

第3章 表面粗糙度

3-1 基本术语与评定参数

一、表面粗糙度的定义

表面粗糙度反映的是零件被加工表面上的微观几何形状误差。表面粗糙度主要是由加工过程中刀具和零件表面间的摩擦、切屑分离时表面金属层的塑性变形及工艺系统的高频振动等原因形成的。

表面粗糙度不同于由机床几何精度方面的误差引起的表面宏观几何误差，也不同于在加工过程中由机床-刀具-工件系统的振动、发热和运动不平衡等因素引起的介于宏观和微观几何误差之间的表面波度。通常可按波形起伏间距 λ 和幅度 h 的比值 λ/h 来划分，如图3-1所示。

比值小于40为表面粗糙度，比值大于1000为形状误差，介于两者之间为表面波度。

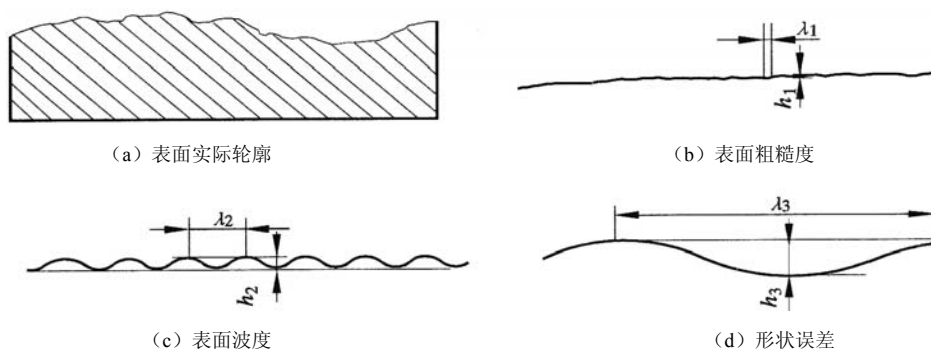


图 3-1 加工误差示意图

二、表面粗糙度对零件使用性能的影响

1. 对配合性质的影响

对于间隙配合，表面粗糙度值过大则易磨损，使间隙很快地增大，从而引起配合性质的改变。特别是在零件尺寸小和公差小的情况下，此影响更为明显。

对于过盈配合，表面粗糙度值过大会减小实际有效过盈量，从而降低连接强度。

因此，提高零件的表面质量，可以提高间隙配合的稳定性或过盈配合的连接强度，更好地满足零件的使用要求。

2. 对摩擦、磨损的影响

两个不平的表面接触时首先是表面的凸峰接触。当两个表面相对运动时，凸峰之间的作

用会产生凸峰的弹性和塑性变形及相互的剪切,从而形成摩擦阻力。表面越粗糙,阻力越大,摩擦系数也就越大,因摩擦而消耗的能量也越大。此外,表面越粗糙,两配合表面的实际有效接触面积越小,单位面积压力越大,因而更易磨损。

但在某些场合(如滑动轴承及液压导轨面的配合处),如表面过于光滑,则不利于润滑油的存储,使之形成半干摩擦甚至干摩擦,有时还会增加零件接触面的吸附力,反而使摩擦系数增大,加剧磨损。

故此,为有效地减小零件的摩擦和磨损,应选取合适的表面粗糙度。

3. 对抗腐蚀性的影响

零件的表面越粗糙,则其凹谷处越容易积聚腐蚀性的物质,然后逐渐渗透到金属材料的表层,形成表面锈蚀。

4. 对零件强度的影响

零件表面越粗糙,则表面上凹痕就越深,产生的应力集中现象就越严重,在交变载荷的作用下,其疲劳强度会降低,因而有可能因应力集中产生疲劳断裂。因此,为增加零件的抗疲劳强度,在加工中要特别注意提高零件沟槽和台阶圆角处的表面质量。

