

# 基于功能参数的渐进成形件表面质量表征研究

赵仕宇<sup>1</sup>, 周超<sup>2</sup>, 詹艳然<sup>2</sup>

(1.福州职业技术学院 机电工程系, 福州 350108;

2.福州大学 机械工程及自动化学院, 福州 350116)

**摘要:** **目的** 以圆锥台成形件为例, 基于粗糙表面的区域支承率曲线, 进行了用功能参数表征表面几何形貌的研究, 以全面、准确、定量地表征渐进成形件的表面质量, 预测表面性能。**方法** 用渐进成形工艺加工成形角分别为 35°、45°和 55°的圆锥台件, 将各圆锥台的成形面分为顶部、中部和底部三个区域, 并使用三维表面轮廓仪, 在上述三个区域中随机测量各 4 个样本。根据 ISO 25178-2:2012, 将各样本表面的区域支承率曲线分为峰区、核心区和谷区, 选用部分功能参数——核心区高度  $S_k$ 、峰区材料体积  $V_{mp}$ 、核心区材料体积  $V_{mc}$  和谷区空隙体积  $V_{vv}$  表征表面, 并与常用的高度表征参数—— $S_a$ 、 $S_q$ 、 $S_{sk}$  和  $S_{ku}$  进行比较。**结果** 成形件表面的  $S_{sk}$  和  $S_{ku}$  的计算值极不稳定, 变异系数(标准偏差与均值之比)最高值分别可达 127.67%和 39.11%,  $S_a$ 、 $S_q$  的最大变异系数分别为 4.41%和 4.26%, 虽然它们的参数计算值较为稳定, 但常无法体现表面形貌的实际差异。功能参数独立表征不同功能区,  $S_k$  和  $V_{mc}$  的最大变异系数分别为 9.32%和 7.73%, 说明同一表面各处, 在长期工作阶段具有较为一致的表面性能,  $V_{mp}$  和  $V_{vv}$  的最大变异系数分别为 60.53%和 31.25%, 说明表面各处峰、谷区的形貌有所不同, 因而在磨合时间、磨粒存储等方面会有不同的表现。**结论** 粗糙表面的三维本质要求用三维表征参数才能全面表征其几何形貌。高度参数虽然计算简单, 但常难以解读它们的物理意义, 无法定量评价表面性能; 功能参数具有明确的物理意义, 可为表征表面质量、预测表面性能提供定量、实用的方法。

**关键词:** 渐进成形; 表面质量; 表面性能; 区域支承率曲线; 功能参数

中图分类号: TG356 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2020)10-0346-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.10.041

## Quality Characterization of Surfaces Formed by Single Point Incremental Forming Based on Functional Parameters

ZHAO Shi-yu<sup>1</sup>, ZHOU Chao<sup>2</sup>, ZHAN Yan-ran<sup>2</sup>

(1.Department of Mechanical and Electrical Engineering, Fuzhou Polytechnic, Fuzhou 350108, China;

2.School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

收稿日期: 2020-04-30; 修订日期: 2020-06-13

Received: 2020-04-30; Revised: 2020-06-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774097); 福建省教育厅资助项目(JZ180614); 福州职业技术学院引进人才项目(RCQD201706)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51774097); Foundation of the Education Department of Fujian Provincial(JZ180614); the Introduction of Talent Fund of Fuzhou Polytechnic(RCQD201706)

作者简介: 赵仕宇(1978—), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为板料柔性增量成形。邮箱: zsy1978@126.com

Biography: ZHAO Shi-yu(1978—), Female, Master, Associate professor, Research focus: flexible incremental forming of sheet metal. E-mail: zsy1978@126.com

引文格式: 赵仕宇, 周超, 詹艳然. 基于功能参数的渐进成形件表面质量表征研究[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 346-352.

ZHAO Shi-yu, ZHOU Chao, ZHAN Yan-ran. Quality characterization of surfaces formed by single point incremental forming based on functional parameters[J]. Surface technology, 2020, 49(10): 346-352.

**ABSTRACT:** The work aims to characterize the quality of surfaces formed by single point incremental forming (SPIF) comprehensively, accurately and quantitatively, and predict the surface properties and then carry out study on the characterization of geometrical morphology by functional parameters based on the material ratio curve in rough surface with conical frustums as examples. Conical frustums with forming angles of 35°, 45° and 55° were processed respectively by SPIF. The formed surface of each frustum was divided into top, middle and bottom regions, and 4 samples were randomly measured in each region by three-dimensional surface profile. According to ISO 25178-2:2012, the material ratio curve of each measured rough surface was divided into three regions: peak, core and dale. Some functional parameters, such as core height  $S_k$ , peak material volume  $V_{mp}$ , core material volume  $V_{mc}$  and dale void volume  $V_{vv}$  were selected and compared with commonly used height characterization parameters including  $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_{sk}$  and  $S_{ku}$ . The values of  $S_{sk}$  and  $S_{ku}$  of the formed surfaces were extremely unstable, and the maximum variation coefficients (ratio of standard deviation to mean value) were 127.67% and 39.11% respectively. The maximum variation coefficients of  $S_a$  and  $S_q$  were 4.41% and 4.26% respectively, which were relatively stable, but often failed to reflect the actual differences in morphology. Since functional parameters characterized functional regions independently, the maximum variation coefficients of  $S_k$  and  $V_{mc}$  were 9.32% and 7.735 respectively, which indicated consistent surface properties in long-term working stages. Meanwhile, the maximum variation coefficients of  $V_{mp}$  and  $V_{vv}$  were 60.53% and 31.25% respectively, which indicated different appearance in peak and dale regions, and different performance in running-in stage and wear particle storage. Therefore, the three dimensional nature of rough surfaces requires three dimensional parameters to fully characterize their geometries. The calculation of height parameters is simple, but it is often difficult to interpret the physical meaning, and evaluate the surface properties quantitatively. The functional parameters have clear physical meaning, which provides a quantitative and practical way for surface quality characterization and performance prediction.

