

高温合金环形件环轧工艺研究进展

江河^{1,2}, 何方有², 许亮², 董建新¹

(1. 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

(2. 无锡派克新材料科技股份有限公司, 江苏 无锡 214161)

摘要: 高温合金因优良的综合高温性能在航空航天、石油化工等领域有广泛应用, 高温合金环锻件主要用于机匣、燃烧室、密封环等部件。随着高性能航空发动机的发展, 对高品质高温合金环锻件的需求日益增加。以往高温合金研究重点在于涡轮盘和叶片材料的合金优化设计、制备工艺和变形机理研究等, 而对高温合金环锻件研究报道稍显薄弱。为此, 本文总结了高温合金环形件环轧技术的发展、数值模拟在高温合金环轧技术探索中的应用、主要高温合金环锻件材料的种类以及高温合金环锻件组织控制的难点, 以期对高品质高温合金环锻件的研发和制备提供一定的理论参考。

关键词: 高温合金; 环形件; 环轧

中图分类号: TG132.3⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)05-1860-07

高温合金既是航空发动机、航天火箭发动机中各类热端部件的重要材料, 又是燃气轮机、石油化工等工业领域重要的高温耐蚀材料, 是国民经济中不可或缺的重要材料^[1]。尤其是涡轮盘和涡轮叶片等核心零部件用高温合金的研发、制备工艺、组织稳定性等研究受到了广泛关注, 但高温合金环锻件的研究报道较为有限。高温合金环锻件在航空航天、燃气轮机等领域均有广泛应用, 主要用于机匣、燃烧室、密封环、支撑环等部位^[2,3]。环形零件在现代航空发动机中属于一种涉及材料种类多、量大面广、精度高和载荷大的重要零件。如美国普惠公司研发的JSF35联合战斗机用涡扇发动机F135-PW-100, 环形件占有发动机锻件成本的12%。由于航空发动机的环形零件工作时长, 反复处于高温、高压、高转速、高低频振动综合作用的恶劣环境中, 随着发动机性能的不不断提升, 对材料的力学性能和承温能力提出了更高的要求。环轧工艺因产品尺寸精度高、组织致密、生产效率高等优点, 成为航空航天高性能环锻件的首选制备技术^[4]。本文将对高温合金环锻件环轧制备技术的发展、高温合金环轧工艺的数值模拟研究、环轧过程的组织控制难点等问题进行总结分析, 以期对高品质高温合金环锻件的研发提供参考。

1 高温合金环轧技术的发展

环件轧制又称为环件辗扩, 是指借助环件轧机和

轧制孔型使环件产生连续局部塑性变形, 从而实现壁厚减薄、直径扩大、截面轮廓成形的塑性加工工艺^[5]。环件轧制技术由于具有产品尺寸精确、组织致密、表面质量好、成形效率高等优点^[4,6], 成为航空航天高性能环件制备的首选工艺^[7]。环轧过程包括三部分的运动: 芯辊通过推动坯料向主辊运动, 主辊具有角速度^[8], 环轧过程主要部件的运动情况如图1所示^[6]。

高温合金锻件可通过自由锻扩孔成形达到最终尺寸, 制备所需的环锻件^[9]。但随着碾环机的大量投入使用, 环轧技术逐渐被广泛采用, 所制备的高温合金环件表面质量好、尺寸精度高、组织更为均匀^[10]。尤其是对于超大型环件, 传统的自由锻工艺受到结构空间的限制, 不能锻造成形, 因此环轧也成为制备超大型环锻件的唯一工艺方法^[11]。

通过环轧制备高温合金环形件的典型工艺流程如图2所示。对锻态坯料进行镦饼、冲孔和马架扩孔后, 进入到环轧环节, 一般需要预轧和终轧两道次轧制。两道次轧制的变形量和轧制温度的配合对环件最终组织和质量至关重要。此外, 在该流程过程中材料需要经过多次的加热和变形, 在反复的加热和变形过程中组织受到热-力的耦合作用会发生一系列变化, 从而可能带入混晶等组织问题, 成为环件制备过程中的组织控制难点。

环轧常见的有普通矩形截面环件和异形截面环件轧制, 如图3所示^[3]。早期矩形截面环件的生产以径

收稿日期: 2020-08-06

基金项目: 国家自然科学基金(51701011); 中央高校基本科研业务费(FRF-TP-19-038A2); 无锡市产业前瞻与关键技术研发项目

作者简介: 江河, 女, 1988年生, 博士, 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083, 电话: 010-62332884, E-mail: jianghe17@sina.cn

