

弹丸尺寸和形状分布的表征

摘要

动态图像分析有助于表征弹丸介质尺寸和形状分布。本文讨论了二维图像数据的获取、阈值处理、统计分析和图形表示。通过图像数据可以分析一些尺寸和形状特征；这些特征将就与介质制作和遗留规范的相关性方面进行讨论。定量介质表征为优化抛喷丸强化处理工艺提供了机会。

导言

用于颗粒大小和形状表征的图像分析已实践多年，特别是在基于实验室的学术研究背景下。成像技术的最新进展使得更多的常规实践成为可能，包括带有动态图像分析(DIA)的在线和在线过程传感，它可以捕捉到随机定向的颗粒流的二维图像，通常收集数千张图像来进行统计分析。在抛喷丸强化处理方面，DIA方法旨在补充和/或取代传统方法，包括基于质量的筛分(如SAE J444)，计数和称重(如AMS 2431)，以及用于形状和外观分析的静态显微镜。虽然在所有情况下均必须获得有代表性的样品，但DIA为定量形状分析和高分辨率尺寸分布提供了一个强大的统计平台。

动态图像分析(DIA)

典型DIA设置如图1所示。将弹丸样品装入一个小漏斗，并通过一个控制弹丸颗粒落在背光(如LED面板)和相机之间速度的进料器排出。相机捕捉离散颗粒的二维灰度投影，通常每帧有多个颗粒。然后，图像分析软件识别图像投影，首先使用阈值将

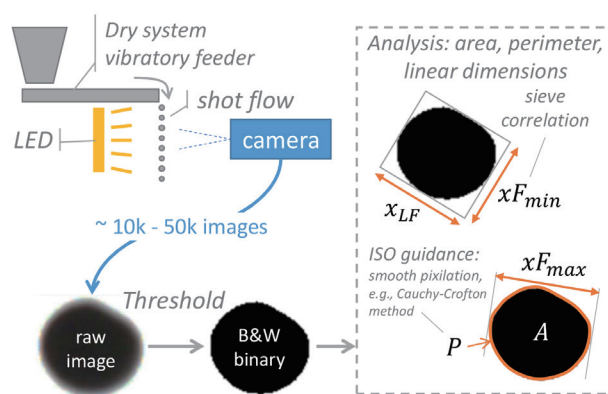


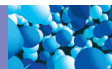
图1：动态图像分析实验设置、图像阈值处理以及特征分析

8位(0-255)灰度转换为黑白二进制图像，然后分析图像特征，包括每个弹丸颗粒的费雷特直径(x)、面积(A)和周长(P)。尺寸和形状特征的细节如表1所示，除非另有说明，否则其与ISO-9276-6一致。

当前工作中使用了SolidSizer系统(JM Cauty, Lockport NY、美国和爱尔兰都柏林)。其使用受PID控制的振动进料器，目的是保持稳定弹丸颗粒进料占据图像区域的目标部分。在我们的实验室，我们使用0.2%的目标占有率，作为计数率和图像分离之间的平衡。使用变焦镜头，图像区域的大小(以及相应的像素分辨率)可以根据所分析的弹丸级别进行调整。理想的放大率能够平衡用计数速度进行的形状分析中平稳像素化的需要——即每帧有多张图像。作为指导原则，每个弹丸粒子的成像分辨率约为1000至2000像素是合理的。对这种高分辨率的需求与ISO-9276-6中描述的周长测量有关；对于像素化图像，周长平滑是必不可少的(例如，使用Cauchy-Crofton方法)。虽然ISO规范建议不规则颗粒周长至少为5000像素，但我们发现1000像

尺寸特征(长度、面积、体积)	形状系数(无尺寸)
<ul style="list-style-type: none"> x_{Fmin}: 最小费雷特长度 x_{LF}: 费雷特长度正交于x_{Fmin}，即做一个边界框。 x_{Fmax}: 最大费雷特长度 A: 面积 P: 周长 $x_A = \sqrt{4A/\pi}$: 等效面积直径 $V = (4/3) \cdot A^{3/2} / \sqrt{\pi}$: 体积 	<ul style="list-style-type: none"> $AR_{ISO} = x_{Fmin}/x_{Fmax}$: 纵横比 $AR_{box} = x_{Fmin}/x_{LF}$: 基于$x_{Fmin}$边界框的纵横比(非ISO) $FF = 4\pi A/P^2$: 形状系数 $EFF = \beta\pi A/P^2$; $\beta = \left(\frac{1.5 \cdot (AR+1)}{\sqrt{AR}} - 1\right)^2$: 椭圆形FF，与AR正交(非ISO)。

