

轴承制造中磨削烧伤的分析和预防

李绪前¹, 梁云峰², 杨光明³

(1.舍弗勒(宁夏)有限公司, 宁夏银川 750021; 2.宁夏大学机械工程学院, 宁夏银川 750021;
3.银川东方气力运输设备有限公司, 宁夏银川 750021)

[摘要] 轴承零件的磨削加工过程中, 磨削热会传导到被加工工件表面。这些热量在磨削过程中来不及传入工件深处, 而是聚集在表层形成局部高温, 当超过某一临界值时, 就会引起淬火后的轴承工件表面机械性能和局部组织发生变化, 这种变化称为磨削烧伤。文章主要分析轴承制造中磨削烧伤的情况及预防, 以为行业提供借鉴。

[关键词] 磨削加工; 磨削烧伤; 冷却液; 砂轮

[中图分类号] TG580.6 **[文献标志码]** A

轴承生产中, 磨削烧伤绝大多数情况下是人眼不可见的, 其产生的原因可能是多因素叠加量变引起质变的结果。若磨削烧伤得不到准确的检测判断和及时处理, 会产生批量的不良品。文章对于及时发现、消除和预防磨削烧伤进行了一些实践层面的探讨。

1 磨削烧伤的分类

(1) 第一类是工件表面积累的磨削热尚未达到工件材料的临界温度, 仅仅使工件表面产生回火现象, 称为回火烧伤。酸洗检查后外观显示为黑色斑块或者条纹, 颜色越黑烧伤越深, 金相组织检测时出现回火层。酸洗后回火烧伤工件表面如图1所示, 金相检测回火烧伤组织(深度107 μm)如图2所示。

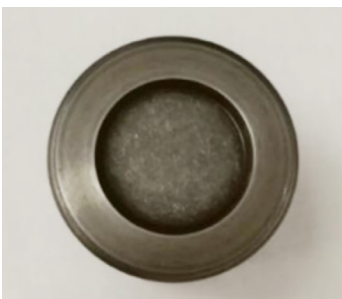


图1 酸洗后回火烧伤工件表面

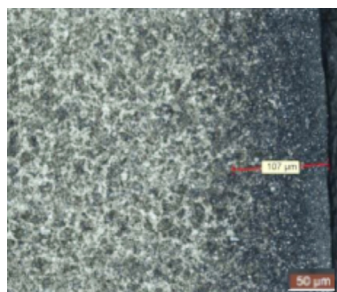


图2 金相检测回火烧伤组织

(2) 第二类是磨削高温被工件表面大量吸收超过了工件材料的临界相变温度, 又被磨削区的冷却液急速冷却而产生二次淬火现象, 称为淬火烧伤, 酸洗后淬火烧伤工件表面如图3所示。淬火烧伤是严重的磨削烧伤, 二次淬火形成的索氏体、托氏体组织一般与回火组织一同出现, 排除酸洗过程中工件表面清洗不充分和酸洗时间过短, 酸洗检查会发现在灰黑表面出现白亮区域或者亮线条。



图3 酸洗后淬火烧伤工件表面

(3) 第三类是更高的瞬时磨削温度和急剧冷却在工件表面层形成很大的拉应力。当拉应力超过了材料的抗拉强度, 就会使工件表面产生磨削裂纹。拉应力在热酸蚀后的试样表面显现出的裂纹需要借助晶相显微镜放大观察, 裂纹特征为黑色线条。磁粉探伤和涡流探伤设备是专门用来检测裂纹的无损检测设备。

磨削烧伤检查方法总结归类见表1。

表1 磨削烧伤检查方法总结归类

项目	回火区、淬火区	残余应力	磨削裂纹
酸洗	适用	不适用	不适用
热酸蚀	不适用	适用	适用
磁粉探伤	不适用	不适用	适用
涡流探伤	适用	不适用	适用
巴克豪森噪声检测法	适用	适用	不适用

2 磨削烧伤产生的原因

作为切削工具的砂轮是由大量的磨粒、结合剂和空隙烧结而成的多孔体，砂轮表面的每一颗磨粒相当于一个具有负前角 γ_0 的微小刃齿，磨粒切削金属时，经历了摩擦、耕犁和切削3个阶段，磨粒的切削模型如图4所示。在 I 阶段，由于切削深度很小，磨粒仅与工件表面产生摩擦，仅在工件表面发生弹性变形；在 II 阶段，随着切削深度逐渐增大，磨粒与工件表面由弹性变形过渡到塑性变形，摩擦力从工件表面向内部过渡；在 III 阶段，切削深度继续增大，摩擦力达到最大，弹性变形最终形成切屑并沿磨粒前刃面流入容屑空间。整个磨削过程中，磨粒对工件的摩擦力是造成磨削热的来源。因此，尽可能减少磨削热的产生，且尽量使产生的热量少传入工件是避免磨削烧伤的关键。

