

温度密码破译：热挤压工艺如何塑造核电用 UNS N08810 合金的黄金性能？

Effect of Hot Extrusion Temperature on the Forming and Microstructure Properties of UNS N08810 Bars for Nuclear Power Applications

供稿|王哨兵¹, 董浩², 王曼¹, 孙文强¹, 周珠¹, 江小川² / WANG Shaobing¹, DONG Hao², WANG Man¹, SUN Wenqiang¹, ZHOU Zhu¹, JIANG Xiaochuan²

内容导读

UNS N08810 镍基合金因其优异的高温耐腐蚀性能，被广泛应用于核反应堆热交换器等关键部件。然而，传统轧制工艺在制备小规格棒材时易出现组织不均和表面裂纹等问题。本研究采用热挤压工艺，创新性地采用了三向压应力的热加工方式，探究了不同挤压温度（1120~1240 °C）对 $\phi 90$ mm UNS N08810 合金棒材成形能力、晶粒组织及力学性能的影响。实验发现：当挤压温度低于 1160 °C 时，材料因变形抗力过大导致“闷车”（即材料无法挤出）；温度高于 1200 °C 时，棒材头部因局部晶粒粗化出现开裂；而 1160~1200 °C 为最佳成形区间，其中 1163 °C 挤压的棒材晶粒度均匀（5.0~5.5 级），室温拉伸性能（抗拉强度 561 MPa，延伸率 52%）完全满足核电标准（ASTM A312/A312M）。此外，高温拉伸测试表明，随着温度从 500 °C 升至 900 °C，材料强度逐渐下降而延展性提升，但不同挤压温度下的高温性能差异不显著。最终通过数据拟合确定核电用棒材的优化挤压温度为 (1160 ± 10) °C，兼顾成形效率与组织均匀性。本研究为核电高温合金的精密加工提供了重要工艺参考，同时揭示了热挤压温度对材料性能的调控机制，对提升核能装备可靠性具有实际意义。

UNS N08810 合金是一种常见的 Ni-Fe-Cr 基高温耐蚀合金，该合金以 Ni、Fe、Cr 作为形成奥氏体的基体元素，并含有少量的 Al、Ti 元素。UNS

N08810 合金室温下的基体组织为奥氏体 γ ， γ 相具有 FCC 晶体结构，由于 Fe、Cr 元素的原子半径与 Ni 不同，Fe、Cr 元素的加入能够提高基体晶格常

作者单位：1. 浙江久立特材科技股份有限公司，浙江 湖州 313009；2. 中国核电工程有限公司，北京 100089

数,阻碍位错运动,从而提高合金强度。由于Ni原子的最外层电子基本处于饱和状态,故 γ 基体具有较高的稳定性。合金中添加的Cr、Al元素能够在其表面形成Cr和Al的氧化物保护膜,提高了合金的耐腐蚀性以及抗高温氧化性。因此UNS N08810合金具有良好的高温拉伸性能,在高温下具有优良的抗氧化和抗腐蚀能力,常常用于核反应堆中高温热交换器及其配件等。

汤文新等^[1]、谢振红^[2]、杨锦明^[3]和孙楠^[4]研究了UNS N08810合金的应用环境,分析了相关性能,并且研究了成分、组织和力学性能对棒材、板材应用的影响。曾卫东等^[5]、王文斌^[6]研究了UNS N08810合金的加工性能,确定了理论层面在不同应变速率、压缩温度下的组织变化情况,但是缺少实际的生产数据。欧新哲等^[7]、黄燕等^[8]研究了固溶热处理温度对材料的组织和性能的影响。高军松^[9]分析了800H管材的高温失效问题,确定了影响高温开裂的原因。综合前期相关的文献调研,对UNS

N08810合金材料的开发集中在成分、组织性能等方面,在材料成形工艺上研究的较少,特别是对UNS N08810合金棒材的研究。常用的UNS N08810合金小规格棒材采用轧制的方式进行制备,但是轧制棒材存在批量大、组织不均匀等特点。针对批量较小的小规格棒材无法进行轧制成形,并且棒材在轧制时由于受到外部的拉应力,易导致棒材表面出现裂纹,无法应用到一些高端部件中。本文采用热挤压的方法制造 $\phi 90$ mm UNS N08810合金棒材,创新性地采用了三向压应力的热加工方式,重点研究不同的热变形温度下,棒材的工艺成形性和成形后的组织性能差异。