表1：使用动态图像分析获得的尺寸特征和形状系数摘要



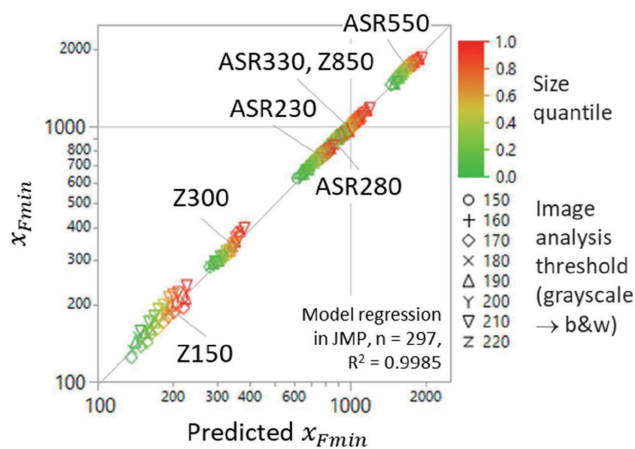


图2: 阈值与尺寸相关的回归模型

素适合于弹丸形态。使用当前的数码相机技术(即至少200万像素),以约1000像素/颗粒的分辨率和约0.2%的帧占用率对10k颗粒流进行成像,平均每帧捕获至少四个粒子。总之,典型的10k颗粒图像采集需要不到~5分钟。

阈值比例

找到正确的阈值设置,将灰度图像转换为二进制图像,取决于照明条件、成像参数和弹丸材料特性。照明取决于LED设置,可以选择使用频闪控制器。如果不使用频闪控制器,相机设置包括镜头光圈、增益和曝光时间。弹丸材料的折射率和光学吸收也有影响。为了创建阈值模型(图2),我们设置了照明和平场校正,以实现均匀白色背景(255),然后以视频格式记录原始图像数据(灰度)。实验包括不同尺寸的钢丸和陶瓷弹丸。在150到220(公式1)的一系列阈值设置中

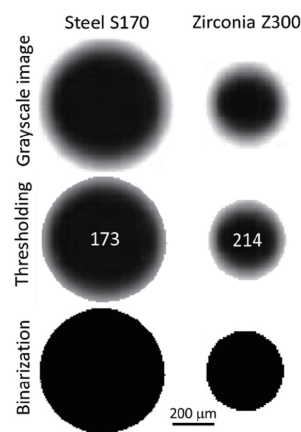


图3: E在白色(255)背景下,钢丸($T=173$)和氧化锆弹丸($T=214$)的阈值处理实例。两个样品均以 $10\mu\text{m}/\text{像素}$ 的放大率成像

进行视频数据分析,其中 d 和 σ 是在参考阈值($T_{ref}^g=190$)下测量的各弹丸样本的几何和标准偏差, θ 是尺寸分布位数的比例函数, Q (公式2), τ 是阈值比例参数(公式3)。通过使用方程4将预测的最小费雷特直径(x_{Fmin})与筛分结果进行比较,得出最佳拟合阈值 T ,其中 x 和 θ 是来自筛分值, d_g 和 σ_g 为图像分析值。对于钢丸(由美国阿德里安密歇根州Ervin Industries提供的ASR级弹丸),173是最适合的阈值。氧化锆弹丸(由法国库尔贝Saint Gobain提供的Zirpro Z

级弹丸)由于其边缘的半透明性和折射率散射,需要更高的阈值(214)。阈值处理的比较情况如图3所示。

$$\ln(x_{Fmin}) = \ln(d_g) + \theta \cdot \ln(\sigma_g) + 0.276 \cdot \tau \quad (1)$$

$$\theta = \sqrt{2} \cdot \text{erf}^{-1}(2Q - 1) \quad (2)$$

$$\tau = (T - T_{ref})/T_{ref} \quad (3)$$

$$T = 190 + 688 \left[\ln\left(\frac{x}{d_g}\right) - \theta \cdot \ln(\sigma_g) \right]; \text{ at } T_{ref} = 190 \quad (4)$$