**KEY WORDS:** single point incremental forming; surface quality; surface property, material ratio curve; functional parameters

板料渐进成形是一种先进的无模塑性成形方法, 成形性好, 灵活性强, 满足了现代制造业对柔性生产、个性化产品定制以及低成本小批量生产的需求。各国学者已对渐进成形的成形机理和工艺进行了广泛研究<sup>[1-3]</sup>, 但加工效率低, 成形件的几何精度、表面质量差等问题, 依旧制约着该技术的广泛工业化<sup>[3-4]</sup>。

表面质量决定了成形件的外观, 及其摩擦、磨损、润滑、密封、抗疲劳、耐腐蚀、导热导电、生物相容性等多种接触和非接触性能<sup>[5-7]</sup>, 当成形件的几何尺寸越来越小时, 表面质量对其性能的影响将会愈加显著。与传统成形方法相比, 渐进成形时, 工具头直接碾压板料, 局部接触应力大, 难形成有效润滑, 易粘着, 剥落的碎屑进一步成为磨粒, 在成形件表面造成磨损<sup>[3,8]</sup>。因此, 渐进成形件的表面几何形貌演化较为复杂, 必须深入研究, 才能实现表面质量的预测与控制。宋修成等<sup>[3]</sup>关注了预设残余波峰高度, 并与板料的原始粗糙度和摩擦类型相结合, 研究了它们对表面的  $R_a$  和  $R_z$  参数的影响。Kurra 等<sup>[4]</sup>采用人工神经网络、支持向量机和遗传算法, 建立了用工具头直径、层压下量、成形角、进给速度、润滑类型等工艺参数, 预测成形件表面的  $R_a$  和  $R_z$  参数的数学模型。赵仕宇等<sup>[8]</sup>基于功率谱和粗糙表面的三维形貌表征参数  $S_q$ 、 $S_{sk}$ 、 $S_{ku}$ 、 $S_z$  和  $S_{tr}$  分析了成形件表面几何形貌的演变以及影响表面质量的有关因素。姜志宏等<sup>[9]</sup>以  $R_z$  为表征参数, 对渐进成形件的表面质量进行了实验研究。当前, 成形件表面质量的表征方法依然以二维轮廓参

数为主, 并且大多选用了计算较为简单的高度参数。然而, 零件表面的本质是三维的, 轮廓参数不能全面反映表面情况; 高度参数虽然使用广泛并且计算简便, 但却无法与表面性能建立定量的、直观的联系。ISO25178-2:2012<sup>[10]</sup>定义了粗糙表面的三维表征参数, 其中将区域支承率曲线及与之相关的参数称为功能参数<sup>[10-12]</sup>。大量研究表明, 这些参数与表面性能确实具有密切关系。例如, 区域支承率曲线可用于表征人工关节的磨损机理与表面形貌<sup>[13]</sup>; 无论在干摩擦还是润滑状态下, 摩擦系数都与区域支承率曲线显著相关<sup>[14]</sup>。

确定合理的定量表征参数集, 是客观、全面地评价渐进成形件表面质量的关键步骤, 也是预测成形件表面性能、实现形性(表面性能)协同控制的基础。本文分别在未变形板料和成形角为 35°、45°和 55°的圆锥台成形件的顶部、中部及底部选取研究样本; 采用三维表面轮廓仪测量样本表面, 基于表面的区域支承率曲线优选, 计算了部分功能表征参数——核心区高度  $S_k$ 、峰区材料体积  $V_{mp}$ 、核心区材料体积  $V_{mc}$  和谷区空隙体积  $V_{vv}$ 。为与传统表征方法相比较, 本文也计算了样本的高度表征参数——算术平均高度  $S_a$ 、均方根高度  $S_q$ 、偏斜度  $S_{sk}$  和驼峰度  $S_{ku}$ 。结果表明, 表征渐进成形件表面质量时, 功能参数具有更强的稳定性和一致性, 它们的物理意义明确, 有助于直观预测成形件的表面性能。