实验材料与方法

材料成分

UNS N08810合金采用真空感应加电渣重熔方式进行冶炼,其化学成分如表1所示。

表1 UNS N08810合金棒材的化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Al	Ti	Ti+Al	N	Fe
0.060	0.480	1.300	22.360	33.350	0.410	0.560	0.970	0.002	余量

UNS N08810合金平衡相图的热力学计算取Cr、Ni、Al、Ti、C、Si、Mn、N、Fe等9种元素,图1为采用Thermo-calc软件计算得出平衡状态下UNS N08810各相析出温度为稳态、平衡状态下的演

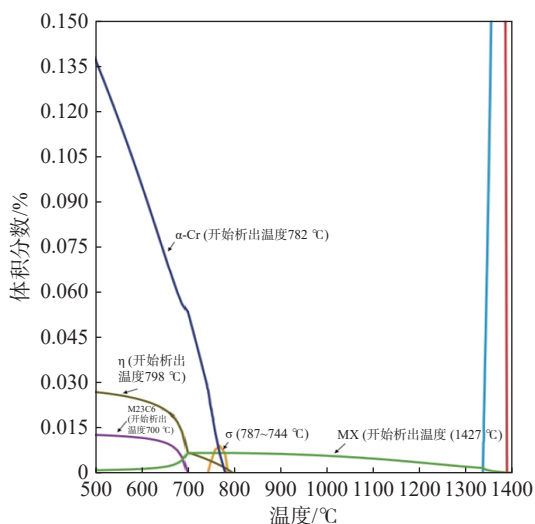


图1 UNS N08810的Thermo-calc软件平衡相图局部位置放大图

变规律的相图。UNS N08810合金室温下的基体组织由奥氏体 γ 相、 σ 相及碳化物 $M_{23}C_6$ 组成,不同相对应的体积分数占比分别为94.9%、4%和1.1%。由相图可知,UNS N08810合金在凝固过程中,最先开始析出MX相(UNS N08810合金中弥散强化相),其主要的成分为Ti、Al等元素;随着凝固过程的进行,析出 η 相, η 是一种在镍基合金中常见的析出相,开始析出温度798°C。后续逐步析出 σ 相、 α -Cr相、 $M_{23}C_6$ 相等,除去MX相外,其余的相析出的温度均集中在700~800°C,在该温度区间内,UNS N08810合金材料存在大量的析出相^[10-11]。

制造工艺

UNS N08810合金中具有较高的Cr元素,该元素为易于偏析元素,在冶炼过程中易偏析元素容易富集在枝晶干上。同时合金中含有强化元素Al、Ti等,这些元素在凝固过程中主要富集在枝晶间。

材料的基体元素 Ni 在合金中的分布较均匀, 没有明显的偏析现象。因此在 UNS N08810 高温合金的凝固过程中, 材料会因为溶质的不均匀分布不可避免地出现宏观偏析和微观偏析, 严重的偏析会造成材料凝固后的组织不均匀。为了改善材料的成分均匀性, 对 UNS N08810 合金钢锭采用真空感应电渣重熔 (VIM+ESR 双联工艺) 的冶炼方式^[12-13]。双联工艺冶炼得到 $\phi 500$ mm 电渣锭, 电渣锭因为补缩等原因需对钢锭头尾切除缩孔, 同时对钢锭表面进行修磨处理, 排除钢锭头尾和表面的缺陷, 钢锭的收得率为 94.8%。检验合格的电渣锭在箱式炉中进行加热, 加热温度控制在 1180~1200 °C, 加热时间为 3 h。确保大规格的电渣锭温度均匀后, 采用快锻液压机开坯, 锻造后坯料规格 $\phi 210$ mm, 对锻造后的钢锭进行剥皮至 204 mm, 锻压比为 5.7, 然后依次进行矫直、表面机加工、超声波探伤, 保证锻造后的圆钢无缺陷。

