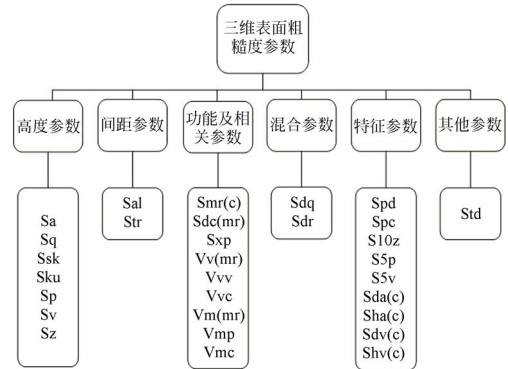


图 1 ISO 25178 规定的三维表面粗糙度参数

Fig. 1 Three-dimensional surface roughness parameters defined in ISO 25178

虽然三维表面粗糙度参数有很多,但是每个参数的含义与算法不尽相同。

#### (1) 高度参数

高度参数反映表面形貌的区域高度偏差,部分参数的数学表达式是已有的二维表面粗糙度参数在三维空间上的扩展。但值得注意的是,它们并不能和相对应的二维表面粗糙度参数进行直接比较。这是因为两种参数选取的滤波器的种类截然不同。主要的高度参数的定义和数学表达式详见表 3。其中  $A$  为取样区域,  $z(x, y)$  表示在位置  $(x, y)$  处的高度。

表 3 高度参数

Tab. 3 Height parameters

参数	定义	数学表达式
$Sq$ / $\mu\text{m}$	取样区域内的均方根高度	$Sq = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dxdy}$
$Ssk$	取样区域内的偏斜度	$Ssk = \frac{1}{Sq^3} \left[ \frac{1}{A} \iint_A z^3(x, y) dxdy \right]$
$Sku$	取样区域内的峰态	$Sku = \frac{1}{Sq^4} \left[ \frac{1}{A} \iint_A z^4(x, y) dxdy \right]$
$Sa$ / $\mu\text{m}$	取样区域内的算术平均高度	$Sa = \frac{1}{A} \int_A  z(x, y)  dxdy$

#### (2) 间距参数

间距参数反映的是水平方向上表面形貌特征的间距,对于识别被测工件表面形貌的纹理特征具有重要意义,可以表征工件的表面形貌是各向同性还是各向异性。间距参数是基于自相关函数

(Autocorrelation function, ACF) 定义的。

为了有效地描述表面的空间特性,利用表面的统计性、相关性和频率分析参数对表面粗糙度进行全面的测量和定量分析,引入了自相关函数用于描述一个表面和由  $(tx, ty)$  所转换的相同表面之间的相关性。ISO25178-2 中给出了 ACF 的数学方程:

$$ACF(tx, ty) = \frac{\iint_A z(x, y) z(x - tx, y - ty) dx dy}{\iint_A z(x, y) z(x, y) dx dy} \quad (1)$$

ACF 描述了一个位置对另一个位置上的数据值的一般依赖性,它提供了有关数据的空间关系和依赖性的基本信息。例如,ACF 在交叉方向上迅速衰减,这表明在相应方向上的数据相关性较低,而 ACF 在沿着表面纹理方向衰减缓慢,则表面在相应方向上的数据相关性较高。显然,ACF 的这种特性提供了一种很好的方法来区分表面纹理的各向同性和各向异性。

间距参数的定义和数学表达式详见表 4。

表 4 间距参数  
Tab.4 Spatial parameters

参数	定义	数学表达式
$Sal$ / $\mu\text{m}$	自相关长度	$Sal = \min \sqrt{tx^2 + ty^2}$
$Str$	纹理特征比	$Str = \frac{\min \sqrt{tx^2 + ty^2}}{\max \sqrt{tx^2 + ty^2}}$

(3) 混合参数

相比于高度参数单一地给出表面形貌特征在竖直方向上的信息和间距参数单一地给出水平方向上的信息,混合参数既可以反映被测工件表面在竖直方向上的振幅又可以反映水平方向上的间距。混合参数的定义和数学表达式详见表 5。

(4) 功能参数

功能参数的定义主要针对解决工程实际的具体应用如零件表面的摩擦,密封和润滑能力等问题。例如: $Vmp$  值较大代表较好的承载能力; $Vvv$  和  $Vvc$  较大代表较好的润滑能力等。功能参数在表征摩擦学方面具有重要的意义。主要的功能参数的定义和数学表达式详见表 6。

表 5 混合参数

Tab.5 Hybrid parameters

参数	定义	数学表达式
$Sdq$ /rad	取样区 域内的 均方根 梯度	$Sdq = \sqrt{\frac{1}{A} \int_0^{tx} \int_0^{ty} (\frac{\partial^2 z(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z(x, y)}{\partial y^2}) dy dx}$
$Sdr$	取样区 域内的 界面面 积比	$Sdr = \frac{1}{A} \iint_A (\sqrt{1 + \frac{\partial^2 z(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z(x, y)}{\partial y^2}} - 1) dx dy$

表 6 功能参数

Tab.6 Functional parameters ( $\mu\text{m}^3 / \mu\text{m}^2$ )

参数	定义	数学表达式
$Vm$	材料体积	$Vm(mr) = \frac{K}{100\%} \int_0^{mr} (Sdc(q) - Sdc(mr)) dq$
$Vmp$	取样区域 内的峰材 料体积	$Vmp = Vm(p)$ $P$ 的默认值为 10%
$Vmc$	取样区域 内的核心 材料体积	$Vmc = Vm(q) - Vm(p)$ $p$ 的默认值为 10%, $q$ 为 80%
$Vv$	空隙容积	$Vv(mr) = \frac{K}{100\%} \int_{nr}^{100\%} (Sdc(mr) - Sdc(q)) dq$
$Vvc$	取样区域 内的核心 空隙容积	$Vvc = Vv(p) - Vv(q)$ $p$ 的默认值为 10%, $q$ 为 80%
$Vvv$	取样区域 内的谷空 隙容积	$Vvv = Vv(p)$ $p$ 的默认值为 80%

三维功能参数在保持与二维功能参数延续性的同时,克服了二维功能参数的理论缺陷,对于所有工程表面都有明确测量值。三维功能参数和表面的精度并无直接关系,三维功能参数是以 Abbott 曲线为基础的,该参数对反映表面支承能力和表征工件使用寿命具有非常重要的意义。

(5) 特征参数

与其他三维表面粗糙度参数不同,特征参数的定义不是通过数学表达式给出,而是通过图案

识别技术的工具箱在取样区域内识别出表面的形貌特征。具体包括表面形貌类型的选取、分区、主要特征的识别、特征属性的选取和特征属性的量化统计等步骤。主要的特征参数的定义详见表 7。其中, Wolfprune 表示一种空间滤波器; FC 代表特征描述; H 表示取样区域内的小山; P 表示取样区域内的峰; D 表示取样区域内的山谷。

