

铜材加工对材料性能的影响及优化策略

张 昊

江西江铜龙昌精密铜管有限公司 江西南昌 330096

摘 要: 在现代工业与科技发展中,铜作为基础金属材料,扮演着不可或缺的角色。其优越的导电性、导热性、良好的延展性和耐腐蚀性使其成为电气、电子、建筑、交通以及众多高科技领域的重要材料。铜材加工,即通过对铜原料进行物理或化学处理,以改变其形状、尺寸乃至性能,是连接原材料与终端产品的桥梁。本文主要分析铜材铜材加工对材料性能的影响影响,以及提出优化加工的策略,以通过科学方法提升铜材制品的品质与性能,满足日益增长的高端应用需求。

关键词: 铜材加工; 材料性能; 影响; 优化策略

引言

铜因其优异的导电、导热性能,以及良好的耐腐蚀性、延展性和可加工性,是电气、电子、建筑、交通、机械制造等多个基础工业领域不可或缺的材料。铜材加工产品,如铜线、铜管、铜板等,是电力传输、电子元器件、制冷设备、水管系统、汽车零部件等众多产品的核心组成部分。随着科技的进步和产业的升级,对高性能、高精度、高可靠性的铜材需求日益增长。例如,5G通信、新能源汽车、高速铁路等新兴行业的发展,极大推动了铜合金材料、超薄铜箔、精密铜配件等高端铜材加工技术的发展和运用,促进了相关产业的技术革新。

一、铜材加工对材料性能的影响

(一) 导电性与导热性

铜作为一种优异的导电和导热材料,在众多领域中扮演着不可替代的角色,如电力传输、电子元器件制造、散热设备等。然而,加工过程对铜的导电性和导热性的影响是一个复杂且微妙的问题,需要细致考量和精确控制。

铜的导电性和导热性主要取决于其自由电子的数量和运动的自由度,而这些性质直接受到材料微观结构的影响。加工过程中,尤其是冷加工,如锻造、轧制或拉伸,会使铜晶粒细化,增加晶界面积,理论上这有利于电子散射,可能轻微降低电导率。然而,实际中,由于冷加工也能减少材料内部的缺陷,如位错,因此对导电性的影响较为复杂,通常并不显著降低,有时甚至因晶粒细化而有所提升。相比之下,铜的导热性对微观结构的敏感度更高,晶粒尺寸和晶界特性对其有较大影响,

但通过合理控制加工工艺,依然能保持较好的导热性能。

纯度高的铜材料加工后通常能较好地保持其电热性能,这是因为杂质是影响铜导电性和导热性的关键因素之一。杂质原子会占据晶格位置或存在于晶界,干扰自由电子的移动,从而降低电导率和热导率。例如,即便是微量的铁、硫、氧等杂质,也可能导致铜的电导率下降几个百分点。因此,在加工前,确保原材料的高纯度是维持导电性和导热性的前提。加工过程中,避免引入新的杂质,并通过合理的热处理减少或重新分布已存在的杂质,对于维持性能同样重要。

(二) 尺寸稳定性

铜材的耐腐蚀性和尺寸稳定性是评价其加工制品质量与使用寿命的两个重要指标。在实际应用中,如何通过合理的加工与处理方法提升铜材的耐腐蚀性,以及如何控制加工过程中的应力以确保尺寸稳定性,是实现高质量产品的关键。耐腐蚀性是铜材在特定环境条件下抵抗腐蚀的能力,对于延长产品使用寿命至关重要。加工应力和热处理过程可能导致材料内部残余应力,影响尺寸稳定性和形状精度。尺寸稳定性关乎铜材加工制品的精确度与功能可靠性,尤其在精密电子、航空航天等对尺寸公差要求严格的领域。

二、铜材加工对材料性能的影响因素

(一) 加工过程中的温度调控

具体到温度对铜材性能的具体影响,高温环境下的铜原子活动显著增强,这会触发一种称为再结晶的过程,即冷加工后形成的细微晶粒重新生长,导致晶粒尺寸膨胀,进而引起材料硬度和强度的下降,与此同时,材料的塑性却得到了提升。以纯铜的退火处理为例,将温度

精确控制在 300℃ 至 400℃ 这一再结晶温度窗口内并保持一定时间，可以高效地逆转冷加工硬化效应，使材料重获初始的高塑性状态，这对于需要深度拉伸或复杂弯曲成型的应用而言是必不可少的步骤。

此外，尽管合理的热处理条件对铜的天然导电性影响甚微，但温度过高则可能引起不利的副作用，包括电子散射增强，这虽对导电率的负面影响有限，却足以引起关注，尤其是在电子工业中，对导电和导热性能的均匀性有着极高的要求。过高的热处理温度还会加速合金元素在基体中的不均匀扩散，这对制造高精度电子组件尤为不利，因为任何导电性和导热性的不均匀都可能影响产品的性能稳定性和使用寿命。因此，对温度的精确控制不仅是工艺技术的体现，更是保证产品一致性和可靠性的关键所在。

