



材料和属性扩展

| | |
|----|-------|
| 版本 | 1.2.1 |
| 地位 | 发布 |

免责声明

这些材料按“原样”提供。贡献者明确否认任何保证（明示、暗示或其他方式），包括与材料相关的适销性、非侵权、适合特定用途或所有权的暗示保证。实施或以其他方式使用这些材料的全部风险由实施者和用户承担。在任何情况下，任何成员均不对任何其他方因利润损失或任何形式的

对于与本交付物或其管辖协议有关的任何诉讼原因而造成的任何性质的间接、特殊、偶然或结果性损害，不论是基于违约、侵权（包括疏忽）还是其他原因，也不论其他成员是否已被告知有此类损害的可能性。

目录

- 前言
 - 关于本规范
 - 文档约定
 - 语言说明
 - 软件一致性
- 第一部分 3MF 文件
 - 第 1 章 新增内容概述
 - 1.1. 资源
 -
 - 1.2. sRGB 和线性颜色值
 - 1.3 材料梯度和插值方法
 - 1.4. 基础材料
 - 第 2 章 颜色组
 - 2.1. 颜色
 - 第 3 章 纹理 2D 组
 - 3.1. 纹理二维坐标
 - 第 4 章 复合材料
 - 4.1. 复合材料
 -
 - 第 5 章 多重属性
 - 5.1. 多重
 -
 - 第 6 章 纹理 2d
 - 第 7 章 显示属性概述
 - 7.1. 镜面显示属性
 - 7.1.1. 镜面
 - 7.2. 金属显示属性
 - 7.2.1. 金属
 -
 -
 -
 - 7.3. 镜面纹理显示属性
 - 7.4. 金属纹理显示属性
 -

- 7.5. 半透明显示属性 7.5.1. 半透明
 -
- 第二部分。附录 附录 A. 词
 - 汇表 附录 B. 3MF 材料和属性 XSD 架构
 - 附录 C. 3MF 样本
 - C.1. 基于物理的材质示例 C.2. 半透明材质示例 附录
 - D. 微面片表面模型和 BRDF D.1. 法线分布函数
 - 数 – D(h)
 -
 - D.2. 几何遮挡项 – G(l, v, h)
 - D.3. 菲涅尔项 – F(l, h)
 - 附录 E. 标准命名空间和内容类型 E.1 内容类型 E.2 关系类型
 -
 -
 - E.3 命名空间
- 参考

前言

关于本规范

此 3MF 材料和属性规范是核心 3MF 规范的扩展。本文档不能独立存在,仅作为核心 3MF 规范的附录。此文档和任何其他 3MF 扩展的使用均遵循核心 3MF 规范中定义的点菜模型。

第 I 部分 “3MF 文档”介绍了主要基于 XML 的 3MF 文档格式的详细信息。本节介绍定义 3D 文档的组成和文档中每个模型的外观的 XML 标记。

第二部分 “附录”包含额外的技术细节和图表,由于篇幅过长,无法包含在正文中文本以及方便的参考信息。

本规范中包含的信息可能会发生变化。我们已尽最大努力确保其在发布时的准确性。

此扩展必须仅与核心规范 1.2 一起使用。

文档约定

参见[3MF 核心规范约定](#)。

在此扩展规范中,作为示例,前缀 “m”映射到 xml 命名空间 “<http://schemas.microsoft.com/3dmanufacturing/material/2015/02>”。参见附录[E.3 命名空间](#)。

语言说明

参见[3MF 核心规范语言注释](#)。

软件一致性

查看[3MF 核心规范软件一致性](#)。

第一部分 3MF 文件

第 1 章 新增内容概述

resourcesCT_Resources

choice [0..2147483647]

sequence

basematerials [0..2147483647]CT_BaseMaterials

idST_ResourceID

m:displaypropertiesidST_ResourceID

[anyAttribute]##other

base [1..2147483647]CT_Base

m:texture2d [0..2147483647]CT_Texture2D

idST_ResourceID

pathST_UriReference

contenttypeST_ContentType

tilestyleuST_TileStyle

tilestylevST_TileStyle

filterST_Filter

[anyAttribute]##other

m:texture2dgroup [0..2147483647]CT_Texture2DGroup

idST_ResourceID

texidST_ResourceID

displaypropertiesidST_ResourceID

[anyAttribute]##other

tex2coord [1..2147483647]CT_Tex2Coord

m:colorgroup [0..2147483647]CT_ColorGroup

idST_ResourceID

displaypropertiesidST_ResourceID

[anyAttribute]##other

color [1..2147483647]CT_Color

m:compositematerials [0..2147483647]CT_CompositeMaterials

idST_ResourceID

matidST_ResourceID

matindicesST_ResourceIndices

displaypropertiesidST_ResourceID

[anyAttribute]##other

composite [1..2147483647]CT_Composite

m:multiproperties [0..2147483647]CT_MultiProperties

idST_ResourceID

pidsST_ResourceIDs

blendmethodsST_BlendMethods

[anyAttribute]##other

multi [1..2147483647]CT_Multi

m:pbspeculardisplayproperties [0..2147483647]CT_PBSpecularDisplayProperties

m:pbspecular [0..2147483647]CT_PBSpecular

m:pbmetallicdisplayproperties [0..2147483647]CT_PBMetallicDisplayProperties

m:pbmetallic [0..2147483647]CT_PBMetallic

m:pbmetallictexturedisplayproperties [0..2147483647]CT_PBMetallicTextureDisplayProperties

m:pbspeculartexturedisplayproperties [0..2147483647]CT_PBSpecularTextureDisplayProperties

m:translucentdisplayproperties [0..2147483647]CT_TranslucentDisplayProperties

m:translucent [0..2147483647]CT_Translucent

[any] [0..2147483647]##other

object [0..2147483647]CT_Object

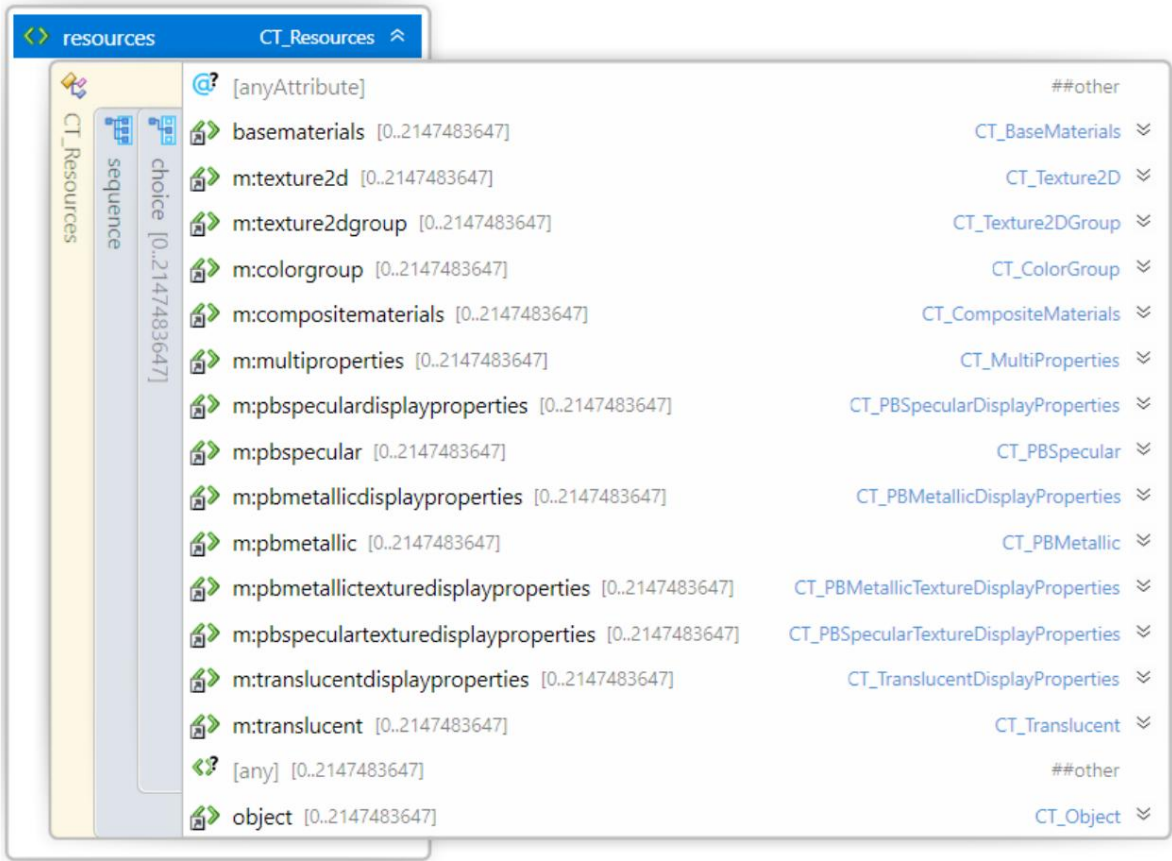
本章描述了新的非对象资源。这些资源对于生产者来说都是可选的,但必须得到指定支持 3MF 材料扩展的消费者的支持。

总体而言,以下资源组将确定表示零件材料特性的不同方式。
相应的资源 ID 可以被核心规范中定义的三角形属性引用。

由于现有的文件格式和用例需要每个三角形包含多条信息,因此可以为每个三角形定义多个属性 (请参阅第 5 章 “多属性”)。消费者必须严格遵守相应段落中规定的混合规则,以避免对设计意图产生歧义解释。

1.1. 资源

元素<resources>



此 3MF 扩展规范中定义的所有新元素都位于核心 3MF 规范中的 <resources> 元素下。<object> 和 <basematerials> 元素来自核心规范,其余元素则在后续章节中定义。此处显示的顺序在架构中不是强制的,因为这些扩展元素都属于核心规范中的 <any> 元素。

1.2. sRGB 和线性颜色值

3MF 核心规范 (5.1. 基础材料)提到,每当 3MF 使用以 #RRGGBB 十六进制量表示的颜色 (每个颜色通道有 8 位)时,它们就被假定为位于 sRGB 颜色空间中。3MF 使用万维网联盟(<http://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB>)指定的 sRGB。

由于人类对亮度的感知与物体实际亮度的对数大致相同,因此颜色数据通常使用非线性颜色分量传输进行编码。这种编码用于优化位的使用,尤其是当单个 R、G、B 颜色通道以 8 位数量表示时,例如 JPEG 和 PNG 的情况

格式。

为了进行逆变换,需要通过将每个通道除以 255 (或 2⁻¹,其中 n 是每个通道的位数)来获得标准化的 C_sRGB 颜色三元组:

n

C_sRGB = {R_sRGB,G_sRGB,B_sRGB} = {#RR/255,#GG/255,#BB/255}

其中 C_sRGB 是不包括 alpha 通道的 sRGB 颜色三元组,其元素规范化为 [0, 1] 范围。

从 sRGB 颜色空间到线性空间的逆变换定义为：

$$C_{linear} = \begin{cases} \frac{C_{sRGB}}{12.92}, & C_{sRGB} \leq 0.04045 \\ \left(\frac{C_{sRGB} + 0.055}{1.055}\right)^{2.4}, & C_{sRGB} > 0.04045 \end{cases}$$

必须将该方程分别应用于 C_sRGB 三元组中的每个通道以创建 C_linear 三元组。

```
C_线性 = {R_线性,G_线性,B_线性}
```

其中R_linear、G_linear、B_linear分别根据相关的R_sRGB、G_sRGB、B_sRGB值通过上述公式计算得出。

对于本规范,此转换称为逆颜色分量传输函数。除非另有规定,否则客户端应在 sRGB 中执行顶点颜色插值和纹理插值,但在进行多属性颜色混合之前,应将逆颜色分量传输函数应用于 sRGB 颜色。这些混合操作应在线性 RGB 空间中执行。这对应于计算机图形学和硬件支持的渲染操作中的常见做法。

从线性到 sRGB 颜色空间的前向颜色分量传递函数定义为：

$$C_{sRGB} = \begin{cases} 12.92 * C_{linear}, & C_{linear} \leq 0.0031308 \\ 1.055 * C_{linear}^{\frac{1}{2.4}} - 0.055, & C_{linear} > 0.0031308 \end{cases}$$

此方程必须分别应用于 C_linear 三元组中的每个通道。应用插值时,sRGB 值应保持在 [0, 1] 范围内。要将 sRGB 返回为 8 位三元组（例如,在保存到磁盘之前）,需将每个通道乘以每通道所需的位数（8 位为 255）,然后四舍五入为最接近的整数。