表 7 特征参数

Tab.7 Feature parameters

参数	定义	描述
$S_{pd}$ $/\mu\text{m}^{-2}$	峰密度	$S_{pd} = \text{FC}; \text{H}; \text{Wolfprune}; \text{X}\%$ ; All; Count; Density 如无特殊说明, $x$ 的默认值为 5
$S_{pc}$ $/\mu\text{m}^{-1}$	算术平均峰值 曲率	$S_{pc} = \text{FC}; \text{P}; \text{Wolfprune}; \text{X}\%$ ; All; Curvature; Mean 如无特殊说明, $x$ 的默认值为 5
$S_{da}$ $/\mu\text{m}^{-2}$	封闭的 谷区域	$S_{da}(c) = \text{FC}; \text{D}; \text{Wolfprune}; \text{X}\%$ ; Open; c; Area; Mean 如无特殊说明, $x$ 的默认值为 5, 主要的特征区域均为闭合
$S_{ha}$ $/\mu\text{m}^{-2}$	封闭的 山区域	$S_{ha}(c) = \text{FC}; \text{H}; \text{Wolfprune}; \text{X}\%$ ; Open; c; Area; Mean 如无特殊说明, $x$ 的默认值为 5, 主要的特征区域均为闭合

#### (6) 其他参数

在 ISO25178 中,  $S_{td}$  被单独作为一组, 是角度功率谱绝对值的最大值, 表示表面的纹理方向, 其值介于  $0^\circ \sim 180^\circ$  之间。

## 4 三维表面粗糙度的测量和表征

表面粗糙度参数是对表面空间特征和功能特性的量化反映, 在产品设计和制造中有着重要的作用。如图 2 所示, 表面形貌特征的测量和表征是质量控制的重要手段。通过表面粗糙度的测量将产品表面特征反馈给加工制造环节来帮助控制和优化制造工艺, 决定和反映功能特性, 从而实现质量控制的闭循环体系。表面形貌的测量和表征在工业中起到桥梁的作用: 一方面连接生产环节, 帮助控制加工工艺生产出合格的产品; 另一方面连接应用环节, 量化表达产品具有的实际功能, 评

价产品使用性能的优劣<sup>[24]</sup>。

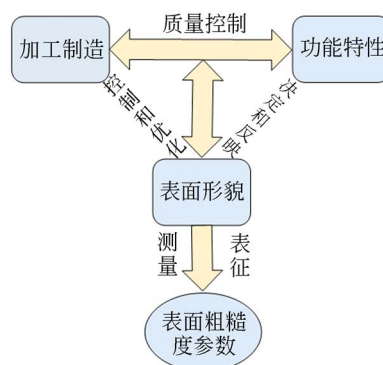


图 2 表面粗糙度的表征与功能特性的关系

Fig.2 Relationship between surface roughness characterization and functional characteristics

表面形貌的测量与表征对于表面研究而言具有重要意义。一般来说, 表面形貌是通过视觉测量技术获得视觉图像(3D图)然后通过软件进行数据处理和分析, 得到一系列参数对其特征进行量化评价的<sup>[25]</sup>。表面粗糙度与表面形貌的关系可以从以下两个方面分析: (1) 从频率方面, 表面粗糙度是表面形貌中的高频成分; (2) 从波距角度来看, 表面粗糙度是表面形貌信息中波距小于 1 mm 的部分。因此, 表面粗糙度的测量一般是在表面形貌测量的基础上通过滤波器滤除其他成分信息实现的。

三维表面测量仪器的发展以 1968 年推出的三维表面触针式轮廓仪和 1976 年研制出的第一台由微机控制三维表面粗糙度轮廓仪为开始的标志<sup>[26]</sup>。近年来, 随着计算机技术、电子技术和信息技术的应用及发展, 许多三维表面形貌测量仪得到研究和商业化生产, 如英国的 Taylor Hobson、德国的 Mahr 和 Polytec、美国的 Zygo 和 Veeco 以及法国的 Fogale nanotech 相干扫描干涉仪 (Coherence Scanning Interferometers, CSI)<sup>[16]</sup> 生产公司, 使得在局部表面上评定三维表面粗糙度成为可行。

三维表面粗糙度的测量方法有很多, 一般根据测量仪器是否与被测表面接触分为接触式测量和非接触式测量两大类。触针式仪器是典型的接触式测量法的代表, 自 1927 年以来就一直被采用, 直至今日仍然被广泛地用于表面粗糙度测量, 并且触针法测量获得的结果经常作为评价其它方法测量精度的参考标准<sup>[27]</sup>。触针式粗糙度测量

仪的基本结构和测量原理如图 3 所示,触针沿着垂直于加工纹理的方向在被测表面轻轻划过,通过被测表面的高低起伏令触针在  $z$  轴方向发生微小位移来反映表面的微观高度信息<sup>[28]</sup>。与二维接触式测量不同的是,三维接触式测量在二维测量的基础上沿加工纹理方向增加  $y$  方向的微小进给,使触针完成轮廓扫描后,由数控工作台带动被测工件沿  $y$  方向移动一段微小的距离(或者是将传感器机械结构部分增加  $y$  方向的位移),得到被测区域的三维数据,被传感器捕捉并加以放大,最后通过输出装置以数据或图形的方式输出。

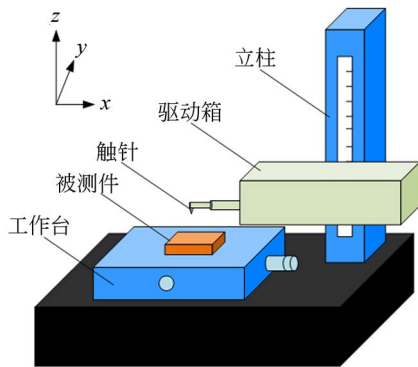


图 3 触针式粗糙度测量仪的基本结构

Fig. 3 Basic structure of stylus roughness measuring instrument

但是,不论是在 2D 还是 3D 分析中,触针的几何形状都会对测量结果的准确性产生很大影响,比如,针尖的半径增加了峰的高度,而减少了谷的深度;触针施加的作用力在与表面接触的区域产生应变;针尖会对被测试件表面造成一定程度的损伤等,这也是接触式测量法的主要局限性。

非接触式测量以光学法测量为例,基本原理是将一个光源投射到被测物体上并处理反射信号以确定它的垂直范围。现在广泛应用的非接触测量主要是相干扫描干涉法,如图 4 所示,通过逐层扫描干涉条纹,定位被测表面各点的最佳干涉位置,获得表面各点的相对高度,从而实现对物体三维形貌的测量<sup>[29]</sup>。

光学法测量和触针法测量是两种主要的表面形貌测量方法。国内外很多学者系统地比较了这两种基本的测量方法<sup>[28,30-31]</sup>。表 8 总结了这两种方法的主要优缺点。

非接触测量的主要优势在于避免了接触测量

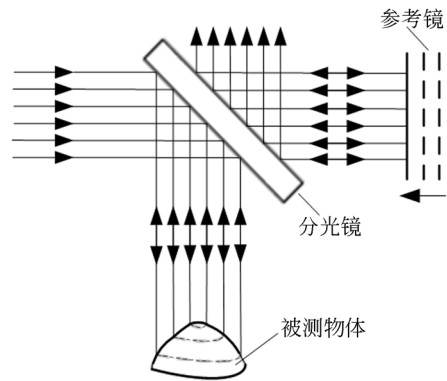


图 4 相干扫描干涉法测量原理

Fig. 4 Measurement principle of coherent scanning interferometry

过程中产品的变形和机械误差,但是非接触测量也包含了很多光学误差源。光学法由于较快的扫描速度和较高的分辨率更适合三维表面形貌测量<sup>[32]</sup>。通常,光学法测量和触针法测量的结果无法达成一致,即便是相同原理的仪器得到的测量结果也不尽相同。通常,触针式表面形貌测量法得到的结果可以作为光学法的一种参考,当然,理想的测量方案是将二者的优势完美结合。