锻造合格的圆钢, 根据钢棒的实际要求进行下料、锯切、圆钢中心钻孔和端面车加工, 并进行尺寸公差和表面质量检查。圆钢在加热前进入连续脱脂清洗装置进行清洗和脱脂, 去除圆钢表面上附着的油脂和污物, 避免圆钢在环形预热炉加热过程中因为油污的存在被污染, 确保圆钢的表面质量^[14]。将清洗后的圆钢送入环形预热炉中进行分段式预热后, 出炉进行扩孔和玻璃润滑后再送入感应炉中进行加热, 最后将感应加热的管坯送入挤压机进行热挤压至 $\phi 90$ mm。具体的生产流程为: 真空感应冶炼—电渣重熔—锻造—圆管坯检验 (无损检验、理化检验、表面检验、尺寸检验)—下料—热挤压—棒材检验。

为了研究挤压温度对 UNS N08810 合金棒材组织性能的影响, 结合热力学 Thermo-calc 软件, 确定了 UNS N08810 的最佳热塑性加工区间, 本实验主要研究在不同挤压温度下 $\phi 90$ mm 合金棒材成形工艺和组织性能差异^[15]。

实验方法

取 3 种不同挤压温度 (1120~1160 °C、1160~1200 °C、1200~1240 °C) 下的棒材研究其成形工艺, 以确定棒材的热加工范围。进一步研究成形的

棒材在温度范围内的组织性能, 主要表征方法包括晶粒度检验 (参考 GB/T 6394—2017)、室温拉伸试验 (参考 GB/T 228.1—2021)、高温拉伸试验 (试验温度为 500~900 °C, 参考 GB/T 228.2—2015)。

棒材成形工艺研究

挤压工艺中常常涉及到挤压力问题, 挤压力类型不同所施加的最大挤压力也不相同, 目前挤压棒材时的挤压力最常用塞茹尔内经验公式来判断, 具体如式 (1) 所示。

$$P = \frac{\pi}{4} D_k^2 K_f \exp\left(\frac{4fL_p'}{D_k}\right) \ln \varepsilon \quad (1)$$

式中, P 为挤压力, N; D_k 为挤压筒直径, mm; K_f 为变形抗力, MPa; f 为金属与模具间的摩擦系数, 采用玻璃润滑时, f 取 0.020~0.035; L_p' 为挤压坯料长度, mm; ε 为挤压比。

依据塞茹尔内挤压力计算公式, 当 UNS N08810 合金棒材的挤压筒直径、挤压比、挤压坯料长度、金属与模具间的摩擦系数均保持一定的情况下, 挤压力与材料的变形抗力有关, 而材料的变形抗力在成分确定的情况下, 主要取决于挤压温度。

确定挤压温度的原则与确定热轧温度的原则相同, 即在所选择的温度范围内金属具有最好的塑性以及较低的变形抗力, 同时要保证挤压制品的组织均匀性良好。由于短时间内 UNS N08810 合金的挤压变形较锻造有较大的热效应, 选择的挤压温度应低于锻造温度。采用“三图”定温原则来确定合适的挤压温度, 三图即合金状态图、金属与合金的塑性图和第二类再结晶图。

合金状态图用于规定合金材料的挤压温度范围, 挤压温度上限低于固相线温度 T_0 , 防止挤压坯料出现过热或过烧现象, 通常挤压温度上限取 $(0.85\sim 0.95) T_0$, 而下限温度取 $(0.60\sim 0.70) T_0$ 。金属与合金的塑性图是高温下, 金属和合金的塑性随变形状态以及加载方式变化的综合曲线图, 可以用来描述延伸率、断面收缩率变化等。利用塑性图可以给出 UNS N08810 合金的热塑性温度范围, 进而确定热加工工艺温度, 塑性图无法反应挤压后的组织与性能, 因此还要结合第二类再结晶图。考虑

到挤压过程中的温度变化对挤压棒材的组织 and 性能影响：挤压温度过低，材料的热塑性差、材料的变形抗力增大，进行挤压时材料与模具之间的摩擦力大，从而降低选用的工模具寿命；挤压温度过高，坯料在挤压过程中因为温度的升高造成表层氧化层厚度增加，挤压成形后氧化铁皮易嵌入到材料基体中，造成棒材的表面质量下降，并且进行热挤压时凸模与高温材料的接触引起了凸模的温度升高，造成了凸模寿命的降低。因此，合理制定挤压温度在生产中具有重要意义^[6]。

表 2 和图 2 所示为 UNS N08810 合金在不同温度范围内进行挤压结果，温度偏差在 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 范围内。