5. 对接触刚度的影响

零件表面越粗糙,表面间的实际接触面积就越小,单位面积受力就越大,这就会使峰顶处的塑性变形增大,降低接触刚度,从而影响机器的工作精度和抗振性能。

6. 对结合密封性的影响

当两个表面接触时,由于表面微观不平的存在,使得两个表面只在局部接触,形成中间缝隙影响密封性。降低表面粗糙度值,对提高零件的密封性能很重要。因此,对零件的表面粗糙度数值进行合理的确定,能提高机械零件的使用性能和寿命。

三、表面粗糙度评定参数

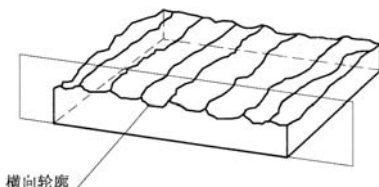
1. 相关术语

(1) 实际轮廓

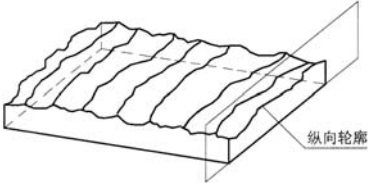
实际轮廓是指平面与实际表面相交所得的轮廓线。

按平面相对于加工纹理方向的位置不同,实际轮廓可分为横向轮廓和纵向轮廓,见表 3-1。

表 3-1 实际轮廓

分类	图示	说明
横向轮廓		指垂直于表面加工纹理的平面与表面相交所得的轮廓线

续表

分类	图示	说明
纵向轮廓		指平行于表面加工纹理的平面与表面相交所得的轮廓线

在评定表面粗糙度时，除非特别指明，否则通常均指横向轮廓，因为在此轮廓上可得到高度参数的最大值。

(2) 取样长度 (l_r)

取样长度是指用于判别具有表面粗糙度特征的一段基准线长度，如图 3-2 所示。

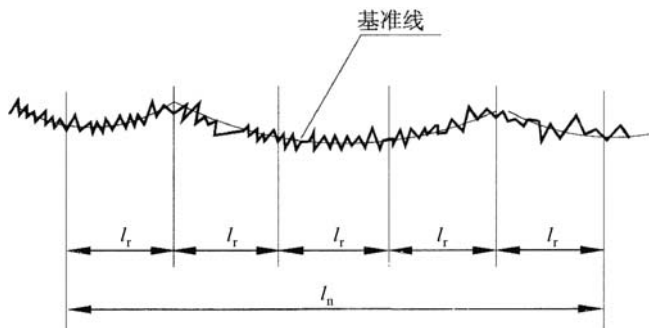


图 3-2 取样长度和评定长度

在实际轮廓上测量表面粗糙度时，必须有一个合理的取样长度，如 l_r 过长，有可能将表面波度的成分引入表面粗糙度的结果中； l_r 过短，将不能反映待测表面粗糙度的实际情况。为了限制和削弱表面波度对表面粗糙度测量结果的影响，在测量范围内较好反映粗糙度的实际情况，国家标准规定取样长度按表面粗糙程度选取相应的数值，一般不少于 5 个以上的轮廓峰和轮廓谷。

(3) 评定长度 (l_n)

评定长度是指评定轮廓所必需的一段长度，它可以包括一个或几个取样长度，如图 3-2 所示。

由于被测表面上表面粗糙度的不均匀性，所以只根据一个取样长度的测量结果来评定整个表面的粗糙度，显然是不够准确和合理的。为较充分和客观地反映被测表面的粗糙度，须连续取几个取样长度，测量后取其平均值作为测量结果。

一般情况下，按标准推荐取 $l_n = 5l_r$ 。若被测表面均匀性好，可选用小于 $5l_r$ 的评定长度值；反之，均匀性差的表面应选用大于 $5l_r$ 的评定长度。