表 8 触针法和光学法对比

Tab. 8 Comparison between stylus and optical methods

触针法	光学法
可能有损	无损
测量几何结构	测量光路
针尖尺寸与角度独立	光分辨率依赖于角度
触针会折断	探针不会折断
对工件的倾斜不敏感	只允许有限的倾斜
测量速度相对较慢	测量速度非常快
可以用来测量物理参数和几何形状	只有光路
所有尺度都可以进行粗糙度校准	很难按标准进行校准
标准颁布较早且完备(2D 比如 ISO 4287 / 4288, 3D 已颁布 ISO 25178)	标准(ISO 25178)颁布较晚且在不断完善中

此外,ISO5178-6:2010《产品几何技术规范(GPS)表面结构区域法第 6 部分:表面结构测量方法的分类》将测量方法分为线轮廓法、区域形貌法和区域特征集成法三大类,以便选择和理解不同类别的测量方法<sup>[33]</sup>。根据测量机理的不同,三维表面测量仪器还可以划分为触针式测量仪、光学式测量仪和扫描显微镜测量仪<sup>[26]</sup>。触针式测

量仪操作简单、通用性强,但容易损伤表面,并且触针磨损也会导致横向分辨率降低。光学式量仪虽然不会损伤工件表面,但对被测表面的清洁度要求较高,对于反射性较差或有较大倾斜度的表面容易造成测量失真<sup>[26]</sup>。扫描显微镜测量仪的分辨率高,测量范围小,在微纳表面测量方面具有极大优势<sup>[34]</sup>,但测量条件比较苛刻。总之,不同测量原理的三维表面测量仪器各有优劣,要根据实际情况进行选择。这部分在记者的另一篇文章

中有详细介绍。

## 5 三维表面粗糙度的应用

虽然三维表面粗糙度参数在实际工程表面中的应用只有短短二十几年的时间,但是它却在制造业、材料、化学、生物、医药等许多方面都得到了不同程度的应用。与功能特性相关的区域表面分析的部分工业应用实例见表 9。

表 9 三维表面粗糙度参数的应用

Tab. 9 Applications of areal surface roughness parameters

研究者	年份	应用领域	所采用的参数	参考文献
Stout and Sullivan	1991	轧制钢板表面	$Sa, Sq, Ssk, Sku$	[35]
Wennerberg <i>et al.</i>	1995	工程与生物材料表面	$Sa, Sq, Sz, Ssk, Sku, Sk, Spk, Svk, Srl, Sr2$	[36]
Dong and Stout	1995	表面磨损	$Sq, Sz, Ssk, Sku, Sal, Str, Sds, S\Delta q, Ssc, Sdr, Svi, Sbi$	[37]
Blunt and Ebdon	1996	砂轮形貌	$Sds, Sq, Sz, Ssk, Sku, Str, Sal, Std, S\Delta q, Ssc, Sdr, Sbi, Sci, Svi$	[38]
Xie <i>et al.</i>	1999	冷轧钢板	$Sq, Sds$	[39]
Jiang, Blunt and Stout	1999	生物工程	$Sq, Sz, Ssk, Sku, Sds, Str, Sal, Std, S\Delta q, Ssc, Sdr, Sbi, Sci, Svi$	[40]
Ramasawmy and Blunt	2001	电火花加工抛光表面	$Sq, Sz, Sds, Sm, Sc, Sv, Sa, S5z$	[41-42]
Butler <i>et al.</i>	2002	砂轮	$Sds, Ssc, Sq$	[43]
Al-Nawas <i>et al.</i>	2003	牙科植入体	$Sa, Sdr$	[44]
Suh <i>et al.</i>	2003	圆盘和钢钉的磨损情况	$Sa, Sq, Sz, Ssk, Sku, Sds, Str, Std, S\Delta q, Ssc, Sdr, Sbi, Sci, Svi$	[45]
王金明等人	2004	复合材料切削表面粗糙度	$Sa$	[46]
Benard <i>et al.</i>	2005	复合材料的附着力	$Sa$	[47]
Kundrak <i>et al.</i>	2006	钻孔	$Sa, Sq, Sz, Ssk, Sku, Sds, Str, Std, Sal, S\Delta q, Ssc, Sdr, Sbi, Sci, Svi$	[48]
Krzyzak and Pawlus.	2006	活塞裙面磨损	$Sq, Ssk, Str, S\Delta q, St\pm 3\sigma, Sku, Sds, Ssc$	[49]
Senin <i>et al.</i>	2006	聚类分割	$Sa, Sq, Sz, Ssk, Sku, Sds, Str, Std, S\Delta q, Ssc, Sdr, Sbi, Sci, Svi$	[50]
艾传智和赵福令	2005, 2006	碳/碳复合材料切削表面粗糙度	$Sa, Sq$	[51-52]
Bénard <i>et al.</i>	2006	玻璃/环氧树脂和碳/环氧复合材料之间的粘附性	$Sa$	[53]
L. T. Brown <i>et al.</i>	2006	人工髋关节柄的磨损	$Sq, Sz, Ssk, Sku, S\Delta q, Vmp, Vvv, Vvc$	[54]
Sul <i>et al.</i>	2007	骨中的钛植入体	$Sa, Sdr, Sds$	[55]
Le Guéhennec <i>et al.</i>	2007	用于快速骨整合的牙科钛植入体	$Sa$	[56]
袁成清等人	2007	磨粒的表面形貌	$Sa, Sq, Ssk, Sku, Std$	[57]
Ávila <i>et al.</i>	2008	涂层硬质合金刀具的月牙洼磨损	$Sa, Sq, Sk, Svk, Spk, Ssk, Sku$	[58]