表 2 UNS N08810 合金在不同挤压温度下的成形结果

目标挤压温度/ $^{\circ}\text{C}$	实际挤压温度/ $^{\circ}\text{C}$	成形结果
1120~1160	1140	挤压闷车
1160~1200	1163、1194	挤出顺利，成形质量好
1200~1240	1220	挤压开裂

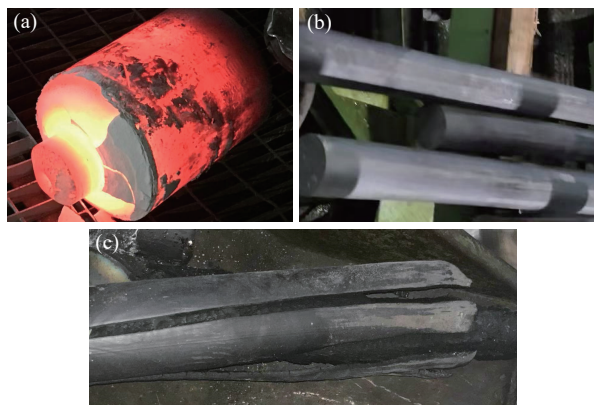


图 2 不同目标挤压温度范围内的棒材成形情况：(a) 1120~1160 $^{\circ}\text{C}$ ；(b) 1160~1200 $^{\circ}\text{C}$ ；(c) 1200~1240 $^{\circ}\text{C}$

根据不同挤压温度下 UNS N08810 合金棒材的成形结果可知，挤压温度在 1120~1160 $^{\circ}\text{C}$ 时，棒材出现了“闷车”现象，即金属材料进行热挤压加工时，由于该温度下最大挤压力达不到材料变形抗力，金属材料无法成形，挤压坯料仍存在挤压筒中。说明在该挤压温度下棒材的变形抗力大，挤压机受限于额定的挤压力无法使棒材成形。挤压温度在 1200~1240 $^{\circ}\text{C}$ 时，棒材头部出现开裂现象，说明此时挤压力满足要求，但是由于挤压过程是一个升温的过程，温度的升高造成了挤压过程中局部晶粒

的粗化，挤压棒材头部出现开裂现象。挤压温度在 1160~1200 $^{\circ}\text{C}$ 时，棒材能够顺利挤出，成形性好。根据不同温度范围内挤压成形结果，确定了 UNS N08810 合金棒材的成形温度区间，即 1163~1194 $^{\circ}\text{C}$ 。考虑到挤压过程中的金属流动差异，对 2 种挤压温度（1163 和 1194 $^{\circ}\text{C}$ ）下挤压成形的棒材进行组织性能分析。

棒材组织性能研究

挤压温度对晶粒度的影响

依据上述挤压实验可知，挤压温度在 1160~1200 $^{\circ}\text{C}$ 内可保证棒材成形。对挤压温度为 1163 和 1194 $^{\circ}\text{C}$ 制得的棒材的头、中、尾进行取样分析，按照 ASTM E112—2013 标准对 2 种挤压温度制得棒材的中心 1/2R 处进行晶粒度检测，结果如图 3 所示。

由图 3 可知，在不同的挤压温度下，棒材不同位置处的晶粒度差异大，挤压温度为 1163 $^{\circ}\text{C}$ 时，棒材的头、中、尾部的晶粒度分别为 5.0，5.0，5.5 级，晶粒度的级差只有 0.5 级，棒材沿着长度方向组织均匀；挤压温度为 1194 $^{\circ}\text{C}$ 时，棒材的头部晶粒度为 6.5 级，伴有局部的细晶组织，中部的晶粒度为 4.0 级，尾部的晶粒度为 5.5 级，棒材的晶粒度级差在 2.5 级以内，棒材沿着长度方向组织不均匀。说明挤压温度对 UNS N08810 合金棒材的晶粒度影响较大。

挤压开始阶段，将管坯放入到挤压筒中，由于管坯的直径比挤压筒的内径小，因此，第一阶段进行填充挤压，促使管坯充满整个挤压筒，此时管坯的温度较高，挤压力增加，管坯外表面的金属与挤压筒、挤压模间受到的热变形较大，晶粒破碎严重。第二阶段为挤压稳定阶段，该阶段挤压力保持在一个稳定的状态，金属流动均匀，棒材中部的晶粒度分布均匀。但是当挤压温度过高，如挤压温度达到 1194 $^{\circ}\text{C}$ 时候，挤压棒材的芯部温度过高，棒材芯部温度在来不及散热的情况下，为晶粒的长大提供驱动力。因此随着挤压温度的升高，棒材的中部晶粒变粗。在挤压最终阶段，因为受到挤压前期的挤压死区和挤压温度下降等因素的影响，挤压力会出现一个突变增高的现象，此时棒材尾部的金属流