(4) 基准线

基准线是用以评定表面粗糙度参数的给定的线（图 3-2）。国家标准规定采用中线制，即以中线为基准线评定轮廓的计算制。

中线有轮廓的最小二乘中线和轮廓的算术平均中线两种，见表 3-2。

表 3-2 轮廓中线

分类	图示	说明
轮廓的最小二乘中线		<p>简称中线,是指具有几何轮廓形状并划分轮廓的基准线,在取样长度内使轮廓线上各点的轮廓偏距的平方和为最小。也就是说在取样长度内,使轮廓上各点至一条假想线距离的平方和为最小,即 $\sum_{i=1}^n Z_i^2 = \min$, 这条假想线就是最小二乘中线</p>
轮廓的算术平均中线		<p>指具有几何轮廓形状在取样长度内与轮廓走向一致的基准线,在取样长度内由该线划分轮廓使上下两边的面积相等。也就是说在取样长度内,由一条假想线将实际轮廓分为上、下两部分,且上部分面积之和等于下部分面积之和,即 $\sum_{i=1}^n F_i = \sum_{i=1}^n F'_i$, 这条假想线就是算术平均中线</p>

标准规定,一般以轮廓的最小二乘中线为基准线。由于在轮廓图形上确定最小二乘中线的位置比较困难,因此标准又规定了轮廓的算术平均中线,其目的是用图解法近似地确定最小二乘中线,即用算术平均中线代替最小二乘中线。通常轮廓算术平均中线可以用目测法来确定。

(5) 轮廓峰与轮廓谷

轮廓峰是指在取样长度内轮廓与中线相交,连接两相邻交点向外(从材料向周围介质)的轮廓部分,如图 3-3 所示。轮廓谷是指在取样长度内轮廓与中线相交,连接两相邻交点向内(从周围介质到材料)的轮廓部分,如图 3-4 所示。

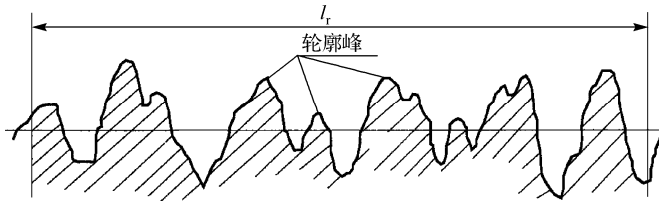


图 3-3 轮廓峰

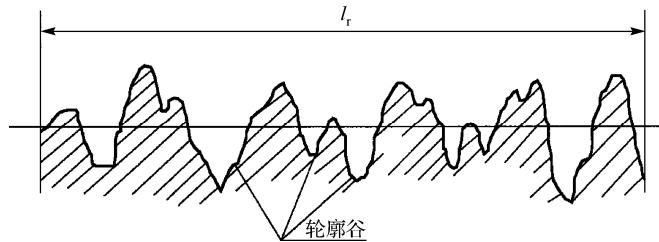


图 3-4 轮廓谷

(6) 极限值判断规则

完工零件的表面按检验规范测得轮廓参数值后,须与图样上给定的极限值比较,以判断其是否合格。极限值判断规则有两种:

1) 16%规则。运用本规则时,当被检表面测得的全部参数值中超过极限值的个数不多于总个数的 16%时,该表面是合格的。

2) 最大规则。运用本规则时,被检的整个表面上测得的参数值一个也不应超过给定的极限值。

16%规则是所有表面结构要求标注的默认规则,即当参数代号后未注明“max”字样时,均默认为应用 16%规则。反之,则应用最大规则。

2. 表面粗糙度评定参数

(1) 高度特性参数

1) 算术平均偏差。这是指在一个取样长度 l_r 范围内,纵坐标 $Z(x)$ 绝对值的算术平均值,用 Ra 表示,如图 3-5 所示。

其表达式为:

$$Ra = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx$$

或近似为:

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z(x_i)|$$

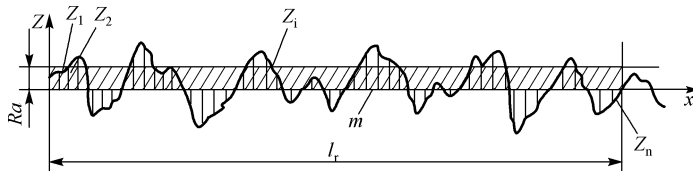


图 3-5 算术平均偏差 Ra

Ra 参数能充分反映表面微观几何形状高度方向的特性,且测量方便,因而标准推荐优先选用 Ra 。

2) 轮廓最大高度。这是指在一个取样长度内,最大轮廓峰高线与最大轮廓谷底线之间的距离,如图 3-6 所示,用 Rz 表示。

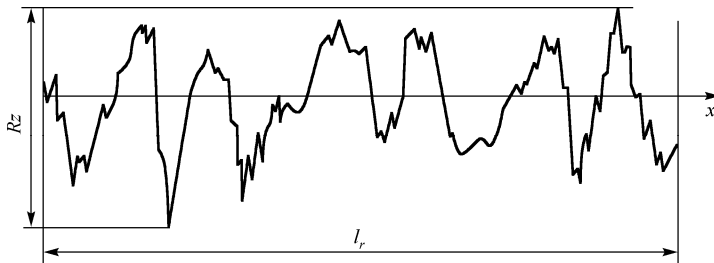


图 3-6 轮廓最大高度 Rz 示意图

(2) 间距参数

1) 轮廓微观不平度的平均间距。轮廓微观不平度的平均间距指在取样长度内轮廓微观不平度的间距的平均值,用 S_m 表示。所谓微观不平度的间距是指含有一个轮廓峰和相邻轮廓谷的一段中线长度,如图 3-7 所示。

2) 轮廓的单峰平均间距。轮廓的单峰平均间距是指在取样长度内轮廓的单峰间距的平均值，用 S 表示。所谓轮廓的单峰间距是指两相邻单峰最高点之间的距离在中线上投影的长度，如图 3-7 所示。

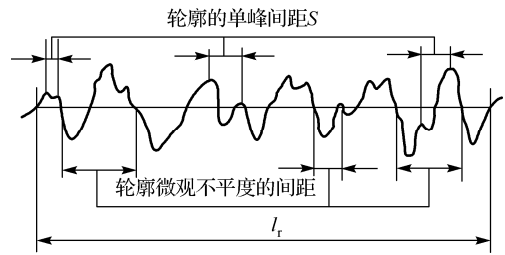


图 3-7 轮廓微观不平度的间距和轮廓的单峰间距

S_m 和 S 的数值已标准化，表 3-3 为 S_m , S 的系列值，表 3-4 为 S_m , S 的补充系列值。国家标准规定优先选用表 3-3 中的数值。

表 3-3 S_m , S 的系列值 (mm)

S_m, S	0.006	0.1	1.6
	0.0125	0.2	3.2
	0.025	0.4	6.3
	0.05	0.8	12.5

表 3-4 S_m , S 的补充系列值 (mm)

S_m, S	0.002	0.032	0.50	8.0
	0.003	0.040	0.63	10.0
	0.004	0.063	1.00	
	0.005	0.080	1.25	
	0.008	0.125	2.0	
	0.010	0.160	2.5	
	0.016	0.25	4.0	
	0.020	0.32	5.0	

(3) 轮廓支承长度率

轮廓支承长度率用 t_p 表示，是指轮廓支承长度 η_p 与取样长度之比。轮廓支承长度 η_p 是指在取样长度内，一平行中线的线与轮廓相截所得到的各段截线长度之和，如图 3-8 所示。用算式表示为：

$$\eta_p = b_1 + b_2 + \dots + b_i + \dots + b_n$$

式中， b_i ——第 i 段截线长度。

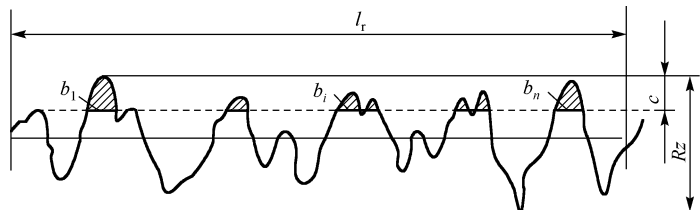


图 3-8 轮廓支承长度

(4) 一般规定

国家标准采用中线制轮廓法评定表面粗糙度，粗糙度的评定参数一般从 Ra 、 Rz 中选取，参数值见表 3-5、表 3-6。表中的“系列值”应优先选用。

表 3-5 轮廓算术平均偏差 (R_a) 的数值 (μm)