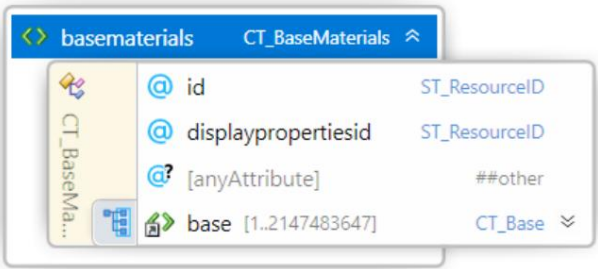
1.3 材料梯度和插值方法

3MF 核心规范 (4.1.4 三角形)描述属性,例如为三角形的每个顶点指定的颜色。具体来说,可以将 sRGB 三元组分配给三角形的每个顶点。三角形内的颜色渐变应通过使用重心坐标在 sRGB 中执行线性插值来计算。在 sRGB 空间中执行颜色顶点插值对应于 2D 和 3D 成像应用中的常见做法,并且比在线性 RGB 空间中的插值更接近于在感知均匀空间中的插值。

1.4. 基础材料

3MF 核心规范 (第 5 章:材料资源)描述基础材料类型。此扩展向基础材料元素添加了一个附加属性,该属性表示允许将材料真实地渲染到显示器上的显示属性。

元素<basematerials>



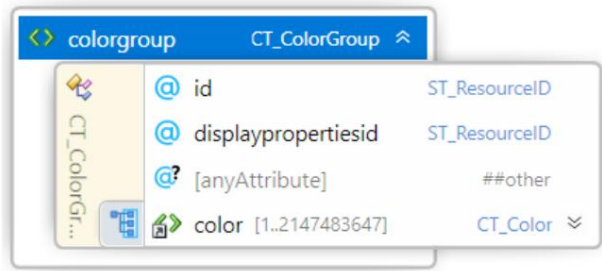
属性

| 姓名 | 类型 | 使用 | 默认 | 注解 |
|---------------------|-----------------|----|----|--|
| displaypropertiesid | ST_ResourceID可选 | | | 引用 <displayproperties> 元素,提供关于如何显示的其他信息 设备显示屏上的材料 |

displaypropertiesid 属性引用一个 <displayproperties> 组,其中包含描述如何
最好在设备显示屏上显示具有这种材质的网格。

第 2 章 颜色组

元素<colorgroup>



属性

| 姓名 | 类型 | 使用 | 默认 | 注解 |
|---------------------|-----------------|----|----|--|
| ID | 需要ST_ResourceID | | | 所有资源中的唯一 ID (可能包括来自规范扩展的元素)。 |
| displaypropertiesid | ST_ResourceID可选 | | | 引用 <displayproperties> 元素,提供关于如何显示的其他信息 设备显示屏上的材料 |
| @anyAttribute | | | | |

<colorgroup> 元素充当颜色属性的容器。

颜色元素的顺序形成一个隐式的基于 0 的索引,可供其他元素引用,例如 <object>
和 <triangle> 元素。

生产者可以定义多个 <colorgroup> 容器来帮助组织文件,例如通过对与以下方面相关的颜色进行分组:
具体对象。

displaypropertiesid 属性引用一个 <displayproperties> 组,其中包含描述如何
最好在设备显示屏上显示具有这种材质的网格。

<colorgroup> 描述一组表面颜色属性,不应引用半透明显示属性。
实现具有表面颜色的半透明效果,应改用多属性组。有关更多信息,
请参阅[第 7 章显示属性概述](#)。

为了避免整数溢出,颜色组必须包含少于 2^31 种颜色。

2.1. 颜色

元素<颜色>



属性

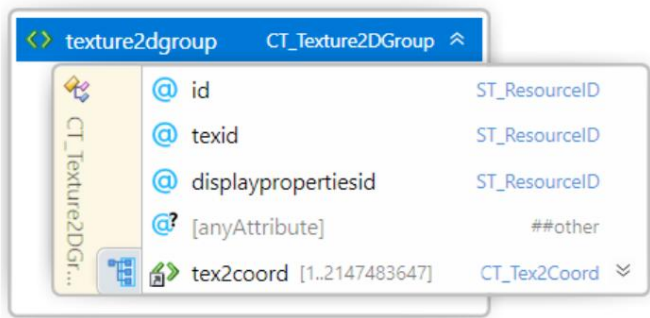
| 姓名 | 类型 | 使用 | 默认 | 注解 |
|-------------------|----|----|----|--------------------|
| 颜色ST_ColorValue必需 | | | | 指定用于渲染材质的 sRGB 颜色。 |

颜色用于表示丰富的颜色,特别是大多数 3D 格式所称的“顶点颜色”。这些元素用于当颜色是材料唯一感兴趣的属性时,需要很大的数字。格式相同 sRGB 颜色如核心 3MF 规范中定义。

除非在 <multiproperties> 中用作非基础层,否则颜色被认为是完全不透明的 (alpha = #FF) 元素。

第 3 章 纹理 2D 组

元素<texture2dgroup>



属性

| 姓名 | 类型 | 使用 | 默认 | 注解 |
|-------------------------------------|-----------------|----|----|--|
| ID | 需要ST_ResourceID | | | 所有资源中的唯一 ID（可能包括来自规范扩展的元素）。 |
| 特克西德 | 需要ST_ResourceID | | | 引用 <texture2d> 元素匹配 id 属性值。 |
| displaypropertiesid ST_ResourceID可选 | | | | 引用 <displayproperties> 元素,提供关于如何显示的其他信息设备显示屏上的材料 |
| @anyAttribute | | | | |

<texture2dgroup> 元素充当纹理坐标属性的容器。这些元素的顺序形成一个隐式的从 0 开始的索引,供其他元素（例如 <object> 和 <triangle> 元素）引用。它还指定通过 texid 指定要使用哪个图像。所引用的 <texture2d> 元素将在下面[第 6 章 Texture 2d 中描述](#)。

纹理的 alpha 通道被认为是完全不透明的 (alpha = #FF),除非用作 <multiproperties> 元素。

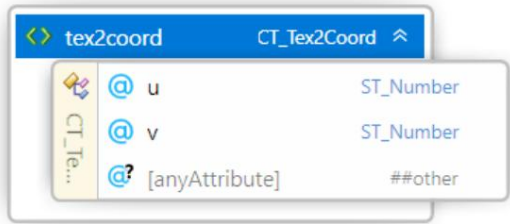
displaypropertiesid 属性引用一个 <displayproperties> 组,其中包含描述如何最好在设备显示屏上显示具有此材质的网格。 <texture2Dgroup> 描述一组表面颜色属性,不得引用半透明显示属性。要通过纹理实现半透明效果,必须使用多属性组。有关更多信息,请参阅[第 7 章“显示属性概述”](#)。

可以将 Texture 2D 分配给对象作为属性。在本例中,由 <tex2coord> 定义的 uv 映射选择指定给对象的颜色。

为了避免整数溢出,纹理坐标组必须包含少于 2^31 个 tex2coords。

3.1. 纹理二维坐标

元素<tex2coord>



属性

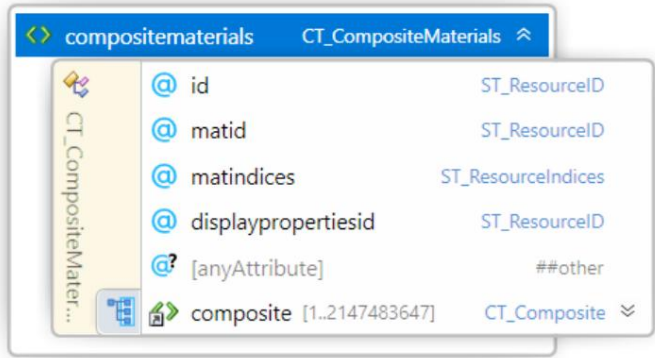
| 姓名 | 类型 | 使用 | 默认 | 注解 |
|---------------|-------------|----|----|----------------------------|
| 在 | 需要ST_Number | | | 纹理中的 U 坐标,水平方向从原点位于纹理的左下方。 |
| v | 需要ST_Number | | | 纹理内的 V 坐标,从原点垂直向上在纹理的左下方。 |
| @anyAttribute | | | | |

纹理坐标将三角形的顶点映射到图像空间中的位置 (U,V 坐标)。纹理映射允许高分辨率彩色位图可应用于任何表面。纹理映射相对于顶点映射的主要优势上一节中的颜色是,纹理允许颜色在比底层网格更精细的细节级别上,而顶点颜色总是与网格具有相同的分辨率。

纹理的左下角为 u,v 坐标 (0,0),右上角为 (1,1)。u,v 值不限于此范围。当 u,v 坐标超出 (0,0)-(1,1) 范围时,将应用 tilestyleu.tilestylev 根据第 6 章。纹理 2d。

第 4 章 复合材料

元素<compositematerials>



属性

| 姓名 | 类型 | 使用 | 默认 | 注解 |
|-----------------------------------|----------------------|-----|----|--|
| ID | ST_资源ID | 必需的 | | 所有资源中的唯一 ID（可以是包括来自规范扩展的元素）。 |
| 垫子 | ST_资源ID | 必需的 | | 参考基体材料组元素具有匹配的 id 属性值（例如 <基础材料>）。 |
| 明天 | 需要ST_ResourceIndices | | | 以空格分隔的 ST_ResourceIndex 列表材料成分的值 |
| displaypropertiesid ST_ResourceID | | 选修的 | | 引用 <displayproperties> 元素提供有关如何在设备显示屏上显示材料 |
| @anyAttribute | | | | |

元素

| 姓名 | 类型 | 使用 | 默认 | 注解 |
|------------------|----|----|----|----|
| 复合CT_Composite必需 | | | | |

<compositematerials> 元素充当复合材料的容器。这些元素的顺序形成一个隐式 0 开始的索引,供其他元素引用,例如 <object> 和 <triangle> 元素。生产者可以定义多个 <compositematerials> 容器,例如通过对不同材料的混合物进行分组。

<compositematerials> 元素定义了通过按规定比例混合 2 种或多种基础材料而得到的材料。这集体混合物被称为复合材料。 matid 属性指定所有成分来自,必须属于 <basematerials> 组。matindices 属性指定要混合的材料。

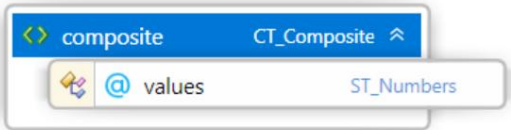
displaypropertiesid 属性引用一个 <displayproperties> 组,其中包含描述如何在设备显示屏上预览使用此材质的网格时,最好显示该材质。有关更多信息,请参阅 [第 7 章显示属性概述](#)。

为了便于观察,应将基础材料的显示颜色（如有）按相同的比例混合,以使其个体对整体的贡献。

为了避免整数溢出,复合组必须包含少于 2^31 个复合数。

4.1. 复合材料

元素<复合>



属性

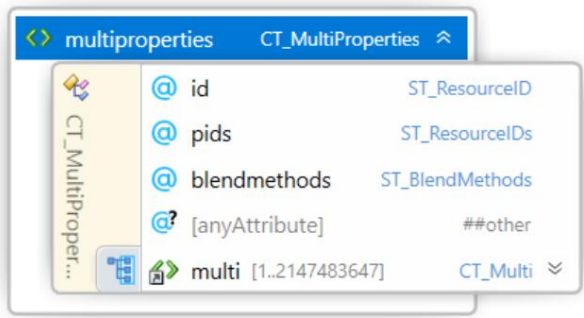
| 姓名 | 类型 | 使用 | 默认 | 注解 |
|---------------|--------------|----|----|--|
| 值 | 需要ST_Numbers | | | 以空格分隔的 0 至 1 之间的 ST_Number 值列表,包含代表材料分数成分。 |
| @anyAttribute | | | | |

<composite> 元素定义了一个 values 属性,该属性指定了每种材料在整体混合物中所占的比例。
如果价值总和大于零,消费者必须将每个价值除以所有成分价值的总和
值属性,以便为每种材料应用正确的比例。如果所有组成值属性的总和为零,则每个
值必须被视为 1.0 除以组成元素的数量。

如果值列表比 matindices 列表短,则消费者必须对未指定的值使用默认值零。
必须忽略额外的值。

第 5 章 多重属性

元素<multiproperties>



属性

| 姓名 | 类型 | 使用 | 默认 | 注解 |
|---------------|-----------------|------|----|---|
| ID | ST_资源ID | 必需的 | | 所有资源中的唯一 ID（可能包括来自规范扩展的元素）。 |
| 进程标识 | ST_资源ID | 必需的 | | 以空格分隔的 ST_ResourceID 值列表代表每个成分的属性组 |
| blendmethods | ST_BlendMethods | 可选混合 | | 定义混合时要使用的方程列表 每层与前一层：“混合”或“相乘”。 应为每一层指定一个值减去 第一层被忽略。 |
| @anyAttribute | | | | |

元素

| 名称类型 | | 使用 | 默认 | 注释 |
|------|------------|----|----|----|
| 多 | 需要CT_Multi | | | |

