

三维拼缝激光焊接的变形动态补偿

龚时华, 喻俊峰, 杨建中, 李 斌

(华中科技大学 装备数字化国家工程研究中心, 武汉 430074)

摘 要: 针对三维拼缝激光焊接过程中的变形扰动, 为实现三维轨迹的精确跟踪, 需要在焊接过程中进行拼缝轨迹实时测量和动态补偿。在五轴联动数控焊接机床上, 利用激光视觉传感器实现三维拼缝焊接过程的实时测量, 获取拼缝轨迹的偏差信息, 将偏差信息从测量坐标系转化到工件坐标系, 实时补偿各运动轴的进给量, 从而实现三维拼缝曲线焊接过程的动态补偿; 分析了基于测量反馈的三维焊接闭环控制系统的稳定性, 最后对所提出的算法进行了试验验证。结果表明, 研究的三维拼缝实时测量与动态补偿方法能够满足三维激光焊接的跟踪控制要求。

关键词: 激光焊接; 三维拼缝; 动态补偿; 视觉传感器

中图分类号: TG439.4 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2011)02-0089-04



龚时华

0 序 言

三维激光焊接越来越广泛地应用于汽车、航空等行业的整体结构件制造中, 如汽车覆盖件、飞行器中的机翼、整体壁板、大梁、隔框等。由于汽车覆盖件与航空结构件普遍具有结构复杂、薄壁、变厚度、曲面曲线结构多、协调精度要求较高等特点, 并由于工件在加工、装配过程中的尺寸误差和位置误差以及焊接工件受热变形等因素的影响, 使得激光焊接过程中的三维拼缝曲线偏离既定的轨迹。

为了减少或避免拼缝变形给焊接质量带来的影响, 保证焊接质量, 人们在变形机理、有限元分析及预测控制等方面展开了大量的研究^[1], 但这些研究只能定性而不能定量地得到某些具体对象的变形情况, 并不能在所有对象上适用。

为了实现三维拼缝轨迹快速而准确的跟踪控制, 解决拼缝曲线的变形或误差问题, 最有效的方法是在控制系统中引入实时测量反馈环节, 以闭环控制的方式消除变形扰动对焊缝跟踪的影响。焊接轨迹动态补偿是实现焊缝跟踪的主要方法之一, 即在焊接过程中根据拼缝曲线的动态变化实时调整焊接运动轨迹, 从而达到焊缝精确跟踪的目的。

目前, 具有焊缝跟踪的焊接设备基本上都是配备视觉传感器的机器人^[2-4], 但速度和精度往往不

能同时满足激光焊接的要求 (焊接速度 5 m/min 拼缝宽度小于 0.1 mm)。为此, 基于多轴联动数控焊接机床平台, 研究并保三维拼缝激光焊接的变形动态补偿, 保证三维激光焊接的高速高精轨迹控制。

1 三维拼缝的实时测量

1.1 三维拼缝测量系统的构成与技术指标

为满足三维拼缝激光焊接的高速高精要求, 需要对拼缝轨迹进行精确的测量和建模。如图 1 所示, 选用处理速度和精度都很高的激光视觉传感器, 视觉传感器 (测量头) 与五轴联动激光焊接机床的

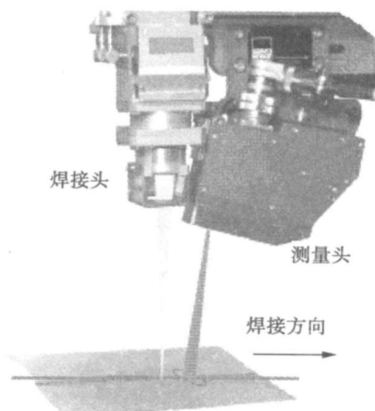


图 1 测量拼缝的激光视觉传感器

Fig 1 Laser vision sensor of measuring joint seam

焊接头固接在一起。激光视觉传感器采用激光三角测量原理^[5], 激光线结构光倾斜照射在待焊工件的拼缝上形成结构光条纹, CCD相机从近似于工件表面法矢的方向上观测结构光条纹并进行拼缝的检测。线结构光由 660 nm 的红色线激光器产生, 激光条纹的宽度较细, 质量较好。该传感器工作距离为 99 mm, 景深 6.5 mm, 平均深度分辨率 0.008 mm, 平均横向分辨率 0.009 mm, 采样速率 100 MPixel/s。