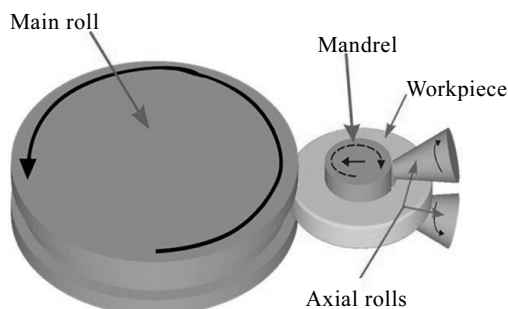


图1 环轧过程示意图

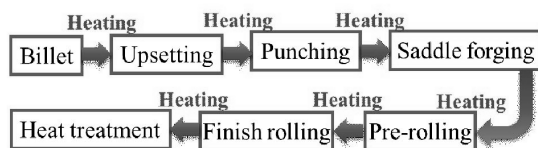
Fig.1 Schematic diagram of ring rolling^[6]

图2 高温合金环形件制备一般工艺流程

Fig.2 Typical manufacture process of superalloy ring

向轧制为主, 环件与坯料采用等高设计, 在轴向方向变形量较小, 锥辊仅起到防止环件攀升和限制环件高度增加的作用。而径/轴双向轧制在径向和轴向 2 个方向同时实施轧制变形, 在得到更加复杂的环形截面的同时, 也使组织更加均匀, 因此, 在高温合金这一类较难变形材料的环形件制备过程中环轧中主要采用径/轴双向轧制, 实际生产对比也表明采用径/轴双向轧制获得的 GH4169 合金环件尺寸精度和性能更好^[12]。刘东等^[13]对 GH4169 合金矩形截面环径/轴双向轧制的轧制曲线(环坯界面外径顶点与环件截面外径顶点在轧制过程中变化的连线)进行了研究, 提出采用特殊的轧制曲线以有效控制环件截面角部的温升, 保证截面组织均匀。异形截面环件轧制具有材料的利用率高、能够获得随性状分布的环件流线等优势; 但由于异形环件截面和轧辊形

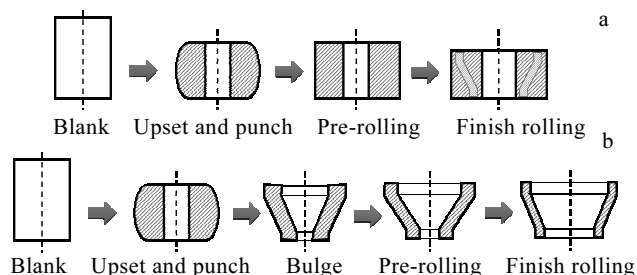


图3 矩形截面环件与异形截面环件轧制过程对比

Fig.3 Manufacture process comparison between rectangular ring (a) and profile ring (b)^[3]

状的不对称, 在轧制过程中易出现“攀升”、“端面剪切”等流动缺陷^[3]。此外, 异形截面环件沿轴向体积分布差别较大, 直接采用矩形环件轧制难度较大, 一般采用预制异形坯料的方式进行环轧^[14]。

2 高温合金环轧的数值模拟研究

与“两盘一片”相比, 高温合金环形件尤其是环轧技术的研究报道较为有限。现有环轧的研究报道主要集中于铝合金、钛合金环件^[15,16], 华林等^[4]开展了环轧的极限参数理论研究工作, 给出环轧每转极限进给量、极限进给速度等计算公式, 而关于高温合金环形件环轧技术的研究主要关注点在于环轧过程的数值模拟。与盘形锻件的模锻工艺相比, 环形锻件的轧制不仅具有普通的平板轧制、异步轧制、多道次轧制的性质, 而且还涉及到直线进给运动、旋转轧制运动、导向运动以及环件自身的转动和直径扩大运动, 这使得精确控制环件轧制成形过程变得十分复杂。与开坯、锻造等工艺环节相比, 环轧过程所需考虑的工艺条件更为复杂, 涉及到主辊转速、芯辊进给、两者配合、坯料温度等多方面因素。复杂的应力条件使得环件制备过程中热-力耦合对组织影响的控制问题变得更为困难。与铝合金相比, 高温合金普遍具有变形抗力大、填充性能差、热导率低的特点, 组织对热力参数敏感的特点, 环轧过程组织控制的难度明显增加^[3]。