<multiproperties> 元素充当 <multi> 元素的容器,这些元素是可索引的属性索引组。
这些元素的顺序形成一个隐式的基于 0 的数组,该数组由其他元素引用,例如 <object> 和
<triangle> 元素。

pids 列表按分层和混合的顺序枚举属性组 ID。pids 列表不得
包含对材料（基础或复合材料）的多个引用。pids 列表不得包含多个
对颜色组的引用。pids 列表不得包含对多属性的任何引用。生产者可以定义
多个 <multiproperties> 容器,例如以不同的顺序分层纹理或指定不同的材质。

如果包含材质,则必须将其定位为构成第一层的列表中的第一个元素,并带有颜色信息 -
纹理或颜色,在后续的层中。这种排列通过定义封闭的
“外壳” 在其顶部混合了多属性中的其他层。

首先,对属性进行独立采样,并在三角形上进行线性插值,然后使用顺序进行分层

在 `pids` 属性中指定。要确定最终颜色,需要通过考虑所有图层的不透明度和混合模式来累积它们各自的贡献。处理图层时,会将其与之前混合操作的已累积结果混合,形成新的累积值。

`blendmethods` 属性允许生成器指定在两个图层之间混合颜色时使用的公式。`blendmethods` 属性提供了与组中每个图层相关联的“混合”或“相乘”值列表,描述如何与前一个图层结果混合。由于 `blendmethod` 在成对的图层中工作,因此必须省略第一层的 `blendmethod`。如果图层数多于列表中指定的 `blendmethods` 值 + 1,则“混合”被视为默认操作。`blendmethods` 的数量不得多于图层 - 1。

对于每种混合方法,都提供了一个指定 RGB 值操作的方程。初始累积的 RGB 值取自第一层,混合过程从第二层开始,一直持续到处理完所有后续层为止。

如果第一层是材料层,则可能无法始终确定初始累积的 RGB 值。例如,用户打印选项可能指示使用金属材料,或者可能存在指示半透明外观的显示属性。因此,如果存在材料层,消费者应跳过第一层(包括 `<blendmethods>` 列表中的第一个条目),并不仅累积 RGB,还累积后续层的不透明度贡献。

为此,每种混合方法都指定了第二个方程,用于累积 alpha。一旦知道了最终的 alpha 值,就会将累积的 RGB 颜色应用于材料表面,并使用累积的 alpha 值作为不透明度。

例如,如果累积的 alpha 值表示不透明度为 70%,则意味着 RGB 颜色的应用方式使得 30% 的底层表面显示出来。如果我们将表面想象成一组无限小的微面,则新层在统计上应覆盖 70% 的微面面积。这可能取决于消费者。例如,观看消费者可能会将材料的显示颜色作为底层表面颜色,以 alpha 混合累积的颜色,或者彩色印刷消费者可能会将颜色喷涂在实际材料的顶部,其密度取决于累积的 alpha。

初始累积的 alpha 值以及第一层不透明度被假定为完全不透明。但是,在跳过第一层的情况下(如上所述),第二层的 RGBA 用于初始化累积的 RGB 颜色和 alpha。在这种情况下,混合从第三层开始。

线性“混合”插值由对 RGB 和 alpha 的以下操作定义:

```
累积颜色.rgb = 新图层.rgb * 新图层.a + 累积颜色.rgb * (1 - 新图层.a)
累积颜色.a = 新图层.a + 累积颜色.a * (1 - 新图层.a)
```

“乘法”混合方法由以下方程式定义:

```
累积颜色.rgb = newLayer.rgb * 累积颜色.rgb
累积颜色.a = 新图层.a * 累积颜色.a
```

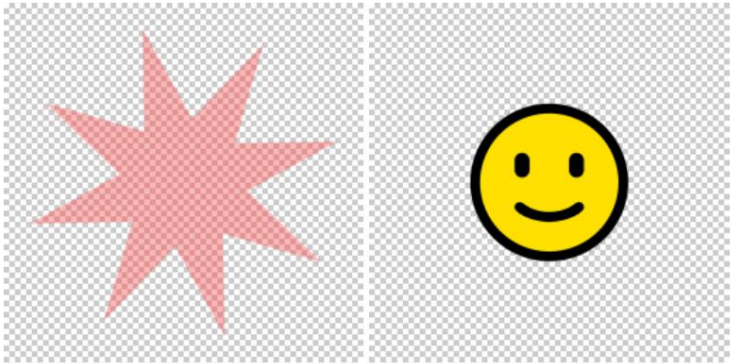
对于混合操作,alpha 值必须介于 0 和 1 之间。对于 8 位编码,实际编码值需要除以 255。

混合操作应在线性 RGB 空间中执行。因此,需要将逆颜色分量传递函数应用于源颜色和目标颜色的每个分量。在计算机图形学中,混合操作通常在线性 RGB 空间中执行。

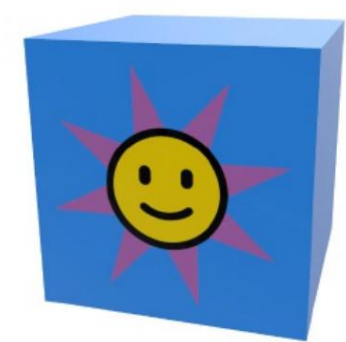
注意:具有图形艺术背景且喜欢在 sRGB 或任何其他颜色空间中执行颜色混合的用户建议在 2D 成像应用程序中执行合成,然后将混合的 2D 纹理应用于对象。

让我们考虑以下例子:

我们希望将两个包含指示透明度的 alpha 通道信息的纹理层应用于 `<triangle>` 元素。
第一个纹理是半透明的星形图案,不透明度为 50%,第二个纹理是完全不透明的表情符号,但边框区域除外,边框区域完全透明:



当应用于不透明的蓝色物体时,我们预期得到以下结果:



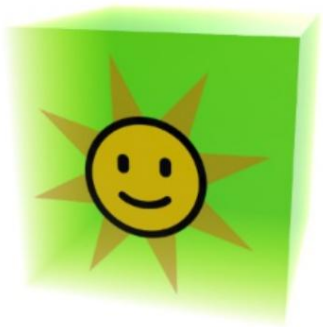
为了实现此效果,可以使用多属性,其中第一层是包含蓝色的颜色组。混合过程从获取蓝色的 RGB 开始,然后根据方法如上所述。

让我们进一步假设使用基础材料而不是颜色组。消费者可能无法确定其颜色 (除了依赖其显示颜色值) ,直到实际打印出来。因此,消费者应首先累积第二层和第三层的整体 RGB 和不透明度贡献,得到以下结果:

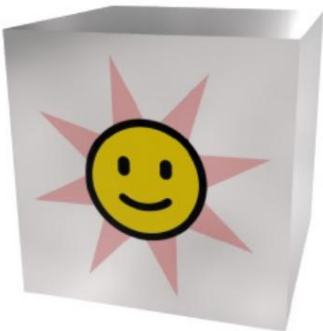


然后,将累积结果应用于实际材质表面,同时考虑 RGB 和不透明度,本质上执行隐式的“混合”操作。

如果显示属性指示使用半透明材料 (在本例中为黄绿色) ,则观看消费者可以将材质层渲染为半透明,以允许底层模型材质“透过”透明纹理显示出来区域。



当第一层具有显示金属外观的显示属性时,或者当打印采用金属材料:



显示属性可以在多属性的多个层上定义。在这种情况下,由消费者决定如何呈现多属性元素的显示属性。建议将第一层的显示属性用作多属性元素的显示属性。但是,更高级的应用程序可以选择混合各个层的显示属性以提供更逼真的视图。

实际打印时,必须忽略显示属性。但在屏幕上渲染时,应混合显示颜色和显示属性以提供逼真的预览。如果不清楚如何混合显示属性(例如,在常规颜色和金属色之间“相乘”混合),消费者可以忽略显示属性并将两个值都降低为纯 RGB。

打印机可以模拟在材料上喷涂颜色,方法是将累积颜色与累积 alpha 混合在材料实际颜色之上,然后打印最终颜色。混合是一种隐式“混合”,覆盖 blendmethods 中指定的方法,如下所示:

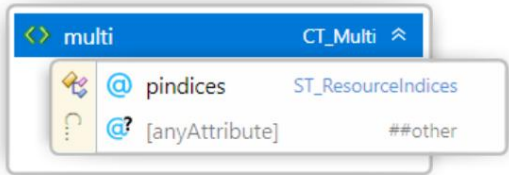
```
打印颜色.rgb = 累积颜色.rgb * 累积颜色.a + 材料颜色.rgb * (1 - 累积颜色.a)
```

请注意,3MF 文档中未指定实际材料颜色,但其他打印机可能知道该颜色方法。

为了避免整数溢出,多属性组必须包含少于 2^31 个 <multi> 元素。

5.1. 多

元素<多>



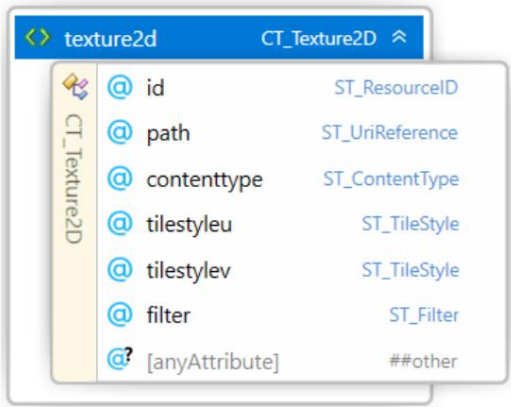
属性

| 姓名 | 类型 | 使用 | 默认 | 注解 |
|---------------|----------------------|----|----|-----------------------------------|
| 指数 | 需要ST_ResourceIndices | | | 以空格分隔的 ST_ResourceIndex 值列表 选民 |
| @anyAttribute | | | | |

<multi> 元素组合了组成材料和属性。pindices 属性是一个空格分隔的列表,其中包含
属性索引按与在
<multiproperties> pids 列表。如果 pindices 列表比 pids 列表短,则消费者必须使用默认索引零
任何未指定的 pindices。额外的 pindices 必须被忽略。

第 6 章 纹理 2d

元素<texture2d>



属性

| 姓名 | 类型 | 使用 | 默认 | 注解 |
|---------------|-------------------|-----|----|--|
| ID | ST_资源ID | 必需的 | | 为此纹理资源指定唯一标识符。 |
| 小路 | 需要ST_UriReference | | | 指定纹理数据的部分名称。 |
| 内容类型 | 需要ST_ContentType | | | 指定 2D 纹理部分的内容类型 路径属性引用。有效值为 图像/jpeg 和 图像/png。 |
| tilestyleu | ST_TileStyle | | 裹 | 指定如何在 u 轴上进行平铺,以便 填充整个请求区域。有效值为 wrap、 镜子,夹具,无。 |
| tilestylev | ST_TileStyle | | 裹 | 指定如何在 v 轴上平铺,以便 填充整个请求区域。有效值为 wrap、 镜子,夹具,无。 |
| 筛选 | ST_过滤器 | | 汽车 | 指定缩放时应用的纹理过滤器 源纹理。允许的值为 “auto”、“linear” , “最近” |
| @anyAttribute | | | | |

2D 纹理资源提供有关纹理图像数据的信息,可通过提供的路径引用找到,必须
也是来自 3D 模型部分的 3D 纹理关系的目标。

contenttype - 唯一支持的内容类型是 JPEG 和 PNG,如 3MF 核心规范中所述
6.1. 缩略图部分。

下表显示了可能的输入像素布局的逻辑解释。符号含义如下:R – 红色,G – 绿色,B – 蓝色,A – alpha,Y – 灰度。

例如,如果规范规定某个值是从纹理的 R 通道采样的,但引用的纹理仅为单色,则灰度通道将被解释为 R 颜色通道。同样,从单色纹理采样的颜色值被解释为好像所有 R、G、B 颜色通道共享相同的灰度值。

作为 RGBA 值的逻辑解释:

| | | | | |
|--------|--------|--|--|--|
| 输入像素布局 | | | | |
| RGBA* | RGBA | | | |
| RGB | RGB#FF | | | |
| 的* | YYYY | | | |
| 和 | YYY#FF | | | |