传感器主要是依据结构光三维测量数据的值跳变位置确定焊缝的边界位置, 从而确定焊缝中心位置, 即根据焊缝的错边位置检测焊缝的中心位置。根据拼缝测量的输出结果, 在测量坐标系下可以得到拼缝的错变量 (mismatch), 拼缝的宽度或间隙 (gap), 拼缝中心的位置 (y, z)。

1.2 三维拼缝位置偏差的定义与获取

在获取拼缝位置偏差之前, 定义以下几个概念。
焊接点: 是指用来描述整条拼缝曲线所有点的集合, 这些点不仅包含拼缝位置信息, 而且还包含拼缝宽度和所在曲面法矢等信息。

测量点: 是指测量系统每隔一定时间间隔测量得到的拼缝实际位置点, 该时间间隔取决于图像采集与处理速度。见图 1 测量点在焊接点之前。

测量系统局部坐标系 $\{O_m\}$ ^[6-7]: 首先建立测量坐标系原点 O_m , 通过精确建模得到三维拼缝的理论曲线, 并得到曲线上每点的精确位置坐标和法矢, 再通过对测量系统精确标定, 使测量坐标系原点 O_m 始终处于视觉传感器视野中心位置, 并在拼缝中心; 坐标系建立为: z 轴沿视觉传感器主光轴方向, y 轴垂直于拼缝的切矢, x 轴根据右手螺旋法则确定 (基本沿拼缝的切矢方向)。如图 2 所示, 测量坐标系平面 $\{O_m\}$ 随拼缝曲线上每点的位置和法矢而变化, 坐标系原点 O_m 始终处在所建立的理论拼缝曲线上。

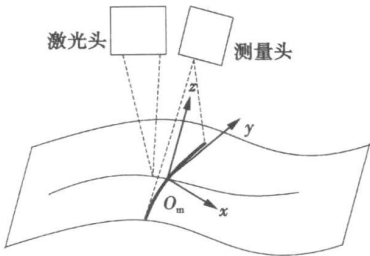


图 2 测量坐标系的建立

依据上述定义, 焊接点的集合描述了整条拼缝曲线, 包含拼缝位置信息及其法矢信息。测量点位于

于测量点之前, 为动态补偿提供反馈信息。
值得注意的是, 由于这里焊接激光头和测量头在机械结构上固接在一起, 为保证测量点能真实反映焊接点的信息, 将测量头主光轴倾斜一定角度, 使测量点与焊接点距离保持在 10 mm 以下, 因此测量坐标系 z 轴与焊接激光光轴有一个偏转角度 (假设为 θ 角)。
从图 2 可以看出, 从视觉传感器获得的图像位于测量坐标系 $\{O_m\}$ 平面内, 通过对视觉传感器进行标定和对三维拼缝曲线进行轨迹规划, 使得焊接之前的测量点始终位于测量坐标系 $\{O_m\}$ 平面的原点 O_m , 那么焊接过程中, 从测量传感器获取的焊缝中心点坐标就是焊缝位置偏差 ($\Delta y, \Delta z$) (图 3)。

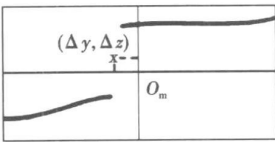


图 3 测量坐标系下拼缝位置偏差的定义
Fig 3 Position bias definition of point seam in measuring coordinate system

由于拼缝测量反馈的是测量坐标系下的拼缝中心点坐标, 对于三维曲线拼缝的测量, 测量坐标系在整个焊接过程中都是变化的, 因此必须建立测量坐标系、焊接头坐标系与工件坐标系之间的相对运动关系, 才能准确获取所要的补偿值。