系列值	补充系列	系列值	补充系列	系列值	补充系列	系列值	补充系列
	0.008						
	0.010						
0.012			0.125		1.25	12.5	
	0.016		0.160	1.6			16.0
	0.020	0.20			2.0		20
0.025			0.25		2.5	25	
	0.032		0.32	3.2			32
	0.040	0.40			4.0		40
0.050			0.50		5.0	50	
	0.063		0.63	6.3			63
	0.080	0.80			8.0		80
0.100			1.00		10.0	100	

表 3-6 轮廓最大高度 (R_z) 的数值 (μm)

系列值	补充系列	系列值	补充系列	系列值	补充系列	系列值	补充系列	系列值	补充系列	系列值	补充系列
			0.125		1.25	12.5			125		1250
			0.160	1.60			16.0		160	1600	
		0.20			2.0		20	200			
0.025			0.25		2.5	25			250		
	0.032		0.32	3.2			32		320		
	0.040	0.40			4.0		40	400			
0.050			0.50		5.0	50			500		
	0.063		0.63	6.3			63		630		
	0.080	0.80			8.0		80	800			
0.100			1.00		10.0	100			1000		



在常用的参数值范围内 (R_a 为 $0.025 \sim 6.3\mu\text{m}$, R_z 为 $0.10 \sim 25\mu\text{m}$), 推荐优先选

用 R_a 。

国家标准 GB/T 3505—2009 虽然定义了 R 、 W 、 P 三种高度轮廓, 但常用的是 R 轮廓。当零件表面有功能要求时, 除选用高度参数 R_a 、 R_z 之外, 还可选用附加的评定参数。

3-2 表面粗糙度的标注

一、表面粗糙度的符号与代号

1. 表面粗糙度符号

表面粗糙度的基本符号如图 3-9 所示, 在图样上用粗实线画出。表面粗糙度符号的含义见表 3-7。

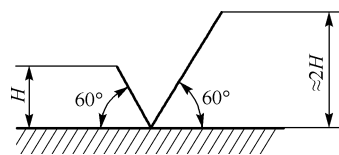


图 3-9 表面粗糙度的基本符号

表 3-7 表面粗糙度符号的含义

符号	名称	说明
	基本图形符号	仅用于简化代号标注, 没有补充说明时不能单独使用
	扩展图形符号	表示用去除材料方法获得的表面, 如通过机械加工获得的表面
		表示不去除材料的表面, 如铸、锻、冲压成形、热轧、冷轧、粉末冶金等; 也用于保持上道工序形成的表面, 不管这种状况是通过去除材料或不去除材料形成的
	完整图形符号	当要求标注表面粗糙度的补充说明时, 应在原符号上加一横线

2. 表面结构补充要求的注写位置

国家标准规定, 为明确表面结构要求, 除了标注表面参数和数值外, 必要时还应标注补充要求, 补充要求包括传送带、取样长度、加工工艺、表面纹理与方向、加工余量等。其标注内容的具体位置如图 3-10 所示。图中位置 $a \sim e$ 分别标注的内容见表 3-8。

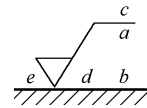


图 3-10 表面粗糙度完整图形符号

表 3-8 表面结构补充要求的注写位置内容

位置符号	标注内容
a	注写表面结构的单一要求。当有两个以上表面结构要求时, 在位置 a 注写第一个表面结构要求
b	当有两个结构表面要求时, 在位置 b 注写第二个表面结构要求或更多个表面结构要求
c	注写加工方法、表面处理、涂层或其他加工工艺要求等, 如车、铣、磨、铰等加工表面
d	注写表面纹理和方向、标注采用符号方法
e	注写所要求的加工余量, 以 mm 为单位给出数值