（二）加工过程中的应力管理

加工应力是加工过程中不可避免的伴随现象，其对铜材的微观结构和性能有着深远影响。冷加工时，材料内部因塑性变形而积累的加工硬化应力，不仅会导致晶格结构的畸变和位错密度增加，还可能引起微观结构的不均匀，进而影响材料的整体力学性能。在承受周期性载荷的组件中，如弹簧和连接件，这些残余应力成为疲劳裂纹的起源，严重影响材料的使用寿命。因此，采取如应力消除退火等措施来控制减轻加工应力，对于提升产品可靠性至关重要。

（三）表面处理工艺的实施

表面处理技术在确保铜材耐腐蚀性方面扮演着决定性的角色。尤其在面对恶劣环境挑战时，未处理的铜材料极易遭受腐蚀侵蚀。通过部署一系列先进的表面处理手段，如电镀技术（包括镀镍、镀锡处理）、化学转化膜技术（磷化、钝化处理）以及专门的防护层涂覆，能够有效搭建起一道坚固的防护壁垒，显著增强铜材的耐腐蚀性能，从而延长其使用寿命。

（四）精密尺寸控制的严格把握

尺寸精度的准确控制对于铜材制品的功能表现具有直接且显著的影响力。在精密工程和制造的范畴内，即便是微小的尺寸偏差也可能导致产品功能的严重失效。以电力传输线的制造为例，截面尺寸的微小波动直接影响其电流承载能力，任何非预期的尺寸变化都可能引发过热乃至火灾的安全隐患。

三、优化策略

（一）选用合适的加工方法

在铜材加工过程中，选用合适的加工方法是确保产

品质量与性能的关键，定了铜材制品的最终形态、性能及应用范围。热处理工艺作为材料科学中一项重要的加工技术，对于改善和优化金属材料性能起着决定性作用。热处理工艺优化主要包括退火、固溶处理、时效处理等。

退火处理是一种基本而重要的热处理方式，旨在消除材料在冷加工过程中产生的加工硬化现象，恢复其塑性和韧性。退火过程通常涉及将材料加热至略低于其再结晶温度并保持一段时间，允许材料内部的晶粒重组和位错减少，从而软化材料。对于铜及铜合金，完全退火温度范围大约在 300℃ 至 700℃ 之间，具体温度根据合金成分和所需性能而定。

固溶处理则是为了溶解合金元素到基体金属中，形成单相固溶体，以达到强化材料的目的。在铜合金中，通过加热至足够高的温度，使合金元素充分溶解到铜晶格中，随后快速冷却（如水淬）以防止析出，可以形成过饱和固溶体，显著提升材料的强度。例如，对于 Cu-Ni-Sn 合金，固溶处理温度一般控制在 900℃ 至 1000℃ 之间，可以有效提升合金的硬度和耐蚀性。

时效处理紧随固溶处理之后，目的是促进过饱和固溶体中的合金元素析出，形成细小沉淀相，进一步强化材料。时效处理分为自然时效和人工时效两种，后者通过加热至较低温度（低于固溶处理温度）加速沉淀过程，以获得更好的机械性能。在铜合金中，恰当的时效处理能显著提升材料的强度和硬度，同时保持一定的塑性和韧性平衡。比如，对于铜铝合金，通过 T6 处理（固溶 + 人工时效），可以获得比 T4 处理（固溶 + 自然时效）更高的机械性能，强度提升可达 20% 以上。

（二）精细化调控加工过程的温度与应力

精确掌握温度与应力的调控是确保铜材性能优化的基石。具体而言，在热加工环节，通过实施精确的炉温调控策略，可以有效防止材料因过热或过烧而导致的晶粒异常长大现象，从而保护并优化其综合力学性能。

而在冷加工阶段，对变形速率与变形程度（通常以百分比减缩率来量化）进行精细管理，是维持材料韧性与强度均衡的必要条件。现有研究表明，大多数铜合金在冷加工减缩率处于 20% 到 50% 这一区间时，能显著增强其强度，同时确保足够的延展性得以保留，这一范围被视为优化性能的最佳实践。此外，对变形速率的巧妙调节（推荐范围大约为每分钟 1 至 10 毫米），能够实现材料硬化与加工效率之间的微妙平衡，有效遏制因变形速率过快而引发的过度加工硬化问题。

