

锻造加热温度优化对合金锻件晶粒组织与成型质量的研究

王炳顺¹ 陈景昊² 潘月芬³ 王海¹ 周辉¹

1. 浙江志达管业有限公司 浙江 温州 325000

2. 中国船级社温州办事处 浙江 温州 325000

3. 温州中源工程项目管理有限公司 浙江 温州 325000

摘 要: 本文系统分析了加热温度对合金材料晶粒长大动力学、再结晶行为及第二相溶解沉淀的影响机制,探讨了温度不均匀分布导致的晶粒异常长大与混晶现象。基于热力学与动力学理论,建立了加热温度与晶粒尺寸演化的定量关系模型。进一步研究了温度优化策略对改善金属流动性、降低变形抗力、抑制开裂倾向的作用规律。提出多目标约束下的加热温度窗口确定方法,兼顾细晶强化效果与成型完整性。研究表明,合理的加热温度优化可使晶粒组织均匀细化,同时提升复杂形状锻件的充填能力与尺寸精度。本文为高性能合金锻件的加热工艺设计提供了理论依据。

关键词: 锻造加热温度; 晶粒组织; 成型质量; 温度优化

引言

锻造是金属塑性成形的关键工艺,广泛应用于高端制造领域。锻件的晶粒组织与成型质量直接决定其性能、可靠性及后续加工成本,而加热温度作为核心工艺参数,对二者具有决定性影响。合理温度可促进动态再结晶,细化晶粒,降低变形抗力,改善金属流动性,避免折叠、充不满等缺陷;温度过高易致晶粒粗化或过烧,过低则引发开裂与混晶组织。近年来,借助数值模拟与组织演化模型,加热温度优化逐步实现定量化,针对铝合金、钛合金、高温合金等材料的研究揭示了温度对再结晶、晶粒长大及第二相行为的影响规律。本文基于热力学与动力学原理,系统阐述加热温度对晶粒演化与成型行为的作用机制,并探讨多目标优化路径,为锻造工艺精细化设计提供理论支撑。

1 锻造加热温度对晶粒组织的影响机理

1.1 晶粒长大动力学与温度依赖关系

金属材料在高温加热时,晶粒长大受热激活扩散控制。依据传统的晶粒长大理论,等轴晶系平均晶粒尺寸与加热时间和温度之间存在如下关系: $D^n - D_0^n = K_0 t \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$ 为原始晶粒尺寸, n 为晶粒长大指数一般取值为2, K_0 为动力学常数, Q 为晶界迁移表观活化能, R 是气体常数, T 是绝对温度。在此式中可以看到温度以指数形式出现,温度稍有增加就会使晶粒长大的速度大大加快。对于合金锻件一般使用亚共析钢或者合金结构钢,加热温度处于奥氏体区(850-1200℃),晶界迁移活化能约在140-250kJ/mol之间。而当温度由1000℃上升到

1100℃时,晶粒长大速度会增加3-5倍。所以要避免出现晶粒粗大现象就要尽量降低最高加热温度以及减少高温停留时间。

1.2 动态与静态再结晶的温度窗口

动态再结晶是获得锻造细晶的主要手段,而它需要在温度大于临界再结晶温度 T_c (约 $0.4 \sim 0.6T_m$) 并且有足够大的塑性变形量的情况下才能发生。温度越高越有利于再结晶的发生和发展,但是温度过高又会造成动态再结晶晶粒之间的相互合并而变得粗大,在温度稍高于 T_c 但是不超过一定范围内的条件下能得到细小而均匀的晶粒^[1]。静态再结晶是在锻造之后进行的退火或者保温过程中的现象,如果温度太高会使晶粒快速长大,如果温度太低则不能充分地发生再结晶而导致晶粒不均匀。因此,对于锻造来说应当选择一个合适的温度使其变形处于可以充分再结晶而又不会导致晶粒过分粗化的区间之内。

1.3 第二相溶解、沉淀与晶界钉扎效应

合金中第二相颗粒钉扎晶界阻止晶粒长大(Zener效应)。加热温度低于固溶温度时,细小弥散第二相起到良好钉扎作用,阻止晶界运动;而高于固溶温度后,则失去钉扎效果,晶粒快速长大。比如含铌微钢中Nb(C,N)在1100~1200℃下完全溶解,在镍基高温合金中 γ' 相在900~1100℃下完全溶解。要尽量避免超过重要第二相溶解温度,还要防止低温长时间加热造成第二相长大(Ostwald熟化)。一般情况下,选择主要强化相溶解温度以下、高于再结晶温度范围作为加热温度,避开脆性相析出。