有限元模拟计算自 19 世纪 60 年代兴起以来, 在工艺参数设计和优化方面得到了广泛应用, 也对提高环轧技术起到了重要的作用。环轧技术于 1842 年在英国发明, 1950 年 Hawkyard 和 Johnson 通过大量研究对环轧设备进行了改进, 自此针对环轧的数控设备不断升级^[17], 有限元模拟研究也让环轧技术的发展摆脱了传统的经验试制阶段, 向更加科学化的方向迈进^[18,19]。Huez 等^[20]构建了环轧三维仿真模型并对 Inconel718 合金(国内对应牌号 GH4169 合金)环轧过程中的温度变化和应变场等进行了研究。Wang 等^[21]利用 LS-DYNA 有限元代码开发了一套计算效率更高、准确度更高的径/轴双向环轧仿真模型, 用于环轧过程的工艺参数设计和优化。由于环轧过程, 尤其是径/轴双向环轧的过程复杂、变量较多, 此后学者们在环轧模拟仿真的研究过程中一直致力于提高计算效率和准确性^[22, 23]。

随着高温合金环形件用量的提升和环轧制备工艺在高温合金环形件中的推广, 近年来高温合金环形件环轧工艺的仿真模拟研究越来越受到关注。在高温合金异形环形件的制备过程中常采用异形坯料的方式进行环轧, 预制坯胎膜成形和终轧环节是工艺中的难点,

欧阳斌等^[24]采用数值模拟的方法对 GH4169 合金大型异形环件胎模制坯及环轧过程主要工艺参数的变化进行了分析研究,并对工艺过程进行了优化。在异形环轧制过程中每转压下量是影响材料流动规律的关键因素,由主辊转速和芯辊进给速度共同决定,为此,刘东等^[3]采用 ABAQUS/Explicit 显式算法对 GH4169 合金异形环轧制过程主辊转速对轴向宽展、应变速率、温度场分布等影响进行了数值模拟,如图 4 所示。系统分析了主辊转速对异形环件轧制过程的影响规律,通过研究确定了异形截面环件轧制过程中最优的主辊转速,在芯辊进给速度相对恒定的情况下,以较低主辊转速为宜。

3 典型高温合金环锻件合金

现代航空发动机静叶环、支撑环等承力环形零件,不仅在高温条件下长期工作,还承受复杂应力的综合作用,因此对承温能力和力学性能均提出了较高的要求。目前,航空发动机用承力环锻件高温合金材料主要有 GH4169、GH4738、GH4698、GH4141 等沉淀强化型镍基变形高温合金。

现有关于高温合金环形件环轧制备的文献资料中,报道量最大的是 GH4169 合金^[25-27]。GH4169 合金是一种沉淀强化型 Ni-Fe 基变形高温合金,以 γ' -Ni₃Nb 相为主要强化相, γ -Ni₃(Al, Ti)相为辅助强化相,合金中还包括 δ 相和碳化物等析出相,在 650 °C 以下具有长期组织稳定性^[28]。该合金强度较高,并且具有优异的耐腐蚀、抗氧化等综合性能,在航空航天、燃气轮机等领域具有广泛应用^[29]。GH4169 合金环形件被用于航空发动机机匣、封严环、火焰筒等部件。国内外研究学者对 GH4169 合金矩形截面和异形截面环件的轧制工艺和组织演变等均进行了系统的研究工作,包括环轧过程的数值模拟、轧制曲线特征、主辊转速优化等。

GH4169 合金是航空发动机机匣环件的主干材料,但随着航空发动机服役温度的提高,GH4169 合金环形件在使用过程中出现高温状态下变形较大的问题,主要原因是短时承受温度超过 GH4169 合金的使用温度,为解决高温变形的问题,采用具有更高服役温度的 GH4738 合金代替 GH4169 合金^[2,10]。GH4738 作为一种成熟的变形高温合金在性能等方面体现出了自身的优势,其应用范围不断扩大,在航空、燃机的盘件、紧固件等领域均有应用^[30,31]。但 GH4738 合金晶粒组织对热加工参数极为敏感^[32],环锻件制备过程中混晶问题较为明显。王丹等^[2]对 2 种不同工艺路线下的 GH4738 异形环环轧组织进行了分析比