## 1 表面测量与数据预处理

选用厚度为 1 mm 的 5052 铝镁合金板渐进成形 3 个成形角分别为 35°、45°和 55°的圆锥台件(图 1)。底圆直径都为 60 mm,高度都为 30 mm。成形工具顶

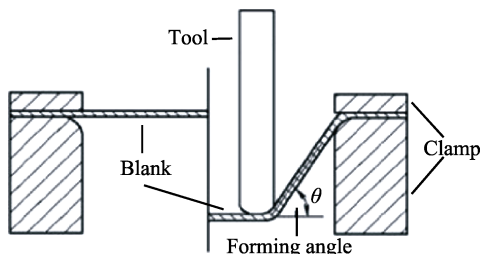


图 1 渐进成形圆锥台

Fig.1 Incremental forming for conical frustums

端为半球形,半径为 5 mm。机床主轴转速为 2000 r/min,进给速度为 1500 mm/min,层压下量为 0.25 mm。图 2 为成形件。

将每个圆锥台分为顶部、中部和底部三个区域(图 2a),每个区域随机裁剪 4 个待测样本。测量设备为法国 STIL 公司制造的白光共聚焦三维轮廓仪,该设备的横向测量分辨率为 1.55  $\mu\text{m}$ ,高度测量分辨率为 0.005  $\mu\text{m}$ ,测量精度为 0.06  $\mu\text{m}$ 。本文中所有测量样本的采样间隔都设定为 5  $\mu\text{m}$ ,两个方向的采样点数都为 512。图 3 为测量获得的 45°成形角圆锥台中部样本的数据。

从图 3 可见,由于圆锥面本身的曲率,测量的原始数据中带有弧状面;图 4a 为采用小波方法滤除该弧状面(图 4b)后的结果。采用同样的方法,完成全部 36 个样本的测量和数据预处理。

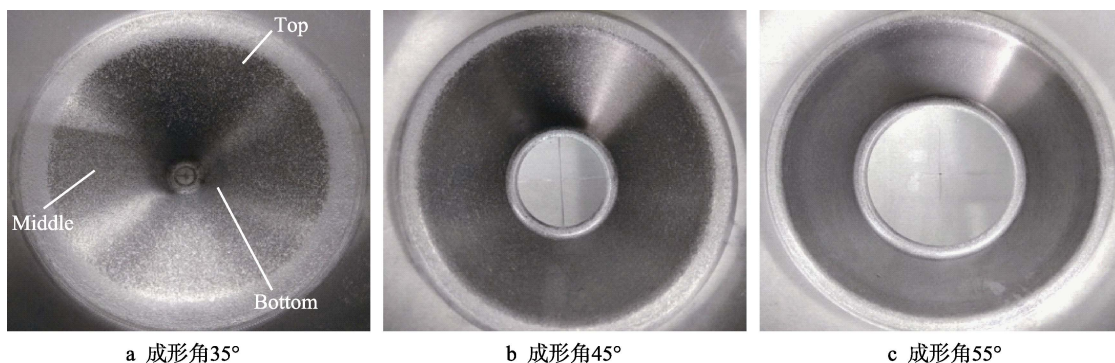


图 2 不同成形角的圆锥台

Fig.2 Conical frustums with different forming angles: a) forming angle of 35°; b) forming angle of 45°; c) forming angle of 55°

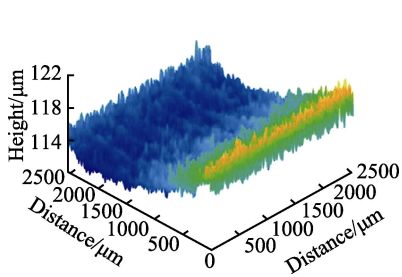
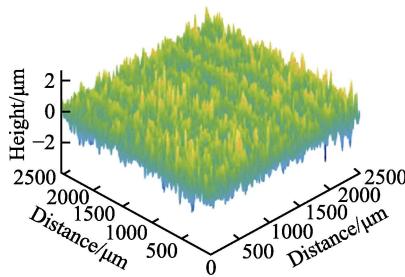
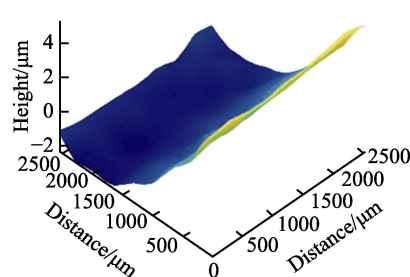


图 3 原始测量样本表面

Fig.3 Original measured sample surface



a 滤波后表面



b 弧状面

图 4 样本表面数据预处理

Fig.4 Preprocessing of sample surface data: a) filtered surface; b) curved surface

## 2 区域支承率曲线和功能参数

区域支承率曲线反映了不同高度位置处,截切平面(与基准面平行)与粗糙表面接触部分的实际材料面积与表面名义面积的百分比<sup>[10-11]</sup>。图 5a、b 中的粗实线即为图 4a 表面的区域支承率曲线,基于区域支承率曲线进行参数表征时,需先将其分为峰区、核心区 and 谷区三部分。