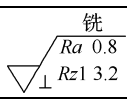

(1) 表面粗糙度代号的含义

表面粗糙度的代号是在其完整图形符号上标注各项参数构成的, 其参数标注和含义见表 3-9。

表 3-9 表面粗糙度代号的含义

代号	含义
	表示不允许去材料, 单向上限值, R 轮廓, 表面粗糙度的最大高度为 $0.4\mu m$, 评定长度为 5 个取样长度 (默认), “16%” 规则 (默认)
	表示去除材料, 单向上限值, R 轮廓, 表面粗糙度最大高度为 $0.2\mu m$, 评定长度为 5 个取样长度 (默认), “最大规则”
	表示去除材料, 单向上限值, 表面粗糙度的最大高度为 $0.8\mu m$, 算术平均偏差为 $3.2\mu m$, 评定长度包含 3 个取样长度, “16%” 规则 (默认)
	表示不允许去除材料, 双向极限值, R 轮廓, 上限值: 算术平均偏差 $3.2\mu m$, 评定长度为 5 个取样长度 (默认), “最大规则”, 下限值: 算术平均偏差、偏差 $0.8\mu m$, 评定长度为 5 个取样长度 (默认), “16%规则” (默认)
	零件的加工表面的表面粗糙度要求由指定的加工方法获得时, 用文字标注在符号上边的横线上
	在符号的横线上面可注写镀 (涂) 覆或其他表面处要求。镀覆后达到的参数值等要求也可在图样的技术要求中说明

续表

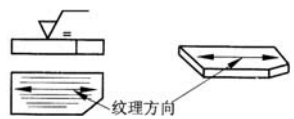
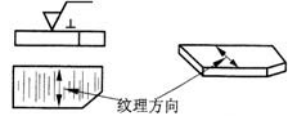
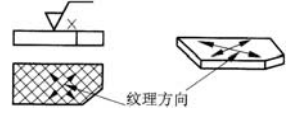
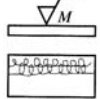
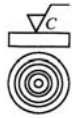

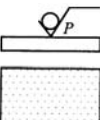
代号	含义
	需要控制表面加工纹理方向时，可在完整符号的右下方加注加工纹理方向符号
	在同一图样中，有多道加工工序的表面可标注加工余量。加工余量标注在完整符号的左下方，单位为 mm

提示 表面粗糙度代号中的参数在表示单向极限值时，只标注参数代号、默认值，默认为参数的上限值；在表示双向极限值时应标注极限代号，上限值在上方用 U 表示，下限值在下方用 L 表示。如果同一参数具有双向极限要求，在不引起争议的情况下可以不加 U、L。

(2) 加工纹理方向

需要控制表面加工纹理方向时，可在符号的右边加注加工纹理方向符号，常见的加工纹理方向符号见表 3-10。

表 3-10 常见的加工纹理方向符号

符号	说明	示意图
=	纹理平行于标注符号视图的投影面	
⊥	纹理垂直于标注符号视图的投影面	
×	纹理呈两斜向交叉且与视图所在的投影面相交	
M	纹理呈多方向	
C	纹理呈近似同心圆且圆心与表面中心相关	
R	纹理呈近似放射状且与表面圆心有关	
P	纹理无方向或凸起的细粒状	

提示 若表面纹理不能清楚地用这些符号表示，应在图样上用文字说明。

二、表面粗糙度在图样上的标注

国家标准中，表面粗糙度代（符）号可标注在轮廓线、尺寸界线或其延长线上，其符号应从材料外指向并接触表面，其参数的注写和读取方向与尺寸数字的注写和读取方向一致，如图 3-11 所示。必要时，表面粗糙度代（符）号可用带黑点或箭头的指引线引出标注，如图 3-12 所示。在不致引起误解时，表面粗糙度代（符）号还可以标注在给定的尺寸线上，如图 3-13 所示。表面粗糙度代（符）号还可标注在几何公差框格上方，如图 3-14 所示。