续表 9

研究者	年份	应用领域	所采用的参数	参考文献
Michalski	2008	圆柱齿轮齿腹	$SP_a, SP_q, S_{pt}, SP_{sc}, SP_{ku}, S_{p\Delta a}, SP_{mr}, SP_{sk}$	[59]
Waikar and Guo	2008	车削和磨削表面	$S_a, S_q, S_p, S_v, S_z, S_{sk}, S_{ku}, S_{ds}, S_{tr}, S_{al}, S_{td}, S_{\Delta q}, S_{sc}, S_{dr}, S_{Tp}, S_{mmr}, S_{mvr}$	[60]
Nguyen and Butler	2008	砂轮形貌	$S_{ds}, S_{sc}, S_q, S_{al}$	[61]
Aris and Cheng	2008	精加工表面	$S_z, S_q, S_{sk}, S_{ku}, S_{sc}, S_{\Delta q}, S_{sc}, S_{al}, S_{dr}$	[62]
李伯奎	2008	摩擦磨损性能	$S_{sk}, S_{ku}$	[63]
Scardino <i>et al.</i>	2009	防污技术	$S_a, S_{sk}, S_{tr}$	[64]
Czifra and Horváth	2011	滑动摩擦	$S_q, S_{ku}, S_{\Delta q}$	[65]
Wang <i>et al.</i>	2011	生物医用钛表面纹理	$S_{ds}, S_{sc}, S_{pd}, S_{pc}, S_{vd}, S_{vc}, S_{10z}, S_{5p}, S_{5v}, S_a, S_q, S_{sk}, S_{ku}, S_z, S_{tr}, S_{dr}, S_{mc}, S_{xp}, S_k, V_{mp}, V_{mc}, V_{vv}, V_{vc}, S_{pc}, S_{10z}, S_{5p}, S_{5v}, S_{da}, S_{ha}$	[66]
Tian <i>et al.</i>	2011	骨关节炎的软骨表面		[67]
墨洪磊等人	2012	固结磨料研磨 K9 玻璃的材料去除率	$S_a$	[68]
张丘等人	2012	高聚合物粘结炸药(PBX)表面粗糙度	$S_a$	[69]
王晓强等人	2014	耐磨性	$S_q, S_{bi}$	[70]
Natalija Bulaha	2015	圆柱形磨削表面的使用性能	$S_a, S_{tr}, S_{sk}, S_{mr1}, S_{mr2}, V_v, V_{vc}, V_{vv}, V_m, V_{mp}, S_{dr}, S_z, S_{ku}, S_k, S_{pk}, S_{vk}$	[71]
刘泊等人	2016	研磨标准样块的表面形貌分析	$S_q, S_{sk}, S_{ku}, S_z, S_{sc}, S_{\Delta q}$	[72]
徐善华等人	2016	Q235 钢板的锈蚀率	$S_a, S_q, S_{sk}, S_{ku}, S_z, S_p, S_v$	[73]
杨洁等	2016	端铣、刨、车削加工的不同等级样块表面形貌	$S_q, S_{sk}, S_{ds}$	[74]
郑立功等人	2016	砂轮形貌	$S_p, S_q, S_{sk}, S_{ku}$	[75]
谢俊峰等人	2017	Waspaloy™镍基高温合金塑性变形局部化	$S_p$	[76]
Gong M <i>et al.</i>	2017	指接板齿梳子表面粗糙度对胶合性能的影响	$S_a, S_{dq}$	[77]

表中列出了区域表面纹理参数的主要开发和应用领域,从中可以看出,随着时间的推移以及研究的深入,所采用的参数也在发生着变化。

高度参数中的  $S_a$  表示在取样区域内被测表面上各点与参考平面的高度绝对值的算术平均值,能够从总体上对表面的高度偏差进行描述,一般用于描述机械加工后的表面形貌,生物材料表面,复合材料表面的附着力以及材料的去除率和钢板的锈蚀率。 $S_p, S_v, S_z$  是表面高度极值函数,不同采样区的位置、大小以及采样精度对极值函数影响非常大,因此,单独使用时的稳定性和有效性不能保证,只有与其他参数配合使用时才能够更加全面地反映表面形貌。 $S_q$  代表表面高度分布的标准偏差,在反映参数高度的分布和在粗

糙度的表征上比  $S_a$  更具有统计学意义。 $S_{sk}$  表示在取样区域内被测表面上各点与参考平面的高度的纵坐标值平均立方值与  $S_q$  值的立方的比值,反映表面高度分布直方图的不对称性,参数值会受孤峰或谷的强烈影响,且  $S_{sk}=0$  表示呈对称的高度分布; $S_{sk}<0$ ,说明此表面为有孔洞支承的曲面,大部分实体材料分布在参考面之上; $S_{sk}>0$ ,表明表面上有尖峰,大部分实体材料在参考面之下,因此  $S_{sk}$  可以用来区分具有相同  $S_a$  值的表面。此外,  $S_{sk}$  与表面的支承性、储油性、磨损性紧密相关。支承性好的表面,  $S_{sk}$  为负数,表明存在较少的丘陵结构,容易被快速磨损掉,但存在较深的谷,可以储存更多的润滑油。 $S_{ku}$  反映的是表面形貌的陡峭度,其数值越小,说明表面高度分

布曲线越扁宽,反之,其值越大,则高度分布曲线越高陡。 $Sku=3$ 时,表面呈高斯分布。 $Sku$ 在预测零部件磨损与润滑相关性能方面同样十分有效<sup>[78]</sup>。 $Sq, Ssk, Sku$ 是3个具有统计意义的参数,应用非常广泛,并且很多情况下同时采用这三个参数进行表征。

间距参数用以评估三维表面纹理特性,尤其可以用来区分表面具有规则纹理结构还是随机结构。对于珩磨表面,一般具有较高的纹理纵横比、最快衰减的自相关长度<sup>[79]</sup>。 $Sal$ 数值较大,表明低空间频率成分占据表面的主导地位,数值较小,则表明高空间频率成分占据表面的主导地位<sup>[78]</sup>。 $Str$ 的值介于0到1之间,其值较小时,表明表面存在强烈的定向结构;其值较大时,则表明表面没有确定的纹理方向。

混合参数综合了幅度和间距信息,与表面的电磁接触特性、密封特性以及光反射特性密切相关<sup>[79]</sup>。表面的均方根斜率 $Sdq$ 和表面接触面积比 $Sdr$ 同样可以用于区分表面是光滑还是粗糙。 $Sdr$ 表示两个表面接触时面积的增量与原面积的比值。 $Sdq$ 和 $Sdr$ 值越小,说明表面越光滑。

功能参数可以用于零件表面的功能特性的表征。体积参数的大小是依据表面峰带、中间带、底带三个高度进行计算的。理想的汽车支承面具有较好的承载和润滑特性,则需要较大的材料体积和谷容积<sup>[79]</sup>。功能参数中的 $Sbi, Sci$ 和 $Svi$ 可以很好地表征表面的支承性能、摩擦磨损性能及润滑性能。三维功能参数对于周期性较强的表面如车削、铣削、刨削、镗削和随机性较强的表面如平磨、外磨在数值会出现较大差异<sup>[80]</sup>。

特征参数中 $Spd$ 和 $Spc$ 反映了微观特征的基本几何信息。 $Spd$ 表示一个单位取样区域内的峰数,该参数在摩擦学中具有重要的研究价值。 $Spd$ 和 $Spc$ 都受测量时的采样间隔影响较大。其他参数中的 $Std$ 表示表面的纹理方向,其值介于 $0^\circ$ 到 $180^\circ$ ,是角度功率谱绝对值的最大值。

一般以一个或几个参数对表面进行评定的结果是不全面的,需要综合多个参数进行多方面表征才能够客观评定表面特征<sup>[81]</sup>。例如, $Sku, Sdr, Vmp, Vmc$ 和 $Vvv$ 在表征摩擦和润滑剂的蓄积能力的方面有重要的应用; $Sa$ 和 $Sdr$ 可用于表征生物学中移植物体的表面形貌; $Sq, Sds$ 和

$Sa$ 可用于表征电化学抛光表面; $Sds, Sq$ 和 $Sal$ 可用于表征磨削齿轮的表面形貌等。

此外,国内外许多学者在三维表面粗糙度参数对表面功能特性的表征方面进行了研究。例如,B. He等人对三维表面粗糙度参数在工程实际的预测功能加以研究。在三维表面形貌影响玻璃基板与所镀铜膜之间的微连接强度的研究中, $Spc, Sq, Vvc$ 和 $Sdq$ 与临界载荷具有很好的相关性,对于预测具有任意表面形貌的结构表面的玻璃基板在镀铜膜后与铜导线的微连接强度很有帮助,可以避免后续的破坏性试验而直接进行筛选,在实际的生产实践中具有重要的指导意义<sup>[82]</sup>。D. J. Whitehouse等提出了一种通过功能图评价表面特性的方法<sup>[83]</sup>。但是在用功能图表征某些表面功能特性时具有一定的局限性。因此,为了获得高质量和期望功能特性的表面,必须准确理解和掌握表面的加工制造过程、测量和表征以及功能特性之间的联系,通过控制加工过程获得理想功能表面<sup>[84]</sup>。Q. Qi等人通过斯皮尔曼相关性分析研究了三维表面粗糙度参数之间的联系,建立了一个3层参数树<sup>[85]</sup>,如图5所示,期望能够帮助工程师合理地选择参数。