- *这些像素布局仅受 PNG 格式支持。

如果纹理中没有 alpha 通道,则应使用默认值 #FF (不透明)。除非另有规定,否则 alpha 通道假定位于线性空间中,而颜色和灰度通道假定位于 sRGB 颜色空间中。纹理过滤应在 sRGB 中执行,但客户端应在进行多属性混合等线性操作之前执行到线性 RGB 的转换 (参见[1.2. sRGB 和线性颜色值](#))。

box 属性在 1.2 版中已弃用。生产者不应生成该属性,消费者应忽略该属性。

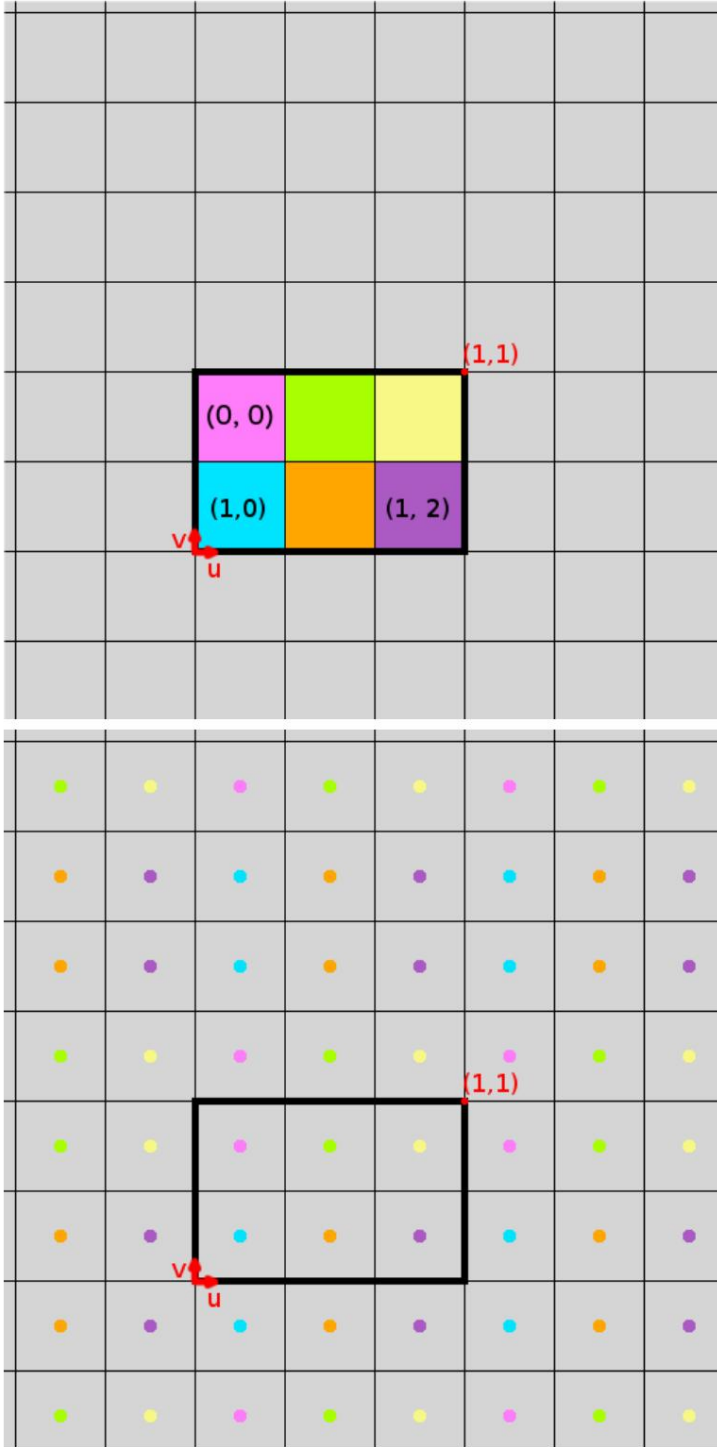
tilestyleu.tilestylev - 平铺样式 “wrap”本质上意味着,对于轴值,应在指定轴 (正向和负向)上重复相同的纹理。平铺样式 “mirror”意味着,每次超出纹理宽度或高度时,纹理的下一重复应在垂直于相关轴的平面上反射。平铺样式 “clamp”意味着,所有超出 0 到 1 范围的纹理 2D 坐标都将被分配最近边缘像素的颜色。平铺样式 “none”与 “clamp”类似,意味着所有超出 0 到 1 范围的纹理 2D 坐标都将被分配最近边缘像素的颜色,但具有完全透明的 alpha (#RRGGBB00),以便在多属性中使用时可以透过下面的图层。

当使用图块样式 “none”作为单个属性或多属性的基础层时,alpha 将被忽略并且其行为如同 “clamp”。

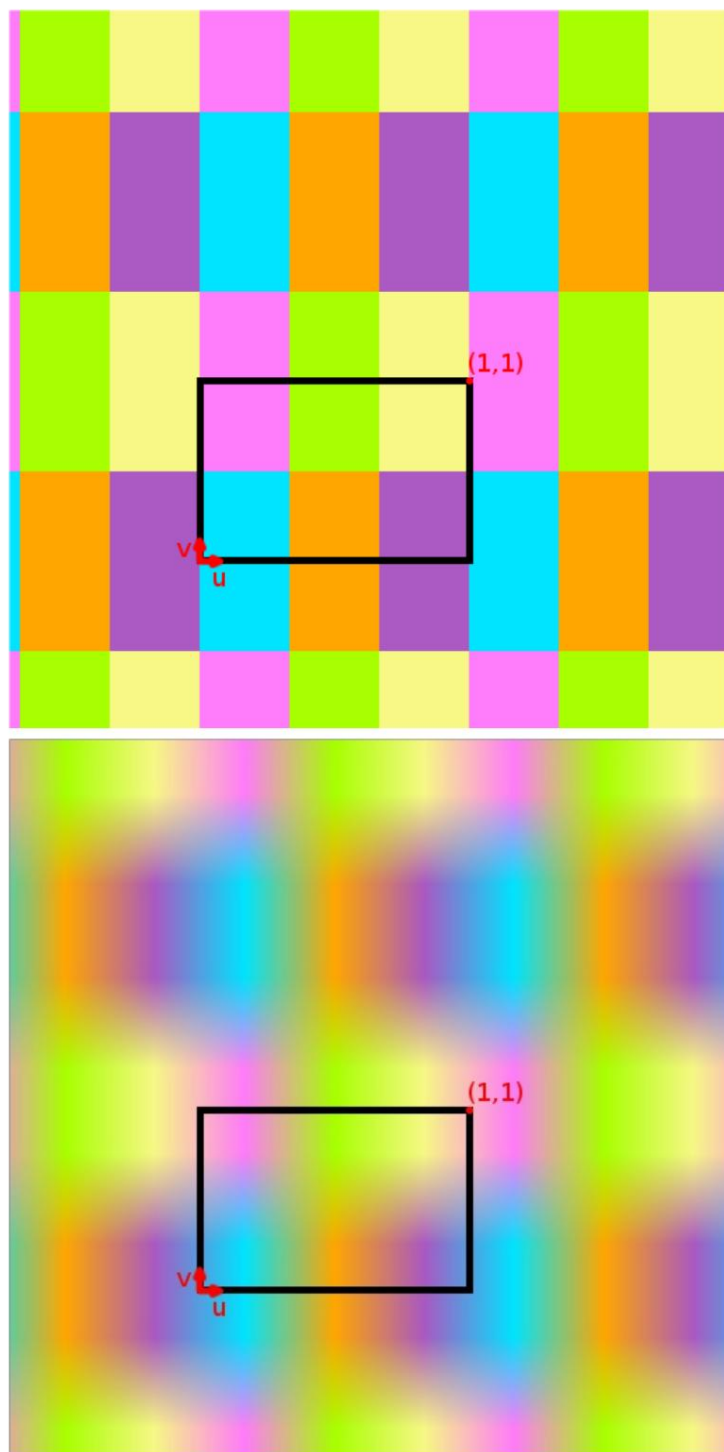
过滤器- 生产者可以要求使用特定的过滤器类型,方法是指定 “线性”用于双线性插值或 “最近”用于最近邻插值。生产者应使用 “自动”来指示消费者使用可用的最高质量的过滤器。如果源纹理随模型缩放,则必须将指定的过滤器类型应用于缩放操作。默认值为 “自动”。

以下示例显示了如何将滤镜应用于纹理。图 6-1 显示了一个小纹理的示例,该纹理通过垂直镜像和水平包裹平铺。它说明纹理像素位于每个单元的中心。所有滤镜操作都应在 sRGB 中执行。

*图 6-1:用作示例的图像和平铺,显示纹理像素的位置。



最后,图 6-2 显示了通过填充单元格输出的最近和线性滤波器。*图 6-2:3 x 2 的纹理过滤图像 (图 1a)中 `tilestyleu=WRAP` 和 `tilestylev=MIRROR`。



第 7 章显示属性概述

显示属性包含有关材质的额外信息,有助于描述材质,以便材质能够真实一致地呈现在屏幕上。例如,金属材质会非常闪亮且反光,而半透明材质则允许光线穿过。此信息主要用于显示目的。

基于物理的渲染 (PBR) 是一种实时渲染材质的方法,可在各种光照条件下提供符合物理规律的表面反射。它可以被视为颜色的延伸,其中表面也由其镜面反射率和粗糙度定义。

大多数现实世界的材料分为两类:

1. 非金属 (电介质)。塑料或陶瓷等材料的反射性往往较低,穿透表面的光线通常会散射并重新发射回环境中。因此,它们的漫反射率可能非常高,而镜面反射率通常仅为 4% 左右。镜面反射通常是无色的。

2. 金属（导体）。这些材料往往反射性很强,它们通常会吸收而不是散射任何穿透表面的光。因此,它们的镜面反射率极高,漫反射率接近于零。镜面反射可以带颜色,例如金和铜。

由于这种二元性,一些系统采用了所谓的金属工作流程,其中材料由其表面颜色和其表现为金属的程度来定义。另一种广泛采用的方法是所谓的镜面工作流程,其中漫反射和镜面反射都明确定义为 sRGB 颜色三元组。

这两种工作流程都使用一个附加参数来指定表面粗糙度,或者其补充值,称为光泽度（或平滑度）。在本文档中,术语“金属工作流程”和“金属表现”以及“镜面工作流程”和“镜面表现”可互换使用。

对于这两种工作流程,3MF 都定义了材料的“平面”和“纹理”表示。

基于物理的材料仅指定材料在物体表面的外观。它们不描述材料在物体体积中的分布。同样,它们也不描述材料的化学成分。

半透明材料具有允许光线穿过的特性,这与不透明材料不同,不透明材料会反射部分电磁波谱,同时吸收其他部分。未反射到环境中的部分光线在穿过材料时会发生折射并逐渐被吸收。物体厚度对光线吸收量起着重要作用。透明材料仅影响其透过的光量,而半透明材料甚至可以改变其路径,从而产生更加漫射的外观。这种外观可以归因于两个因素的结合 由于物体表面粗糙度而导致的表面散射和由于材料中的微观不均匀性而导致的体积散射。在后一种情况下,光线不会沿着直线路径传播,而是在物体内部反射多次,然后才被吸收或重新发射到其他地方。

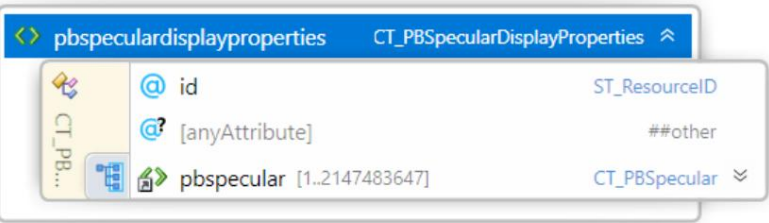
显示属性由这五种类型表示 - 镜面反射、金属反射、带纹理的镜面反射、带纹理的金属反射和半透明。

“metallic”、“specular”和“translucent”类型仅对<basematerials>、<compositematerials>和<colorgroup>有效。其中“metallictexture”和“speculartexture”仅对<texture2dgroup>有效。

三角形上定义的显示属性（来自显示属性组）不得形成渐变,因为本规范未定义基于物理的材料之间的插值。消费者必须将 p1 属性应用于整个三角形。属性 p2 和 p3 必须未指定,或者必须等于 p1。

7.1. 镜面显示属性

元素<pbspeculardisplayproperties>



| 姓名 | 类型 | 使用 | 默认 | 注解 |
|---------------|-----------------|----|----|-----------------------------|
| ID | 需要ST_ResourceID | | | 所有资源（可能包括来自规范扩展的元素）中的唯一 ID。 |
| @anyAttribute | | | | |

元素

| 姓名 | 类型 | 使用 | 默认注释 | |
|--------------------------|----|----|------|--|
| pbspecular CT_PBSpecular | 需要 | | | |

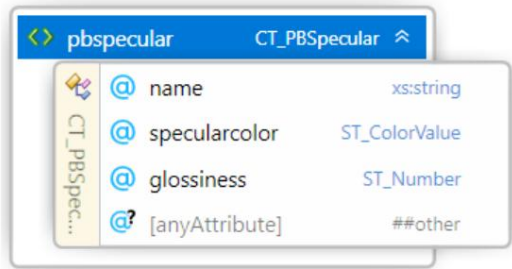
<pbspeculardisplayproperties> 位于 <resources> 下,包含一组属性,描述如何真实地显示镜面材质。它们可选择通过“displaypropertiesid” 属性。

<pbspeculardisplayproperties> 是一个或多个 <pbspecular> 元素的容器。

元素的顺序和数量形成一个隐式的基于 0 的索引,与元素的顺序和数量相同关联的材料组。例如,如果 <basematerials> 组包含指向 <pbspeculardisplayproperties> 元素,将有与 <basematerial> 相同数量的 <pbspecular> 元素元素中第一个 <pbspecular> 元素描述组中第一个 <basematerial>。