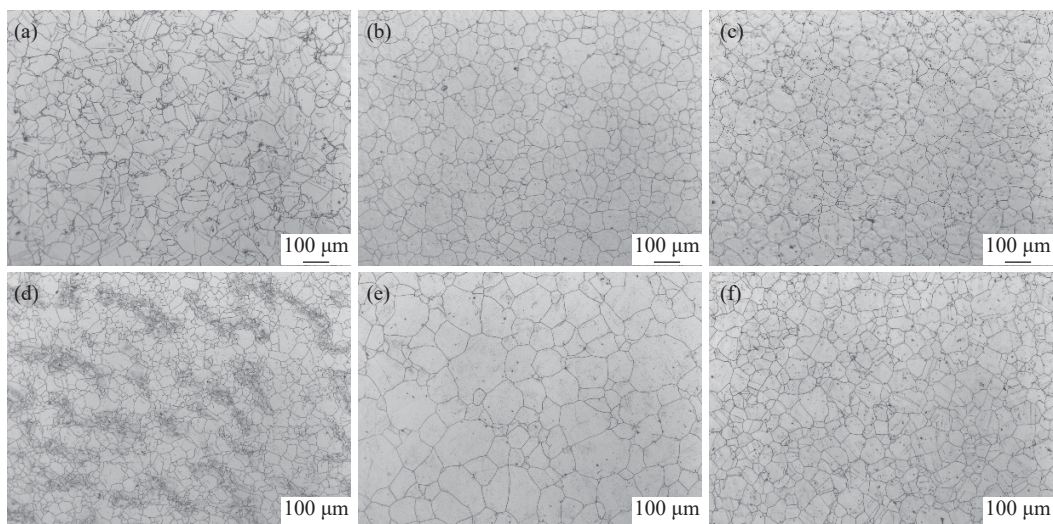


图3 2种挤压温度下棒材头、中、尾晶粒度分布: (a) 1163 °C-头; (b) 1163 °C-中; (c) 1163 °C-尾; (d) 1194 °C-头; (e) 1194 °C-中; (f) 1194 °C-尾

动性增加, 晶粒组织破坏性大。

挤压温度对拉伸性能的影响

UNS N08810 合金棒材在进行室温拉伸和高温拉伸时, 试样的变形过程分为: 弹性变形、均匀塑性变形、不均匀集中塑性变形和断裂 4 个阶段。UNS N08810 合金棒材在 2 种挤压温度下的室温拉伸性能结果如表 3 所示。2 种不同挤压温度下的 UNS N08810 合金棒材室温拉伸性能符合 ASTM A312/A312M—24A 中的要求, 并且 2 种挤压温度下的室温拉伸性能基本一致。

表3 UNS N08810 棒材挤压态室温拉伸性能

热挤压温度/°C	抗拉强度, R_m /MPa	屈服强度, $R_{p0.2}$ /MPa	延伸率, A /%
1163	561	232	52
1194	558	230	53
ASTM A312/A312M—24A 标准	≥450	≥200	≥30

考虑到 UNS N08810 合金棒材产品应用在核电装备的组件部分, 使用环境温度在 500~800 °C, 但相关的技术标准并无 900 °C 的高温性能要求。为了掌握 UNS N08810 合金棒材的高温瞬时性能, 填补标准空白, 对 UNS N08810 合金棒材进行 500~900 °C 的高温拉伸性能研究。棒材按照 ASTM E21—2020 标准进行高温拉伸试验时, 采用的高温拉伸试验机由拉伸试验用主机、温度检测系统、用于测量屈服强度的引伸计 3 部分组成。用于高温拉伸加热的高温炉内有 3 根测温热电偶, 用于接触试样, 实时反馈试样温度。同时热拉伸试验机温度控制器会进行温度控制和补偿, 控制加热温度为设定温度 ± 10 °C。UNS N08810 合金棒材高温拉伸的温度设定为 500、600、650、700、800、900 °C, 试样取样位置为棒材中部。为避免因试样问题造成数据误差, 每个温度点取 2 个试样进行测试, 对每个温度点高温拉伸性能结果求平均值后进行制图, 结果如图 4 所示。