### 2.1 $k$ 系参数

$k$  系参数包括核心区高度  $S_k$ 、折算峰高  $S_{pk}$  和折

算谷深  $S_{vk}$ <sup>[10-11]</sup>。计算时(参见图 5a),首先在区域支承率曲线上找到包含 40% 的被测表面点和斜率绝对值最小的直线(等效直线),并求出当区域支承率分别为 0% 和 100% 时,等效直线端点  $M$ 、 $Q$  的高度值;然后分别从  $M$ 、 $Q$  做水平线与区域支承率曲线交于点  $N$ 、 $P$ ,并将点  $N$  处的区域支承率记为  $S_{mr1}$ ,点  $P$  处的区域支承率记为  $S_{mr2}$ 。区域支承率在  $S_{mr1}$  和  $S_{mr2}$  之间的部分称为核心区(高度为  $S_k$ ),低于  $S_{mr1}$  称为峰区,大于  $S_{mr2}$  称为谷区。 $H$  点和  $L$  点处的区域支承率都为 0%, $H$  点处的高度值为表面最高值,当三角形  $LMN$  的面积与曲边三角形  $HMN$  相同时,可确定  $L$  点

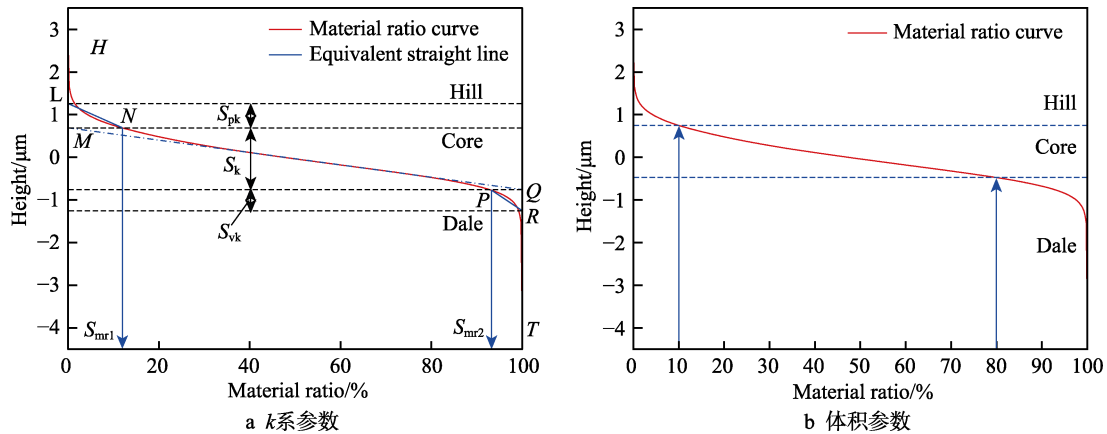


图 5 区域支承率曲线及表征参数

Fig.5 Material ratio curve and characterization parameters: a)  $k$  series parameters; b) volume parameters

的高度, 线段  $LM$  的长度即为  $S_{pk}$  的值。类似的,  $T$  点和  $R$  点处的区域支承率都为 100%,  $T$  点的高度值为表面最低值, 当三角形  $RPQ$  面积与曲边三角形  $TPQ$  相同时, 可确定  $R$  点位置,  $S_{vk}$  即为  $RQ$  的长。

## 2.2 体积参数

体积参数用于表征表面单位面积上的材料体积或空隙体积 (单位为  $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ ), 包括峰区材料体积  $V_{mp}$ 、核心区材料体积  $V_{mc}$ 、核心区空隙体积  $V_{vc}$  和谷区空隙体积  $V_{vv}$ 。ISO 25178-2:2012 中默认以区域支承率为 10% 和 80%, 作为峰区、核心区和谷区的边界, 但也可根据实际情况选用不同的边界值<sup>[10-11,15]</sup> (图 5b)。

峰区表示粗糙表面在磨合阶段迅速磨损、产生磨粒的部分, 核心区表示表面长期工作时承受载荷及存储润滑物质的部分, 而谷区的主要功能是容纳磨损时产生的磨粒。考虑到  $k$  系参数的区域划分方法, 选取了表面最平坦的部分作为核心区, 因此本文选用  $S_{mr1}$  和  $S_{mr2}$  区分峰区、核心区和谷区, 并选用  $S_k$  表示核心区的高度,  $V_{mc}$  表示核心区的材料体积; 当采用  $S_{mr1}$  和  $S_{mr2}$  划分区域后,  $S_{pk}$  和  $V_{mp}$ 、 $S_{vk}$  和  $V_{vv}$  参数是可以相互换算的<sup>[15]</sup>, 考虑到  $V_{mp}$  和  $V_{vv}$  的物理意义更为明确, 并且可根据定义, 由公式(1)和公式(2)直接求出, 因此选用它们表征峰区和谷区。

$$V_{mp} = h_1 \frac{n_1}{N} - S_{mc}(S_{mr1}) \quad (1)$$

$$V_{vv} = S_{mc}(S_{mr2}) - h_2 \frac{n_2}{N} \quad (2)$$

式中:  $S_{mc}(S_{mr1})$  和  $S_{mc}(S_{mr2})$  分别表示当区域支承率分别为  $S_{mr1}$  及  $S_{mr2}$  时的表面高度;  $N$  表示表面的总采样点数;  $h_1$  表示峰区采样点的高度平均值;  $n_1$  表示峰区采样点的数量;  $h_2$  表示谷区采样点的高度平均值;  $n_2$  表示谷区采样点的数量。

