

$$u_c^2(y)=\sum_{i=1}^N\left[\frac{\partial f}{\partial x_i}\right]^2u^2(x_i)=\sum_{i=1}^Nc_i^2\cdot u^2(x_i)=\sum_{i=1}^Nu_i^2(y)$$

即

$$u_c^2(R_m)=c_{F_m}^2\cdot u^2(F_m)+c_{S_0,m}^2\cdot u^2(S_0)+u^2(R_{m,rou})$$
$$u_c^2(A)=c_{L_u}^2\cdot u^2(L_u)+c_{L_0}^2\cdot u^2(L_0)+u^2(A_{rou})$$

由测量模型对各输入量求偏导数，可得相应的不确定度灵敏系数：

$$c_{F_m}=\frac{\partial R_m}{\partial F_m}=\frac{1}{S_0}\cdot c_{S_0,m}=\frac{\partial R_m}{\partial S_0}=-\frac{F_m}{S_0^2}$$

$$c_{L_u}=\frac{\partial A}{\partial L_u}=\frac{1}{L_0}\cdot c_{L_0}=\frac{\partial A}{\partial L_0}=-\frac{L_u}{L_0^2}$$

将各数据带入上式得

$$c_{F_m}=\frac{1}{80}=0.0125\text{mm}^{-2}$$
$$c_{S_0,m}=-11965.113/(80\times 80)=-1.870\text{N/mm}^2$$
$$c_{L_u}=1/80=0.0123\text{mm}^{-1}$$
$$c_{L_0}=114.9/80/80=2.063\text{mm}^{-1}$$

标准不确定度分量详见表 3。

表 3 标准不确定度分量明细表

分量	不确定度来源	标准不确定度 u(xi) 值	自由度 v
$u(S_0)$	平行长度的横截面积的允许公差	0.231	∞
$u(F_m)$	最大力测量	79.688N	5
	试验机示值误差	690.381N	50
	标准测力仪的不确定度	179.475N	50
	读数分辨率	717.765N	∞
$u(L_u)$	断后标距长度测量	1.223	5
	量具误差	0.70509mm	50
$u(R_{rou})$	数值修约（间隔为 1N/mm ² ）	0.29N/mm ²	∞
$U(A_{rou})$	数值修约（间隔为 0.5%）	0.14%	∞

将各不确定度分量和不确定度灵敏系数代入计算公式，有：

$$u_c^2(R_m)=0.0125^2\times 717.765^2+(-1.870)^2\times 0.231^2+0.29^2=80.7686$$
$$u_c^2(A)=0.0123^2\times 0.70509^2+(2.063)^2\times 0+0.14^2=0.1400$$

由以上结果可知

$$u_c(R_m)=8.987\text{N/mm}^2$$
$$u_c(A)=0.374\%$$

3.8 扩展不确定度的计算

扩展不确定度采用 $U=ku_c(y)$ 的表示方法，即：
对本例，包含因子取 2，因此有：

$$U(R_m)=2u_c(R_m)=2\times 8.987=17.974\text{N/mm}^2=18\text{N/mm}^2$$
$$U(A)=2u_c(A)=2\times 0.374=0.748=0.7\%$$

用相对扩展不确定度来表示，则分别是：

$$U_{rel}(R_m)=U(R_m)/R_m=17.974/299=6.0\%$$
$$U_{rel}(A)=U(A)/A=0.7/43.5=1.6\%$$

3.9 测量不确定度的报告

本例所评定的金属板材的抗拉强度、断后伸长率测量结果的不确定度报告如下：

$$R_m=299\text{N/mm}^2; U=18\text{N/mm}^2; k=2$$
$$A=43.5\%; U=0.7\%; k=2$$

以上结果表明，可以预期在符合正态分布的前提下，在 (299-18) 至 (299+18)N/mm² 的区间包含了抗拉强度测量结果可能值的 95%；在 (43.5%-0.7%) 至 (43.5%+0.7%) 的区间包含了断后伸长率测量结果可能值的 95%。如果按相对扩展不确定度的方式来呈现，则可写为：

$$R_m=299\text{N/mm}^2; U_{rel}=6.0\%; k=2$$
$$A=43.5\%; U_{rel}=1.6\%; k=2$$

结语：综上所述，为提升检测机构的测量及不确定度评定的能力，应结合机构未来规划与发展，做好年度质量控制计划、提升检测人员计量领域专业知识、开展常态化监督机制，随时掌握检测机构人员、设备、环境设施、测量系统、测量程序的变化，对已完成评估的测量不确定度进行实时监控和及时调整，为机构的质量可持续发展做出贡献 [4]。

参考文献

[1] GB/T 228.1-2021金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法

[2] CNAS GL009-2018材料理化检测测量不确定度评定指南及实例

[3] JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示

[4] 彭宏，王春奕，徐鸿昊，张全新. GH4169高温合金圆棒试样室温拉伸试验的测量不确定度评定[J].热处理 2024 ,39 (01)

Discussion on defects and control in the processing of metal materials

Lingyun Zhang

Jinduicheng Molybdenum Co., Ltd. Taiyuan, Shanxi, 710000, China

Abstract

Metal materials are widely used in the field of processing and manufacturing, and are currently showing a diversified development trend, which is mainly characterized by high performance and environmental protection, and the application field is constantly expanding. In the process of metal material processing, affected by various factors, it is inevitable that some defects will occur. In order to make the processing of metal materials more delicate and high-quality, it is necessary to control defects in the processing process. This paper introduces the common defects of metal materials, expounds the defect detection technology in the processing of metal materials, and proposes the control measures of processing defects according to the requirements of material processing.