尺寸和形状分布的图形案例研究

我们提出了一个比较两种类型的未经处理钢丸情况的案例研究。铸钢丸S110(由美国阿德里安密歇根州Ervin Industries提供)和G2条件的钢丝切丸CW14(由美国印第安纳州南本德Toyo Seiko America提供)。比较结果以图形形式显示为尺寸和形状分布(图4和图5);根据等式5,两个样本都遵循具有拉伸指数形式的累积分布函数(cdf),其中 x^* 代表模式, n 代表分布的陡度。图6显示了形状分析的进一步细化,其中单个颗粒数据(每个约10k)经过粗粒度处理,形成轮廓图(灰色),绘制在由椭圆形状因子(EFF)和纵横比(AR)定义的正交网格上。AR是伸长率的量度。EFF显示了其他周边不规则性,例如,由于角度或卫星特征造成的不规则

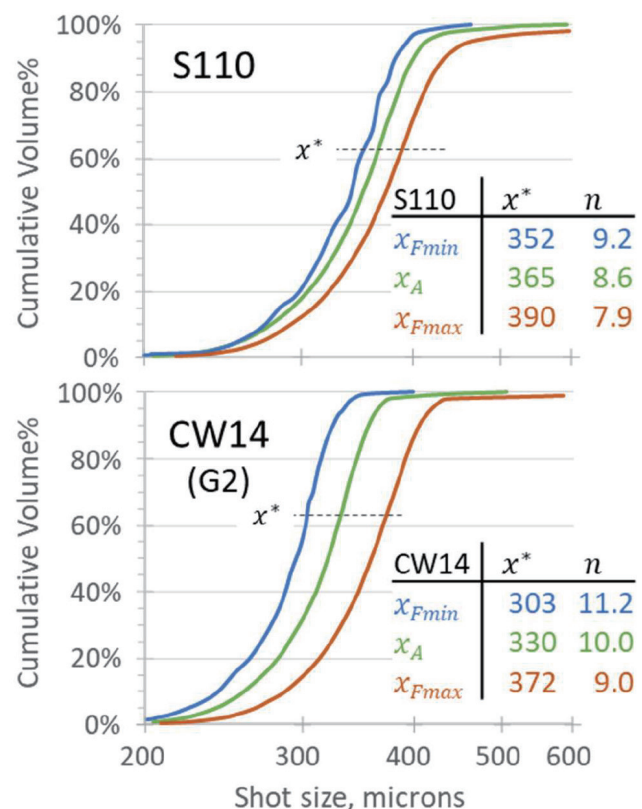


图4: 选定的铸钢丸(S110)和钢丝切丸(CW14)样品的尺寸分布

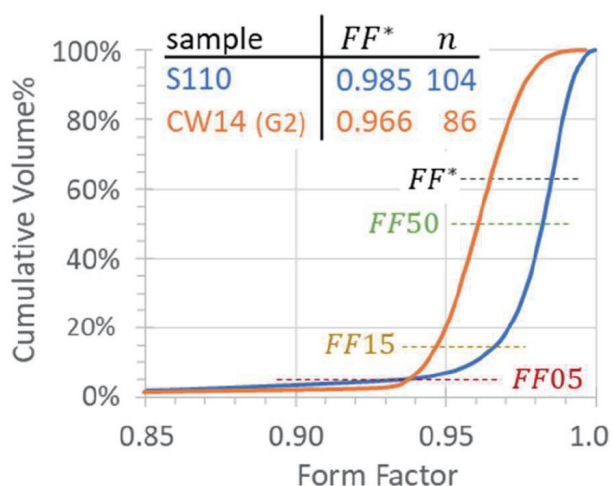
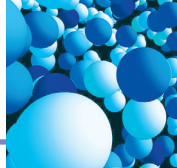


图5：形状系数形状分布；分位数(虚线交点)对应于图6中的FF叠加

则性。形状系数(FF)分位数重叠(彩色)；FF将这两种效应结合起来，形成了对圆度的整体衡量。选定的图像数据沿FF分位数显示。

$$cdf = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{x^*}\right)^n\right) \quad (5)$$