图 4 表示测量坐标系与工件坐标系之间的关系。图 4 中点 P 为拼缝上的测量点, O_m 为测量坐标系, O_w 为工件坐标系。

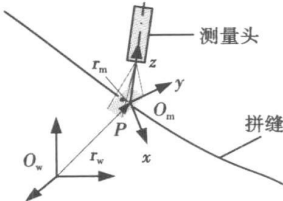


图 4 测量坐标系与工件坐标系的关系
Fig 4 Relationship between measuring coordinate system and workpiece coordinate system

假设拼缝测量点 P 在测量坐标系下的位置矢量为 $r_m(x_m, y_m, z_m)$, 在工件坐标系下的位置矢量为 $r_w(x_w, y_w, z_w)$, 则两位置矢量存在如下对应关系, 即

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_w \\ \bar{y}_w \\ \bar{z}_w \\ 1 \end{bmatrix}^T = {}^W_M T \begin{bmatrix} \bar{x}_m \\ \bar{y}_m \\ \bar{z}_m \\ 1 \end{bmatrix}^T \quad \text{即} \quad \begin{bmatrix} \bar{x}_w \\ \bar{y}_w \\ \bar{z}_w \\ 1 \end{bmatrix} = {}^W_M T \begin{bmatrix} \bar{x}_m \\ \bar{y}_m \\ \bar{z}_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: A C 分别为五轴联动中两旋转轴 (绕 x 轴, y 轴) 的角度; θ 为测量光轴与焊接激光光轴的夹角; LC 为 C 轴旋转中心到 B 轴中心与测头交点的距离。

通过拼缝测量反馈得到 P 点在测量坐标系下的位置矢量 $\bar{r}_m$ 及拼缝偏差后, 根据式 (1) 和式 (2) 便能够精确计算得到该点在工件坐标系下的位置矢量 $\bar{r}_w$ 及拼缝偏差。

2 三维拼缝激光焊接轨迹动态补偿

根据补偿原理的不同, 三维拼缝焊接过程的动态补偿可以分为独立式和分解式两种。

独立式补偿实现方式为: 在激光视觉传感器上集成一套二维十字滑台, 将测得的拼缝变形偏差值送到独立的数控单元, 控制二维十字滑台实施相应的纠偏动作, 从而实现精确跟踪。这种补偿需要增加独立的补偿运动控制器以及相应的补偿运动轴,

$$\left. \begin{aligned} \Delta \bar{x}_w &= -\Delta \bar{y}_m \sin C \cos A + \Delta \bar{z}_m (\cos C \sin \theta + \cos C \cos A \cos \theta) - LC \cos C \sin \theta - LC \sin C \cos A \cos \theta + LC \sin C \sin A \\ \Delta \bar{y}_w &= \Delta \bar{y}_m \sin C \cos A + \Delta \bar{z}_m (\cos C \sin \theta - \cos C \cos A \cos \theta) - LC \sin C \sin \theta + LC \sin C \sin A \sin \theta - LC \sin C \cos A \\ \Delta \bar{z}_w &= \Delta \bar{y}_m \cos A + \Delta \bar{z}_m \cos A \sin \theta - LC \sin A \sin \theta + LC \cos A \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

与独立式补偿相比, 分解式补偿不需要添加额外硬件, 完全通过软件编程实现。所研究五轴联动数控焊接机床激光焊接就采用这种动态补偿方法。

3 基于测量反馈的三维轨迹闭环控制稳定性分析

由前面的分析可知, 基于测量反馈的三维拼缝激光焊接轨迹控制实质上为全闭环控制, 这种闭环控制又具有自身的特殊性, 这是因为: (1) 由于测量反馈需要进行图像采集、图像处理、运算和实时通讯, 因而反馈具有滞后环节; (2) 由于测量头在机械结构上超前于焊接头, 因此反馈又具有超前环节。

一方面, 测量运算包含图像采集、图像处理、运算和数据传输等过程 (假设滞后时间为 t_1)。根据测

式中: ${}^W_M T$ 为测量坐标系 O_m 相对于工件坐标系 O_w 的齐次变换矩阵, 该矩阵可由机床结构尺寸和机床各运动轴坐标得到, 即

$${}^W_M T = \begin{bmatrix} \cos C \sin \theta - \sin C \cos A \cos \theta & -\sin C \cos A \cos C \sin \theta + \cos C \cos A \cos \theta & -LC \cos C \cos \theta - LC \sin A \cos \theta - LC \sin C \cos A + X \\ \sin C \cos \theta + \sin C \sin A \cos \theta & \sin C \cos A \cos C \sin \theta - \cos C \cos A \cos \theta & -LC \sin C \sin \theta + LC \sin C \sin A \sin \theta - LC \sin C \cos A + Y \\ -\cos A \sin C & \cos A & \cos A \sin \theta & -LC \sin A \sin \theta + LC \cos A + Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