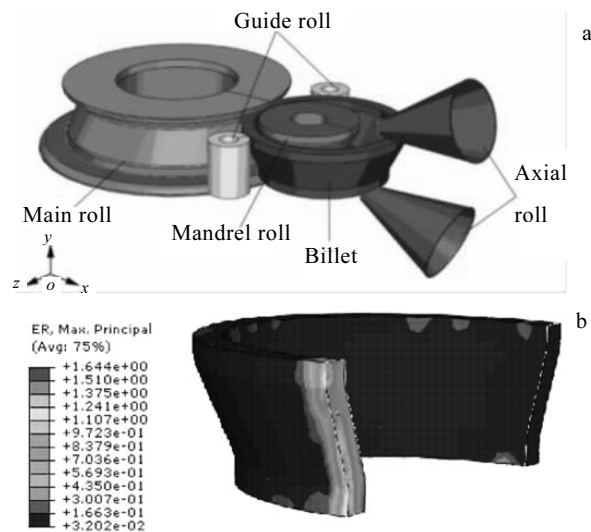


图 4 GH4169 合金异形环件环轧工艺模拟计算

Fig.4 Finite element simulation for ring rolling of alloy GH4169: (a) finite element simulation model and (b) distribution of strain rate during ring rolling^[3]

对,结果表明采用 1080 °C 预轧+1080 °C 终轧的工艺路线比 1060 °C 预轧+1060 °C 终轧的工艺路线更有利于获得均匀的显微组织,且有利于提高环件的持久性能。

此外,国内通过锻造方式制备出 GH4698 和 GH4720Li 环锻件^[33,34]。也有报道表明对于合金化程度较高、难变形的 3K79 合金,通过合理的前期组织处理使合金获得超塑性后可以通过环轧工艺获得 3K79 合金的环形件,如图 5 所示^[35]。固溶强化型的镍基高温合金 GH3536、GH3230 和钴基高温合金 GH5188 等在高温合金环形件中也常见应用。

4 高温合金环轧过程组织控制难点

与开坯、锻造工艺相比,环轧具有明显的自身特色。现有高温合金环轧工艺的研究重点集中于采用有限元模拟的方式对轧制工艺参数进行优化设计,从力学和数学角度构建了一套完备的仿真模拟体系。但高温合金环轧过程组织演化规律和机理研究,与高温合金盘锻件相比较为薄弱。环轧过程高温合金的组织变化更为复杂,在一道次轧制过程中,坯料不断旋转,与轧辊接触的部分发生变形的同时内部组织发生动态再结晶过程,而空转尚未与轧辊接触的坯料部分发生后动态再结晶过程。由于在一道次轧制过程中,坯料与轧辊反复处于接触-未接触的状态,内部组织变化处于动态再结晶-后动态再结晶交替往复的过程,内部组

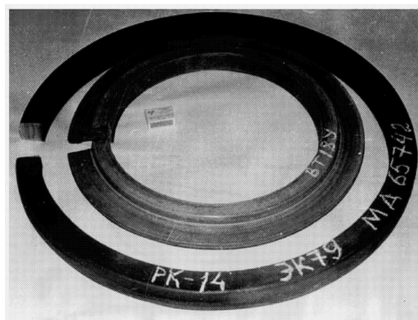


图5 环轧工艺制备的 3K79 合金环形件

Fig.5 3K79 ring made by ring rolling^[35]

织变化极为复杂。

虽然环轧一道次变形量一般在 20%~35%之间,但是需要通过芯辊进给、坯料多次轧制完成,即坯料与轧辊每一次接触时变形量较小,甚至可能处于合金的临界变形量位置。对于高温合金而言,小变形量的热变形易出现混晶等组织,而混晶组织在继续轧制过程中可能会更加明显,若合金在临界变形量位置反复变形,甚至可能出现热变形后晶粒不细化、反而长大的现象。环形件生产过程较为复杂、流程长,环形件受多道次热-力耦合作用,内部组织变化过程复杂,尤其是高温合金因合金化程度较高,组织对工艺参数极为敏感,且具有较强的组织遗传性,因此易发生混晶等问题^[33, 36, 37],如图 6 所示^[10],直接影响了环形件的品质。此外,高温合金环形件制备过程中还可能出现环形件开裂、尺寸精度差等宏观质量缺陷。