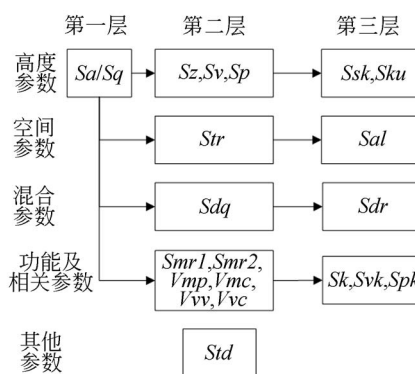


图5 三维参数树<sup>[85]</sup>

Fig. 5 Areal parameters tree

从相关性来看,不同参数组之间的关系是十分复杂的,即便是同组参数之间也有的呈强相关,有的呈弱相关,但他们之间都存在着一定的联系(除 $Std$ 以外)。 $Sa$ 与 $Sq$ 呈现最强相关,二者可以互换并且与大多数参数之间都存在着紧密联系,是最典型的参数,因此被选作参数树的起点;第二层参数通常会比第三层参数的使用频率要高; $Std$ 是完全独立的参数,与其他参数之间几乎没有联系或联系微乎其微,因此其使用频率也相

对较低。

L. D. Todhunter 等人经过八个月的调研,收到 34 个国家共计 179 个工业用户的反馈信息,将 ISO 25178-2 标准中的三维参数划分为场参数、功能参数和特征参数三类,分别对其使用频率以及行业分布进行了统计分析<sup>[86]</sup>。这份调研将视角转向了三维参数在实际工业中的应用,包括研究机构、计量标定、航空和自动化、电子工业以及产品加工等领域。根据分析结果,将所有三维参数的坐标轴进行统一,得到了图 6。

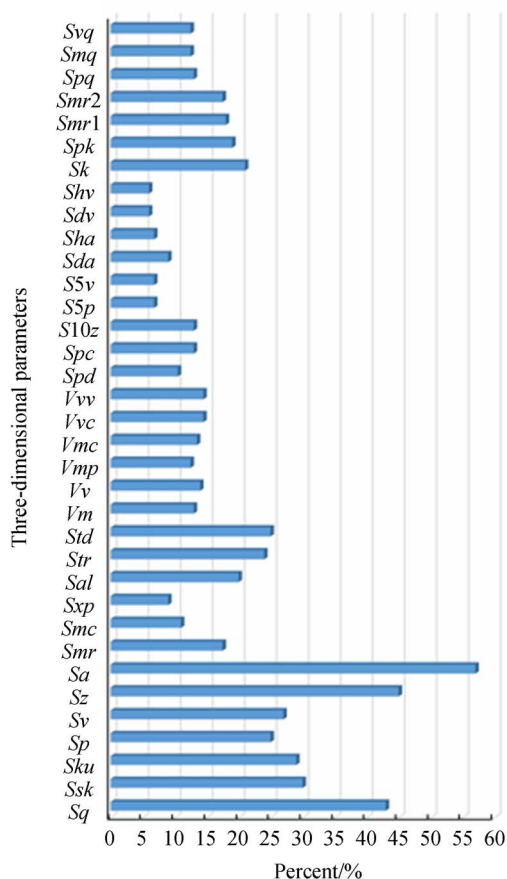


图 6 三维表面参数的使用率<sup>[86]</sup>

Fig. 6 Utilization rate of areal surface parameters

由图 6 可以看出,三维表面参数在实际工业中的使用率不尽相同。 $Sa$ ,  $Sz$ ,  $Sq$  的使用率相对较高,其次是  $Ssk$  与  $Sku$ 。总体来看,高度参数的使用率是最高的,而特征参数的实际使用率最低。这恰好体现了由二维到三维的过渡过程,与轮廓毫无关系的特征参数虽然当下的使用率最低,但是当其与实际功能建立紧密联系后,特征参

数必将在很多行业得到广泛应用。

由于表面三维形貌信息具有的复杂性和综合性的特点,对每一个功能特性都建立准确的参数是不切实际的。现代精密制造业和精密测量技术的飞速发展使得一套与实际功能相关的表面特征评价体系的诞生已是迫在眉睫,需要将三维表面参数及其影响因子与表面实际功能建立清晰的网络,便于三维参数的选择和功能评价。同时,为防止三维参数无限增殖,要深入研究参数表征体系,实现一个参数对多个性能特性的评价以及通过数量较少的参数对表面特征进行综合描述。

## 6 结 论

工件的表面形貌不仅可以衡量加工质量还包含非常丰富的特征和功能信息,这些信息与工件的硬度、残余应力、表面功能等内外特性密切相关。表面形貌的测量和表征是控制加工质量、改进工艺的有效途径。依靠测量技术可以将加工制造与特定功能联系起来,实现对加工产品表面质量的控制和有效预测。

科技水平的不断提高对工程零件表面性能提出了更高的要求,二维表面粗糙度参数有很大的局限性和误导性,而三维表面粗糙度参数可以很好的弥补二维表面粗糙度参数的不足,现已成为一个非常有价值的工具,广泛用于制造业、摩擦学与 biomedical 等领域的研究。

目前,先进的制造技术和科技水平的显著提高,如纳米技术和复杂形状加工技术,也对三维表面粗糙度的表征提出了新的要求。未来三维表面粗糙度测量、表征和应用的发展会有以下几个方向:

(1) 完善修订已有参数及标准,避免不必要的增殖。

由于三维表面形貌信息的复杂性及评定方法的多样性,许多专家学者或研究团体所给出的表征参数也不尽一致,因此,导致了“参数爆炸”和“标准爆炸”的现象。为了控制国际标准不必要的增殖,避免大量时间精力的投入,无端增加仪器制造商的压力,应该完善修订已出版的标准,把出版的技术规范数量降到最小。

(2) 建立并完善三维表面功能表征体系,构建三维参数和功能预测的桥梁。

目前,三维表面表征参数与功能特性的相关性研究还处于萌芽阶段,大多数三维粗糙度表征参数仅从零件表面的微观几何特性出发,表征参数与零件表面功能特性无关,因而无法准确地评价零件表面功能及其应用。今后的研究应该着眼于三维表征参数与表面功能的内在联系,找出三维表征参数中特定功能的主要敏感参数或探究三维参数对实际表面功能的影响因子。通过主要敏感参数或参数对特定功能的影响因子大小,建立三维表面功能表征体系,争取用数量较少的参数组实现表面功能的预测。

(3) 开发新的三维表面参数,满足自由曲面以及复杂曲面形貌特征的测量和表征。

伴随产品几何技术规范的发展和完善,自由

曲面以及复杂曲面形貌特征的测量和表征成为未来研究的主要方向。现有的三维表面参数对自由曲面、复杂形状的表征存在一定的不足,需要开发新的三维参数以便不断适应发展的需求。