1.4 温度不均匀引起的混晶与异常长大

炉内温度梯度以及大截面锻件心表面温差造成各处晶粒长大速度不同而产生混晶组织（局部粗晶和细晶共存），对以后加工有不利影响，在局部晶粒明显大于其附近晶粒的情况下可能发生异常晶粒长大（二次再结晶），粗晶区可达到毫米量级，破坏组织均匀性^[2]。因此加热应注意温度均匀性，采取阶梯加热的方式降低温差并且适当降低加热速度。

2 加热温度对成型质量的影响规律

2.1 流变应力与金属流动性

合金的流变应力随着温度提高明显下降，在热变形过程中，流变应力 σ 与温度 T 、应变速率 $\dot{\epsilon}$ 之间服从双曲正弦本构关系： $\dot{\epsilon} = A(\sinh(\alpha\sigma))^n \exp(-Q/(RT))$ 。温度升高增加了热激活的可能性，使得位错滑移以及攀移更加容易发生，从而导致材料软化现象加剧。一般而言，对于一个普通的合金结构钢来说，当加热温度由 900℃ 提升到 1100℃ 时，在相同的应变速率下所对应的峰值应力会下降约 40%-60%。较低的流变应力代表着需要施加的压力较小，所需的锻造设备吨位也更小，同时模具的磨损也会减少。但是另一方面更低的流变应力又使得金属更容易充满模具内部的空间，便于薄壁、深腔以及复杂形状的充填。但是温度过高容易造成过大的流动，出现穿流或者折叠等不良后果。所以，温度的选择应当是在保证足够的充型能力的同时防止由于过度软化工件产生缺陷。

2.2 高温塑性、开裂倾向与温度敏感性

合金的高温塑性并不是随温度提高而一直增大，在一定范围内有最大塑性温度区间，在较低温度下由于存在较大的加工硬化以及动态再结晶不足而导致塑性较低，容易出现晶界开裂，在较高温度下进入再结晶温度区后塑性明显提高，但是随着温度继续上升接近固相线时，晶界开始溶化（过烧）、或者形成低熔点化合物，热塑性降低，塑性变形易产生沿晶界开裂^[3]。过烧是不可逆的，是绝对不能允许的，因此锻造加热温度不应超过合金过烧温度 50~100℃。而且不同的合金对于温度的要求也不同，铝合金要求很严格（±10℃），钛合金其次（±30℃），而合金钢温度要求相对较宽松（±50℃），根据实际情况确定合适的温度范围。

2.3 对锻件尺寸精度与残余应力的影响

加热温度对锻件原始坯料尺寸造成影响从而影响最终锻件尺寸精度，因为材料热膨胀率 α 随着温度增加而增大（如钢材， α 在 20℃ 为 $11.5 \times 10^{-6}/K$ ，在 1000℃ 为

$14 \times 10^{-6}/K$ ），如果加热温度高于或低于规定值，则坯料尺寸发生变化导致最终锻件尺寸不符合要求，比如直径为 100mm 的钢坯，温度变化 ±30℃ 会引起直径变化 ±0.04mm，这对高精度锻造是不允许的；另外，由于不均匀加热产生的热应力以及锻后冷却过程中产生的组织应力叠加形成不均匀残余应力，过高加热温度会导致晶界偏析和热应力集中，在随后淬火过程中会引起开裂或者弯曲等缺陷。适当的温度调整需考虑后续冷却过程，适当降低加热温度可以减少残余应力的最大值。

2.4 锻造温度窗口的确定方法

综合晶粒组织控制以及成型质量的要求来选择合适的锻造加热温度窗口需要经过以下几个过程：①通过热模拟试验（Gleeble 等）获得合金不同温度下的流变应力、临界再结晶温度 T_c 、动态再结晶晶粒尺寸的变化等信息；②利用差热分析（DSC）得到第二相溶解温度 T_{diss} 、过烧温度 $T_{overheating}$ ；③画出“温度-晶粒尺寸”、“温度-流变应力”的图谱，在此基础上加上成形条件限制（例如允许的最大流变应力、最小延伸率）；④取交集即为可用温度范围，在此基础上再根据晶粒细化及最低能耗的要求进行单目标或多个目标的优化。如果缺少相应数据，则可以借助基于物理本构理论的方法来进行相变温度、第二相含量的计算预测从而帮助确定温度窗口大小。需要注意的是最优加热温度并不是一个常数，而是一个变量，它会随着变形程度、应变率的变化而变化，在大变形时可以适当降低温度，利用形变储存的能量促使再结晶发生；而在高应变率下就需要提高温度来抵消因绝热升温带来的影响。