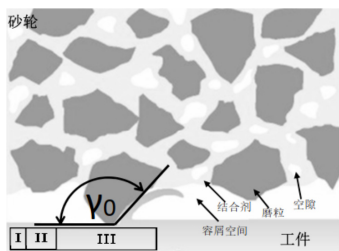


图4 磨粒的切削模型

3 磨削烧伤的预防

3.1 冷却液

冷却液有冷却、润滑、清洗和防锈作用，性能优良的切削液是有效避免磨削烧伤的前提。现代轴承制造业中，高速磨削广泛应用，通常使用合成型水基乳化液和非水溶性磨削油作为冷却液来满足高速磨削的需求。

在使用过程中要定期监控冷却液的状态，根据检测结果及时添加相关的杀菌剂、pH 值提高剂等，并及时补充原液。若冷却液变质发臭、易起泡、浓度波动大、细菌含量超标、pH 值太低，不仅冷却润滑效果变差，不利于磨削烧伤的预防，而且起不到清洗和防锈作用，过多泡沫容易导致溶液漫溢泄漏，污染工作环境。除定期监控，还要避免设备泄漏的机油、雨水等进入冷却系统，禁止将清洁设备后的污水、茶梗等倒进冷却液系统。

冷却液对磨削烧伤的预防不仅取决于本身的性能和工作状况，也取决于冷却液是否正确地浇注到磨削区。必须保证中央冷却系统或者冷却泵在设定的压力下持续稳定地将一定流量和压力的冷却液直接喷射在磨削区，冷却液喷嘴在与工件上下料、砂轮进给不产生干涉的原则下，要尽可能贴近磨削区。

3.2 砂轮

3.2.1 砂轮的特性

砂轮特性包括砂轮形状和尺寸、磨料、粒度、硬度、组织、结合剂、最高工作线速度等7个要素。在磨削过程中不同特性的砂轮对磨削热的产生有决定性的影响。依据工厂相关方工件的材料、硬度、热处理方法、磨削加工精度、工件的形状和尺寸、磨削设备等提出的要求，砂轮制造商不断优化砂轮配方，最后选出最适用的砂轮加以定型，如图5所示。供应商也能根据砂轮使用过程中出现的新问题随时优化砂轮型号。

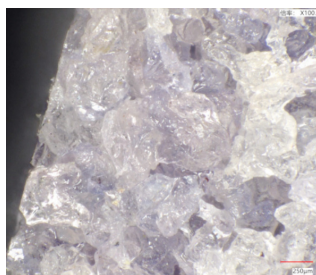


图5 一款常用的SA54K6V砂轮的3D显微镜下组织结构

砂轮各要素之间存在互相补偿和制约的关系，生产中根据追求的不同侧重点而搭配调整。总原则是在合理的砂轮消耗成本和不产生磨削烧伤的前提下，达到最大的磨削效率和磨削质量。轴承生产中砂轮的磨料有棕刚玉（A），白刚玉（WA），铬刚玉（PA），单晶刚玉（SA），立方氮化硼（CBN）等。相同的加工参数下，其磨削性能和加工精度依次增强；磨削过程中的发热量依次减少，砂轮的价格是依次增高。棕刚玉一般用于主要去除加工余量的粗磨加工，白刚玉及以上则用于细磨和精度要求较高的磨削；砂轮的粒度在能满足表面粗糙度和加工轮廓的情况下，应选用粒度号越小、颗粒尺寸越大的砂轮，这样不仅能提高磨削效率还能有效避免磨削烧伤。砂轮的硬度是指磨粒在磨削过程中从砂轮表面脱落的难易程度，磨粒容易脱落其砂轮硬度就低，反之，硬度就高。同一种磨料可以做出不同硬度的各种砂轮。砂轮组织是指砂轮中的磨料、结合剂和空隙三者间的体积关系，砂轮组织号大，单位体积内磨粒的含量少，砂轮磨损度和消耗增加，但容屑空间和空隙大，不易堵塞，气孔可以将冷却液和空气带入磨削区，工件发热变形小，不易产生磨削烧伤。

