

高性能铜合金的热处理及其加工技术

孙庆安

湖南高创科惟新材料股份有限公司 湖南 长沙 410000

摘要：高性能铜合金通过热处理技术如再结晶退火、固溶处理和时效硬化，显著改善其织构、晶粒度和机械性能，增强耐腐蚀性和抗疲劳性。加工技术则涵盖塑性加工（锻造、挤压、轧制）、冷加工（冷轧、冷拔）及切削加工和铸造等，每种技术均针对特定需求优化合金性能。综合运用这些技术，可生产出广泛应用于航空航天、汽车制造、电子设备等领域的高性能铜合金产品。

关键词：高性能铜合金；热处理；加工技术

引言：高性能铜合金以其优异的机械性能、导电导热性以及良好的耐腐蚀性，在航空航天、汽车制造、电子通讯等领域展现出巨大的应用潜力。为了充分发挥其性能优势，热处理与加工技术成为不可或缺的关键环节。热处理通过控制加热、保温和冷却过程，优化合金的微观结构和性能；而加工技术则通过塑性变形、切削去除等方式，实现合金的精确成型与性能提升。两者相辅相成，共同推动着高性能铜合金材料的发展与应用。

1 高性能铜合金的基本特性

高性能铜合金经过特殊的合金化设计和热处理工艺，能够达到较高的抗拉强度和屈服强度。例如，某些高性能铜合金的抗拉强度可超过600MPa，甚至更高，确保了在复杂工况下的结构稳定性和安全性。合金化元素的加入和精细的微观组织控制，使得高性能铜合金在保持高强度的同时，也具备良好的韧性，能够抵御冲击和振动，延长使用寿命。部分高性能铜合金，如含有特殊耐磨组元的合金，展现出卓越的耐磨性能，适用于高摩擦、高磨损的工作环境。高性能铜合金通常具有优异的耐腐蚀性，能够在酸、碱、盐等多种腐蚀环境中保持稳定，减少因腐蚀导致的性能下降和失效风险。例如，某些铜镍合金在海洋环境中表现出色，被广泛应用于海水淡化、海洋工程等领域^[1]。尽管加入了其他合金元素，但高性能铜合金仍然保持了较高的导电性和导热性。这使得它在电子、电力、热交换等领域具有广泛应用，如高性能电子元器件、集成电路、散热器等。高性能铜合金具有良好的可塑性和可加工性，易于通过铸造、锻造、挤压、拉伸等多种方法进行成形加工。

2 高性能铜合金的热处理技术

2.1 再结晶退火技术

再结晶退火技术通过加热合金至再结晶温度以上，并保温一定时间后冷却，使合金内部的微观组织发生再

结晶，从而显著改善材料的性能。（1）再结晶退火主要基于金属材料的恢复和再结晶现象。在冷变形加工过程中，铜合金内部会产生大量的残余应力和不均匀的微观组织，如纤维状组织和位错等。这些因素会严重影响合金的塑性和韧性。通过再结晶退火，可以使合金内部的晶粒重新形核并长大，形成均匀的等轴晶粒组织，从而消除残余应力和不均匀组织，提高合金的塑性和韧性。（2）再结晶退火的关键在于选择合适的加热温度。通常，这个温度需要高于合金的再结晶温度，但又要避免过高导致晶粒过度长大。保温时间的长短直接影响再结晶过程的进行程度。保温时间过短，再结晶可能不充分；保温时间过长，则可能导致晶粒过度长大。（3）冷却方式的选择对再结晶退火效果也有一定影响。一般来说，冷却速度不宜过快，以免产生过大的内应力。在某些情况下，可以采用炉冷或空冷的方式，使合金在缓慢冷却过程中完成再结晶过程。（4）再结晶退火的效果可以通过显微组织观察和力学性能测试来评估。显微组织观察可以直观地看到晶粒的形貌和分布情况，从而判断再结晶是否充分。力学性能测试则可以进一步验证再结晶退火对合金性能的影响，如塑性、韧性、强度等指标的变化。

2.2 固溶处理技术

固溶处理的原理在于利用高温下合金元素的溶解和扩散能力，将合金中的溶质原子（如镍、铬、锡等）均匀溶解到基体铜中，形成固溶体。这一过程能够改变基体的晶格结构，消除偏析和组织缺陷，提高合金的强度和韧性。同时，固溶处理还能后续的时效处理提供基础，通过析出细小的强化相，进一步提升合金的性能。固溶处理的加热温度需要根据合金的具体成分和性能要求来确定。一般来说，加热温度需要高于合金的固相线温度，但又要避免过高导致合金熔化或晶粒过度长大。