弹丸介质的制造工艺通过其尺寸和形状特征而变得明显。由熔体雾化制成的铸钢丸在其大部分分布范围内是高度球形的。切钢丝切丸是通过将拉伸钢丝切割成圆柱形段，然后通过调整和/或在加工过程中进行圆整而制成。切割钢丝介质具有一致的最小费雷特直径，即图4中所示的CW14 x_{Fmin} 的陡峭斜率，以及由最小和最大费雷特尺寸之间的差值所示的略微延长的切割长度。CW弹丸的伸长率和调整之间的关系如图6所示，例如沿形状系数5%分位数(FF05)。虽然沿给定FF分位数的所有颗粒具有相同的整体“圆度”，但那些EFF较低的颗粒有轻微的棱角(即调整较少)，而那些AR较低的颗粒则更加细长。

结论

此简短信息提供了使用动态图像分析进行弹丸尺寸和形状表征的示例，提供了更高的尺寸分布分辨率和形状的定量评估。还讨论了将DIA分析与传统方法相关联所需的详细步骤，例如，通过控制样本馈送和图像阈值。目前，普渡大学表面工程与强化中心(CSEE)的抛喷丸强化处理工作将表征与冲击建模联系起来，根据弹丸参数和弹丸特性预测残余应力场。形状效应是基于描述铸钢丸和钢丝切丸介质的原型的减序模型。接下来的步骤包括工作混合样品的表征，以及将尺寸和形状纳入工业应用的工艺流程模型。

致谢

作者感谢普渡大学表面工程和强化中心(CSEE)的

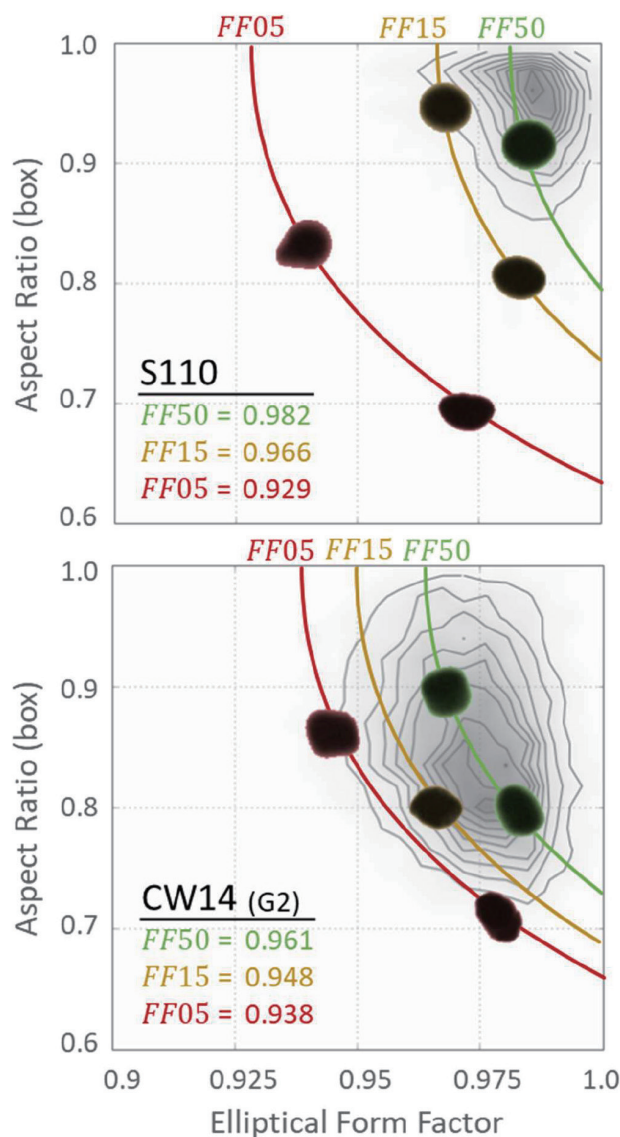


图6：粗粒度形状映射与实例颗粒图像叠加。正交因子(EFF和AR)有助于形状系数(轮廓)的周长和伸长分量；(1,1)代表一个理想的球面投影

支持，以及JM Canty、Electronics Inc.、Ervin Industries、Toyo Seiko和Saint Gobain的实物支持。我们还感谢普渡大学MSE顶石课程；的学生作为高级项目的一部分所做的阈值校准工作。Andrew Babiuk Murray、Torie Lichti、Nikole McPheron和Michael Thoenen。

作者：Paul Mort and Langdon Feltner

Department of Materials Engineering
Purdue University
Center for Particulate Products and Processes (CP3)
FLEX Lab 3021B, Gates Rd, West Lafayette, IN 47906, USA
电话：+1.765.496-3450
邮箱：pmort@purdue.edu