3.2.2 砂轮的修整

砂轮在使用中磨粒会变钝，表面的几何形状由于磨粒的脱落发生改变，容屑空间被磨屑逐渐填满，切削性能降

低，与工件表面的摩擦力增加，磨削温度上升，工件加工质量降低，表面出现振纹，烧伤风险增大。此时，需要对砂轮进行及时修整，实质上就是用安装在修整器上的金刚笔、金刚滚轮等对砂轮磨削表面进行修锐整形，主要目的有：①使变钝的磨粒破碎崩裂，产生新的切削刃；②去除被磨屑填充堵塞的结合剂层，露出新的容屑空间和磨粒；③得到所需要的砂轮轮廓。定期修整对砂轮自锐性和磨削性能的保持起着决定性作用。砂轮的修整间隔在数控磨床中是以相邻两次修整之间所加工工件的个数或者加工一件工件需要修整的次数来设定的。实际生产中，随着砂轮直径的消耗变小，如果所加工工件的轮廓、核心粗糙度、波纹度等变差或者出现磨削烧伤，可以通过缩短修整间隔加以改善。如果缩短间隔还是不能起作用，则要及时更换新的砂轮。

修整时必须使用锋利的修整器，磨钝了的金刚笔或金刚滚轮不仅起不到修整的目的，还会使修整后的砂轮表面变得更差，增加烧伤风险。有经验的作业人员会通过观察加工后的工件外观，听设备加工噪声变化确定是否需要重新选择金刚笔的安装方向或者更换，而不仅仅依靠加工的数量。

3.3 参数的选择

修整的主要参数有修整量 t_a (mm)，修整速度 V_a ($\mu\text{m/s}$) 等。减少 t_a 、降低 V_a ，则修整后的砂轮表面更细密光滑，加工后的工件表面质量更高，但不利于磨削烧伤风险的降低，反之，则相反。修整参数选择的原则是在能达到工艺质量要求的前提下，砂轮表面尽可能修整得粗糙些。

选择合理的砂轮与工件的对刀点位置。每完成一次加工，砂轮将以极快的速度到达对刀点重新开始下一个工件的磨削。要依据工件的最大实体尺寸、椭圆度合理设定此位置参数，如果设置过大，设备有一部分时间在消除空行程，磨削效率降低；如果设置过小，对于出现的个别尺寸偏差大或者变形量较大的工件，砂轮在快速逼近的过程中已经接触到了工件，极易产生磨削烧伤，极端情况会出现设备“撞车”事故。

生产中一般用金属去除率 Q_w 来评定磨削快慢，表示对应的每 1mm 宽度的砂轮每秒钟去除的磨屑体积。

$$Q_w = D_w \pi V_f \quad (1)$$

式中， D_w 为工件直径，mm； V_f 为工件进给速度，mm/s。

V_f 增大，则 Q_w 升高，每秒中将有更多的磨屑填充到砂轮表面，砂轮与工件的摩擦力将增大，烧伤风险上升。同一工序，加工较大直径的工件，则要相应地选择较小的 V_f ，以避免磨削烧伤。

$$n_w = 1000 V_m / \pi D_w \quad (2)$$

式中， n_w 为工件转速，r/min； V_m 为工件的线速度，m/min。 n_w 升高，工件母线上的单次磨削时间变短，利于磨削热的扩散，在能满足质量要求的前提下，应尽可能选择比较大的 n_w 。

4 结束语

本着对质量和客户负责的原则，轴承磨加工后的套圈和滚动体是不允许存在磨削烧伤的，如果发现裂纹则工件要全部报废处理。因此，日常生产中，企业管理人员首先要加强对磨削烧伤可能产生的不良后果和危害性的认识，培训操作者和质量人员提高预防磨削烧伤的意识和能力；其次相关人员要严格执行工艺规定，除了做好每班的正常频次检查，在设备更换工装、砂轮、修整器、修改磨削参数后要对首件工件进行额外的烧伤检测；最后，企业的相关支持部门，也是磨削烧伤预防的关联方，他们所提供的外部输入诸如淬火工件的质量、中央冷却设施的可靠运行、工装备件等的质量对磨削后产品质量稳定的影响也不应忽视。

参考文献

- [1]中国轴承工业协会.轴承套圈磨工工艺[M].郑州：河南人民出版社，2006.
- [2]王先逵.机械制造工艺学[M].北京：机械工业出版社，1995.
- [3]吴桓文.机械加工工艺基础[M].北京：高等教育出版社，1990.
- [4]费代祥，孙少玉，来亦卢.渗碳钢齿轮磨削烧伤研究[J].今日制造与升级，2024（2）：107-109.

作者简介

李绪前（1984—），男，甘肃甘谷人，本科，主要研究方向为机械制造。

（编辑：凌 瑞）