

GH4169 孔挤压强化工艺过程数值模拟

胡殿印^{1,2,3}, 李雯竹³, 刘 辉³, 潘锦超³, 王荣桥^{2,3}

- (1. 北京航空航天大学 航空发动机研究院, 北京 100191;
2. 北京航空航天大学 航空发动机结构强度北京市重点实验室, 北京 100191;
3. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 在验证镍基高温合金 GH4169 中心孔挤压(CE)三维有限元模型正确性的基础上,利用单元删除法研究倒角、孔挤压-倒角顺序和铰削量 3 种具体工艺过程对孔边周向残余应力分布的影响。结果表明:孔边小于芯棒过盈量的初始倒角可以减小孔挤压后残余压应力;采用孔挤压-倒角的工艺顺序可以在孔边获得更小的残余压应力。铰孔可增大孔边入口处残余压应力,去除残余压应力极小值部分的材料。因此,在挤压强化后应尽量避免铰孔。

关 键 词: 镍基高温合金; 孔挤压; 倒角及铰孔; 有限元模拟; 残余应力

中图分类号: V260.6

文献标志码: A

Numerical simulation on cold expansion strengthening technology process of GH4169

HU Dianyin^{1,2,3}, LI Wenzhu³, LIU Hui³,

PAN Jinchao³, WANG Rongqiao^{2,3}

- (1. Research Institute of Aero-Engine,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. Beijing Key Laboratory of Aero-Engine Structure and Strength,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
3. School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: On the basis of verifying the correctness of the three-dimensional finite element model for the cold expansion (CE) of central hole fatigue specimen of nickel-based superalloy GH4169, the influences of chamfering size, the order of chamfering-CE process and the reaming amount on circumferential residual stress distribution around the hole edge were studied through element deletion method. The results showed that the initial chamfer size less than the interference amount of the mandrel can reduce the residual compressive stress after CE. Lower residual compressive stress can be obtained at the hole edge by using the CE-chamfering process. The reaming process can lead to the increase of residual stress at the entrance of the hole edge and the minimum residual stress may be removed. Thus, reaming should be avoided as much as possible after cold expansion strengthening.

收稿日期: 2020-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(51675024); 航空动力基金(6141B090314)

作者简介: 胡殿印(1980—),女,教授,博士,研究领域为发动机结构强度及疲劳可靠性。E-mail:hdy@buaa.edu.cn

引用格式: 胡殿印,李雯竹,刘辉,等. GH4169 孔挤压强化工艺过程数值模拟[J]. 航空动力学报,2020,35(11):2241-2247. HU Dianyin, LI Wenzhu, LIU Hui, et al. Numerical simulation on cold expansion strengthening technology process of GH4169 [J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(11): 2241-2247.

Key words: nickel-based superalloy; cold-expansion; chamfering and reaming; finite element simulation; residual stress

镍基高温合金(如 GH4169 高温合金)因其优异的高温性能被广泛应用于航空发动机高压压气机、涡轮盘等轮盘结构^[1]。由于高温、高转速等服役载荷环境的复杂性,且实际轮盘常存在螺栓孔、通气孔、销钉孔等易产生应力集中的几何特征,由此导致孔边部位易发生疲劳失效。为此,通常采用孔挤压强化表面改性技术,通过在孔边引入残余压应力来提高结构的抗疲劳能^[2-5]。孔挤压强化工艺的原理是,利用工作段直径大于孔的锥形芯棒对孔壁进行连续、缓慢的挤压,使孔边产生大的塑性变形进而引入一定深度的残余压应力层抑制疲劳裂纹的萌生。在实际工艺过程中,通过在挤压前对孔边进行倒角处理来改善挤入端孔边的强化效果^[6],挤压后也进行倒角处理来消除挤出端形成的火山口形貌;同时,为保证芯棒直接挤压后孔的圆度与装配精度,常采用铰孔工艺。以上工艺均会影响孔边的残余应力分布^[7-8],因此,针对孔挤压强化的工艺过程开展残余应力分析研究是十分有必要的。

目前,国内外广泛采用有限元方法对孔挤压强化工艺过程进行数值模拟,获得强化后的残余应力分布^[9-10]。例如,Liu 等综合考虑芯棒过盈量和孔表面摩擦的影响,利用芯棒和孔边位移的加载方式研究了孔挤压铝合金板件的残余应力分布^[11]。朱有利等通过改变芯棒前锥段的曲线形式进行了孔挤压强化效果的数值模拟,表明外凸正弦曲线芯棒可获得更好的强化效果^[12]。Baltach 等对不同锥度的芯棒挤压强化效果进行对比,认为低锥度的芯棒更利于保证薄板的强化效果^[13]。Jang 等研究倒角参数和挤压强化后残余应力分布的关系,得出倒角尺寸的影响大于倒角角度的结论。以上研究涉及挤压强化工艺过程中的重要工艺参数,为工程应用中的芯棒、润滑剂等选择提供了指导。然而,以上研究还未系统地进行孔挤压强化工艺过程的数值模拟研究,即不能有效反映倒角、孔挤压、铰孔等具体工艺的影响。