7.1.1. 镜面反射

元素<pbspecular>



属性

| 姓名 | 类型 | 使用 | 默认 | 注解 |
|-------------------|--------|-----|---------|--------------|
| 姓名 | xs:字符串 | 必需的 | | 指定材料名称 |
| 镜面颜色ST_ColorValue | | | #383838 | 镜面反射值 |
| 光泽度 | ST_ 编号 | | 0 | 表面光泽度 (平滑度)值 |
| @anyAttribute | | | | |

<pbspecular> 元素根据与其关联的材质的颜色属性推断漫反射颜色。例如,当 <pbspecular> 显示属性与 <basematerial> 关联时,basematerial 中的 “displaycolor”属性指定使用 pbspecular 显示属性应用的漫反射颜色。类似地,当 <pbspecular> 显示属性为与 <color> 材质相关联,“color”属性指定要应用的漫反射颜色。

漫反射颜色描述表面颜色。它是 sRGB 颜色三元组,指定表面的漫反射率。它表示以漫反射方式从表面反射的红、绿、蓝光的比例波长区域。漫反射是一个理想化的概念,其中入射光向所有方向散射与其到达的角度无关。

为了获得可用于照明计算的 0..1 范围内的 RGB 系数,逆颜色分量必须应用转换函数 (参见1.2. sRGB 和线性颜色值)将颜色从 sRGB 颜色空间转换为线性 RGB 空间。

姓名

材料名称旨在传达设计意图。生产商应避免使用特定于机器的命名,而应使用更多便携式描述。

镜面颜色

镜面反射颜色是 sRGB 颜色三元组,用于指定法线入射 (光束垂直于表面的情况)时表面的镜面反射率。它表示在红、绿和蓝波长范围内以镜面方式从表面反射的光的比例。与漫反射不同,镜面反射取决于观察者的位置和入射角。直观地说,该参数描述了表面反射的强度和色调。

默认值 #383838 对应于塑料和其他介电材料常见的线性镜面反射值 (0.04, 0.04, 0.04)。

为了获得可用于照明计算的 0..1 范围内的线性 RGB 系数,必须应用逆颜色分量传递函数 (参见1.2. sRGB 和线性颜色值) 。

光泽度

光泽度是 0..1 范围内的标量表面属性,用于指定表面的光滑程度。现实世界的表面具有微观缺陷,这些缺陷会导致入射光散射。由于这些缺陷超出了普通 3D 打印机和显示器的分辨率,因此假设可以使用微面表面模型 (参见附录 D。微面表面模型和 BRDF)对它们的散射特性进行统计建模,其中表面由无限小的镜面组成,这些面仅根据其方向 (法线)向一个方向反射光。值为 1 表示表面非常光滑,微面法线的方向与表面法线相同。

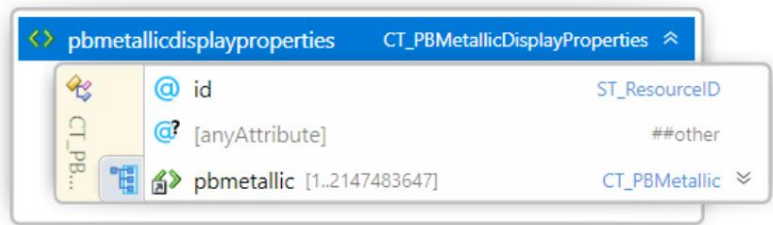
值为 0 表示表面非常粗糙,其微面法线分布为均匀的半球。

消费者应遵循 GLTF 指定的行为,根据粗糙度/光泽度材料参数确定表面反射特性,以获得一致的视觉效果。有关更多信息,请参阅附录 D。

微面片表面模型和BRDF或GLTF 2.0规范附录B:BRDF实现。

7.2. 金属显示特性

元素<pbmetallicdisplayproperties>



属性

| 姓名 | 类型 | 使用 | 默认 | 注解 |
|---------------|-----------------|----|----|------------------------------|
| ID | 需要ST_ResourceID | | | 所有资源 (可能包括来自规范扩展的元素)中的唯一 ID。 |
| @anyAttribute | | | | |

元素

| 姓名 | 类型 | 使用 | 默认 | 注解 |
|------------|-----------------|----|----|----|
| pbmetallic | CT_PBMetallic需要 | | | |

<pbmetallicdisplayproperties> 位于 <resources> 下,包含一组描述如何真实显示金属材质的属性。它们可以通过 “displaypropertiesid”属性与特定材质关联。

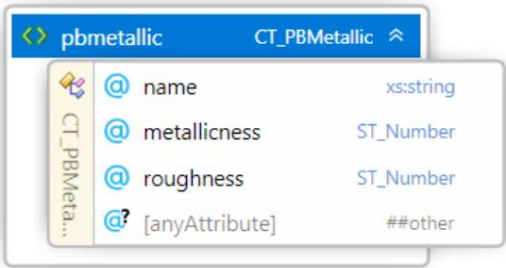
<pbmetallicdisplayproperties> 是一个或多个 <pbmetallic> 元素的容器。

元素的顺序和数量形成一个隐式的基于 0 的索引,与元素的顺序和数量相同

关联的材料组。例如,如果 <basematerialgroup> 包含指向 <pbmetallicdisplayproperties> 元素,将有与 <basematerial> 相同数量的 <pbmetallic> 元素元素中第一个 <pbmetallic> 描述组中第一个 <basematerial>。

7.2.1. 金属

元素<pbmetallic>



属性

| 姓名 | 类型 | 使用 | 默认 | 注解 |
|------------------|---------------|-----|----|--------|
| 姓名 | xs:字符串 | 必需的 | | 指定材料名称 |
| 金属度ST_Number需要 0 | | | | 表面金属性 |
| 粗糙度 | ST_Number必填 1 | | | 表面粗糙度 |
| @anyAttribute | | | | |

金属属性根据与其关联的特定材质的颜色属性推断出基色（显示颜色来自基础材料,例如）：

- 1. 当 metalness = 0 时,它代表 7.1.1 中描述的“diffusecolor”。[镜面](#)反射率默认为 (0.04, 0.04, 在这种情况下,值为 0.04。
- 2. 对于 metalness = 1,它代表 7.1.1 中描述的“specularcolor”。[镜面反射](#)。在这种情况下,漫反射默认为 (0,0,0)。

在这两种情况下, [1.2](#)中描述的逆颜色分量传输函数。sRGB 和线性颜色值必须是执行以获得用于照明计算的线性 RGB 值。对于任意金属度值,等效漫反射颜色和镜面颜色值应根据以下公式计算：

漫反射颜色 = (1 - 金属度) * (1 - 0.04) * 基色

其中 0.04 表示线性默认镜面反射值,源自[1.2 中将 sRGB 应用于线性公式](#)。[sRGB 和线性颜色值](#)为#383838。

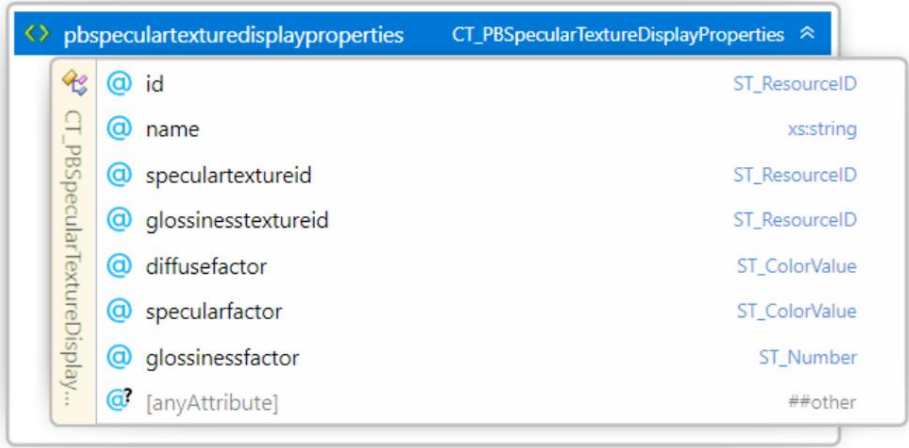
名称名称属性旨在传达设计意图。生产者应避免使用特定于机器的命名,而应使用更加便携的描述。

金属度金属度是一个标量值,范围在 0..1 内,用于描述材料金属性。值为 1 表示纯金属,而 0 表示非金属（电介质）表面。可以使用中间值但不鼓励这样做,除非设计意图是表示复合材料或含有杂质的金属材料。

粗糙度0..1 范围内的标量值,表示表面粗糙度。（1 - 粗糙度）的值具有相同的含义与[7.1.1. 镜面反射中描述的‘光泽度’](#)相同。

7.3. 镜面纹理显示属性

元素<pbspeculartexturedisplayproperties>



属性

| 姓名 | 类型 | 使用 | 默认 | 注解 |
|-------------------------------------|-----------------|-----|---------|----------------------------|
| ID | 需要ST_ResourceID | | | 所有材料组中的唯一ID（可以包括来自扩展的元素规格） |
| 姓名 | xs:字符串 | 必需的 | | 指定材料名称,旨在传达设计意图 |
| 镜面纹理 ID | 需要ST_ResourceID | | | 引用 <texture2d> 元素匹配 id 属性值 |
| glossinesstextureid ST_ResourceID必需 | | | | 引用 <texture2d> 元素匹配 id 属性值 |
| 弥散因子 | ST_ColorValue | | #FFFFFF | 漫反射颜色乘积因子 |
| 镜面反射因子 | ST_ColorValue | | #FFFFFF | 镜面反射倍增因子 |
| 光泽度因子 | ST_ 编号 | | 1 | 光泽度倍增因子 |
| @anyAttribute | | | | |

<pbspeculartexturedisplayproperties> 包含一组属性,描述如何真实地显示纹理镜面反射材料。

<pbspecular> 和 <pbspeculartexture> 之间的区别在于漫反射颜色、镜面反射颜色和光泽度参数没有明确指定 而是从相应的 <texture2d> 资源中采样, speculartextureid 和 glossinesstextureid。通过纹理查找获得的值随后按分量相乘通过相应的<texture2d>资源、specularfactor和glossinessfactor方式。

假设颜色值位于 sRGB 颜色空间中。因此,逆分量传递函数必须是 在进行分量乘法之前应用。从 <texture2d> 资源中采样的光泽度值 由 glossinesstextureid (以及 glossinessfactor)引用的被认为是线性的,没有逆分量传递函数是必要的。

引用此显示属性的纹理材质中包含一个漫反射纹理。 <texture2d> 资源应该被忽略,并且假定纹理是完全不透明的。

消费者必须应用 <texture2d> 元素中定义的纹理寻址属性 (tilestyleu.tilestylev.filter) 纹理材质引用到 <texture2dgroup> 元素中引用的所有其他 <texture2d> 资源。其他 <texture2d> 资源必须保留这些属性未指定,或者必须为这些属性指定相同的值特性。

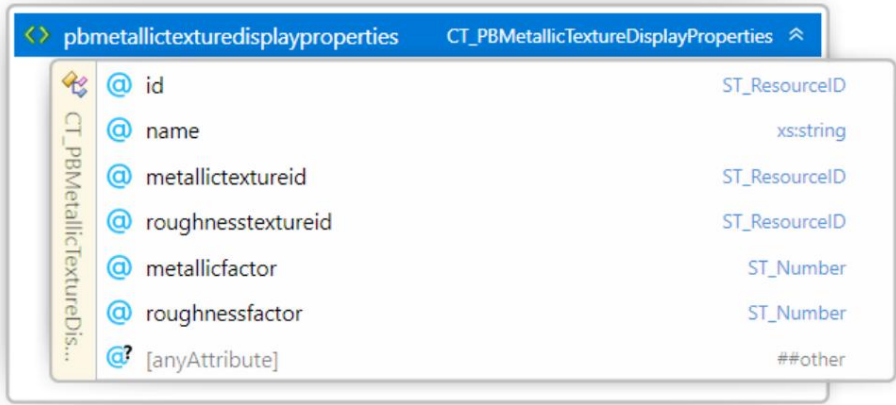
由 <tex2coord> 元素指定的同一组纹理坐标用于漫反射、镜面反射和光泽度

<texture2d> 资源。这对应于纹理的创建方式。对象特征（例如车门）占据在所有三个纹理中都使用相同的区域,因为这样设计师更容易匹配它们。speculartextureid 有可能和 glossinesstextureid 共享相同的值,因此引用相同的 <texture2d> 资源。在这种情况下镜面颜色从其 RGB 颜色通道采样,光泽度参数从其 A（alpha）通道采样。如果不存在 alpha 通道,则假定为 #FF。

如果 speculartextureid 和 glossinesstextureid 不同,则光泽度参数从红色 (R) 通道采样对应纹理的亮度信息。单色纹理被视为亮度信息代表 R 通道。