因此并不适应于所研究的五轴联动数控平台。分解式补偿的基本原理如图 5 所示。

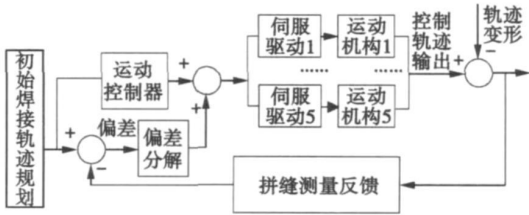


图 5 分解式补偿基本原理
Fig 5 Principle of decomposed compensation

将测量坐标系下得到的焊缝轨迹偏差分解到机床各轴, 通过补偿机床运动轴的运动量来实现焊缝精确跟踪。假设测量坐标系下得到焊缝轨迹的偏差为 $(\Delta \bar{y}_m, \Delta \bar{z}_m)$, 分解到工件坐标系的偏差为 $(\Delta \bar{x}_w, \Delta \bar{y}_w, \Delta \bar{z}_w)$, 根据式 (1) 和式 (2) 有

量系统的性能, t 取值范围为 $(0.03 \sim 0.05 \text{ s})$ 。

另一方面, 测量点超前焊接点, 假设距离为 L , 焊接速度为 v , 则测量超前时间 $t = L/v$ (s), 取值范围为 $(0.06 \sim 0.2 \text{ s})$ 。

假定 $R(s)$ 为三维拼缝曲线初始规划轨迹, $G(s)$ 为多轴输入输出系统开环传递函数, $w(s)$ 为扰动, $C(s)$ 为轨迹输出, 则整个闭环系统控制模型如图 6 所示。

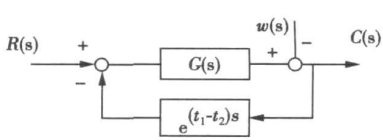


图 6 三维拼缝闭环控制模型
Fig 6 Closed-loop control model of 3D joint seam

令 $\tau = \frac{1}{\lambda_i}$ 很显然, $\tau > 0$ 测量反馈总体表现是一个超前环节, 将导致系统不稳定。

不失一般性, 将各运动轴的控制模型简化成一个二型系统, 则各轴的开环传递函数可以写为

$$G_i(s) e^s = \frac{k_i e^s}{s(s + \lambda_i)} \tag{4}$$

式中: 为传递函数自变量; λ_i 为开环极点。

由根轨迹法可以得到主根轨迹的相角条件, 假设主根轨迹与虚轴的交点为 ω' , 得到

$$\frac{\pi}{2} + \arctan \frac{\omega'}{\lambda_i} = \pi + \phi' \tag{5}$$

根据式 (6) 解出 ω' , 再根据根轨迹的幅值条件, 得到各轴的临界开环增益为

$$k'_i = |\phi'| \cdot |\phi' + \lambda_i| \tag{6}$$

为保持系统稳定, 采取的措施是: (1) 各轴开环增益不能超过其临界值 k'_i ; (2) 在机械结构允许的情况下, 尽量通过减少测量点到焊接点的距离 L 以减小 τ ; (3) 将测量反馈获得的偏差补偿量分多个伺服周期而不是一个伺服周期补偿到各个运动轴, 这样能减小各运动轴的突加给定, 有效克服系统的不稳定。

4 试验验证

图 7 所示为实际的三维拼缝曲线, 首先进行测量建立数学模型, 并生成焊接数控代码; 为验证文中的动态补偿算法, 将工件或拼缝人为偏移 4 mm, 用焊接激光的同轴光走一遍轨迹, 则光点不在拼缝中心; 打开测量装置, 开启动态补偿功能, 以 5 m/m 速度运行, 通过实时测量及动态补偿, 焊接激光准确地落在拼缝中心, 并沿拼缝前进。