近年来,王幸等利用单元删除的方法模拟了 TC4 板孔挤压后的铰削工艺,结合临界距离法预测了钛合金试件的疲劳寿命^[14]。Huang 等评估孔挤压、倒角、螺栓夹紧及三种工艺组合对铝锂合金单孔板疲劳寿命的影响并确定了最佳组合工艺参数^[15]。何志明等综合考虑了铰削量、预制倒角

的影响,并结合试验验证了两种工艺及其组合下的 300M 钢耳片开缝衬套挤压强化的疲劳寿命增益^[16]。这些研究综合考虑了不同工艺组合的强化效果,并对开缝衬套挤压后铰孔工艺的影响进行了评估。但是,未能考虑倒角工艺对残余应力的影响,对直接挤压后需进行轮廓修正的孔也未予以探讨。此外,以上研究多针对铝合金、高强度钢及钛合金等材料,对镍基高温合金的孔挤压强化研究鲜有报道。因此,亟需开展镍基高温合金材料的孔挤压强化整个工艺过程的数值模拟研究。作者所在团队在前期初步建立了镍基高温合金 GH4169 孔挤压强化的数值模型^[17-18],但未考虑孔结构的初始倒角尺寸,以及倒角、铰孔及其组合等工艺过程对残余应力的影响规律。

基于此,本文以镍基高温合金 GH4169 材料为对象,研究建立了倒角、挤压-倒角顺序和铰削工艺的数值模拟方法,并在此基础上研究了倒角尺寸、挤压-倒角顺序和铰削量等工艺参数对孔边残余应力分布的影响规律。该方法建立了芯棒直接挤压强化的后续工艺流程的数值模拟方法,可量化由于结构差异、材料去除等引起的残余应力重分布,为孔挤压强化技术在航空发动机轮盘上的应用提供技术支持。

1 数值模拟方法

1.1 孔挤压模拟方法

镍基高温合金 GH4169 平板试件的几何参数如图 1 所示,其弹性模量为 196 GPa,泊松比为 0.3。芯棒材料为 300M 钢,弹性模量为 179 GPa,泊松比为 0.32,工作段直径为 10.65 mm,长为 1.5 mm,过盈量为 0.15 mm,入口、出口锥度分别为 3°、8°。芯棒的相对挤压量为 1.4%,在工程应用范围内可避免因较大的过盈量导致孔边产生径向微裂纹。

根据孔挤压强化模型对称性,在软件 Abaqus 中建立如图 2 所示的孔挤压强化 1/4 有限元模型。平板试件与芯棒的单元类型分别为 8 节点六面体减缩积分单元(C3D8R)、完全积分单元(C3D8),单元数目分别为 12 400 和 1 975,接触面摩擦因数为 0.1。由于试件在挤压过程中会产生塑性变形,故采用弹塑性本构关系,芯棒则采用线弹性本构关系以减小计算量。查阅高温合金手册

得 GH4169 的真实应力-应变曲线如图 3 所示^[19], 其中 ϵ 代表应变, σ 为应力。

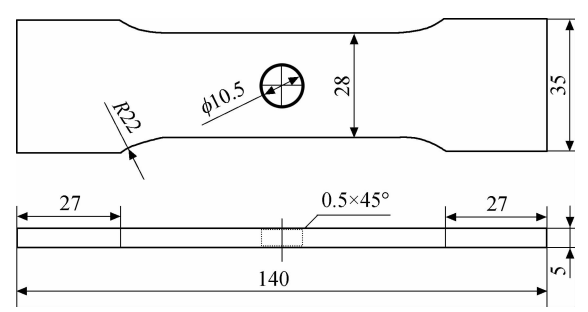


图 1 GH4169 平板试件几何尺寸(单位:mm)
Fig. 1 Geometry of GH4169 plate specimen (unit:mm)