为解决高温合金环形件环轧过程组织控制问题,国内学者开展了大量的研究工作。针对环轧过程中可能会使环件处于临界变形量而产生混晶这一问题,在 GH4141 合金环锻件研制过程中通过终锻之前内孔机加的方式保证锻件与芯辊在高度方向上均匀接触使锻件一火成形获得足够的变形量,避免合金处于临界变形范围,从而使锻件获得均匀的晶粒组织^[37]。

刘信祖^[10]采用不同规格和生产商的锻棒、不同工艺路线对 GH4738 合金环形件环轧工艺进行了对比研究发现,采用一道次环轧获得的环形件组织比两道次环轧所获得的组织更为均匀。但 Hu 等人^[38]在环轧道次对 GH4738 合金热力学参数和组织影响的研究中通过比对单道次大变形量轧制和多道次小变形量轧制发现:多道次轧制环件温度、应变场分布更加均匀;单道次大变形量轧制有利于获得更细小的晶粒,但多道次小变形量轧制所得到的组织更加均匀,可避免混晶现象的发生;需要合理分配每道次轧制变形量才能

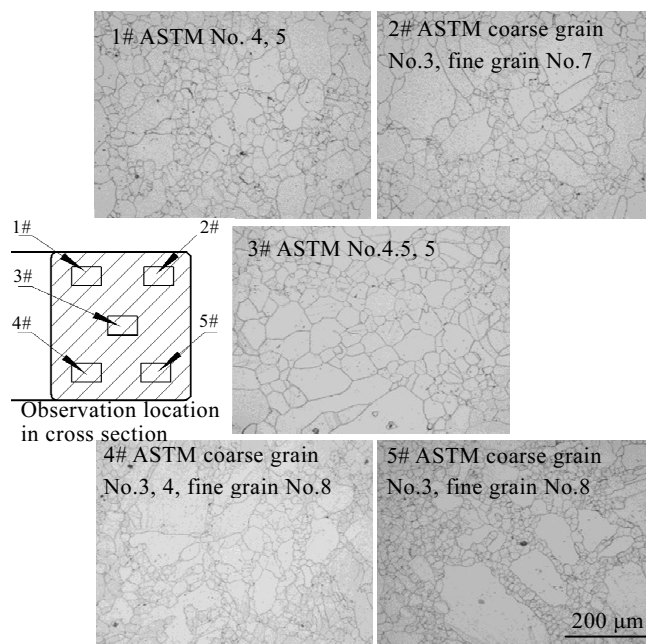


图6 GH4738 环形件中的混晶缺陷

Fig.6 Mixed crystal microstructure defect in GH4738 ring after ring rolling^[10]

改善组织均匀性。不同研究中对 GH4738 合金环形件最优工艺的研究结果有所不同,可能与坯料、环件尺寸和工艺路线有关,但同时也表明解决 GH4738 合金环轧混晶问题、提高环形件质量仍需要深入研究。

对于固溶强化型的 GH3230 合金,C 质量分数高达 0.093%,并且 W+Mo 元素含量极高,使合金的碳化物含量较高,前期锻造工艺不当或变形不充分极易形成碳化物条带并遗传到环锻件成品中,使晶粒组织不均匀影响环件的力学性能。通过比对发现在锻饼环节将单向墩粗工艺改为多向锻造工艺可以使最终的 GH3230 环形件晶粒组织和碳化物分布更均匀,力学性能更加稳定^[39]。

在 GH907 环锻件的研究中发现,加热温度偏高、终锻变形量偏小、终锻温度偏低是导致锻件不均匀组织的主要原因,通过降低环坯加热温度,提高终锻变形量的工艺改进,环锻件的组织均匀性和力学性能得到了明显的改善^[36]。

由于高温合金环轧过程中组织演变规律复杂,采用模拟计算的方式进行环轧过程的组织精确预测,对于解决高温合金环形件制备过程中常见的混晶问题具有极其重要的价值。虽然高温合金环形件环轧工艺的有限元模拟已有较多文献报道^[20],但对环轧过程的组织模拟预测研究较为有限,科研工作者也采用了各种方式对