例如,某些高性能铜合金的固溶处理温度可能设定在900°C至950°C之间。保温时间的长短直接影响溶质原子在基体中的溶解程度和均匀性。保温时间过短,溶质原子可能无法充分溶解;保温时间过长,则可能导致晶粒长大。因此,需要根据合金的特性和处理要求来精确控制保温时间,通常可能在1小时至2小时之间。快速冷却(如水淬或油淬)能够保留高温下的固溶体状态,防止溶质原子在冷却过程中析出。这样有利于后续的时效处理过程中形成细小的强化相。

2.3 时效硬化技术

时效硬化的核心在于利用合金在固溶处理后形成的过饱和固溶体。在随后的时效处理过程中,过饱和固溶体中的溶质原子会随时间推移而逐渐析出,形成细小的第二相粒子。这些粒子与基体之间产生强烈的交互作用,阻碍了位错运动,从而提高了合金的硬度和强度。此外,时效处理还可能引发合金内部的其他相变,如有序化、偏聚等,进一步增强了硬化效果。时效硬化通常在固溶处理之后进行。固溶处理使合金元素充分溶解到基体中,形成过饱和固溶体,为后续的时效硬化提供基础。时效温度是关键参数,需根据合金成分和性能要求精确设定。通常,时效温度低于固溶处理温度,以避免合金熔化或晶粒过度长大。例如,某些高性能铜合金的时效温度可能设定在400°C至500°C之间。时效时间的长短直接影响硬化效果。保温时间过短,析出相可能未充分形成;过长则可能导致析出相粗化,降低硬化效果。因此,需通过实验确定最佳时效时间,一般可能在几小时至十几小时不等^[2]。时效处理后的冷却方式一般选择空冷或炉冷,以避免快速冷却导致的内应力和组织缺陷。时效硬化的效果可通过显微组织观察和力学性能测试进行综合评估。显微组织观察可直观展现析出相的形态、分布和数量;力学性能测试则直接反映合金硬度和强度的提升情况。这些测试数据为优化时效硬化工艺提供了重要依据。

2.4 热处理工艺的优化与创新

精确控制固溶处理和时效处理的温度与时间,是优化热处理工艺的基础。通过大量实验数据积累,确定最佳的温度-时间组合,以最大化析出相的数量和分布均匀性,从而提高合金的硬度和强度。例如,对于某些Cu-Ag合金,通过精确控制固溶处理在特定温度下进行,随后在400°C至500°C的时效温度下保温数小时,可获得理想的析出相形态和分布,显著提升合金性能。冷却方式的选择对热处理效果有显著影响。优化冷却速度,如采用快速冷却技术,可以抑制晶粒长大,细化组织,提高

材料的强度和韧性。另外,引入多步热处理工艺,如双时效处理、多级固溶处理等,可以进一步细化组织,提高合金的综合性能。通过多步热处理,可以在不同温度和时间下分别析出不同类型的强化相,实现更复杂的强化机制。最后,不断探索和应用新型热处理技术,如激光热处理、微波热处理等,这些技术具有加热速度快、温度场均匀、能耗低等优点,可以显著提高热处理效率和效果。例如,激光热处理可以实现局部快速加热和冷却,有助于细化晶粒和析出强化相,提升合金性能。结合现代控制技术和人工智能技术,开发智能化热处理系统。通过实时监测和调控热处理过程中的温度、时间等参数,实现热处理工艺的精确控制和优化。智能化热处理系统还可以根据材料成分和性能要求,自动调整热处理工艺参数,提高生产效率和产品质量。

3 高性能铜合金的加工技术

3.1 塑性加工技术

塑性加工技术通过施加外力使合金材料在高于再结晶温度的条件下发生塑性变形,从而获得所需形状和性能的产品。首先,塑性加工技术主要包括锻造、挤压、轧制等多种方法。这些方法各具特点,但共同之处在于它们都能有效地改善合金的组织结构,提高材料的力学性能。作为塑性加工的重要方法,锻造通过高温下对合金施加压力,使其发生塑性变形并充满模具型腔。此过程中,合金的晶粒得到细化,组织更加致密,从而显著提高了材料的强度和韧性。锻造工艺特别适用于制造大型、复杂形状的部件,如发动机零件、结构件等,这些部件在航空航天、汽车制造等领域有着广泛的应用。挤压技术利用模具对合金施加压力,使其从模具的孔洞中挤出,形成所需形状和尺寸的产品。这种方法能够制造出壁厚较薄、精度较高的产品,如电线杆、型材等。挤压过程中,合金的组织结构同样得到优化,性能得以提升。此外,挤压工艺还具有生产效率高、材料利用率高等优点。轧制是通过两个旋转的轧辊对合金材料进行压延,使其发生塑性变形并减薄至所需厚度的加工方法。轧制工艺能够生产出各种规格的板材、带材和箔材等,如铜板、铜带、铜箔等,这些产品在电子、电力、通信等领域有着广泛的应用。轧制过程中,合金的组织结构和性能也能得到显著改善,如提高强度、改善韧性等。