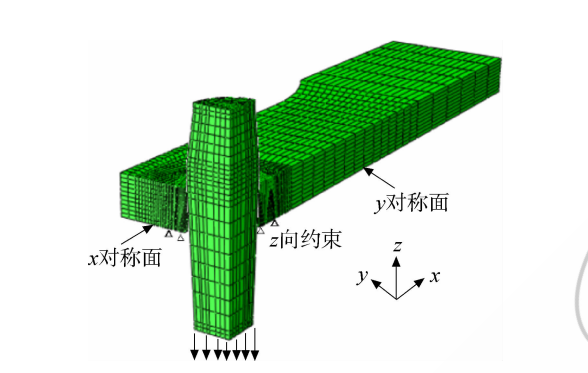


图 2 有限元模型
Fig. 2 Finite element model

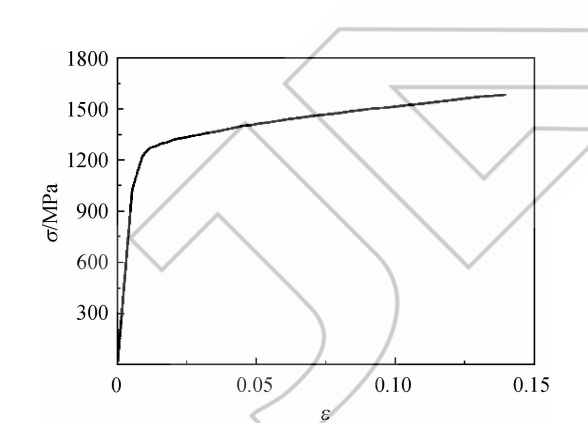


图 3 GH4169 真实应力-应变曲线
Fig. 3 True stress-strain curve of GH4169

依据实际强化工艺,在有限元模型中施加 x 、 y 坐标面内的对称约束,并在试件底部孔边圆弧内径为 11 mm、外径为 20 mm 的区域约束 z 方向上的位移。通过在芯棒底面施加沿 z 轴负方向的位移模拟挤压强化过程,实际模拟时设置芯棒位移量为 10 mm。当芯棒工作段通过孔后不再与孔壁发生接触,此时抑制接触关系,以节约计算成本。

1.2 数值模拟方法的验证

因孔边疲劳裂纹萌生及扩展主要受周向应力

的影响,同时数值模拟表明挤入端残余压应力最小,故本文除特殊说明外均针对以下情况进行研究:①挤入端残余应力沿孔径方向 d 的变化;②孔壁表面残余应力沿厚度方向 h 的变化。选取路径的示意图如图 4 所示。

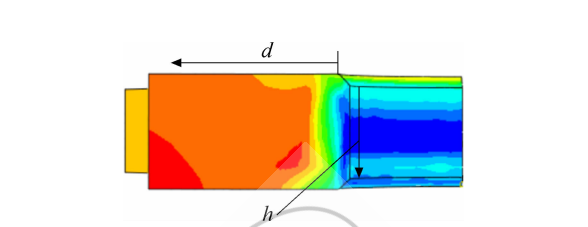


图 4 路径示意图
Fig. 4 Diagram of the paths

选用孔两边倒角 0.5 mm (记为 $C_{0.5}$) 的 GH4169 平板试件进行孔挤压强化模拟,并开展相应的试验研究。图 5 为挤入端、挤出端周向残余

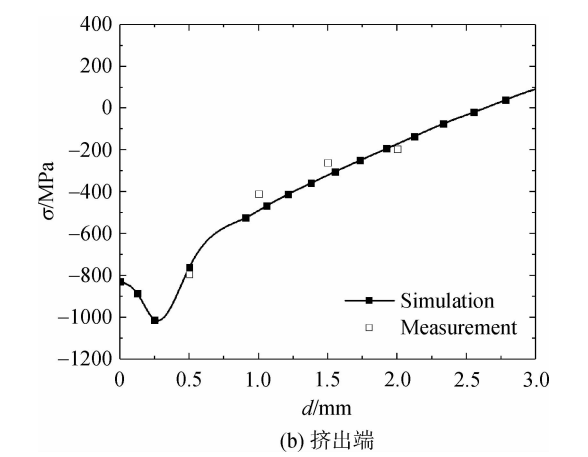
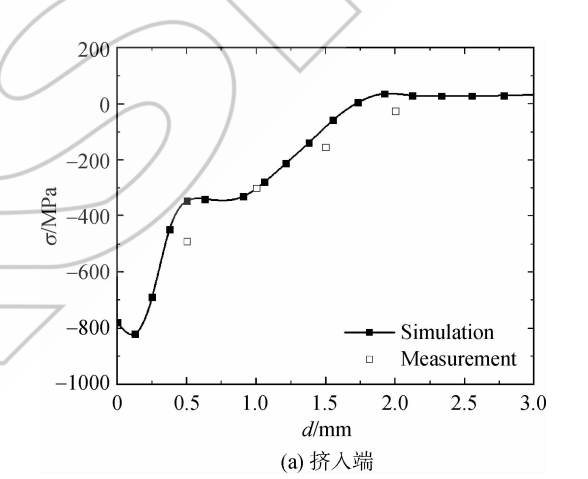