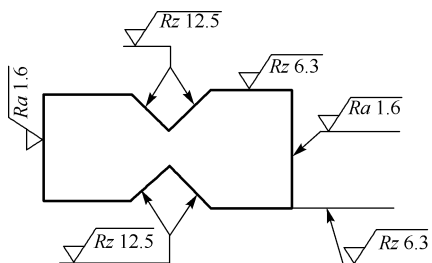


图 3-11 注写方向

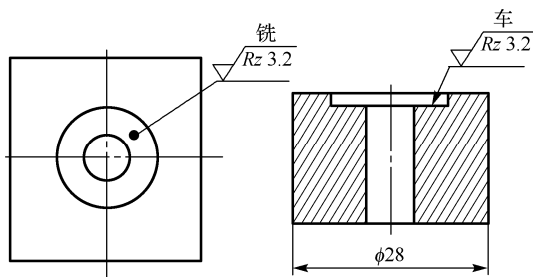


图 3-12 标注在指引线上

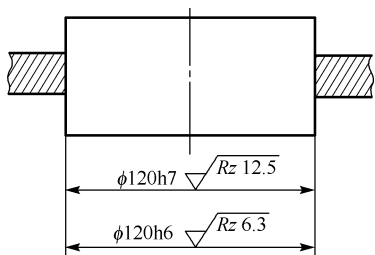


图 3-13 在给定尺寸线上标注

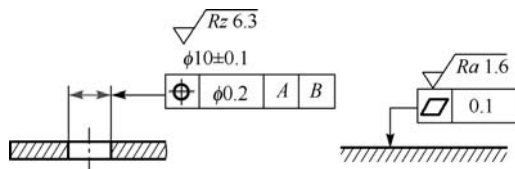


图 3-14 标注在几何公差的框格上

如果工件的大部分（包括全部）表面有相同的表面粗糙度要求，这个表面粗糙度可统一标注在图样的标题栏附近。此时表面粗糙度的符号后应有：在圆括号内给出无任何其他标注的基本符号，或在圆括号内给出不同的表面结构要求，如图 3-15 所示。

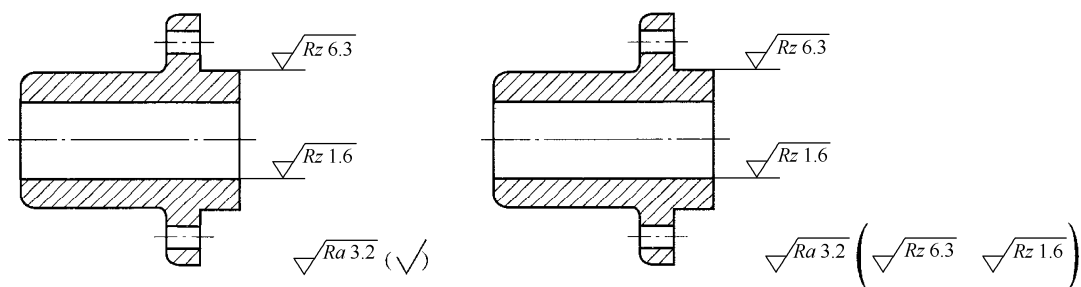


图 3-15 有相同表面结构要求的简化注法

当多个表面具有相同的表面结构要求或图样空间有限时，可以采用简化注法。可用带字母的完整符号，以等式的形式，在图形或标题栏附近，对有相同表面结构要求的表面进行简化标注，如图 3-16 所示。