综上所述, 本文最终选用  $S_k$ 、 $V_{mp}$ 、 $V_{mc}$  和  $V_{vv}$  进行渐进成形件表面质量表征。

## 3 结果与讨论

### 3.1 未变形表面

为研究功能参数在渐进成形的整个过程中对表面形貌的表征能力, 先在未变形板料上随机测量 4 个区域。图 6 是经数据预处理后的表面形貌, 表 1 为表征参数的计算值。

由图 6、表 1 和表 2 可知, 由于存在随机分布的凸峰/深谷, 位于同一板料不同区域的样本, 它们的部分表征参数值非常不稳定。 $S_{sk}$  的变异系数超过了 30%,  $S_{ku}$  和  $V_{mp}$  的变异系数也在 20% 左右。例如, 样本 3 (图 6c) 表面的凸峰, 导致其  $S_{sk}$  和  $S_{ku}$  的值分别高达平均值的 1.41 倍和 1.31 倍, 若仅考察这两个参数, 很难判定该样本与其他样本来自同一板料表面。

由任何单一的高度表征参数都难以解读粗糙表面的几何形貌信息。再次以样本 3 为例, 其  $S_a$  和  $S_q$  的值与其他样本大致相当; 结合  $S_{ku}$  才能知道, 该样本表面采样点的高度分布比其他样本更集中; 最后根据  $S_{sk}$  才可判定该样本表面存在较多的高点, 但这样的分析结果是完全非定量的。同时, 在计算高度表征参数时, 完全平等地使用了所有采样点的高度信息, 但从实际情况来看, 这并不合理。比如图 6 表面中部分孤立、细长的高点, 它们会对  $S_{sk}$  和  $S_{ku}$  的计算值产生较大影响, 但却会在接触的初期很快磨损。

通过对区域支承率曲线的划分, 功能参数只包含了粗糙表面高度方向上局部区域的信息。未变形板料不同样本的  $S_k$  和  $V_{mc}$  的变异系数分别仅有 2.32% 和 2.5%, 是最稳定的 2 个表征参数;  $V_{mp}$  和  $V_{vv}$  的变异系数分别为 19.7% 和 10.3%, 准确地体现了随机高峰/深谷导致的不同样本峰区/谷区形貌的差别。更为重要的是,  $S_k$ 、 $V_{mc}$ 、 $V_{mp}$  和  $V_{vv}$  都有明确的物理意义和可量化的参数值, 便于在生产中预测表面性能、控制表面质量。



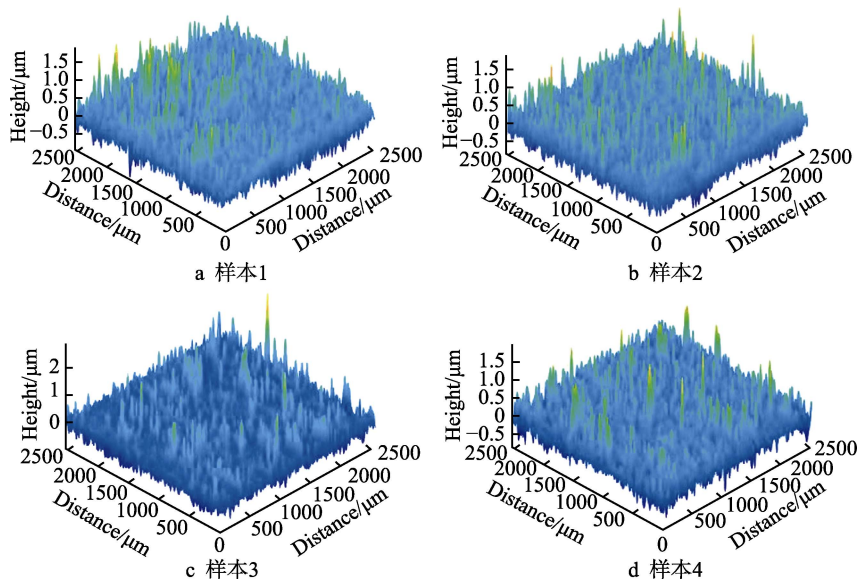


图6 未变形板料样本表面的几何形貌

Fig.6 Geometry of undeformed sheet sample surfaces: a) sample 1; b) sample 2; c) sample 3; d) sample 4