(三) 高效优化表面处理技术

表面处理技术的持续优化,对提升铜材制品的终端性能、可靠性及拓宽应用领域至关重要,是通往高端制造和精细化加工的必经之路。

电镀技术,作为传统表面处理手段,通过电解作用于铜表层沉积金属或合金涂层,如镀镍、镀金和镀银,显著增强了铜材的耐腐蚀性和导电性,尤其适用于电子组件与连接器制造。

化学镀,或称无电解镀,提供了一种无需外部电流的镀层方法,如化学镀镍,因其出色的均匀性、卓越的耐腐蚀能力和优秀的缝隙填充性能,成为了复杂几何形状零件防护的优选。化学镀铜则为钢铁基材提供优异的铜底层,为后续电镀步骤打下坚实基础,此过程强调对化学反应条件的精细调控,以防止基材损伤或镀层缺陷。

钝化处理,作为一种转化膜形成技术,通过化学反应在铜表面形成一层薄而致密的保护层,有效隔离环境中的腐蚀因子。磷酸盐钝化和铬酸盐钝化技术,特别适合那些不适合电镀或化学镀处理的部件,提供了初步的耐蚀保护。尽管钝化层较薄,限制了其在极端环境下的长期防腐能力,但其对材料基本性质影响微乎其微。

(四) 实现超精密尺寸控制

过采用高精度加工手段,不仅可以显著减少因加工过程引入的应力,还能够大幅提升尺寸精度和改善表面质量,从而满足高端应用领域提出的严格要求:

1.高速加工技术:高速加工技术侧重于提高材料去除率的同时保持加工精度,主要通过提高切削速度、进给速度来缩短加工时间,提升生产效率。它适用于大批量生产中的金属切削加工,如航空零件、汽车部件的制造。高速铣削通过使用硬质合金或陶瓷刀具,在高速旋转下进行材料切削,可以显著减少切削力,提高加工表面质量,减少热变形。高速钻削与攻丝在高转速下进行孔加工和螺纹加工,提高了孔的圆度和螺纹的质量,减少了毛刺的产生,特别适合难加工材料的高效加工。

2.精密测量技术:精密测量技术是保障精密制造质量与效率的关键,它涉及对物体尺寸、形状、位置、表面粗糙度等物理参数进行高精度、高稳定性的检测与评估。随着科技的进步,精密测量技术也在不断地发展与革新,其中光学测量技术、非接触式测量技术以及高精度测量仪器的广泛应用,为实现微纳米尺度的精确测量提供了强有力的支持。

3.精密装配技术:精密装配技术是确保高端装:功

能完整性和性能稳定性的重要环节,它要求在微米乃至纳米级别上实现零部件的精确对接与组装。随着科技进步和制造业转型升级,微型零件装配技术和高精度定位技术是精密装配领域的核心。微型零件装配技术,如激光辅助装配,利用激光的热效应或光压力,精确控制局部加热或推动微小零件,实现无接触、高精度的装配。激光焊接、切割也是微装配中的关键技术,适用于微电子器件、医疗器械的精密连接。高精度定位技术,如超精密导轨系统,采用空气轴承、磁悬浮等技术的导轨系统,能极大降低摩擦力,实现超低震动、高稳定性的运动控制,对于需要长行程高精度定位的应用尤为重要。

4.精密控制技术:精密控制技术是确保精密制造过程稳定、高效运行的核心,它通过精确控制加工设备的运动、加工参数及系统状态,以达到预期的加工精度和生产效率。在铜材加工的精密制造中,伺服控制技术是典型代表,如伺服控制技术通过力矩控制,在需要高精度力控的场合,如精密研磨、抛光,伺服系统能精确控制输出力矩,维持恒定的接触压力,确保加工质量。

结束语

综上所述,铜材加工技术的持续创新与优化,不仅提升了铜材的耐腐蚀性、强度、导电性等关键性能,还通过减小加工应力、提高尺寸精度,确保了铜材制品在高端领域的广泛应用,实现了经济效益与生态效益的双赢。未来铜材加工行业将探索更智能、更环保的加工方法,不断突破材料性能极限,以适应快速发展的科技时代,为社会的可持续发展贡献重要力量。

参考文献

- [1]伍文文.挤压加工对铜基复合材料组织性能的影响[J].中国金属通报,2021(018):000.
- [2]李惠.高效连铸结晶器铜材表面涂层制备、性能表征及其机理研究[D].江苏大学[2024-05-19].DOI:CNKI:CDMD:1.1014.226798.
- [3]魏东彬,章林,张鹏,et al.铜铁预合金粉末对铜基摩擦材料摩擦磨损性能的影响[J].粉末冶金技术,2022,40(1):9.DOI:10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2020050017.
- [4]马文林,未亮亮.微织构对铜基自润滑复合材料摩擦磨损性能的影响[J].表面技术,2023,52(1):93-102.
- [5]司丽娜,陈林林,阎红娟,等.铜基复合制动材料摩擦磨损性能研究进展[J].润滑与密封,2022,47(10):8.