Keywords

metal materials; Processing; flaw

金属材料加工过程中的缺陷与控制探讨

张凌云

金堆城钼业股份有限公司, 中国 · 山西 太原 710000

摘 要

金属材料在加工制造领域中广泛应用, 目前呈现出多元化的发展趋势, 主要特征为高性能和环保化, 并且应用领域在不断拓展。在金属材料加工的过程中, 受到各种因素的影响, 难免会出现一些缺陷。为了使金属材料加工更加精细和优质, 必须对加工过程中的缺陷进行控制。本文介绍了常见的金属材料缺陷, 阐述了金属材料加工中的缺陷检测技术, 根据材料加工的要求, 提出了加工缺陷的控制措施。

关键词

金属材料; 加工; 缺陷

1 引言

在加工制造的过程中, 许多产品都需要使用金属材料。根据化学成分进行分类, 金属材料可以分为黑色金属和有色金属两类。比较常见的黑色金属包括铁、锰、铬等。有色金属包括铜、钛、铝等。其中, 钢铁为最常用的金属材料, 具有较高的性能优势, 但随着制造业的发展, 对新材料的需求也更加迫切。在金属材料加工过程中, 会采用多种工艺技术, 包括超塑成型、增材制造等, 利用各种技术改造金属的形状与性能, 满足产品制造在造型与能力方面的需求。从目前的情况看, 铝合金、镁合金等合成金属材料逐渐代替传统金属材料, 具有高性能、绿色环保、成本低廉等优势。在这些金属材料加工的过程中, 如果没有采取有效的控制措施, 可能出现表面缺陷或内部缺陷, 包括腐蚀、气孔等。这些缺陷会影响材料性能和美观性, 造成产品性能下降, 甚至在应用中

会产生安全风险。所以必须采取有效的缺陷控制措施, 确保金属材料加工质量。

2 金属材料加工过程中常见的缺陷

2.1 表面缺陷

金属材料表面缺陷的形式有很多, 常见的缺陷问题包括磨损、氧化、拉伤、划痕等。其中, 氧化缺陷的引发原因有很多, 包括工艺缺陷、环境因素、结构设计等, 会出现氧化膜异常的情况, 金属材料表面变色, 导致材料表面出现色斑, 影响材料的膜层附着力, 材料缝隙也会出现腐蚀。最常见的氧化形式就是锈蚀, 比如常用的铁材料, 氧化后会出现铁锈, 表面出现黄褐色的锈斑, 造成铁材料结构被破坏, 降低铁的强度、韧性、硬度等性能, 影响铁制品的使用寿命^[1]。一些产品对金属表面有较高的品质要求。例如, 在高温或者高压环境下使用此类铁质产品, 如果出现氧化锈蚀的问题, 容易引发事故, 造成设备损坏以及人员伤亡。

磨损包括划痕、擦伤等表面损伤, 会影响金属的厚度、硬度和美观度, 造成金属机械性能不足, 难以满足生产加工

【作者简介】张凌云(1987-), 女, 工程师, 本科, 中国陕西西安人, 从事金属压力加工研究。

的使用需求^[2]。拉伤也是比较常见的表面缺陷，因为金属表面拉伸，所以产生明显的变化痕迹，在加工过程中，这部分会导致应力集中，造成金属脆性增加，裂纹因此扩展。此外，还有一些金属可能外表面被异物包裹，或者在加工时油漆、胶水等其他材料残留，造成金属外部美观性受影响，一些残留物也会腐蚀金属表面。

表面缺陷对金属材料的影响较大，体现在多个方面，最主要的就是会导致金属材料的机械性能下降，包括强度、韧性、硬度、抗疲劳性等，造成材料使用寿命缩短，在预期寿命之前就出现断裂或者弯折等问题。不仅如此，氧化会造成金属难以抵抗外部腐蚀，造成材料被腐蚀的速度加快，缩短材料的使用寿命^[3]。划痕则主要影响材料的外观，严重的划痕也会增加材料断裂的风险，如果使用有划痕的材料进行零部件生产，会影响产品的精度，使用该材料的设备也需要经常维护，严重时还需要更换新品，造成维护成本过高，也会带来安全风险。