图 5 挤入端与挤出端周向残余应力的数值模拟与试验结果对比

Fig. 5 Comparison between experimental data and simulation results of circumferential residual stresses on entrance and exit plane

余应力沿孔径方向分布的数值模拟结果,并与试验数据进行了对比。

由于衍射光斑为具有一定的直径的圆形区域,试验测量为该区域内周向应力的平均值,故数值模拟结果选取相应测量区域应力的平均值。可以看出,数值模拟与试验数据具有良好的一致性,验证了数值模拟方法的有效性。后续研究在此基础上模拟倒角、铰孔工艺过程,进而研究其对周向残余应力的影响。

1.3 倒角及铰孔工艺的模拟

综合考虑参考文献[14,20-21]的方法,本文采用直接单元删除的方法模拟倒角、铰削工艺中材料的去除,单元删除方式采用一次全部删除。具体的数值模拟过程为:①进行一次孔挤压强化过程,确定塑性变形量,根据最终工艺尺寸确定需要去除的材料;②分别对需要去除部分与基体部分划分网格;③重新进行孔挤压过程模拟,而后通过直接单元删除模拟倒角、铰削工艺中材料约束的释放。

对于本文的模型,一次挤压后挤入端、挤出端的塑性变形量相差较小。为降低模型倒角、铰削部分材料网格划分的难度,便于计算结果收敛,对于倒角工艺塑性变形量取挤入端、挤出端倒角外圆处的平均值;对于铰孔工艺,塑性变形量取挤入端、挤出端孔壁表面的平均值。去除部分材料的网格划分如图 6 所示,单元类型为 8 节点六面体减缩积分单元(C3D8R)。

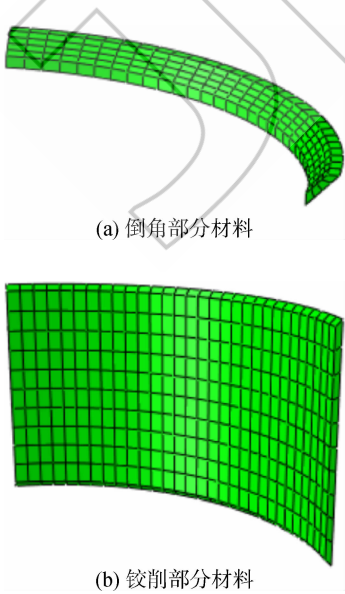


图 6 去除部分材料网格

Fig. 6 Mesh of the removed part materials

本文研究了倒角尺寸、孔挤压-倒角顺序对周向残余应力的影响,建立了 5 种尺寸的 45°倒角孔结构,初始倒角 C 值取 0、0.1、0.2、0.3、0.5 mm,倒角最终尺寸为 0.5 mm。在研究孔挤压-倒角顺序时,需排除挤入、挤出端倒角顺序对模拟结果的影响。 C_0 -CE- $C_{0.5}$ (代表初始无倒角-孔挤压强化-倒角尺寸 0.5 mm 的工艺过程,以下类似表示)模型的挤入-挤出(代表先对试件挤入端倒角,后对挤出端倒角,以下类似表示)、挤出-挤入倒角顺序得到周向残余应力分布如图 7 所示。可以看出,挤入、挤出端的倒角顺序不影响孔边的周向残余应力分布。因此,接下来的模拟时均采用挤入-挤出的倒角顺序。

挤压强化后孔部位一般需要通过铰削工艺修正轮廓,单边铰削量值通常较小。但为了更直观对比较孔的影响,本文在模拟时适当增大单边铰削量,分别取单边铰削量为 0.05、0.1 mm,并与未铰削的模型进行对比。

