

# 铜合金热锻成型工艺优化与微观组织演变研究

叶亚峰

宁波埃美柯铜阀门有限公司 浙江 宁波 315202

**摘要:** 本文聚焦于铜合金热锻成型工艺优化与微观组织演变的研究。通过系统实验设计与实施,深入探讨热锻温度、热锻压力等关键工艺参数对铜合金微观组织及机械性能的影响。研究揭示微观组织演变规律,包括晶粒细化、再结晶过程及第二相粒子析出等。基于实验结果,成功优化了热锻成型工艺参数,显著提升锻件的综合性能,为相关行业的铜合金热锻成型工艺,提供理论依据和技术参考。

**关键词:** 铜合金; 热锻成型工艺; 微观组织演变

## 1 铜合金热锻成型工艺基础

### 1.1 铜基金属分类

按照铜含量,铜基金属可分为两大类:纯铜、铜合金

纯铜:铜含量  $\geq 99.9\%$ ,杂质极少,又称紫铜或红铜。

(2)合金铜:铜含量50%-99%,这是经过合金化处理后的铜,根据用途和性能的不同,又可进一步细分为多种类型。

### 1.2 铜合金分类

(1)按材料化学成分划分:如黄铜、青铜、白铜。

(2)按材料形成方法划分:可分为铸造铜合金、变形铜合金等。

### 1.3 热锻成型原理

热锻是一种金属成形工艺,将金属加热至一定温度,使其变得柔软,然后通过锤击、压力或冲压等手段对其进行塑形。铜合金的热锻成型工艺同样基于这一原理。在热锻过程中,铜合金被加热至其再结晶温度以上,提高其塑性和降低变形抗力。受合金成分、晶体结构等多种因素的影响,具体温度根据铜合金的类型和成分而定。随后,利用锻造设备对加热后的铜合金施加外力,使其发生塑性变形,从而获得所需的形状和尺寸。热锻成型不仅可以提高铜合金的机械性能,还可以改善其组织结构和内部缺陷。

### 1.4 热锻设备

热锻设备是铜合金热锻成型工艺中不可或缺的部分,一般由三部分组成:加热设备、成形设备、辅助设备。

加热设备:用于将铜合金加热至所需的锻造温度。常见的加热设备有天然气炉、电炉(中/高频感应炉)等。采用天然气炉加热,成本较低,加热效率高。采用电炉加热,具有温度控制精确、加热均匀等优点。这两种设备是铜合金热锻成型中常用的加热设备<sup>[1]</sup>。在加热过

程中,需要注意炉内的气氛控制,以避免铜合金氧化或产生其他不利影响。

成形设备:用于对加热后的铜合金施加外力,使其发生塑性变形。锻造设备根据结构和工作原理的不同,可分为多种类型,如机械压力机、液压机等。其中,机械压力机在铜阀门行业的最为广泛,它通过电机驱动飞轮,利用曲柄连杆机构将旋转运动转化为直线运动,产生压力。特点是工作速度快,适合铜阀门的大批量、高效率生产。液压机,通过液压系统驱动活塞,具有压力大、行程长、控制精确等优点,适合高精度锻造。

## 2 铜合金热锻成型工艺参数对成型质量的影响

### 2.1 温度对热锻成型质量的影响

在铜合金的热锻成型过程中,温度是一个至关重要的工艺参数,在铜阀门热锻成型过程中尤其重要。合适的加热温度,能够显著提高铜合金的塑性和流动性,降低其变形抗力,得到尺寸稳定且内部组织均匀的锻件,降低开裂风险。当加热温度过低时,铜合金的塑性不足,容易在锻造过程中产生裂纹和冷隔等缺陷;而当加热温度过高时,则可能导致铜合金的晶粒长大,甚至出现过烧现象,严重影响锻件的机械性能和使用寿命。

### 2.2 压力对热锻成型质量的影响

压力是热锻成型过程中的另一个重要关键工艺参数。在锻造过程中,压力的大小和分布直接影响铜合金的变形程度和内部组织的形成。适当的压力能够使铜合金在变形过程中充分流动,有利于获得形状准确、尺寸稳定的锻件。压力还能够促进铜合金内部组织的均匀化和致密化,提高其机械性能和抗疲劳性能。然而当压力过大时,可能导致锻件出现过度变形、尺寸超差等问题;而当压力不足时,则可能使锻件出现形状不完整、内部组织疏松等缺陷。热锻压力和铜合金类型、热锻温度、变形量、工件尺寸形状都有关系。热锻压力可以通

过以下公式估算 $P = K\sigma A$

$P$ —热锻压力(单位: kN)

$K$ —修正系数(通常为1.2~1.5)

$\sigma$ —流动应力(单位: MPa, 可通过实验或查询相关资料获得)

$A$ —接触面积(单位:  $\text{mm}^2$ )

### 2.3 变形速率对热锻成型质量的影响

变形速率, 即单位时间内铜合金的塑性变形量, 也是影响热锻成型质量的因素之一。在热锻过程中, 适当的变形速率能够使铜合金在变形过程中保持较好的塑性和流动性, 有利于锻件的均匀变形和内部组织的细化。当变形速率过高时, 铜合金的塑性降低, 变形抗力增大, 容易产生热裂纹和折叠等缺陷; 而当变形速率过低时, 则可能导致锻件出现流线不清晰、组织不均匀等问题。