3.2 冷加工技术

冷加工技术主要包括冷轧、冷拔、冷挤压等多种方法,这些方法在加工过程中不依赖于高温环境,因此能够避免合金材料在高温下可能发生的氧化、脱碳等不利反应,保持材料的纯净度和原有性能。冷轧是通过轧辊

对合金板材进行连续冷变形的过程。在冷轧过程中，合金材料的厚度逐渐减小，同时其硬度和强度得到显著提升。冷轧工艺不仅适用于生产高精度的薄板、带材，还能通过控制轧制过程中的变形量来优化材料的组织结构和性能。冷拔是一种通过模具对合金棒材或线材进行拉伸变形的加工方法。在冷拔过程中，合金材料在模具的拉力作用下发生塑性变形，直径逐渐减小，同时其硬度和强度也显著增加。冷拔工艺能够生产出表面光滑、尺寸精确的棒材和线材，广泛应用于电线电缆、精密仪器等领域。另外，冷挤压则是将合金材料放入模具中，通过模具的挤压作用使其发生塑性变形，从而获得所需形状和尺寸的产品。冷挤压工艺能够生产出形状复杂、精度高的零件，同时材料的力学性能和致密性也得到显著提升。

3.3 切削加工技术

在数控切削系统的支持下，可以预设加工路径和参数，确保加工过程的稳定性和重复性，满足复杂形状和高精度要求的零件加工。由于高性能铜合金的硬度较高，切削加工时需要选用合适的切削刀具。常用的刀具材料包括硬质合金、陶瓷等，这些材料具有良好的耐磨性和切削性能。同时，刀具的几何形状和切削参数（如切削速度、切削深度、进给量）也需要根据具体的加工条件进行优化，以提高加工效率和加工质量。在切削加工过程中，切削液的使用对于降低切削温度、减少刀具磨损和提高加工表面质量具有重要作用。切削液能够带走切削区域产生的热量，降低切削温度，避免合金材料因高温而软化或产生热裂纹。同时，切削液还能起到润滑作用，减少切削力与切削热的产生，保护刀具和工件。切削加工技术在高性能铜合金的加工中应用广泛，如航空航天、汽车制造、电子设备等领域。通过切削加工，可以生产出各种精密零件和复杂结构件，满足不同行业对高性能铜合金材料的需求。例如，在航空航天领域，切削加工技术被用于制造发动机叶片、涡轮盘等关键部件；在汽车制造领域，切削加工技术则用于生产发动机缸体、变速箱壳体等高精度零件。

3.4 铸造技术

无论是大型结构件还是精细零部件，铸造技术都能提供可靠的解决方案。相比其他加工技术，铸造技术的材料利用率较高。通过精确控制浇注过程和模具设计，可以最大限度地减少材料的浪费，降低生产成本。铸造技术具有较高的生产效率，能够在短时间内完成大量铸件的生产。这得益于其自动化的生产流程和先进的生产设备，使得铸造过程更加稳定和高效。作为最常用的铸造方法之一，砂型铸造具有成本低、适用范围广的优点。然而，其铸件表面粗糙度和精度相对较低，需要后续加工处理^[3]。金属型铸造利用金属模具进行浇注，能够获得表面光滑、精度高的铸件。但金属模具制造成本较高，适用于大批量生产和对铸件质量要求较高的场合。压力铸造通过压力将熔融金属注入模具中，提高了铸件的致密性和强度。同时，压力铸造还能生产出壁厚较薄、形状复杂的铸件，满足特殊需求。离心铸造利用离心力使金属液在模具中分布均匀，适用于生产管状、环形等特定形状的铸件。其优点是生产效率高、铸件质量好，但设备成本较高。

结语

综上所述，高性能铜合金的热处理与加工技术是实现其性能优化与广泛应用的重要途径。通过精细的热处理工艺，能够调控合金的微观结构，显著提升其力学性能与耐腐蚀性等关键指标。而多样化的加工技术则满足了不同领域对合金形状、尺寸及表面质量的严格要求。未来，随着科技的不断进步，热处理与加工技术将持续创新，为高性能铜合金的深入应用开辟更加广阔的前景。

参考文献

- [1]雷前,杨一海,肖柱,姜雁斌,龚深,李周.高强高导高耐热铜合金的研究进展与展望[J].材料导报,2021,35(15):153-161.
- [2]李龙健,于风云,李仁庚,张斯若,康慧君,王同敏.高性能铜合金研究现状及发展趋势[J].特种铸造及有色合金,2021,41(03):293-298.
- [3]姜业欣,娄花芬,解浩峰,李廷举,宋克兴,刘雪峰,运新兵,汪航,肖柱,李周.先进铜合金材料发展现状与展望[J].中国工程科学,2020,22(05):84-92.