3 温度优化的多目标策略与模型

3.1 晶粒组织均匀细化的温度控制准则

晶粒均匀细化的关键是控制加热时晶粒长大以及变形时发生动态再结晶。基于 MonteCarlo 或元胞自动机组织演化模型可以计算出不同温度-时间条件下晶粒尺寸大小，其主要原则有以下几点：①加热后初始晶粒处于 ASTM5~7 级（30~65μm）；②变形温度下动态再结晶体积分数大于等于 95%，同时再结晶晶粒尺寸小于等于初始晶粒的一半；③锻造后快速冷却以免细小晶粒重新长大形成粗大晶粒。这三条原则被转换成加热温度上下限要求： $T_{min} = \max(T_c, T_{req})$, $T_{max} = \min(T_{diss} - 20^\circ C, T_{overheating} - 80^\circ C, T_{noabnormalgrowth})$ 。对于 42CrMo4 钢， T_c 约为 850℃， T_{diss} 约为 1120℃， $T_{overheating}$ 约为 1250℃，在正常情况进行锻造时温度范围一般为 900 到 1100℃，如果要得到更细晶粒则可以降低到 950 到 1050℃。

3.2 考虑成型质量约束的温度优化模型

成型质量包括充填性、精度以及表面质量等，可以建立一个具有多个目标的目标函数进行优化，在 $(T_{\min}, T_{\max})$ 之间选取一个加热温度 T ，使得目标函数 $F(T) = \omega_1 f_{\text{grain}}(T) + \omega_2 f_{\text{flow}}(T) + \omega_3 f_{\text{defect}}(T)$ 最小化。其中 f_{grain} 是晶粒大小或者组织不均匀程度， f_{flow} 是流动应力或者充填能量， f_{defect} 是开裂敏感性（例如热加工图失稳参数）， ω 是权重；同时满足流动应力不能大于设备的最大承受能力、避开失稳区域、第二相体积分数不低于钉扎临界值等约束条件，可以用遗传算法或者粒子群算法求取 Pareto 前沿^[4]。近年来，基于人工神经网络或者支持向量回归的方法用少量的实验数据得到晶粒尺寸以及载荷从而大大加快优化速度。

3.3 加热工艺参数的耦合优化

加热制度有升温速度、保温温度及时间、多级阶梯等因素，需要与温度匹配进行优化。快升温降低高温保持时间、防止晶粒长大，但是容易由于热应力造成开裂；慢升温使得低温区域保持时间较长而有利于第二相长大。建议采取“低温预热+快速加热+短时保温”的方式：预热位于回火温度范围内以消除初始应力，快速加热（感应或者盐浴炉）使工件表面快速到达锻造温度，短时均匀化保温（保温时间为根据截面积大小确定 $0.3 \sim 0.5 \text{ min/mm}$ ）。大中型锻件可以采用“分段保温法”，在低于、接近以及等于锻造温度处设置台阶来控制相变应力以及组织遗传。数值仿真（有限元结合晶粒长大算法）可以得到不同加热条件下的温度场及晶粒场变化情况从而对它们进行优化。

4 结语

锻造加热温度是连接材料微观组织演化与宏观成型行为的核心纽带。本文从晶粒长大动力学、再结晶机制、第二相行为等方面揭示了加热温度对晶粒组织的影响规律，分析了温度对金属流动性、塑性、开裂倾向及尺寸精度的调控作用，提出了兼顾组织细化与成型质量的多目标温度优化模型与参数耦合策略。研究明确指出：合理的加热温度窗口应位于再结晶临界温度以上、关键第二相溶解温度以下且低于过烧温度的安全区间内；温度均匀性是抑制混晶与异常长大的关键；升温速率与保温时间的耦合优化可进一步挖掘细晶潜力。不同合金体系因其热物理特性差异而需定制优化策略。未来应加强多尺度模拟与智能控制技术的融合，推动锻造加热从经验定性走向精准定量。本研究为高性能合金锻件的加热工艺设计提供了系统性的理论参考。

参考文献

- [1] 王晓东, 李明, 张海峰. 合金钢锻造加热过程中晶粒长大行为的 MonteCarlo 模拟 [J]. 金属热处理, 2021, 46(5): 112-118.
- [2] 刘志强, 陈刚, 孙丽丽. 钛合金锻件加热温度对晶粒组织及力学性能的影响研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(8): 2745-2751.
- [3] 李建国, 王伟, 赵峰. 基于热加工图的铝合金锻造加热温度优化 [J]. 锻压技术, 2022, 47(3): 1-7.
- [4] 陈海生, 张立文, 杨勇. 镍基高温合金锻造加热过程的组织演变模型与温度优化策略 [J]. 航空材料学报, 2023, 43(1): 78-86.