## 3 铜合金热锻过程中的微观组织演变规律

### 3.1 微观组织观察方法

在铜合金热锻过程中, 理解其微观组织的演变规律对于优化工艺参数、提高锻件质量至关重要。为了深入探究这一过程, 需要采用一系列先进的微观组织观察方法。这些方法主要包括光学显微镜观察、扫描电子显微镜(SEM)分析、透射电子显微镜(TEM)观察以及电子背散射衍射(EBSD)技术等<sup>[2]</sup>。

光学显微镜观察, 是最基础的微观组织分析方法之一。通过金相试样的制备和染色, 可以在光学显微镜下清晰地观察到铜合金的晶粒形态、晶界分布以及第二相粒子的分布和形态。这种方法虽然分辨率有限, 但对于初步判断铜合金的热锻微观组织特征具有重要意义。在企业的工艺研究、产品质量控制中采用最为广泛。

扫描电子显微镜(SEM)分析、透射电子显微镜(TEM)观察以及电子背散射衍射(EBSD)技术等, 常用于科研领域, 一般企业中并不常见。

### 3.2 热锻过程中的微观组织变化

在铜合金的热锻过程中, 微观组织会发生一系列复杂的变化。这些变化主要包括晶粒的细化、再结晶过程、第二相粒子的析出与溶解以及组织的形成与变化。

晶粒细化。在热锻过程中一个显著的现象, 在高温和高应变速率的条件下, 铜合金的原始粗晶粒会发生破碎和细化, 形成细小的等轴晶或拉长晶粒。晶粒细化有助于提高铜合金的强度和韧性。

再结晶过程。它在热锻过程中也起着重要作用, 当铜合金受到足够的热机械变形时, 会发生再结晶现象, 形成新的无畸变晶粒。再结晶过程有助于消除热锻过程中产生的加工硬化和残余应力, 提高锻件的塑性和韧性。

第二相粒子的析出与溶解。它是热锻过程中不可忽视的微观组织变化, 在热锻过程中, 随着温度的升高和应变的增加, 铜合金中的第二相粒子可能会发生析出或溶解现象。这些变化会影响铜合金的力学性能和耐腐蚀性。

组织的形成与变化。组织, 即晶体取向的择优分布。它的出现与变化, 是热锻过程中另一个重要的微观组织变化, 在热锻过程中, 铜合金的晶粒产生滑移, 会沿着特定的方向排列, 形成组织。它受到温度、变形速率、变形量、原始组织的形态的影响。在退火过程中, 组织也会产生一定程度的变化。组织影响铜合金的力学性能和各向异性, 可以通过控制温度、速率、变形量优化组织, 也可以对产品进行热处理, 调整组织, 改善性能。

### 3.3 微观组织演变的影响因素

铜合金热锻过程中的微观组织演变受到多种因素的影响, 这些因素主要包括热锻温度、热锻压力、变形速率、合金成分以及热处理工艺等。

热锻温度是影响铜合金微观组织演变的关键因素之一, 随着变形温度的升高, 铜合金的塑性增加, 再结晶过程加速, 晶粒细化程度提高。过高的变形温度可能导致晶粒长大和过烧现象的发生。

变形速率也对铜合金的微观组织演变产生重要影响, 当变形速率增加时, 铜合金的塑性降低, 变形抗力增大, 再结晶过程受到抑制。这可能导致锻件中出现更多的加工硬化和残余应力。

变形量是决定铜合金微观组织演变程度的另一个重要因素, 随着应变量的增加, 铜合金中的位错密度增加, 再结晶驱动力增大, 过大的应变量可能导致锻件出现裂纹和折叠等缺陷<sup>[3]</sup>。

合金成分对铜合金的微观组织演变具有显著影响, 不同的合金元素会改变铜合金的相图和热力学性质, 从而影响其再结晶行为、第二相粒子的析出与溶解以及组织的形成与变化等方面。

热处理工艺也是影响铜合金微观组织演变的重要因素之一, 通过合理的热处理工艺, 我们可以调控铜合金的晶粒尺寸、再结晶程度以及第二相粒子的分布和形态等方面, 从而优化其力学性能和耐腐蚀性。

## 4 铜合金热锻过程中的微观组织演变对性能的影响

### 4.1 微观组织与机械性能的关系

铜合金热锻过程中的微观组织演变对其机械性能具有深远的影响。晶粒细化是热锻过程中的一个显著现象, 它通过增加晶界数量来阻碍位错运动, 从而提高材料的强度和硬度。细小的晶粒也意味着更多的变形单元, 使得材料在塑性变形过程中能够更均匀地分散应

力,从而提高韧性。热锻过程中形成的组织也会影响材料的各向异性力学性能,如拉伸强度、屈服强度和冲击韧性等。组织的存在使得材料在某些方向上具有更高的强度和硬度,而在其他方向上则可能较低。