7.4. 金属纹理显示属性

元素<pbmetallictexturedisplayproperties>



属性

| 姓名 | 类型 | 使用 | 默认 | 注解 |
|--------------------|-----------------|-----|----------------|--------------------------------|
| ID | 需要ST_ResourceID | | | 所有材料组中的唯一ID（可以包括来自扩展的元素规格） |
| 姓名 | xs:字符串 | 必需的 | | 指定材料名称,旨在传达设计意图 |
| 金属纹理 | 需要ST_ResourceID | | | 引用 <texture2d> 元素 匹配 id 属性值 |
| roughnesstextureid | ST_ResourceID必需 | | | 引用 <texture2d> 元素 匹配 id 属性值 |
| 基色因子 | ST_ColorValue | | #FFFFFF 基色乘积因子 | |
| 金属因子 | ST_ 编号 | | 1 | 金属度倍增因子 |
| 粗糙度系数 | ST_ 编号 | | 1 | 粗糙度乘积因子 |
| @anyAttribute | | | | |

<pbmetallictexturedisplayproperties> 包含一组属性,描述如何真实地显示纹理金属材料。

<pbmetallicdisplayproperties> 和 <pbmetallictexturedisplayproperties> 之间的区别在于基色,金属度和粗糙度参数没有明确指定 - 相反,它们是从各自的<texture2d> 相关纹理材质、metallictextureid 和 roughnesstextureid 引用的资源。值然后将其按分量方式与相应的基础颜色因子相乘,金属因子和粗糙度因子。从纹理采样的颜色值假定在 sRGB 颜色空间中。因此,在进行逐个分量乘法之前,必须应用逆颜色分量传输函数。从 metallictextureid 引用的 <texture2d> 资源中采样的金属度和粗糙度值以及

roughnesstextureid（以及metallicfactor和roughnessfactor）被认为是线性的，不需要逆颜色分量传递函数。

应忽略相关纹理材质引用的 <texture2d> 资源的 Alpha 透明度值，并且假定纹理完全不透明。

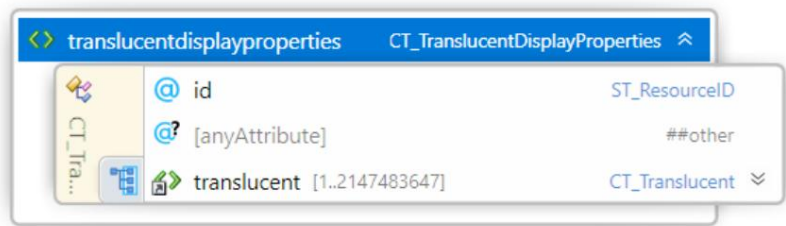
消费者仍必须将相关纹理材料引用的 <texture2d> 元素中定义的纹理寻址属性（tilestyleu,tilestylev,filter）应用于 <metallictexture> 元素中引用的所有其他 <texture2d> 资源。其他 <texture2d> 资源必须保留这些属性未指定，或者必须为这些属性指定相同的值。由 <tex2coord> 元素指定的同一组纹理坐标用于基色、金属度和粗糙度 <texture2d> 资源。这与创建纹理的方式相对应：对象特征（例如车门）在所有三个纹理中占据相同的区域，因为这样设计师更容易匹配它们。

metaltextureid 和 roughnesstextureid 可以共享相同的值，因此引用相同的 <texture2d> 资源。在这种情况下，粗糙度从其 R 颜色通道采样，而金属度参数从其 G 颜色通道采样。

如果 metaltextureid 和 roughnesstextureid 不同，则 metalness 和 roughness 参数从相应纹理的红色 (R) 通道中采样。单色纹理被视为亮度信息代表 R 通道。

7.5. 半透明显示属性

元素<translucentdisplayproperties>



属性

| 姓名 | 类型 | 使用 | 默认 | 注解 |
|---------------|-----------------|----|----|-----------------------------|
| ID | 需要ST_ResourceID | | | 所有资源（可能包括来自规范扩展的元素）中的唯一 ID。 |
| @anyAttribute | | | | |

元素

| 姓名 | 类型 | 使用 | 默认 | 注解 |
|---------------------|----|----|----|----|
| 半透明CT_Translucent可选 | | | | |

<translucentdisplayproperties> 位于 <resources> 下，包含一组描述如何真实显示半透明材质的属性。它们可以通过 “displaypropertiesid”属性与特定材质关联。<translucentdisplayproperties> 是一个或多个 <translucent> 元素的容器。

元素的顺序和数量形成一个隐式的从 0 开始的索引，与相关材质组的元素顺序和数量相同。例如，如果 basematerial 组包含指向 translucentdisplayproperties 元素的 displaypropertiesid 属性，则 translucent 元素的数量将与 basematerial 元素的数量相同，其中第一个 translucent 元素描述组中的第一个 basematerial。

因为半透明度本质上是一种体积属性（而不是物体表面属性），所以指定半透明材质的对象应该确保该材质仅在物体级别指定，或者所有<triangle>

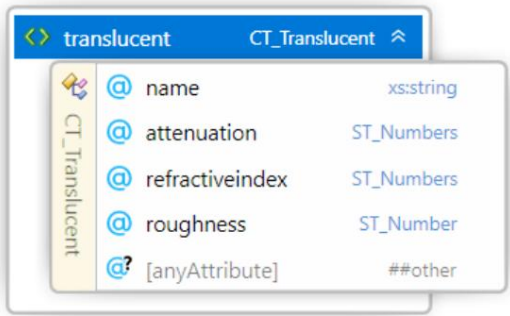
元素应该通过其“p1”、“p2”、“p3”属性引用相同的半透明属性。

多属性图层可能包含半透明属性,包括带有 alpha 通道的纹理,用于指示透明度。透明度信息应该混合在一起,以允许半透明物体具有表面

decals。alpha 通道表示要混合的不透明度级别。例如,当指定纹理颜色时如果没有指示透明度的 alpha 通道,则纹理区域被视为不透明的表面处理,就像表面经过涂漆。

7.5.1. 半透明

元素<半透明>



属性

| 姓名 | 类型 | 使用 | 默认 | 注解 |
|---------------|---------------------|-----|----|--------------------------------|
| 姓名 | xs:字符串 | 必需的 | | 指定材料名称,旨在传达设计目的,旨在帮助用户进行打印映射材料 |
| 衰减 | 需要ST_Numbers | | | 线性衰减系数以倒数为单位表示长度 |
| 折射率 | ST_Numbers需要“1 1 1” | | | 材料的折射率 |
| 粗糙度 | ST_ 编号 | | 0 | 表面粗糙度 |
| @anyAttribute | | | | |

为简单起见,这些属性仅侧重于参数化表面散射的量。主流体积瑞利散射或米氏散射等散射模型不够通用,无法用于所有材料。

实现一个实时半透明材质查看器来近似所有描述的光学现象是计算成本高且技术难度大。大多数应用程序可能会采取合理的简化。但是,可以选择添加全套参数以供离线渲染器和光线追踪器使用。

以这种方式定义的半透明属性被认为是物体内部体积均匀且各向同性的。

这意味着半透明物体仅由材料组或多属性组定义,其中第一个索引是具有分配给 translucentdisplayproperties 的显示属性的材料,并且同一材料是第一个索引为该网格分配所有其他材质。或者,可以将显示属性分配给对象级别的材质组或多属性组,以指示半透明显示属性,从而实现更简单的表示。

半透明显示属性不得应用于 <texture2dgroup> 或 <colorgroup> 属性。半透明效果是通过使用具有半透明显示属性的材料的多属性组并混合后续层。

衰减

衰减系数是衡量光束穿透材料的难易程度的指标。值为零表示

材料完全透明。数值越大,光束穿过材料时衰减越大。衰减的单位是米的倒数 (m⁻¹)。衰减表示由于吸收和散射而造成的能量总损失。由于不同波长的吸收率不同 (这赋予了半透明材料颜色色调),衰减系数定义为对应于红、绿和蓝色通道的三重值。

光强度的下降与材料厚度的关系可用比尔-朗伯定律来描述。
根据该定律,强度随着光在介质中传播的距离而呈指数衰减:

RGB_输出 = RGB_输入 * e^{-(at)}

在哪里:

RGB_out – 输出 (透射)光强度
RGB_in – 输入 (入射)光强度

a – 衰减系数
t – 在介质内行进的距离 (以米为单位)

折射率

折射率是衡量光束穿过真空和半透明材料之间的边界时弯曲程度的指标。它也可以作为光在材料内部相对于真空中的光速降低的因素。由于折射量取决于波长,因此折射率被定义为对应于红、绿和蓝色通道的三重值。这允许客户端渲染诸如色散之类的光学现象。

入射角 (入射光线与表面法线之间的角度)与折射角 (折射光线与表面法线之间的角度)之间的关系由斯涅尔定律描述。如果 i 是真空中光线的入射角,r 是折射角,则折射率 n 定义为入射角正弦与折射角正弦之比:

n = 正弦(i) / 正弦(r)

粗糙度

表示表面粗糙度的 0..1 范围内的标量值。(1 - 粗糙度) 的值与第 7.1 章中描述的 “光泽度”具有相同的含义。

粗糙度用于参数化表面反射的模糊度并模拟物体的表面散射特性。

有关微表面模型的更多信息,请参见附录 D. 微表面模型和 BRDF。

第二部分 附录

附录 A 词汇表

参见[3MF 核心规范词汇表](#)。

附录 B. 材料和属性的 3MF XSD 架构

```
<?xml版本= 1.0 编码= UTF-8 ?> <xs:schema
xmlns= http://schemas.microsoft.com/3dmanufacturing/material/2015/02  xmlns:xs= http://www.w3.org/2001/
XMLSchema  xmlns:xml= http://www.w3.org/XML/1998/
namespace
  targetNamespace= http://schemas.microsoft.com/3dmanufacturing/material/2015/02  elementFormDefault= unqualified
  attributeFormDefault= unqualified  blockDefault= #all  ><xs:import namespace= http://www.w3.org/XML/1998/namespace  schemaLocation= http://
www.w3.org/2001/xml.xsd  /> <xs:annotation>
```

```
<xs:documentation><![CDATA[架构说明:
```

此模式中的项目遵循一个简单的命名约定,即附加一个前缀来指示引用元素的类型:

无前缀:元素名称

CT_:复杂类型

ST_:简单类型

```
]]></xs:documentation>
```

```
</xs:注释>
```

```
<!-- 复杂类型 --> <xs:complexType
```

```
name= CT_Texture2D > <xs:attribute name= id
```

```
type= ST_ResourceID use= required /> <xs:attribute name= path
```

```
type= ST_UriReference use= required /> <xs:attribute name= contenttype
```

```
type= ST_ContentType use= required /> <xs:attribute name= tilestyleu type= ST_TileStyle
```

```
default= wrap /> <xs:attribute name= tilestylev type= ST_TileStyle default= wrap />
```

```
<xs:attribute name= filter type= ST_Filter default= auto /> <xs:anyAttribute
```

```
namespace= ##other processContents= lax /> </xs:complexType> <xs:complexType
```

```
name= CT_ColorGroup >
```

```
<xs:sequence> <xs:
```

```
element ref= 颜色 maxOccurs= 2147483647 />
```

```
</xs:sequence>
```

```
<xs:attribute名称= id 类型= ST_ResourceID 使用= required /> <xs:attribute名称
```

```
= displaypropertiesid 类型= ST_ResourceID 使用= optional /> <xs:anyAttribute命名空间= ##other processContents= lax /
```

```
> </xs:complexType> <xs:complexType名称= CT_Color > <xs:attribute名称= color 类型
```

```
= ST_ColorValue 使用
```

```
= required /> </xs:complexType> <xs:complexType
```

```
名称= CT_Texture2DGroup >
```

```
<xs:序列>
```

```
<xs:element ref= tex2coord maxOccurs= 2147483647 />
```

```
</xs:序列>
```

```
<xs:attribute名称= id 类型= ST_ResourceID 使用= required /> <xs:attribute名称
```

```
= texid 类型= ST_ResourceID 使用= required /> <xs:attribute名称
```

```
= displaypropertiesid 类型= ST_ResourceID 使用= optional /> <xs:anyAttribute命名空间= ##other
```

```
processContents= lax /> </xs:complexType> <xs:complexType名称= CT_Tex2Coord >
```

```
<xs:attribute名称= u 类
```

```
型= ST_Number 使用= required /> <xs:attribute
```

```
名称= v 类型= ST_Number 使用= required /> <xs:anyAttribute命名空间
```

```
= ##other processContents= lax /> </xs:complexType> <xs:complexType名
```

```
称= CT_CompositeMaterials >
```

```
<xs:序列>
```

```
<xs:element ref= composite maxOccurs= 2147483647 /> </xs:sequence>
```

```
<xs:attribute
```

```
name= id type= ST_ResourceID use= required /> <xs:attribute name= matid
```

```
type= ST_ResourceID use= required /> <xs:attribute name= matindices
```

```
type= ST_ResourceIndices use= required />
```

```

<xs:attribute name= displaypropertiesid type= ST_ResourceID use= 可选 /> <xs:anyAttribute namespace= ##other
processContents= lax />
</xs:complexType>
<xs:complexType名称= CT_Composite ><xs:attribute名称
= 值 类型= ST_Numbers 使用= required /></xs:complexType> <xs:complexType名称
= CT_MultiProperties >

<xs:序列>
<xs:element ref= 多 maxOccurs= 2147483647 />
</xs:sequence>
<xs:attribute name= id 类型= ST_ResourceID use= required /> <xs:attribute name= pids 类型
= ST_ResourceIDs use= required /> <xs:attribute name= blendmethods 类型= ST_BlendMethods
use= optional default= mix /> <xs:anyAttribute namespace= ##other processContents= lax /></xs:complexType> <xs:complexType
name= CT_Multi ><xs:attribute name= pindices 类型= ST_ResourceIndices use= required />
<xs:anyAttribute
namespace= ##other processContents= lax />

</xs:complexType>
<xs:complexType名称= CT_PBSpecularDisplayProperties >
<xs:序列>
<xs:element ref= pbspecular maxOccurs= 2147483647 />
</xs:序列>
<xs:attribute名称= id 类型= ST_ResourceID 使用= required /> <xs:anyAttribute命名空间= ##other
processContents= lax /></xs:complexType> <xs:complexType名称= CT_PBSpecular ><xs:attribute
名称= name 类型
= xs:string 使用= required /> <xs:attribute名称
= specularcolor 类型= ST_ColorValue 默认值= #383838 /> <xs:attribute名称= glossiness 类型
= ST_Number 默认值= 0 /> <xs:anyAttribute命名空间= ##other processContents= lax /></xs:complexType>
<xs:complexType名称= CT_PBMetallicDisplayProperties >

<xs:序列>
<xs:element ref= pbmetallic maxOccurs= 2147483647 /></xs:sequence> <xs:attribute
name= id
type= ST_ResourceID use= required /> <xs:anyAttribute namespace= ##other
processContents= lax />
</xs:complexType>
<xs:complexType名称= CT_PBMetallic ><xs:attribute名称
= name 类型= xs:string use= required /> <xs:attribute名称= metallicness 类型
= ST_Number default= 0 /> <xs:attribute名称= roughness 类型= ST_Number default= 1 />
<xs:anyAttribute命名空间= ##other processContents= lax /></xs:complexType> <xs:complexType名
称= CT_PBSpecularTextureDisplayProperties ><xs:attribute名称= id 类型= ST_ResourceID
use= required />
<xs:attribute名称= name 类型= xs:string use= required /> <xs:attribute名称= speculartextureid 类
型= ST_ResourceID use= required /> <xs:attribute名称= glossinesstextureid 类型
= ST_ResourceID 使用= required /> <xs:attribute name= diffusefactor 类型= ST_ColorValue 默
认值= #FFFFFF /> <xs:attribute name= specularfactor 类型= ST_ColorValue 默认值= #FFFFFF /> <xs:attribute
name= glossinessfactor 类型= ST_Number 默认值= 1 />

```

```

<xs:anyAttribute命名空间= ##other processContents= lax /></xs:complexType>
<xs:complexType名称
= CT_PBMetallicTextureDisplayProperties ><xs:attribute名称= id 类型
= ST_ResourceID 使用= required /><xs:attribute名称= name 类型= xs:string 使
用= required /><xs:attribute名称= metallictextureid 类型= ST_ResourceID 使用
= required /><xs:attribute名称= roughnesstextureid 类型= ST_ResourceID 使用= required />
<xs:attribute名称= metallicfactor 类型= ST_Number 默认值= 1 /><xs:attribute名称= roughnessfactor 类
型= ST_Number 默认值= 1 /><xs:anyAttribute命名空间= ##other processContents= lax /
></xs:complexType><xs:complexType名称= CT_Translucent >

<xs:attribute名称= 名称 类型= xs:string 使用= 必需 /><xs:attribute名称= 衰减 类型= ST_Numbers 使
用= 必需 /><xs:attribute名称= refractiveindex 类型= ST_Numbers 默认值= 1.11 /><xs:attribute名称= 粗糙度 类型
= ST_Number 默认值= 0 /><xs:anyAttribute命名空间= ##other processContents= lax /></xs:complexType><xs:complexType
名称= CT_TranslucentDisplayProperties >

<xs:序列>
  <xs:element ref= 半透明 maxOccurs= 2147483647 />
</xs:sequence>
<xs:attribute名称= id 类型= ST_ResourceID 使用= required /><xs:anyAttribute命名空间
= ##other processContents= lax /></xs:complexType><xs:complexType名称
= CT_BaseMaterials >
<xs:attribute名称= displaypropertiesid 类型= ST_ResourceID 使
用= optional /><xs:anyAttribute命名空间= ##other processContents= lax />

</xs:complexType><!--
简单类型 --><xs:simpleType
name= ST_ContentType ><xs:restriction
base= xs:string ><xs:enumeration
value= image/jpeg /><xs:enumeration
value= image/png />
</xs:限制>
</xs:simpleType>
<xs:simpleType名称= ST_TileStyle ><xs:restriction基础
= xs:string ><xs:enumeration值= clamp />
<xs:enumeration值= wrap /><xs:enumeration值
= mirror />

<xs:enumeration值= 无 />
</xs:限制>
</xs:simpleType>
<xs:simpleType名称= ST_Filter ><xs:restriction基础
= xs:string ><xs:enumeration值= 自动 />

<xs:enumeration值= 线性 />
<xs:enumeration值= 最近 />
</xs:限制>
</xs:simpleType>
<xs:simpleType名称= ST_ColorValue ><xs:restriction
base= xs:string >

```



```

<xs:模式
  value=  #[0-9|AF|af][0-9|AF|af][0-9|AF|af][0-9|AF|af][0-9|AF|af][ 0-9|AF|af]
([0-9|AF|af][0-9|AF|af]) ? ”
/>
</xs:限制>
</xs:simpleType>
<xs:simpleType名称= ST_UriReference ><xs:restriction
  base= xs:anyURI ><xs:pattern值= /.*/ >

</xs:限制>
</xs:simpleType>
<xs:simpleType名称= ST_Number >
  <xs:restriction base= xs:double >
    <xs:whiteSpace值= collapse /><xs:pattern值= ((\-\|+)?
      ([[0-9]+(\.[0-9]+)?]|(\.[0-9]+))((e|E)(\-\|+)?[0-9]+)? ) />
    </xs:限制>
  </xs:simpleType>
<xs:simpleType名称= ST_ZeroToOne ><xs:restriction
  base= ST_Number >
    <xs:minInclusive值= 0.0 />
    <xs:maxInclusive值= 1.0 />
    </xs:限制>
  </xs:simpleType>
<xs:simpleType名称= ST_Numbers ><xs:restriction
  base= xs:string ><xs:whiteSpace值= collapse />
  <xs:pattern值= (((\-\|+)?([0-9]+(\.[0-9]+)?]|(\.[0-9]+))((e|E)
    (\-\|+)?[0-9]+)? )? )
    + ) />
  </xs:限制>
</xs:simpleType>
<xs:simpleType名称= ST_ResourceID >
  <xs:restriction base= xs:positiveInteger ><xs:maxExclusive值
    = 2147483648 />
  </xs:限制>
</xs:simpleType>
<xs:simpleType名称= ST_ResourceIndex >
  <xs:restriction base= xs:nonNegativeInteger >
    <xs:maxExclusive值= 2147483648 />
    </xs:限制>
  </xs:simpleType>
<xs:simpleType名称= ST_ResourceIndices >
  <xs:restriction base= xs:string >
    <xs:whiteSpace值= collapse /><xs:pattern值= ((([0-9]+)
      ( )?)+ />
    </xs:限制>
  </xs:simpleType>
<xs:simpleType名称= ST_ResourceIDs ><xs:restriction
  base= xs:string ><xs:whiteSpace值= collapse />
  <xs:pattern值= ((([0-9]+)( )?)+ />

  </xs:限制>
</xs:simpleType>
<xs:simpleType名称= ST_BlendMethods ><xs:restriction
  基础= xs:string >

```

```
<xs:whiteSpace值= collapse /> <xs:pattern值= (mix|
multiply)( (mix|multiply))* />
</xs:限制>
</xs:简单类型>
<!-- 元素 -->

<xs:元素名称= texture2d 类型= CT_Texture2D /> <xs:元素名称= colorgroup 类型
= CT_ColorGroup /> <xs:元素名称= color 类型= CT_Color /> <xs:元素名称
= texture2dgroup 类型= CT_Texture2DGroup /> <xs:元素名称
= tex2coord 类型= CT_Tex2Coord /> <xs:元素名称= compositematerials 类型
= CT_CompositeMaterials /> <xs:元素名称= composite 类型= CT_Composite />
<xs:元素名称= multiproperties 类型= CT_MultiProperties /> <xs:元素名称= multi 类型= CT_Multi /> <xs:元素名称
= pbspeculardisplayproperties 类型= CT_PBSpecularDisplayProperties /> <xs:元素
名称= pbspecular 类型= CT_PBSpecular /> <xs:元素名称= pbmetallicdisplayproperties 类型
= CT_PBMetallicDisplayProperties /> <xs:元素名称= pbmetallic 类型
= CT_PBMetallic /> <xs:元素名称= pbmetallictexturedisplayproperties 类型= CT_PBMetallicTextureDisplayProperties />

<xs:元素名称= pbspeculartexturedisplayproperties 类型= CT_PBSpecularTextureDisplayProperties
/> <xs:元素名称= translucentdisplayproperties 类型
= CT_TranslucentDisplayProperties /> <xs:元素名称= translucent 类型= CT_Translucent /> <xs:属性名称= displaypropertiesid 类型
= ST_ResourceID />

</xs:架构>
```

附录 C. 3MF 样本

C.1. 基于物理的材质示例

```
<?xml version= 1.0 encoding= UTF-8 ?> <模型单位= 毫米
xml:lang= en-US xmlns:m= http://schemas.microsoft.com/
3dmanufacturing/material/2015/02 xmlns= http://schemas.microsoft.com/3dmanufacturing/core/2015/02 >

<资源>

<m:pbmetallicdisplayproperties id= 1000000000 >
  <m:pbmetallic name= 金属 金属度= 1 粗糙度= 0.09 />
</m:pbmetallicdisplayproperties> <basematerials
id= 1 >
  <base name= 常规 displaycolor= #21BB4CFF />
</basematerials>
<basematerials id= 2 displaypropertiesid= 1000000000 > <base name= 金属色
displaycolor= #F5F0F0FF />
</basematerials>
<m:texture2d id= 4 路径= /3D/Texture/BorderedTexture083c5805.png
contenttype= 图像/png tilestyleu= wrap tilestylev= wrap />
<m:texture2dgroup id= 8 texid= 4 >
  <m:tex2coord u= 0 v= -5.96046e-008 />
  <m:tex2coord u= 1 v= -5.96046e-008 />
  <m:tex2coord u= 1 v= 1 />
  <m:tex2coord u= 0 v= 1 />
</m:texture2dgroup>
```

```
<object id= 5 类型= 模型 ><网格>

<顶点>

  <vertex x= 0 y= 42.998 z= 39.998 />
  <vertex x= 39.998 y= 42.998 z= 39.998 /> <vertex
x= 0 y= 82.998 z= 39.998 /> <vertex
x= 39.998 y= 82.998 z= 0 /> <vertex
x= 0 y= 42.998 z= 0 /> <vertex
x= 0 y= 82.998 z= 0 /> <vertex
x= 39.998 y= 42.998 z= 0 /> <vertex
x= 39.998 y= 82.998 z= 39.998 />
</顶点>

<三角形>

  <三角形v1= 0 v2= 1 v3= 2 pid= 1 p1= 0 /> <三角形
v1= 3 v2= 4 v3= 5 pid= 2 p1= 0 /> <三角形v1= 4
v2= 3 v3= 6 pid= 2 p1= 0 /> <三角形v1= 7 v2= 2
v3= “1” PID= “1” p1= 0 /> <三角形v1= 4 v2= 6 v3= 1
pid= 8 p1= 0 p2= 1 p3= 2 /> <三角形v1= 4 v2= 2 v3= 5 pid= 2
p1= 0 /> <三角形v1= 7 v2= 1 v3= 6 pid= 2 p1= 0 /
> <三角形v1= 5 v2= “2” v3= “7” pid= “2” p1= 0 /> <三角形
v1= 4 v2= 0 v3= 2 pid= 2 p1= 0 /> <三角形v1= 6
v2= 3 v3= 7 pid= 2 p1= 0 /> <三角形v1= 1 v2= 0
v3= 4 pid= 8 p1= 2 p2= 3 p3= 0 /> <三角形v1= 7
v2= 3 v3= 5 pid= 2 p1= 0 />

</三角形> </网格>

</object>
<object id= 6 type= model >
  <components>
    <component objectid= 5 />
  </组件> </对象>

</资源>
<构建>

  <item objectid= 6 transform= 1 0 0 1 0 0 1 27.7814 52.0603 0 /> </build>

</模型>
```