(4) 解决三维表面形貌测量的溯源性、重复性问题,提高测量精度。

三维测量的标准日趋完善,三维粗糙度参数更多地与表面功能特性相结合。虽然在溯源性、测量的重复性、数据点的处理以及图像拼接等方面还有不足,但是未来随着研究的深入以及三维表面测量设备及相应软件的发展,三维表面粗糙度的测量表征以及参数体系一定会趋于完善,三维表面参数的表征和应用也一定会普及,甚至取代二维表面粗糙度的表征和应用。

#### 参考文献:

- [1] 石照耀,姜海洋,张敏. 产品几何规范中非理想表面的多尺度表征[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(7):1647-1654.  
SHI Z Y, JIANG H Y, ZHANG M. Multi-scale representation for skin models in geometrical product specifications [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(7):1647-1654. (in Chinese)
- [2] WHITEHOUSE D J. *Handbook of surface and nanometrology* [M]. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [3] LEACH R K. *Fundamental principles of engineering nanometrology* [M]. Amsterdam: Elsevier/William Andrew, 2014.
- [4] 李伯奎,刘远伟. 表面粗糙度理论发展研究[J]. 工具技术, 2004, 38(1):63-67.  
LI B K, LIU Y W. *Study of developing tendency of surface roughness* [J]. *Tool Engineering*, 2004, 38(1):63-67. (in Chinese)
- [5] 陈继涛. 表面粗糙度检测方法发展史及研究现状概述[J]. 中国科技信息, 2007(17):305-306.  
CHEN J T. A Survey of the research on surface roughness measuring development and method [J]. *China Science and Technology Information*, 2007(17):305-306. (in Chinese)
- [6] 杨永成,王运波. 表面粗糙度与光洁度等级对照[J]. 机械工程师, 1987(4):44-45.  
YANG Y CH, WANG Y B. The comparison between surface roughness and the level of finish [J]. *Mechanical Engineer*, 1987(4):44-45. (in Chinese)
- [7] 王玉田,韩向春. 表面粗糙度的表征参数及其与表面功能特性的关系[J]. 燕山大学学报, 1983(4):50-58.  
WANG Y T, HAN X CH. The relationship between characterization parameters of surface roughness and its functional properties [J]. *Journal of Yanshan University*, 1983(4):50-58. (in Chinese)
- [8] 李成贵,董申. 表面粗糙度的现状及发展[J]. 航空精密制造技术, 1999, 35(5):1-4.  
LI C G, DONG S. The research status and development of surface roughness [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 1999, 35(5):1-4. (in Chinese)
- [9] 刘长生,张礼华. 机械零件表面粗糙度的影响与选择[J]. 现代制造工程, 2004(2):114-115.  
LIU CH SH, ZHANG L H. Selection and effect of parts surface roughness [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2004(2):114-115. (in Chinese)
- [10] GRIEVE D J, KALISZER H and ROWE G W. A "Normal Wear" Process Examined by Measurements of Surface Topography [J]. *CIRP Annals*, 1970, 16(4):585-592.
- [11] 李成贵,董申. 三维表面微观形貌的表征趋势[J]. 中国机械工程, 2000, 11(5):488-492.  
LI CH G, DONG S. The Trends of characterizing 3D

- surface microtopography [J]. *China Mechanical Engineering*, 2000, 11(5):488-492. (in Chinese)
- [12] ISO/FDIS 25178-2: 2010. Geometrical product specifications (GPS)-Surface texture: Areal-Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters [S].
- [13] STOUT K J. *Development of methods for the characterisation of roughness in three dimensions* [M]. 1st Edition, Amsterdam: Elsevier, 1998.
- [14] 张琳娜, 赵凤霞, 李晓沛, 等. 现代产品几何技术规范(GPS)体系及应用分析[J]. *机械强度*, 2004, 26(4):400-404.  
ZHANG L N, ZHAO F X, LI X P, *et al.*. Analysis of modern product geometry specification (GPS) system and application [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2004, 26(4):400-404. (in Chinese)
- [15] 李晓沛. ISO/TC213“产品的尺寸和几何规范及检验”工作近况[J]. *机械工业标准化与质量*, 1996(12):33-34.  
LI X P. Recent work of ISO/TC213 "product size and geometry specification and inspection" [J]. *Standardization and quality of machinery industry*, 1996(12):33-34. (in Chinese)
- [16] WHITEHOUSE D J. The parameter rash-is there a cure? [J]. *Wear*, 1982, 83(1):75-78.
- [17] LEACH R K. *Characterisation of Areal Surface Texture* [M]. Berlin Heidelberg:Springer, 2013.
- [18] 陈国强, 张维强, 彭文静. 研磨表面微观形貌的三维检测及 Areal 表征[J]. *机械设计与研究*, 2009, 25(2):19-22.  
CHEN G Q, ZHANG W Q, PENG W J. Research on the 3-D detection and areal characterization of micro-topography of lapping surface [J]. *Machine Design and Research*, 2009, 25(2):19-22. (in Chinese)
- [19] BLUNT L, JIANG X Q. *Advanced Techniques for Assessment Surface Topography: Development of a Basis for 3D Surface Texture Standards SurfStand* [M]. Amsterdam: Elsevier, 2003.
- [20] ISO. How to write standards [R]. Geneva: International Organization for Standardization, 2013.
- [21] GB/T 33523.6-2017. 产品几何技术规范(GPS)表面结构 区域法 第6部分:表面结构测量方法的分类[S].  
GB/T 33523.6-2017. Geometrical Product Specifications-surface texture: areal-part 6: Classification of surface structure measurement methods [S]. (in Chinese)
- [22] LEACH R K, DE GROOT P. The standards rash - is there a cure? [J]. *International Journal of Metrology & Quality Engineering*, 2015, 6(1):101.
- [23] JIANG X Q, SCOTT P J, WHITEHOUSE D J, *et al.*. Paradigm Shifts in Surface Metrology. Part II. The Current Shift [J]. *Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences*, 2007, 463(2085):2071-2099.
- [24] WHITEHOUSE D J. *Surface and their measurement* [M]. London: Hermes Penton Ltd, 2002.
- [25] 王永礼, 屠恒贤. 微观表面的表征技术与方法[J]. *安徽工业大学学报(自然科学版)*, 2005, 22(4):369-371.  
WANG Y L, TU H X. Characterization techniques and methods of micro-surface [J]. *Journal of Anhui University of Technology (Natural Science)*, 2005, 22(4):369-371. (in Chinese)
- [26] 李成贵, 董申. 3D表面粗糙度的测量方法分析[J]. *航空精密制造技术*, 1999, 32(02):36-40.  
LI CH G, DONG SH. Methods and analysis of 3D surface roughness measurement [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 1999, 32(02):36-40. (in Chinese)
- [27] LEACH R K, HART A. A comparison of stylus and optical methods for measuring 2D surface texture [R]. National Physical Laboratory (NPL) REPORT CBTLM 15, 2002.
- [28] LEACH R K. *Optical measurement of surface topography* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2011.
- [29] VORBURGER T V, RHEE H G, RENEGAR T B, *et al.*. Comparison of optical and stylus methods for measurement of surface texture [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 33(1):110-118.
- [30] 陈建超, 冯世绪, 郭保苏, 等. 表面微观形貌测量