表1 未变形板料样本表面的表征参数计算值

Tab.1 Values of characterization parameters of undeformed sheet samples

Samples	$S_a/\mu\text{m}$	$S_q/\mu\text{m}$	$S_{sk}/\mu\text{m}$	$S_{ku}/\mu\text{m}$	$S_k/\mu\text{m}$	$V_{mp}/(\mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{m}^{-2})$	$V_{mc}/(\mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{m}^{-2})$	$V_{vv}/(\mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{m}^{-2})$
1	0.158	0.211	0.862	6.312	0.478	0.0183	0.241	0.0085
2	0.157	0.208	0.687	5.770	0.476	0.0168	0.239	0.0093
3	0.170	0.234	1.416	9.459	0.492	0.0255	0.250	0.0077
4	0.154	0.207	1.055	7.253	0.465	0.0187	0.235	0.0074

表2 未变形板料表面表征参数的统计量

Tab.2 Statistical values of characterization parameters of undeformed sheet surface

Parameters	Mean/ $\mu\text{m}$	Standard deviation/ $\mu\text{m}$	Coefficient of variation/%
$S_a$	0.160	0.007	4.41
$S_q$	0.215	0.013	5.94
$S_{sk}$	1.005	0.313	31.10
$S_{ku}$	7.199	1.627	22.60
$S_k$	0.478	0.011	2.32
$V_{mp}$	0.0198	0.0039	19.7
$V_{mc}$	0.241	0.006	2.5
$V_{vv}$	0.0082	0.000 854	10.3

### 3.2 成形件表面

以成形角和样本编号对取自圆锥台(图2)的表面样本进行命名,顶部样本编号为1—4,中部样本编号为5—8,底部样本编号为9—12。例如,s35r1取自成形角为35°的圆锥台顶部。为了图示清晰,图7只给出了各样本表面功能参数计算值的变化情况。表3列出了所有表征参数的均值、标准偏差和变异系数。

表3中,成形角35°为圆锥台的 $S_{sk}$ 均值为负,计算变异系数时,均值取绝对值。由图7和表3数据可见,由于板料表面在成形过程中受工具头碾压,成形后的表面粗糙度比成形前大很多,且成形角越小,表

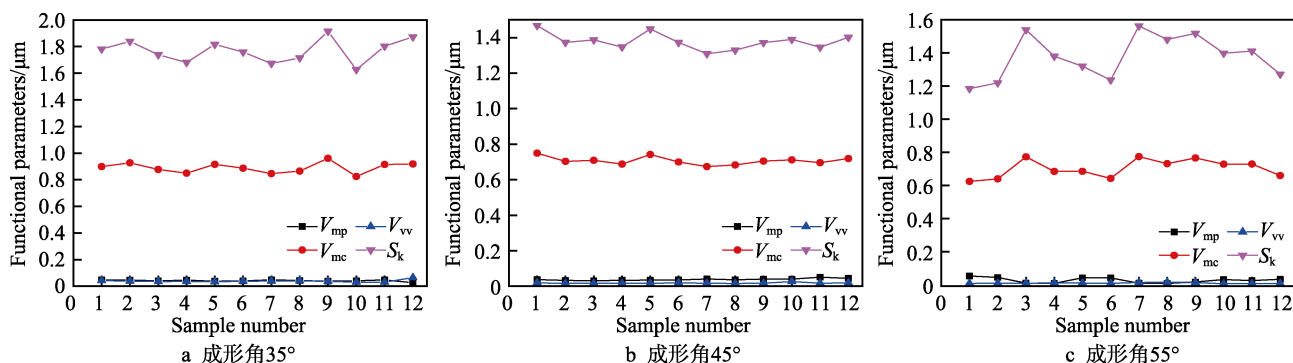


图7 圆锥台样本表面功能参数计算值

Fig.7 Values of functional parameters of frustum cone samples: a) forming angle of 35°; b) forming angle of 45°; c) forming angle of 55°

表 3 成形件表面样本表征参数的统计量  
Tab.3 Statistical values of characterization parameters of formed surface samples

Para- meters	Forming angle 35°			Forming angle 45°			Forming angle 55°		
	Mean/ μm	Standard deviation/μm	Coefficient of variation/%	Mean/ μm	Standard deviation/μm	Coefficient of variation/%	Mean/ μm	Standard deviation/μm	Coefficient of variation/%
$S_a$	0.567	0.025	4.41	0.436	0.014	3.21	0.411	0.016	3.89
$S_q$	0.727	0.031	4.26	0.550	0.022	4	0.499	0.017	3.41
$S_{sk}$	-0.003	0.167	55.67*	0.306	0.231	75.49	0.206	0.263	127.67
$S_{ku}$	3.734	0.434	11.62	3.784	1.480	39.11	2.564	0.226	8.81
$S_k$	1.768	0.086	4.86	1.379	0.046	3.34	1.374	0.128	9.32
$V_{mp}$	0.0421	0.0062	14.73	0.0378	0.0057	15.08	0.0266	0.0161	60.53
$V_{mc}$	0.89	0.0395	4.44	0.7064	0.0222	3.14	0.7028	0.0543	7.73
$V_{vv}$	0.0392	0.0088	22.45	0.0175	0.0029	16.57	0.0096	0.003	31.25