C.2. 半透明材质示例

以下 3MF 示例演示了具有半透明显示属性的对象和具有透明 alpha 通道的纹理。C.2. 半透明材质示例

```
<?xml version= 1.0 encoding= UTF-8 ?> <模型单位
= 英寸 xml:lang= en-US xmlns:m= http://
schemas.microsoft.com/3dmanufacturing/material/2015/02 xmlns= http://schemas.microsoft.com/
3dmanufacturing/core/2015/02 >

  <资源>

    <m:translucentdisplayproperties id= 1 >
      <m:translucent name= TransparentResin attenuation= 0.5 0.5 0.5 glossary= 1.3 1.3 1.3 roughness= 0.1 /> </m:translucentdisplayproperties>
    <basematerials id= 2 displaypropertiesid= 1 >
```

```

    <base名称= BaseMaterial displaycolor= #FFFFFF />
  </basematerials>

  <m:texture2d id= 3 路径= /3D/Texture/Sticker.png contenttype= image/png
  tilestyleu= clamp tilestylev= clamp /> <m:texture2dgroup
  id= 4 texid= 3 >
    <m:tex2coord u= 0 v= 1 />
    <m:tex2coord u= 1 v= 1 />
    <m:tex2coord u= 0 v= 0 />
    <m:tex2coord u= 1 v= 0 />
  </m:texture2dgroup>
  <m:multiproperties id= 5 pids= 24 > <m:multi pindices= 0
  0 /> <m:multi pindices= 0 1 /> <m:multi
  pindices= 0 2 /> <m:multi pindices= 0
  3 /> </m:multiproperties> <object id= 6
  type= model > <mesh>

  <顶点>

    <顶点x= 0 y= 0 z= 1 /> <顶点x= 1
    y= 0 z= 1 /> <顶点x= 0 y= 0 z= 0 /
    > <顶点x= 1 y= 0 z= 0 /> <顶点x= 0
    y= 1 z= 0 /> <顶点x= 1 y= 0 z= 0 /
    > <顶点 x= 0 y= 1 z= 1 /> <顶点x= 1
    y= 1 z= 1 /> <顶点x= 0 y= 1 z= 0 /
    > <顶点 x= 1 y= 1 z= 0 /> </vertices>

  <三角形> <三角形
  v1= 0 v2= 2 v3= 1 pid= 5 p1= 0 p2= 2 p3= 1 /> <三角形v1= 3 v2= 1 v3= 2
  pid= 5 p1= 3 p2= 1 p3= 2 /> <三角形v1= 1 v2= 3 v3= 5 pid= "2" p1= "0" /> <三角形
  v1= "7" v2= "5" v3= "3" pid= "2" p1= "0" /> <三角形v1= "5" v2= "7" v3
  = "4" pid= "2" p1= 0 /> <三角形v1= 6 v2= 4 v3= 7 pid= 2
  p1= 0 /> <三角形v1= 4 v2= 6 v3= "0" pid= "2" p1= "0" /> <三角形
  v1= 2 v2= 0 v3= 6 pid= 2 p1= 0 /> <三角形v1= 4 v2= 0
  v3= 5 pid= 2 p1= 0 /> <三角形v1= 1 v2= 5 v3= 0 pid= 2
  p1= 0 /> <三角形v1= 2 v2= 6 v3= 3 pid= 2 p1= 0 /> <三角形
  v1= 7 v2= 3 v3= 6 pid= 2 p1= 0 />

  </三角形> </网格>

  </对象> <对象
  id= 7 类型= 模型 > <组件>

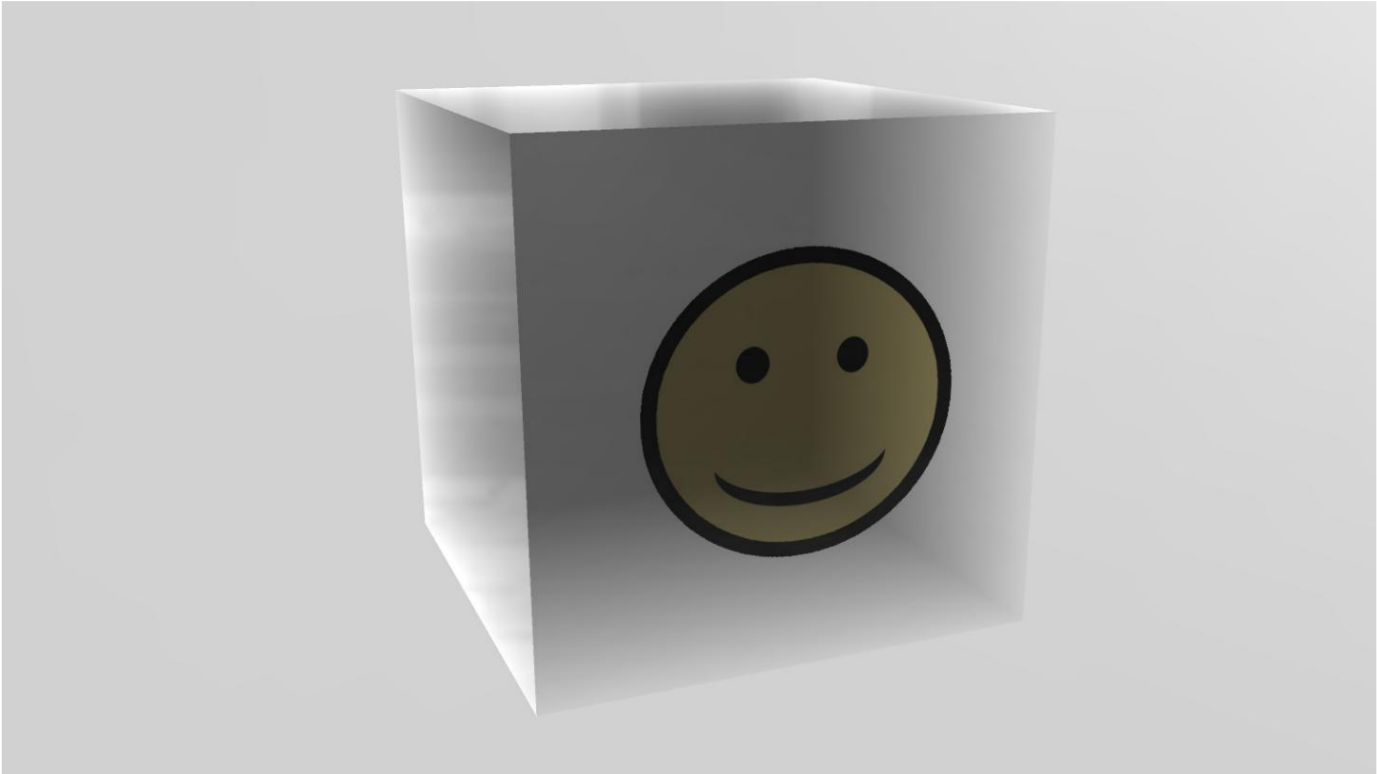
    <component objectid= 6 />
  </组件> </对象>

  </资源>
  <构建>

  <item objectid= 7 transform= 100010001000 /> </build>

```

</模型>



附录 D. 微面片表面模型和 BRDF

逼真图像的渲染需要物体表面如何反射光线的数学模型。给定表面上的一点、光源和观察者,该模型将确定到达观察者的光线的颜色和强度。大多数现实世界的表面都表现出漫反射 (光线均匀地散射到各个方向)和镜面反射 (光线集中在镜面方向周围)的组合。

表面的反射特性通常用双向反射分布函数 (BRDF) 来描述。给定朝向特定光源的方向和朝向观察者的方向,BRDF 返回在观察者方向上反射的光能比例。在针对多个光源 (例如环境纹理图的像素)评估照明的场景中,BRDF 会在一组贡献光上进行积分

来源。

虽然材料的 BRDF 可以在实验室条件下直接测量,但也提出了分析 BRDF 模型。物理上可信的模型的主要特征是入射方向和镜面方向之间的对称性、能量守恒 (总反射能量小于或等于入射光的能量)和正性 (反射能量为正或等于零的观察结果)。

由于现实世界中的材料存在微观缺陷,因此分析 BRDF 模型必须考虑表面的散射特性 (粗糙表面的反射图像看起来很模糊)。在实时计算机图形中,常用的 BRDF 模型假设粗糙表面可以近似为无限小的微面片的集合,每个微面片都是由其各自的微表面法线决定的一个方向上的完美镜面反射器。由于微面片超出了普通 3D 打印机和显示器的分辨率,因此假设它们的组合散射效应可以进行统计建模。材料的粗糙度参数决定了这种统计分布的形状,其中一个方向的反射比其他方向的反射更有可能。

参考 BRDF 实现基于 Schlick 的分析 BRDF 模型 (如 Christophe Schlick 的“基于物理的渲染的廉价 BRDF 模型”中所述)。Schlick 的 BRDF 方程具有以下一般性形式

$$BRDF(l,v)= (D(h))*G(l,v,h)*F(l,h))/(4(nl)(nv))$$

其中 n – 物体表面点的法线单位 v – 观察者方向的单位向量 l –

特定光源的方向 \mathbf{h} – \mathbf{v} 和 \mathbf{l} 之间的单位“半向量”（角平分线）

项 $D(\mathbf{h})$ 、 $G(\mathbf{l}, \mathbf{v}, \mathbf{h})$ 和 $F(\mathbf{l}, \mathbf{h})$ 代表法线分布函数、几何遮挡项和菲涅尔项,每个项将单独描述。虽然每个项都有多种可能的选择（计算复杂度和物理精度各不相同）,但客户应首先参考建议的公式以获得视觉上一致的结果,尤其是考虑到材料粗糙度参数的解释及其对微面法线分布的影响。

D.1. 正态分布函数 – $D(\mathbf{h})$

正态分布函数项描述了微面法线在每个方向上对齐的可能性。将正态分布函数积分到小而平坦的表面块上方的某个立体角上,可以得出该块内法线落在指定立体角内的微面的密度。建议选择 Trowbridge-Reitz,通常也称为 GGX。Trowbridge-Reitz 公式的分布形状类似于以给定方向向量为中心的截头椭圆柱体。粗糙度 = 0 映射到完美的镜面,而粗糙度 = 1 映射到均匀的半球形分布。我们采用 $\alpha = \text{roughness}^2$ 的重新参数化,从而产生视觉上均匀的粗糙度增量。

$$D(\mathbf{h}) = \alpha^2 / (\pi((n\mathbf{h})^2 * (\alpha^2 - 1) + 1)^{3/2})$$

D.2. 几何遮挡项 – $G(\mathbf{l}, \mathbf{v}, \mathbf{h})$

在任何粗糙表面上,一些微面很可能因为被遮挡而无法接收光线,或者它们反射到观察者方向的光线会被其他微面阻挡。当表面以掠射角照射时,这种影响尤其明显。几何遮挡项描述了给定一组方向向量 \mathbf{l} 、 \mathbf{v} 、 \mathbf{h} 时微面被遮挡的可能性。几何遮挡项的建议选择是 Smith 阴影函数的 Schlick 近似:

$$k = (\text{粗糙度} + 1)^{2/8}$$

$$G_1(\mathbf{x}) = (n\mathbf{x}) / ((n\mathbf{x}) * (1 - k) + k)$$

$$G(\mathbf{l}, \mathbf{v}, \mathbf{h}) = G_1(\mathbf{l}) * G_1(\mathbf{v})$$

可以看出,总几何遮挡项是针对光源方向和视线方向应用的两个遮挡函数 G_1 的乘积。

D.3. 菲涅尔项 – $F(\mathbf{l}, \mathbf{h})$

菲涅尔项是一个物理术语,描述材料边界上反射光与透射光能量的比率。它模拟了现实世界的观察结果,即表面反射在掠射角处强度增加。菲涅尔方程描述了光在不同折射率的介质之间移动时的确切行为。然而,由于它们的复杂性和相对较高的计算成本,建议选择计算机图形学中常用的 Schlick 近似来表示菲涅尔项:

$$F(\mathbf{l}, \mathbf{h}) = F_0 + (1 - F_0) * (1 - \mathbf{l} \cdot \mathbf{h})^5$$

其中 F_0 是材料在法线入射时的镜面反射率（其镜面颜色）。

附录 E. 标准命名空间和内容类型

E.1 内容类型

3D 纹理应用程序/vnd.ms-package.3dmanufacturing-3dmodeltexture

E.2 关系类型

3D 纹理<http://schemas.microsoft.com/3dmanufacturing/2013/01/3dtexture>

E.3 命名空间

先进材料<http://schemas.microsoft.com/3dmanufacturing/material/2015/02>

参考

参见[3MF 核心规范参考](#)。

版权所有 3MF Consortium 2018。