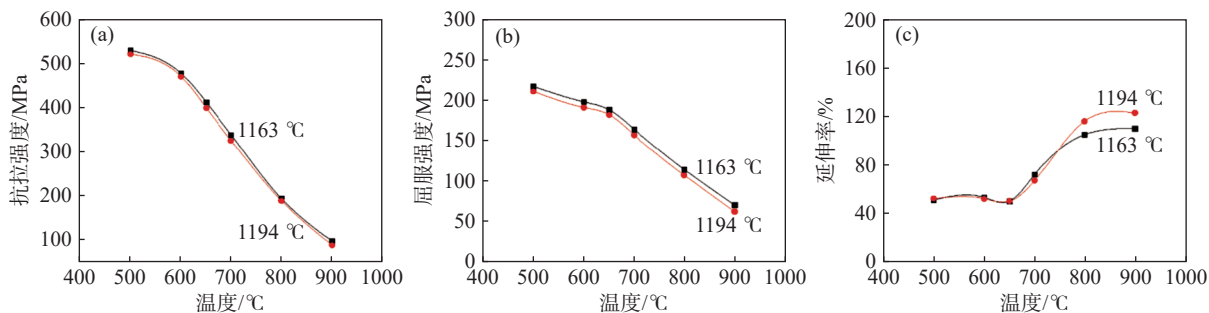


图4 2种挤压温度下棒材的高温拉伸性能随温度变化曲线: (a) 抗拉强度; (b) 屈服强度; (c) 延伸率

当 UNS N08810 合金棒材的挤压温度相同时, 随着高温拉伸温度的升高, 抗拉强度和屈服强度降低, 延伸率增加。温度越高, 原子扩散率越大, 原子扩散后造成合金试样中的空位数量增多, 使得材料的高温强度下降。同时随着温度的升高, 合金试样的材料变形机制增多, 强度随着温度的升高而降低, 延伸率随着温度的升高而增加。在不同的挤压温度下, UNS N08810 合金棒材的高温拉伸性能基本一致, 挤压温度对高温拉伸性能影响不大^[17-18]。

对经 1163 和 1194 °C 挤压制得棒材在不同高温下得到的高温抗拉强度和屈服强度进行数据拟合, 得到的拟合曲线公式和拟合优度 R 如式 (2)~(5) 所示。拟合优度越接近于 1, 说明拟合公式与实际曲线越接近, 能够准确的反应高温拉伸强度变化规律。本次高温拉伸的数据拟合优度均在 0.95 以上, 说明数据可行度高。

$$Y_{R_m}(1163\text{ }^{\circ}\text{C}) = 1161 - 1.2X, R^2 = 0.98 \quad (2)$$

$$Y_{R_{p0.2}}(1163\text{ }^{\circ}\text{C}) = 417 - 0.38X, R^2 = 0.95 \quad (3)$$

$$Y_{R_m}(1194\text{ }^{\circ}\text{C}) = 1175 - 1.2X, R^2 = 0.95 \quad (4)$$

$$Y_{R_{p0.2}}(1194\text{ }^{\circ}\text{C}) = 422 + 0.38X, R^2 = 0.95 \quad (5)$$

结合图 4 所示的 UNS N08810 合金棒材在 2 种挤压温度下的高温拉伸高性能变化规律和拟合优度数值, 在 1163 和 1194 °C 的挤压温度下, 该棒材的高温拉伸性能变化趋势一致, 且在相同的高温拉伸温度下, 经过不同挤压温度制备的材料性能基本无差异。

综合挤压温度为 1163 和 1194 °C 棒材的晶粒度、室温拉伸性能和 500~900 °C 下的高温拉伸性能, 考虑其作为核电结构材料要求具有严密的组织均匀性, 稳定的室温和高温力学性能, 并参照相关的热处理工艺规范文件要求的温度偏差控制需求, 确定核电结构用棒材的优选挤压温度为 (1160±10) °C。

结束语

(1) 在 1120~1160 °C 和 1200~1240 °C 的挤压温度下, 棒材出现挤压“闷车”和头部开裂现象, 该温度范围内棒材无法挤压成形; 当挤压温度为