高温合金环轧过程的组织精确模拟预测进行了探究。GH4169 合金环轧过程的 Deform-2D 有限元模拟计算结果表明, 环轧过程的动态再结晶极为不均匀, 晶粒尺寸明显分为 3 个区域: 大变形区再结晶最为充分, 晶粒最为细小; 小变形区晶粒尺寸次之; 难变形区再结晶最为不充分, 晶粒尺寸较大^[40]。Sui 等^[27]采用 ANSYS/LS-DYNA 软件对 Inconel718 合金环轧过程中温度、应力、应变等参数变化进行模拟, 然后通过 FORTRAN 对软件进行了二次开发耦合了动态再结晶、亚动态再结晶和晶粒长大模型, 对环轧过程中的晶粒度变化进行求解和模拟, 对环形件截面芯部的晶粒度模拟预测结果与实际组织具有较好的吻合度。Zambrano 等^[6]采用 Deform-3D 有限元软件模拟了不同初始晶粒度条件下 Inconel718 合金组织演变情况, 模拟结果与 Huez 等^[20]人的组织分析结果有较好的一致性, 与轴向辊接触部分环件的晶粒尺寸变化较大, 环件芯部晶粒组织较为均匀细小, 如图 7 所示。此外, 若轧前组织为粗晶, 轧制之后的环件晶粒尺寸也明显大于细晶坯料所获得的环件晶粒尺寸。在最新的报道中 Büscher 和 Witulski^[41]采用近年来新开发的 Simufact Forming 金属材料加工工艺仿真软件自带的环轧模型对 Inconel718 合金环轧过程的组织进行了预测和分析。

对高温合金环轧过程组织的精确预测, 有利于构建轧制工艺与组织之间的对应关系, 对于解决高温合

金环轧之后的混晶问题具有重要的应用价值。但是现有对于高温合金环轧过程组织演化的模拟研究与盘锻件的组织模拟研究相比尚不够精细。在高温合金环形件组织演化的仿真模拟研究中, 环形件旋转和轧制过程中与轧辊接触和非接触时间段, 不同类型再结晶公式的调用次序和逻辑关系, 是模拟过程中的难点, 仍需相关的研究和验证工作, 为环形件制备过程的组织演变的精确预测和工艺参数的优化设计提供参考。

5 结束语

随着航空工业的发展, 对高温零部件质量的要求日趋严格。经过数十年的发展, 我国在高温合金涡轮盘和叶片等重要热端部件领域进行了大量、系统的研究, 但在高温合金环锻件制备方面研究报道较为有限。现有高温合金环形件环轧工艺的研究主要集中于采用数值模拟结合实际生产比对的方式对高温合金环轧工艺进行优化设计, 保障了高温合金环形件环轧过程的成形性。但高温合金具有组织对工艺参数敏感、组织遗传性强的特点, 环轧过程的组织控制和混晶问题的解决一直是高温合金环轧研究的重点和难点。为提升高温合金环形件品质, 形成完备的组织控制理论基础, 今后研究中需关注环轧过程中高温合金在多道次热力耦合作用下组织演变规律和机制; 进一步完善环轧过程数值模拟的组织预测功能, 对环形件不同部位的晶粒度实现精确模拟预测; 从而构建组织-工艺参数的关联性模型, 为提升高温合金环锻件组织均匀性提供完整的理论保障。

参考文献 References

- [1] Du Jinhui(杜金辉), Lv Xudong(吕旭东), Dong Jianxin(董建新) et al. *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2019, 55(9): 1115
- [2] Wang Dan(王丹), Liu Zhi(刘智), Wang Jianguo(王建国) et al. *Forging & Stamping Technology*(锻压技术)[J], 2020(5): 128
- [3] Ma Yiwei(马义伟), Wang Zhihong(王志宏), Liu Dong(刘东) et al. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*(航空学报)[J], 2011, 32(8): 1555
- [4] Hua Lin(华林). *Ring Rolling Theory and Technology*(环件轧制理论和技术)[M]. Beijing: China Machine Press, 2001
- [5] Hua Lin(华林). *Thesis of Doctorate*(博士论文)[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2000
- [6] Zambrano-Robledo P, Salinas-Rodriguez A, Almeraya Calderon F. *Proceedings of the Symposium of Aeronautical and Aerospace Processes, Materials and Industrial Applications*[M].