#### 4.2 微观组织与耐腐蚀性能的关系

铜合金的耐腐蚀性能同样受到热锻过程中微观组织演变的影响。第二相粒子的析出与溶解是热锻过程中的重要微观组织变化之一,这些粒子对材料的耐腐蚀性具有重要影响。当第二相粒子以细小、均匀且稳定的形式存在时,它们可以作为腐蚀屏障,减缓腐蚀介质对基体的侵蚀。如果第二相粒子过大、分布不均或易于溶解,则可能形成腐蚀通道,加速腐蚀过程。晶界的数量和性质也会影响材料的耐腐蚀性。高密度的晶界和清洁的晶界结构有助于提高材料的耐蚀性,因为晶界是腐蚀介质扩散的障碍。

#### 4.3 微观组织与热稳定性的关系

铜合金的热稳定性是指其在高温下保持性能稳定的能力。热锻过程中的微观组织演变对铜合金的热稳定性具有重要影响。再结晶过程能够消除热锻过程中产生的加工硬化和残余应力,从而提高材料的热稳定性。然而如果再结晶不完全或再结晶晶粒过大,则可能导致材料在高温下发生软化或蠕变变形,组织的存在也会影响材料的热稳定性。

### 5 铜合金热锻成型工艺优化实例分析

#### 5.1 实验设计与实施思路

为了优化铜合金的热锻成型工艺,设计并实施一系列实验。首先,选择了特定的铜合金材料作为研究对象,并明确优化的目标,如提高锻件的力学性能、抗应力腐蚀性能等。接下来,制定详细的实验方案,包括热锻温度、热锻压力、热处理等关键工艺参数。

为了全面评估不同工艺参数对锻件性能的影响,采用正交实验设计,根据加工经验及理论分析,确定最佳参数组合,并进行验证实验。在实验实施过程中,严格按照预定的方案进行操作。首先,选择同一批次、同一规格、同种牌号、同种成型方式的黄铜原材料,以确保实验条件的一致性。然后,在不同的热锻温度和热锻压力下对铜合金进行锻造,并记录相应参数。为了确保实验结果的普遍性,每种参数组合方案,连续加工50个样品,随机选择3个作为观察对象。分别进行金相组织观察、扩口试验、氨熏试验。

5.2 实验结果与分析(因保密需要,下文温度压力数据不出具。)

按照5.1的实验设计思路,选取牌号HPb59-1的黄铜材料进行试验。原材料为 $\Phi 26\text{mm}$ 连铸黄铜棒,产品为DN20黄铜闸阀阀体。热锻设备采用“西班牙全自动热锻机”,采用加热温度 $t_1^\circ\text{C}$ 、 $t_2^\circ\text{C}$ 、 $t_3^\circ\text{C}$ 、 $t_4^\circ\text{C}$ ,冲压压力 $P_1\text{kN}$ 、 $P_2\text{kN}$ 、 $P_3\text{kN}$ 、 $P_4\text{kN}$ ,进行参数组合。采用蔡司金相显微镜Axio Lab.5进行金相组织观察。采用公司自制的专用扩口机进行“扩口试验”,评价其机械性能(强度和韧性)。按YS/T 814进行“氨熏试验”,评价其抗应力腐蚀的能力。

经过分析试验,热锻温度对铜合金的微观组织和机械性能具有显著影响。在较低的热锻温度下,锻件的晶粒细化程度有限,且存在较多的残余应力和加工硬化现象,导致力学性能提升不明显。当热锻温度过高时,虽然晶粒细化程度增加,但过高的温度也导致了晶粒的长大和过烧现象的发生,同样不利于力学性能的提升。通过对比分析不同热锻温度下的实验结果,确定了最优的热锻温度范围。

另外压力在热锻成型过程也用于有着显著影响,它直接影响产品的成形质量。不用压力下,出现不同的表面质量。适当的压力,可以确保材料填满模具型腔,并获得满意的表面质量,对于结构复杂的零件,压力影响更加明显。观察分析不同压力下的金相组织,可以发现内部组织材料流动性、均匀性和致密,都有一定程度的差异。

通过对比和分析不同工艺参数下的实验结果,我公司已成功地优化了铜合金的热锻成型工艺参数。优化后的工艺参数,不仅提高我公司黄铜闸阀机械性能,还提高了产品的合格率。

#### 结束语

本研究通过对铜合金热锻成型工艺优化与微观组织演变的深入探讨,不仅加深了对铜合金热锻过程中微观组织演变规律的理解,而且为铜合金热锻工艺参数调整提供方法和依据。未来,将进一步探索更多铜合金材料在复杂热锻条件下的微观组织演变机制,以期实现更高水平的性能定制与优化,推动铜合金热锻成型技术在更广泛领域的应用与发展。

#### 参考文献

- [1]赵玉飞,吴艳.热冲压成型工艺的发展及相关模具材料分析[J].现代制造技术与装备,2020,(4):137-138.
- [2]闻德升.基于电子控制技术工业设计在机械产品设计中的应用探析[J].时代农机,2020,47(2):77-78.
- [3]罗永峰,黄飞宇.优化铝合金铸造工艺的策略研究[J].世界有色金属,2023(18):134-136.