- 方法探讨[J]. 计量学报, 2016, 37(6A):204-211.
- CHEN J CH, FENG SH X, GUO B S, *et al.*. Methods employed for measuring surface microtopography [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2016, 37 (6A):204-211. (in Chinese)
- [31] WHITEHOUSE D J. Comparison between stylus and optical methods for measuring surfaces [J]. *CIRP Annals*, 1988, 37 (2):649-653.
- [32] 杨建虹. 表面粗糙度评定由二维向三维转化综述 [J]. 机械工业标准化与质量, 2015, (505):20-23.
- YANG J H. A summary of the transformation of surface roughness characterization from two-dimensional to three-dimensional [J]. *Machinery Industry Standardization & Quality*, 2015, (505):20-23. (in Chinese)
- [33] 李惠芬, 蒋向前, 李柱. 三维表面功能评定技术发展综述[J]. 工具技术, 2002, 36(2):8-11.
- LI H F, JIANG X Q, LI ZH. Summary of development of 3D surface function evaluation technology [J]. *Tool Engineering*, 2002, 36(2):8-11.
- [34] MATHIA T G, PAWLUS P, WIECZOROWSKI M. Recent trends in surface metrology [J]. *Wear*, 2011, 271(3):494-508.
- [35] STOUT K J, SULLIVAN P J, MCKEOWN P A. The use of 3D topographic analysis to determine the micro-geometric transfer characteristics of textured sheet surfaces through rolling [J]. *CIRP Annals*, 1992, 41 (1):621-624.
- [36] WENNERBERG A, OHLSSON R, ROSKNT B G, *et al.*. Characterizing three-dimensional topography of engineering and biomaterial surfaces by confocal laser scanning and stylus techniques [J]. *Medical Engineering Physics*, 1996, 18(7):548-556.
- [37] DONG W P, STOUT K J. An integrated approach to the characterisation of surface wear: Qualitative characterisation [J]. *Wear*, 1995, 181:700-716.
- [38] BLUNT L and EBDON S. The application of three-dimensional surface measurement techniques to characterizing grinding wheel topography [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1996, 36 (11):1207-1226.
- [39] XIE H C, CHEN D R, KONG X M. An analysis of the three-dimensional surface topography of textured cold-rolled steel sheets [J]. *Tribology International*, 1999, 32(2): 83-87.
- [40] JIANG X Q, BLUNT L, STOUT K J. Three-dimensional surface characterization for orthopaedic joint prostheses [J]. *Journal of Engineering in Medicine*, 1999, 213(1):49-68.
- [41] RAMASAWMY H, BLUNT L. 3D surface topography assessment of the effect of different electrolytes during electrochemical polishing of EDM surfaces [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, 42: 567-574.
- [42] RAMASAWMY H, Blunt L and RAJURKAR K P. Investigation of the relationship between the white layer thickness and 3D surface texture parameters in the die sinking EDM process [J]. *Precision Engineering*, 2005, 29(4):479-490.
- [43] BUTLER D L, BLUNT L, SEE B K, *et al.*. The characterisation of grinding wheels using 3D surface measurement techniques [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 127 (2): 234-237.
- [44] AL-NAWAS B, GÖTZ H. Three-dimensional topographic and metrologic evaluation of dental implants by Confocal Laser Scanning Microscopy [J]. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, 2003, 5(3):176-183.
- [45] SUH A Y, POLYCARPOU A A, CONRY T F. Detailed surface roughness characterization of engineering surfaces undergoing tribological testing leading to scuffing [J]. *Wear*, 2003, 255(1):556-568.
- [46] 王金明, 杨志翔. 复合材料切削表面粗糙度测试方法的研究[J]. 宇航材料工艺, 2004, 34(4):59-62.
- WANG J M, YANG ZH X. Study of roughness measurement on cutting surface of composites [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2004, 34 (4):59-62. (in Chinese)
- [47] BÉNARD Q, FOIS M, GRISEL M. Influence of fibre reinforcement and peel ply surface treatment towards adhesion of composite surface [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2005, 25(5):404-409.

- [48] KUNDRAK J, OSANNA P H, AFJEHI-SADA A, *et al.*. Surface quality of hard turned boreholes [C]. *Metrology for a Sustainable Development*, XVIII IMEKO WORLD CONGRESS, Rio de Janeiro, Brazil: September 2006.
- [49] KRZYZAK Z, PAWLUS P. 'Zero-wear' of piston skirt surface topography [J]. *Wear*, 2006, 260(4):554-561.
- [50] SENIN N, ZILIOOTTI M, GROPPETTI R. Three-dimensional surface topography segmentation through clustering [J]. *Wear*, 2007, 262(3):395-410.
- [51] 艾传智, 杨东军, 赵福令, 等. C/C 复合材料切削表面粗糙度的测量评定与影响因素研究[J]. *航空精密制造技术*, 2005, 41(6):31-34.
- AI CH ZH, YANG D J, ZHAO F L, *et al.*. Study on measurement & evaluation of cutting surface roughness of C/C Composite and the influential factors [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2005, 41(6):31-34. (in Chinese)
- [52] 赵福令, 艾传智, 杨东军, 等. 碳/碳复合材料切削表面粗糙度的评定方法及评定参数研究[J]. *计量学报*, 2006, 27(3):206-211.
- ZHAO F L, AI CH ZH, YANG D J, *et al.*. Study on the evaluation method and evaluation parameters of cutting surface roughness of carbon/carbon composite [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2006, 27(3):206-211. (in Chinese)
- [53] BÉNARD Q, FOIS M and GRISEL M. Surface treatment of carbon/epoxy and glass/ epoxy composites with an excimer laser beam [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2006, 26(7):543-549.
- [54] BROWN L T. *The use of 3D surface analysis techniques to investigate the wear of matt surface finish femoral stems in total hip replacement* [D]. University of Huddersfield, 2006.
- [55] SUL Y T, KANG B S, JOHANSSON C, *et al.*. The roles of surface chemistry and topography in the strength and rate of osseointegration of titanium implants in bone [J]. *Journal of Biomedical Materials Research*, 2009, Part A, 89(4):942-950.
- [56] LE GUÉHENNEC L, SOUEIDAN A, LAY-ROLLE P, *et al.*. Surface treatments of titanium dental implants for rapid osseointegration [J]. *Dental materials*, 2007, 23(7):844-854.
- [57] 袁成清, 严新平, 彭中笑. 磨粒的三维表面特征描述[J]. *摩擦学学报*, 2007, 27(3):294-296.
- YUAN CH Q, YAN X P, PENG ZH X. Three-dimensional surface characterisation of wear debris [J]. *Tribology*, 2007, 27(3):294-296. (in Chinese)
- [58] ÁVILA R F, GODOY C, ABRÃO A M, *et al.*. Topographic analysis of the crater wear on TiN, Ti (C, N) and (Ti, Al) N coated carbide tools [J]. *Wear*, 2008, 265(1):49-56.
- [59] MICHALSKI J. Surface topography of the cylindrical gear tooth flanks after machining [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 43(5):513-516.
- [60] WAIKAR R A, GUO Y B. A comprehensive characterisation of 3D surface topography induced by hard turning versus grinding [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 197(1):189-199.
- [61] NGUYEN A T, BUTLER D. Correlation of grinding wheel topography and grinding performance: A study from a viewpoint of three-dimensional surface characterisation [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 208(1):14-23.
- [62] ARIS N F M, CHENG K. Characterization of the surface functionality on precision machined engineering surfaces [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 38(3):402-409.
- [63] 李伯奎. 三维表面偏斜度与陡度的规律研究[J]. *计量技术*, 2008(10):3-6.
- LI B K. Study on the law of the skew and steepness of three-dimensional surface [J]. *Measurement Technique*, 2008(10):3-6. (in Chinese)
- [64] SCARDINO A J, HUDLESTON D, PENG Z, *et al.*. Biomimetic characterisation of key surface parameters for the development of fouling resistant materials [J]. *Biofouling*, 2009, 25(1):83-93.
- [65] CZIFRA Á, HORVÁTH S. Complex microtopography analysis in sliding friction of steel-ferodo ma-