Note: \* means when calculating, take the absolute value of the mean

面粗糙度越大。成形后表面的  $S_{sk}$  和  $S_{ku}$  值依然非常不稳定，而  $S_a$  和  $S_q$  的变异系数值较小，但可能会造成它们在表征表面时区分度不高。功能参数中的  $S_k$  和  $V_{mc}$  的变异系数也比较小，但它们只表征了核心区的高度和材料体积。并且，由于它们具有明确的物理意义，因此可以认为，成形角相同的成形件表面处于长期工作阶段时，应具有较为一致的表面性能，如承载、抗磨、储油能力等。 $V_{mp}$  和  $V_{vv}$  的变异系数较大，体现了各样本表面的峰区和谷区形貌有较大不同，这可能是由于成形时的粘着磨损、犁沟现象等原因造成的。 $V_{mp}$  值的差异，说明了表面各处

在跑合阶段的时间、磨损等方面会有不同的表现。

图 8a、c 分别是样本 s45r5 和 s45r11 的表面形貌，它们的  $S_a$  值分别为 0.447 和 0.445， $S_q$  值分别是 0.558 和 0.580，这两个最常用的高度表征参数，无法区分它们的形貌差异。图 8b、d 是上述两样本对应的区域支承率曲线，图中标出了功能参数的计算值。可以看到，区域支承率曲线完整地反映了样本表面在不同高度处的区域支承率变化，而使用功能参数便于将这种变化进行定量的、实用的表征。例如图 8c、d 中，由于存在凸峰，s45r11 表面的  $V_{mp}$  值为 s45r5 表面的 150%。

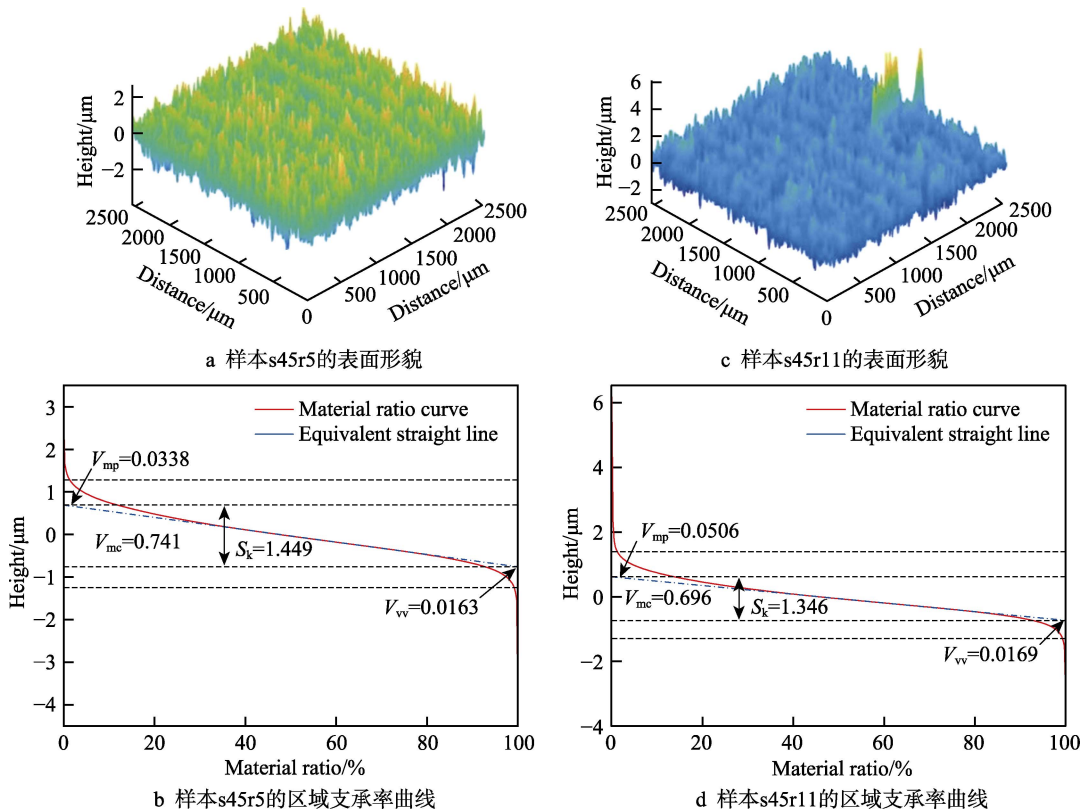


图 8 样本表面形貌和区域支承率曲线

Fig.8 Surface geometry and material ratio curve of samples: a) surface geometry of s45r5; b) material ratio curve of s45r5; c) surface geometry of s45r11; d) material ratio curve of s45r11

## 4 结论

1) 全面、准确评价粗糙表面的几何形貌, 必须选用三维表征参数。三维高度表征参数的计算虽然简便, 但不易于解读参数的物理意义, 且难以提供对表面性能的定量评价。

2) 区域支承率曲线反映了表面高度与区域支承率的关系, 选取该曲线上包含 40% 的被测表面点且斜率绝对值最小(最平坦)的部分, 绘制等效直线, 可将粗糙表面沿高度方向分为峰区、核心区和谷区, 每个区域在表面的不同工作阶段都有明确的作用。