2.2 内部缺陷

金属材料内部缺陷会直接影响材料性能和寿命，常见的内部缺陷包括夹杂物、气孔、析出物、裂纹等。夹杂物就是材料中夹杂着异物或其他微小的材料颗粒，导致金属材料出现应力集中的情况，容易造成裂纹扩展，也会带来疲劳损伤；气孔就是材料内部出现孔隙，因为加工的过程中有气体进入材料，这些气体没有全部排出，所以产生气孔^[4]。析出物就是一些合金材料中会析出一些不稳定的元素，造成金属脆性不足，也会降低机械性能。裂纹是比较常见的内部缺陷，通常由应力原因导致，造成材料的整体强度下降，也会导致材料韧性不足。

内部缺陷对金属材料的影响较大，会造成金属材料的力学性能下降。例如，夹渣、气孔、裂纹等问题，会造成金属材料强度、刚度、韧性等力学性能降低，导致材料加工需求无法满足。例如，焊接不够彻底的情况下，焊缝强度不足，进而导致气体进入材料内部，材料随之出现气孔缺陷，造成材料承载能力下降，容易出现弯折、断裂等问题；内部缺陷也会影响金属材料的疲劳强度，一些疲劳裂纹不仅会出现在金属材料的表面，也会出现在亚表面缺陷位置，内部缺陷会延缓裂纹成核，内部裂纹虽然会迅速扩展，但扩展速率并不会超过表面裂纹，所以表面缺陷主要影响金属材料的疲劳强度；内部缺陷对材料的冲击韧性也有较大的影响，所谓冲击韧性，就是材料遭受冲击荷载时，用于衡量其抵抗破坏的能力^[5]。裂纹、气孔、夹杂物等内部缺陷会降低材料冲击韧性，也就是降低了冲击韧性指标（ α_k 值），造成材料在遇到冲击时，更容易发生锻造问题。

造成金属材料出现内部缺陷的原因有很多，以夹杂物缺陷来说，可能因为炉料、炉渣等进入金属内部；在材料加工的过程中，通常需要经过冷却环节，如果冷却不均匀，会影响材料内部组织结构均匀性，进而导致各类内部缺陷。例

如，冷却钢钉的过程中，因为金属模温度较低，材料表面层会有晶粒区域形成，内部因为冷却不均匀造成明显的晶粒产生，导致严重的内部缺陷；在材料锻造的过程中，如果没有合理控制工艺参数，也可能导致内部缺陷^[6]。例如，焊接处理是非常重要的加工环节，如果电压、电流等参数不达标，则可能导致焊接质量低下，会出现气孔、夹渣等缺陷。此外，一些金属材料本身就存在质量问题，所以生产加工时也难免出现缺陷。例如，金属原材料本身就具有较高的气体含量，所以出现气孔缺陷的概率较高。

3 金属材料加工过程中的缺陷检测技术

3.1 无损检测技术

无损检测技术顾名思义，就是不会破坏金属材料的检测技术。常用的无损检测技术有超声波检测和X射线检测两种。

超声波检测就是利用声波传播原理定位金属材料的缺陷，在材料内部引入高频声波，监测声波传播情况，根据声波变化进行分析，不会损伤材料且缺陷定位比较精准。在实际监测时，使用超声波探头发送声波，如果材料内部存在缺陷，则声波遇到缺陷就会反射或者散射，进而出现回波信号，检测人员根据回波信号做出判断（如图1）。该检测技术具有较高的分辨率，而且检测速度较快，不会损坏检测样品，能够满足多样化的检测需求。目前，金属材料加工缺陷检测中，超声波检测技术应用广泛，主要针对气孔、裂纹等内部缺陷进行检测，能够有效监控材料质量，使材料加工更加精细。

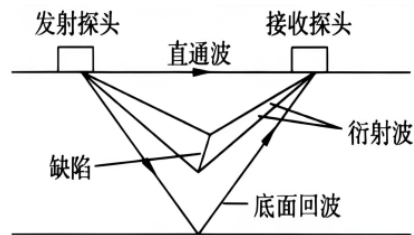


图1 超声波检测技术原理

X射线检测就是根据X射线的传递情况进行检测分析，探测器能够捕获射线。如果X射线遇到气孔、夹渣等缺陷，则会出现散射、吸收等情况，探测器随之产生影像^[7]。X射线检测的分辨率也比较高，同时属于无损检测技术，能够探测金属材料深处，所以在焊接、锻造等加工环节广泛应用该技术进行检测。

3.2 材料性质测试

在金属材料加工的过程中，要确认材料是否存在缺陷，需要进行严格的材料性质测试。主要进行拉伸试验和硬度测试。

在拉伸试验中，先选择金属材料样品，然后使用拉伸试验机进行测试。设定试验机的拉伸力和拉伸速度，使材料样品逐渐被拉伸。在这个过程中，测量拉伸力与材料的伸长量，通过数据的记录与分析确定材料拉伸参数。根据拉伸试验结果获取材料的应力-应变曲线^[8]。在拉伸试验中，伸长率、抗拉强度、屈服强度等都是不可或缺的重要参数，通过拉伸