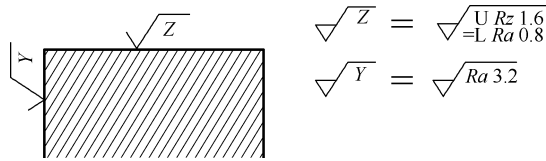


图 3-16 多个表面有共同要求的简化注法

由几种不同的工艺方法获得的同一表面，当需要明确每种工艺方法的表面结构要求时，可用虚线分开标注，如图 3-17 所示。

对于圆柱和棱柱的表面粗糙度要求只标注一次，如果每个棱柱表面有不同的表面粗糙度要求，则应分别单独标注，如图 3-18 所示。

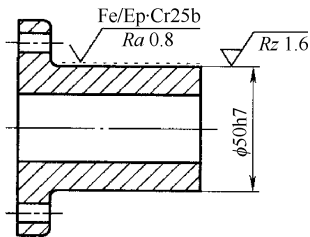


图 3-17 两种或多种工艺获得同一表面的注法

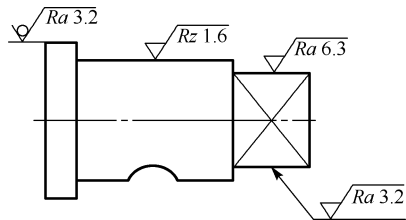


图 3-18 在圆柱和棱柱表面上的标注

三、表面粗糙度参数的选用

表面粗糙度参数（ R 轮廓参数）的选择应遵循在满足表面功能要求的前提下，尽量选用较大的粗糙度参数值的基本原则，以便简化加工工艺，降低加工成本。

表面粗糙度参数值的选择一般采用类比法，参见表 3-11，具体选择时应考虑下列因素。

- 1) 在同一零件上，工作表面一般比非工作表面的粗糙度参数值要小。
- 2) 摩擦表面比非摩擦表面的粗糙度参数值要小，滚动摩擦表面比滑动摩擦表面的粗糙度参数值要小，运动速度高、压力大的摩擦表面比运动速度低、压力小的摩擦表面的粗糙度参数值要小。
- 3) 承受循环载荷的表面及易引起应力集中的结构（圆角、沟槽等），其粗糙度参数值要小。
- 4) 配合精度要求高的结合表面、配合间隙小的配合表面及要求连接可靠且承受重载的过盈配合表面，均应取较小的粗糙度参数值。
- 5) 配合性质相同时，在一般情况下，零件尺寸越小，则粗糙度参数值应越小；在同一精度等级时，小尺寸比大尺寸、轴比孔的粗糙度参数值要小；通常在尺寸公差、表面形状公差小时，粗糙度参数值要小。
- 6) 防腐性、密封性要求越高，粗糙度参数值应越小。

表 3-11 给出了粗糙度参数值在某一范围内的表面特征及应用，供选用时参考。

表 3-11 表面粗糙度参数的表面特征与应用

表面特征		$Ra/\mu\text{m}$	$Rz/\mu\text{m}$	应用举例
粗糙表面	可见刀痕	>20~40	>80~160	半成品粗加工过的表面，非配合的加工表面，如轴端面、倒角、钻齿轮和带轮侧面、键槽底面、垫圈接触面等
	微见刀痕	>10~20	>40~80	

续表

加工方法		Ra 值 (μm)													
		0.012	0.025	0.05	0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	6.3	12.5	25	50	100
铣端面	粗														
	半精														
	精														
磨外圆	粗														
	半精														
	精														
磨平圆	粗														
	半精														
	精														
珩磨	平面														
	圆柱														
研磨	粗														
	精														
抛光	一般														
	精														

思考与习题

1. 什么是表面粗糙度？表面粗糙度对零件的使用性能有什么影响？
2. 什么是取样长度？为什么评定表面粗糙度必须确定一个合理的取样长度？
3. 试说明评定长度与取样长度的关系，并说明评定长度的作用。
4. 为什么在评定表面粗糙度的两个高度参数中，标准规定优先选用 Ra 参数？
5. 表面结构符号有哪几种？试说明各自的含义。
6. 什么是表面结构代号？画图说明标准规定各参数在符号上的标注位置。
7. 试说明最大规则和 16% 规则在意义和标注上的区别。
8. 表面结构符号、代号在图样上标注时有哪些基本规定？
9. R 轮廓参数（表面粗糙度参数）的选用一般采用什么方法？其遵循的基本原则是什么？