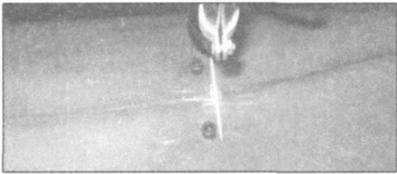


图 7 三维拼缝
Fig. 7 A 3D joint seam

提取试验中的各条轨迹 x, y 两轴数据, 作出 xy 平面上的相关曲线如图 8 所示。首先得到示教测量后的理论拼缝曲线 S_0 , 然后得到理论曲线在 y 方向上整体偏移 4 mm 后的曲线 S_1 通过计算补偿值后 (曲线 S_1 实际得到的曲线 (曲线 S_2) 与理论曲线 S_0 重合。试验证明动态补偿算法能够满足跟踪控制要求。

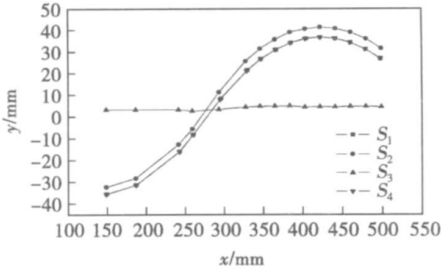


图 8 动态补偿运动轨迹
Fig. 8 Motion trajectories in dynamic compensation

5 结 论

- (1) 利用激光视觉传感器对三维拼缝焊接过程的进行实时测量, 能够获取拼缝轨迹的偏差信息。
- (2) 通过偏差分解, 实时补偿各运动轴的进给量, 能实现三维拼缝激光焊接实时测量和动态补偿。

参考文献:

[1] Guo H, Zuo DW, Wang SH, et al. The application of FEM technology on the deformation analysis of the aero thin-walled frame shape workpiece[J]. Key Engineering Materials 2006 315(6): 174-179

[2] 林尚扬, 陈善本, 李成桐. 焊接机器人及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000

[3] 徐 德, 谭 民, 李 原. 机器人视觉测量与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008

[4] Zhou L, Lin T, Chen SB. Autonomous acquisition of seam coordinates for arc welding robot based on visual servoing[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems Theory and Applications 2006 47(11): 239-255

[5] 吴家勇, 王平江. 激光焊接对接接头间隙宽度视觉测量系统[J]. 焊接学报, 2009 29(8): 105-108
Wu JiaYong, Wang PingJiang. Vision system of butt joint gap width measurement for laser welding[J]. Transactions of the China Welding Institution 2009 29(8): 105-108

[6] Matthew Miller. Development of automated real time data acquisition system for robotic weld quality monitoring[J]. Mechanics 2002 12(7): 1259-1269

[7] 蔡春波, 张华军, 张义顺, 等. 基于视觉传感器焊缝跟踪轨迹自示教方法研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2009 14(2): 95-97.
Cai Chunbo, Zhang Huajun, Zhang Yishun, et al. Investigation on seam tracking path self teaching method based on visual sensor[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology 2009 14(2): 95-97.

作者简介: 龚时华 男, 1968 年出生, 博士, 副教授。主要从事激光及相关特种加工装备控制的研究工作。发表论文 30 余篇。Email: gongshihua@mail.hust.edu.cn

the motion trajectory of welding gun was planned. The 3D model of the welding equipment based on Pro/Engineer working environment was established. The definition of the motion jointing and the parameters of servomotors were set. The virtual prototype motion simulation experiment of the welding equipment was run. The motion trajectory curve was created, and the simulation errors was analyzed. The correctness of modeling the mathematical model was validated, which provided the simulation technology support of virtual prototype for developing and manufacturing the welding equipment.