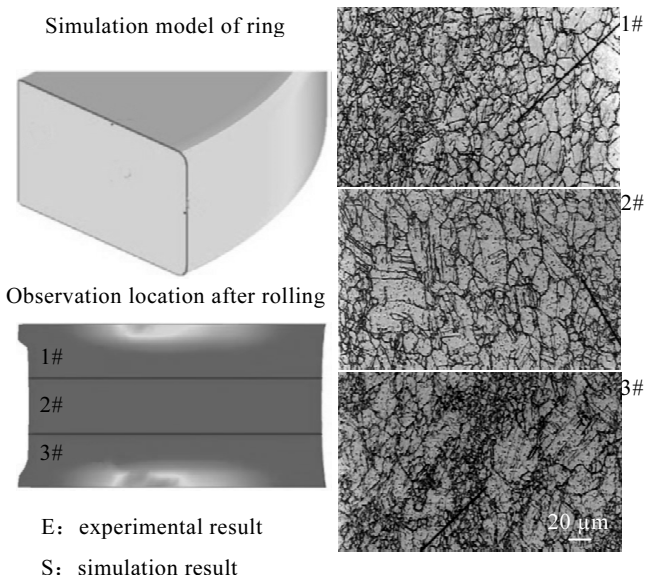


图 7 Inconel718 合金环轧组织模拟结果与实验结果比对
Fig.7 Comparison between finite element simulation result and microstructure of Inconel 718 ring^[6, 20]: 1# E: 11~20 μm, S: 9.53~10 μm; 2# E: 11 μm, S: 10 μm; 3# E: 11~20 μm, S: 9.53~10 μm