- terial pair [J]. *Meccanica*, 2011, 46(3):609-616.
- [66] WANG J, JIANG X J, GURDAK E, *et al.*. Numerical characterisation of biomedical titanium surface texture using novel feature parameters [J]. *Wear*, 2011, 271(7):1059-1065.
- [67] TIAN Y, WANG J, PENG Z, *et al.*. Numerical analysis of cartilage surfaces for osteoarthritis diagnosis using field and feature parameters [J]. *Wear*, 2011, 271(9):2370-2378.
- [68] 墨洪磊, 朱永伟, 唐晓潇, 等. 固结磨料研磨 K9 玻璃的工艺优化[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2012, 32(3):7-11.
- MO H L, ZHU Y W, TANG X X, *et al.*. Parameter optimization when lapping K9 glass with fixed abrasive pad [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2012, 32(3):7-11. (in Chinese)
- [69] 张丘, 刘维, 唐贤进. PBX 炸药切削表面粗糙度评定及影响因素[J]. *含能材料*, 2012, 20(6):775-778.
- ZHANG Q, LIU W, TANG X J. Evaluation of Cutting Surface Roughness of PBX Explosive and Its Influence Factors [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 20(6):775-778. (in Chinese)
- [70] 王晓强, 余真珑, 崔凤奎. 基于灰关联的三维表征参数与耐磨性相关性分析[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2014, 33(6):761-765.
- WANG X Q, YU ZH L, CUI F K. Correlation analysis of 3D characterization parameters and wear resistance based on grey correlation [J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2014, 33(6):761-765. (in Chinese)
- [71] BULAHAN. Analysis of service properties of cylindrically ground surfaces, using standard ISO 25178-2:2012 surface texture parameters [C]. *Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference, Rezekne, Latvia*, 2015, 1:16-21.
- [72] 刘泊, 齐兴华, 张明. 表面三维轮廓的粗糙度评定[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(10s):135-140.
- LIU B, QI X H, ZHANG M. Roughness evaluation of 3D surface profile [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10s):135-140. (in Chinese)
- [73] 徐善华, 何羽玲, 秦广冲, 等. 钢材锈蚀率与表面三维粗糙度参数的关系[J]. *材料科学与工程学报*, 2016, 34(2):292-295.
- XU SH H, HE Y L, QIN G CH, *et al.*. Relationship between steel corrosion ratio and 3D surface roughness parameters [J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2016, 34(2):292-295. (in Chinese)
- [74] 杨洁, 李乐. 基于机器视觉的表面粗糙度测量与三维评定[J]. *光学技术*, 2016, 42(6):491-495.
- YANG J, LI L. Surface roughness measurement and three-dimensional assessment based on machine vision [J]. *Optical Technique*, 2016, 42(6):491-495. (in Chinese)
- [75] 郑立功, 姚鹏, 张志宇, 等. 金属结合剂金刚石砂轮的高压磨料水射流修锐技术[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(10s):477-483.
- ZHENG L G, YAO P, ZHANG ZH Y, *et al.*. High-pressure abrasive water jet dressing of metal bonded diamond grinding wheel [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10s):477-483. (in Chinese)
- [76] 谢俊峰, 何声馨, 李大磊, 等. 表面状态对疲劳塑性变形局部化的影响[J]. *表面技术*, 2017, 46(2):224-228.
- XIE J F, HE SH X, LI D L, *et al.*. Effect of surface states on fatigue plastic deformation localization [J]. *Surface Technology*, 2017, 46(2):224-228. (in Chinese)
- [77] GONG M, RAO SH ZH, LI L. Effects of machining parameters on surface roughness of joints in manufacturing structural finger-joined lumber [J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2017, 2(4):10-18.
- [78] LEACH R K, BROWN L, JIANG J, *et al.*. *Measurement Good Practice Guide No. 108-Guide to the measurement of smooth surface topography using coherence scanning interferometry* [M]. National Physical Laboratory (NPL), 2008.
- [79] 蒋向前, L. Blunt. 三维表面测量的发展[J]. *工程设计学报*, 2000, 7(4):98-100.
- JIANG X Q, BLUNT L. Advance in the Three-Dimensional Surface Metrology [J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2000, 7(4):98-100. (in Chinese)

- [80] 李伯奎,李年莲,刘远伟,等. 表面粗糙度功能参数及其三维量值的实验研究[J]. 机械设计与制造, 2011,(9):179-181.  
LI B K, LI N L, LIU Y W, *et al.*. Functional parameters of surface roughness and experimental study of its 3-D index [J]. *Machinery Design&Manufacture*, 2011, (9):179-181. (in Chinese)
- [81] 张洪玉,蒋向前,Blunt L,等. 人工髌关节柄磨损评定中的三维表面形貌测量[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20 (1):139-148.  
ZHANG H Y, JIANG X Q, BLUNT L, *et al.*. The application of 3D surface metrology in characterization of femoral stem wear [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2012, 20 (1): 139-148. (in Chinese)
- [82] HE B F, PETZING J, WEBB P, *et al.*. Improving copper plating adhesion on glass using laser machining techniques and areal surface texture parameters [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2015, 75:39-47.
- [83] WHITEHOUSE D J. Function maps and the role of surfaces [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2001, 41(13):1847-1861.
- [84] 李丽伟,董申,程凯. 超光滑表面的加工、表征和功能[J]. 工具技术, 2002, 36(8):15-18.  
LI L W, DONG S, CHENG K. Generation, Characterization and Function of Super-smooth Surfaces [J]. *Tool Engineering*, 2002, 36(8):15-18. (in Chinese)
- [85] QI Q, LI T, SCOTT P J, *et al.*. A Correlational Study of Areal Surface Texture Parameters on Some Typical Machined Surfaces [J]. *Procedia CIRP*, 2015, 27:149-154.
- [86] TODHUNTER L D, LEACH R K, LAWES S D A, *et al.*. Industrial survey of ISO surface texture parameters [J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science & Technology*, 2017,19:84-92.

#### 作者简介:



何宝凤(1983—),女,吉林白城人,博士,讲师,2006年、2009年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,2012年于英国拉夫堡大学获得博士学位,主要研究方向为精密测试技术与仪器。  
E-mail: baofenghe@bjut.edu.cn.



石照耀(1964—),男,湖南岳阳人,博士,教育部长江学者特聘教授,1984年于合肥工业大学获得学士学位,1988年于陕西机械学院获得硕士学位,2001年于合肥工业大学获得博士学位,主要研究方向为精密测试技术及仪器。E-mail: shizhaoyao@bjut.edu.cn.