3) 选取  $S_k$ 、 $V_{mc}$ 、 $V_{mp}$  以及  $V_{vv}$  作为表征表面的功能参数, 它们都具有明确的物理意义, 为表征表面质量、预测表面性能提供了定量的、实用的方法, 是实现成形件形性(表面性能)协同控制目标的重要基础工作。

### 参考文献:

- [1] 李燕乐, 陈晓晓, 李方义, 等. 金属板材数控渐进成形工艺的研究进展[J]. 精密成形工程, 2017, 9(1): 1-9.  
LI Yan-le, CHEN Xiao-xiao, LI Fang-yi, et al. Research development on incremental sheet metal forming process[J]. Journal of netshape forming engineering, 2017, 9(1): 1-9.
- [2] 陈继平, 钱健清, 王会廷. 渐进成形锥形件壁厚的正弦定理预测精度研究[J]. 中国机械工程, 2017, 28(22): 118-124.  
CHEN Ji-ping, QIAN Jian-qing, WANG Hui-ting. Study on wall thickness prediction accuracy by sine law for incrementally formed conical parts[J]. China mechanical engineering, 2017, 28(22): 118-124.
- [3] 宋修成, 陆彬, 陈军, 等. 板料渐进成形件表面质量的影响因素分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(8): 84-90.  
SONG Xiu-cheng, LU Bin, CHEN Jun, et al. Influencing factor analysis on the surface quality of incremental forming parts[J]. Journal of mechanical engineering, 2013, 49(8): 84-90.
- [4] KURRA S, RAHMAN N H, REGALLA S P, et al. Modeling and optimization of surface roughness in single point incremental forming process[J]. J mater res technol, 2015, 4(3): 304-313.
- [5] 杨方亮, 王彦峰. 钛合金表面百微米级 Ti/TiN 多层复合涂层性能研究[J]. 表面技术, 2017, 46(3): 96-100.  
YANG Fang-liang, WANG Yan-feng. Properties of hundred-micron Ti/TiN multilayer composite coating on titanium alloy[J]. Surface technology, 2017, 46(3): 96-100.
- [6] 王春水, 何声馨, 张二亮, 等. 喷砂表面的多尺度分析与表征[J]. 表面技术, 2015, 44(6): 127-132.  
WANG Chun-shui, HE Sheng-xin, ZHANG Er-liang, et al. Analysis and characterization of sandblasted surfaces using multi-scale analysis[J]. Surface technology, 2015, 44(6): 127-132.
- [7] 张慧萍, 张校雷, 张洪霞, 等. 300M 超高强钢车削加工表面质量[J]. 表面技术, 2016, 45(2): 181-187.  
ZHANG Hui-ping, ZHANG Xiao-lei, ZHANG Hong-xia, et al. Surface quality of high-speed turning 300M ultrahigh strength steel[J]. Surface technology, 2016, 45(2): 181-187.
- [8] 赵仕宇, 周超, 詹艳然. 5052 铝合金薄板数控渐进成形件表面质量分析[J]. 塑性工程学报, 2018, 25(6): 40-46.  
ZHAO Shi-yu, ZHOU Chao, ZHAN Yan-ran. Surface quality analysis of 5052 aluminum alloy thin sheet workpieces formed by numerical control incremental forming[J]. Journal of plasticity engineering, 2018, 25(6): 40-46.
- [9] 姜志宏, 彭杰, 姜晓峰, 等. 金属板材数控单点渐进成形表面质量的实验研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(15): 26-29.  
JIANG Zhi-hong, PENG Jie, JIANG Xiao-feng, et al. Experimental study on surface quality single-point incremental forming of metal sheet[J]. Hot working technology, 2019, 48(15): 26-29.
- [10] ISO 25178-2: 2012, Geometrical product specifications (GPS)-surface texture: Areal—Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters[S].
- [11] LEACH R. Characterisation of areal surface texture[M]. Heidelberg: Springer, 2013: 15-29.
- [12] DONG W P, SULLIVAN P J, STOUT K J. Comprehensive study of parameters for characterising three-dimensional surface topography III: Parameters for characterizing amplitude and some functional properties[J]. Wear, 1994, 178: 29-43.
- [13] NIEMCZEWSKA-WÓJCIK M. Wear mechanisms and surface topography of artificial hip joint components at the subsequent stages of tribological tests[J]. Measurement, 2017, 107: 89-98.
- [14] ZHU S, HUANG P. Influence mechanism of morphological parameters on tribological behaviors based on bearing ratio curve[J]. Tribology international, 2017, 109: 10-18.
- [15] FRANCO L A, SINATORA A. 3D surface parameters (ISO 25178-2): Actual meaning of  $S_{pk}$  and its relationship to  $V_{mp}$ [J]. Precision engineering, 2015, 40: 106-111.