- Switzerland: Springer, 2018: 107
- [7] Song J L, Dowson A L, Jacobs M H *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2002, 121(2-3): 332
- [8] Jan Awrejcewicz. *Numerical Analysis-Theory and Application*[M]. Croatia: InTech, 2011: 373
- [9] Huang Chunfeng(黄春峰). *Forging & Stamping Technology* (锻压技术)[J], 1998, 23(4): 11
- [10] Liu Zuxin(刘信祖). *Thesis of Master*(硕士论文)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017
- [11] Hua Lin(华 林), Qian Dongsheng(钱东升), Deng Jiadong(邓加东) *et al.* *Forging & Stamping Technology*(锻压技术)[J], 2018, 43(7): 17
- [12] Yang Yong(杨 勇), Zhang Hua(张 华), Liu Feng(刘 峰) *et al.* *Proceedings of the 11th China Superalloy Conference*(第十一届中国高温合金年会论文集)[C]. Beijing: HTSM, 2007: 25
- [13] Liu Dong(刘 东), Fu Mingjie(付明杰), Wan Ziyong(万自永) *et al.* *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*(航空学报)[J], 2007, 28(5): 1276
- [14] Guo Lianggang(郭良刚), Yang He(杨 合), Jin Jiancheng(金坚诚). *Journal of Mechanical Engineering*(中国机械工程学报)[J], 2010, 46(24): 1
- [15] Xu Kunhe(徐坤和), Zhang Wenxue(张文学), Yang Daijun(阳代军) *et al.* *Forging & Stamping Technology*(锻压技术)[J], 2016, 41(10): 92
- [16] Guo Lianggang(郭良刚), Chen Xiaoqing(陈孝庆), Yang He(杨 合) *et al.* *Journal of Mechanical Engineering*(中国机械工程学报)[J], 2014, 50(14): 126
- [17] Hawkyard J B, Johnson W, Kirkland J *et al.* *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 1973, 15(11): 873
- [18] Jiang Ridong(蒋日东), Huang Shuhuai(黄树槐). *Journal of Huazhong University of Science and Technology*(华中科技大学学报)[J], 1997(A01): 1
- [19] Dewasurendra L. *A Finite Element Method for Ring Rolling Processes*[D]. Ohio: Ohio University, 1998
- [20] Huez J, Noyes J L, Coupu J. *Proceedings of the 4th International Symposium on Superalloys 718 & Derivatives: Energy, Aerospace, and Industrial Applications*[C]. Pittsburgh: TMS, 2001: 249
- [21] Wang Z W, Zeng S Q, Yang X H *et al.* *Journal of Materials Processing Tech* [J], 2007, 182(1-3): 374
- [22] Xie C, Dong X, Li S *et al.* *International Journal of Machine Tools and Manufacture*[J], 2000, 40(1): 81
- [23] Kim B S, Moon H K, Kim E Z *et al.* *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2013, 15(4): 635
- [24] Ouyang Bin(欧阳斌), Xu Dong(徐 东), Fan Maoyan(范茂艳). *Die & Mould Industry*(模具工业)[J], 2017, 43(10): 13
- [25] Sui F, Chen L, Liu X *et al.* *Acta Metallurgica Sinica, English Letters*[J], 2009, 22(2): 81
- [26] Sui F L, Chen L Q, Liu X H *et al.* *Journal of Iron and Steel Research (International)*[J], 2009, 16(5): 43
- [27] Sui F L, Yue Z, Liu X H *et al.* *Applied Mathematical Modelling*[J], 2013, 37(20-21): 8776
- [28] Lu X D, Du J H, Deng Q. *Materials Science & Engineering A* [J], 2013, 559(1): 623
- [29] Xie Xishan(谢锡善), Dong Jianxin(董建新), Fu Shuhong(付书红) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2010, 46(11): 1289
- [30] Li Linhan(李林翰), Dong Jianxin(董建新), Zhang Maicang(张麦仓) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2014, 50(7): 821
- [31] Zhu Qing(朱 擎), Dong Jianxin(董建新), Zhang Maicang(张麦仓) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(9): 2546
- [32] Shen G, Semiatin S L, Shivpuri R. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 1995, 26(7): 1795
- [33] Wang Xincal(王信才). *Special Steel Technology*(特钢技术)[J], 2016, 22(2): 41
- [34] Wang Tao(王 涛), Li Zhao(李 钊), Xia Chunlin(夏春林) *et al.* *Proceedings of the 13th China Superalloy Conference*(第十届中国高温合金年会论文集)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015: 130
- [35] Mukhtarov S, Ganeev A, Nagimov M *et al.* *Key Engineering Materials*[J], 2017, 746: 69
- [36] Tang Xiaohui(唐晓辉), Yang Shulin(杨树林), Zang Dechang(藏德昌) *et al.* *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2015, 44(7): 153
- [37] Xie Yongfu(谢永富), Li Yufeng(李玉凤), Su Chunmin(苏春民). *Journal of Ordnance Equipment Engineering*(兵器装备工程学报)[J], 2017, 38(7): 168
- [38] Hu Y, Liu D, Zhu X *et al.* *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2018, 96: 1165
- [39] Zhang Yonglu(张勇路), Tong Jintao(童金涛), Ju Quan(鞠 泉) *et al.* *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2017, 46(13): 151
- [40] Wu Quan(伍 权), Xu Weiping(徐卫平), Yang Guangfu(杨光复). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2009, 38(11): 111
- [41] Büscher M, Witulski T. *Proceedings of the 9th International Symposium on Superalloy 718 & Derivatives: Energy, Aerospace, and Industrial Applications*[C]. Switzerland: Springer, 2018: 1001

Research Progress on Ring Rolling Technology of Superalloy Ring Forging

Jiang He^{1, 2}, He Fangyou², Xu Liang², Dong Jianxin¹

(1. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(2. Wuxi Paikexin New Materials Technology Co., Ltd, Wuxi 214161, China)

Abstract: Superalloy exhibits excellent overall performance at high temperature. As a result, it is widely used in the field of aerospace, petrochemical engineering and so on. Superalloy ring forging is mainly used in the component of receiver, combustor, sealing ring, etc. With the development of high performance aero-engine, the demand of superalloy ring forging with high quality keeps increasing. Previously, most focus is put on superalloy used for turbine disks and blades. Related research is carried out on alloy design and optimization, manufacture technology and deformation mechanism. However, there is only limited work about superalloy ring forging. Hence, in the present work, the development of ring rolling technology of superalloy ring forging is summarized. The application of numerical simulation technique in manufacture process design of superalloy ring forging is discussed. The main superalloy used as ring forging is compared. At last, the difficulty in microstructure control during ring rolling process of superalloy is analyzed. This review work is made hoping to provide some theoretical guidance for the research and development of superalloy ring forging with high quality.

Key words: superalloy; ring forging; ring rolling technology

Corresponding author: Jiang He, Ph. D., School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China, Tel: 0086-10-62332884, E-mail: jianghe17@sina.cn