Key words: petroleum drill valve; intersection surface; motion simulation; trajectory curve

Extraction method of welding seam and defect in ray testing image ZHANG Xiaoguang², SUN Zheng, HU Xiaolei, HUAN Yuyue (1. College of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 3. Physics & Electronic Engineering Department, Zaozhuang University, Zaozhuang 277160, China). P 77—80

Abstract: A practical detection method, which takes advantage of the information contained in the image itself, is presented based on local treatment gradually for attacking the difficulties in accurately detecting and extracting weld seam and defect in ray testing image. First of all, the approximate location of the weld zone in the original image is determined by detecting the regional characteristics of bands; then, the local area where the weld boundaries and defect are in is determined by analyzing gray column waveforms; and the area types are divided into the categories of non-crack and crack class roughly; finally, the detection and extraction of welding defects are realized by using the methods based on Watershed Transform and Beamlet Transform respectively. The results show that the method can accurately detect the weld boundaries and weld defect in various ray images and has good adaptability and practicality.

Key words: ray testing image; welding seam; defect extraction; Watershed Transform; Beamlet Transform

Numerical modeling of welding distortion in thin-walled mild steel pipe DENG Dequn, TONG Yangang, ZHOU Zhongyu (College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China). P 81—84

Abstract: A thermal-mechanical nonlinear finite element method based on ABAQUS was developed to simulate the temperature, residual stress and strain fields in thin-walled structures welded by arc fusion welding processes. The welding temperature field and the welding distortion in a thin-walled mild steel pipe were predicted by using the developed finite element method. Meanwhile, experiments were carried out to measure the actual welding distortion in the thin-walled pipe welded by an arc welding robot. The coincidence between the simulation and the experimental results confirmed the validity of the numerical simulation method. The numerical simulation method has established a

foundation for prediction of welding distortion in thin-walled structure used in practical engineering.

Key words: finite element method; numerical simulation; welding temperature field; welding distortion

Microstructure and properties of rapidly solidified Ag-Cu-Sn ternary brazing fillers XU Jinfeng, ZHANG Xiaocun, DANG Bo, DAI Weigang (1. School of Material Science and Engineering, Xi'an University and Technology, Xi'an 710048, China; 2. Changshu Shuanghua Electronic Co., Ltd., Changshu 215500, China). P 85—88

Abstract: The phase constitution, morphology, electrical resistivity and mechanical properties of $\text{Ag}_{42.47}\text{Cu}_{57.53-x}\text{Sn}_x$ ($x=12, 23, 12, 94, 13, 65$, mass fraction%) prepared by melt spun method are investigated. The results indicate that the microstructure of the alloys consists of (Ag) $_{\alpha}$ -Cu and a few of $\text{Cu}_{13.7}\text{Sn}$ phases. With the rise of tin content, the electrical resistivity increases for refining of the microstructure and increasing of grain boundary amount and solute trapping; on the other hand, fine crystal strengthening and solution hardening will result in the increment of tensile strength from 280 to 360 MPa, but the elongation reduces from 5% to 2.8%. The ranges of solidus and liquidus temperature of those alloys are 590 to 616 °C and 615 to 622 °C respectively, and the temperature range increases with the increasing of tin content.

Key words: ternary alloy; quenched brazing filler; rapid solidification; microstructure; properties

Dynamic compensation for deformation in laser welding of 3D joint seam GONG Shihua, YU Junfeng, YANG Jianzhong, LI Bin (State Engineering Research Center of Manufacturing Equipment Digitization, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China). P 89—92

Abstract: As there is deformation perturbation in the laser welding process of 3D joint seam, the real time measurement and dynamic compensation in the welding process is used to track accurately a 3D trajectory. The real time measuring of the 3D joint seam welding is achieved with a laser visual sensor on a five-axis NC welding machine tool. The bias information of tracking joint seam is transformed from measuring coordinate system to workpiece coordinate system; the feed amount of axes is compensated real time, and the dynamic compensation in the welding process of 3D joint seam is realized. The stability of the closed control system with 3D joint seam measuring feedback is analyzed, and the proposed arithmetic is testified by experiment, which indicates that the real time measuring and dynamic compensation in the 3D joint seam welding process satisfies the track control requirement in 3D laser welding.

Key words: laser welding; 3D joint seam; dynamic compensation; visual sensor

Effect of CuAl₂ Phase on Properties and microstructure of Cu/Al brazed joint ZHANG Mark², XUE Songbai, JI Feng, LOU Yubin, WANG Shuqing (1. College of Materials