1160~1200 °C 时, 无论挤压温度为下限 1163 °C 还是上限 1194 °C, 棒材都能顺利成形。

(2) UNS N08810 合金棒材在挤压温度为 1163 °C 时, 整根棒材的晶粒度在 5.0~5.5 级, 棒材组织均匀; 挤压温度为 1194 °C 时, 整根棒材的晶粒度在 4.0~6.5 级, 并伴有局部的细晶组织, 棒材晶粒组织不均匀, 说明挤压温度对 UNS N08810 合金棒材的晶粒度影响较大。

(3) 当挤压温度相同时, UNS N08810 合金棒材的高温抗拉强度和屈服强度随着拉伸温度的升高而降低, 延伸率随着温度的升高而增加。当挤压温度不同时, UNS N08810 合金棒材的高温拉伸性能基本一致, 说明挤压温度对高温拉伸性能影响不大。对经 1163 和 1194 °C 挤压制得棒材在不同高温下得到的高温抗拉强度和屈服强度进行数据拟合, 拟合优度为 0.95 及以上, 说明可行度高, 具有很高的参考价值。

(4) 结合 UNS N08810 合金棒材成形工艺和组织性能, 核电结构用棒材 $\phi 90$ mm 的挤压温度确定为 (1160±10) °C, 可保证棒材的成形性和组织均匀, 室温拉伸性能和高温拉伸性能优良。

参考文献

- [1] 汤文新, 陈继志, 刘小义, 等. Incoloy800H 合金的开发. 材料开发与应用, 2000, 15(4): 10
- [2] 谢振红. 800H 合金技术要求及预制问题探讨. 上海化工, 2015, 40(6): 13
- [3] 杨锦明. Incoloy 800H 合金的应用和性能分析. 炼油技术与工程, 2002, 32(6): 18
- [4] 孙楠. Al、Ti 含量及固溶处理对 Incoloy800H 合金组织和性能的影响. 南京: 南京航空航天大学, 2017
- [5] 曾卫东, 周义刚, 周军, 等. 加工图理论研究进展. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(5): 673
- [6] 王文彬. 基于热压缩模拟实验的 800H 合金高温变形行为研究. 铸造技术, 2014, 35(7): 1387
- [7] 欧新哲, 姚雷, 马明娟. 固溶处理对 800H 合金组织和力学性能的影响. 金属功能材料, 2016, 23(2): 50
- [8] 黄燕, 戴起勋, 李冬升, 等. 固溶处理对 800H 合金组织和硬度的影响. 金属热处理, 2012, 37(3): 73
- [9] 高军松. 高温烟道 Incoloy800H 波纹管失效分析. 压力容器, 2005, 22(4): 36
- [10] 王黎云. Incoloy800H 合金的成分与结构特征. 特殊钢, 1994, 15(1): 41

- [11] 康霞龙. 800H 合金蠕变性能研究. 装备制造技术, 2015(12): 217
 - [12] 候亚庆. Incoloy800H 合金晶界特征分布优化及其性能研究 [学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2016
 - [13] 刘立, 赵俊学, 李献民, 等. $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO}$ 五元渣的表面张力及其在镍基合金电渣重熔的应用. 特殊钢, 2015, 36(6): 20
 - [14] 王宝顺, 李郑周, 杨晨, 等. GH3625 合金无缝钢管的研制开发//第十三届中国高温合金年会论文集. 北京, 2015: 4
 - [15] 曹宇, 邸洪双, 马天军, 等. 800H 合金热变形行为研究. 东北大学学报 (自然科学版), 2012, 33(2): 213
 - [16] 王鑫潮, 王岩, 李吉东. 镍基耐蚀合金 N10276 开坯开裂原因分析和工艺改进. 特殊钢, 2022, 43(2): 36
 - [17] 肖将楚, 张麦仓, 彭以超, 等. Incoloy800H 合金管材服役过程的开裂机制. 材料热处理学报, 2015, 36(4): 121
 - [18] 李莎, 赵振铎, 王贵平. N08800 铁镍基合金热变形行为及组织演变. 特殊钢, 2021, 42(5): 16
- 作者简介: 王哨兵 (1989—), 男, 安徽合肥人, 高级工程师, 主要研究方向: 不锈钢及镍基合金产品的研发。通信地址: 浙江省湖州市吴兴区; E-mail: shaobingW@126.com。