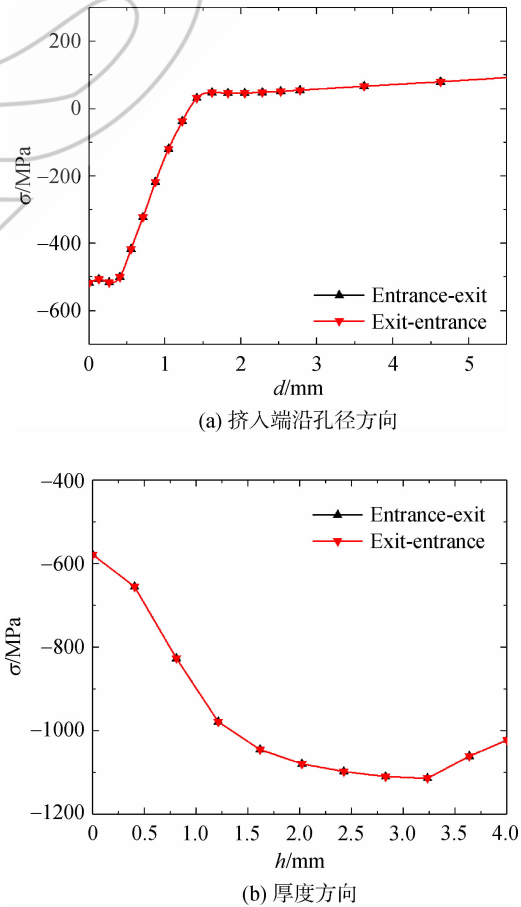


图 7 不同倒角顺序的残余应力分布对比

Fig. 7 Comparison of residual stress distribution in different chamfering order

2 孔挤压强化工艺过程影响研究

2.1 倒角尺寸

数值模拟分析了 0、0.1、0.2、0.3 mm 和 0.5 mm 共 5 组倒角尺寸对周向残余应力的影响,如图 8 所示。由模拟结果可知,①在挤入端沿孔径方向,随着倒角尺寸的增大残余压应力深度层不断减小,相应的最小残余压应力绝对值也不断减小;但当倒角尺寸为 0、0.1、0.2 mm 时得到的最小残余压应力值基本相等。②在挤入端孔边, $C_{0.1}$ 、 $C_{0.2}$ 模型的残余应力分别比 C_0 降低了 146、44 MPa,说明与芯棒过盈量相近的初始倒角尺寸对孔边强化效果有利。③在挤入端沿孔径向 0.5 mm 深度范围内,残余压应力在 $C_{0.1}$ 模型中为最小, C_0 次之, $C_{0.2}$ 最大。这说明挤压强化时,当初始倒角尺寸小于芯棒过盈量,材料的挤压更充分;倒角会使挤压时的接触更充分,有利于提高强化效果。④在孔壁表面沿厚度方向,残余应力随着初始倒角尺寸的增大而减小。结合图 8(a)、图

8(b)可知,当倒角尺寸大于过盈量时,倒角表面会因孔壁挤压充分、孔边挤压不充分而引入明显的残余应力梯度,使孔壁挤入端的残余应力值整体处于较大水平。

根据以上分析可知,倒角尺寸会影响 GH4169 高温合金的孔挤压强化效果。与芯棒过盈量相近的初始倒角利于在孔边危险位置获得更小的残余压应力;但大于过盈量的初始倒角会在挤入端孔壁厚度方向上引入较大的应力梯度。因此,为有效提高结构的疲劳寿命,可在挤压强化前加工小于芯棒过盈量的初始倒角。

2.2 孔挤压-倒角顺序

以最终倒角尺寸 0.5 mm 的孔挤压模型为对象,研究孔挤压-倒角顺序对孔边周向残余应力分布的影响,模型初始倒角尺寸 C 分别为 0、0.1、0.2、0.3、0.5 mm。由模拟结果(见图 9)可知,①在挤入端沿孔径方向,采用孔挤压- $C_{0.5}$ 的工艺顺序可在孔边约 1 mm 范围内获得更小残余压应力,残余应力大小与初始倒角尺寸有关。②在孔壁表面沿厚度方向,孔挤压-倒角顺序主要影响挤入端、挤出端 1 mm 范围内的周向残余应力分布,初始倒角的尺寸对挤入端的影响大于挤出端。③当初始倒角尺寸不为 0 且逐渐增大时,残余应力在挤入端孔边深度方向及孔壁厚度方向上均逐渐增大。这反映了当倒角尺寸增大时,材料未充分挤压强化会带来抗疲劳性能逐渐削弱。④对于初始倒角尺寸小于芯棒过盈量的模型, $C_{0.1}$ 在挤入端孔边径向深度约 0.2 mm 内获得的残余应力极小值较 C_0 降低了 8% 左右;在厚度方向 0~0.5 mm 的孔壁表面, $C_{0.1}$ 的残余压应力平均比 C_0 降低了 20%。⑤与 $C_{0.5}$ -CE 模型相比,虽然在挤入端厚度方向上 $C_{0.1}$ 得到的残余应力提高了 2% 左右,但在其挤出端附近残余应力分布更均匀,且不

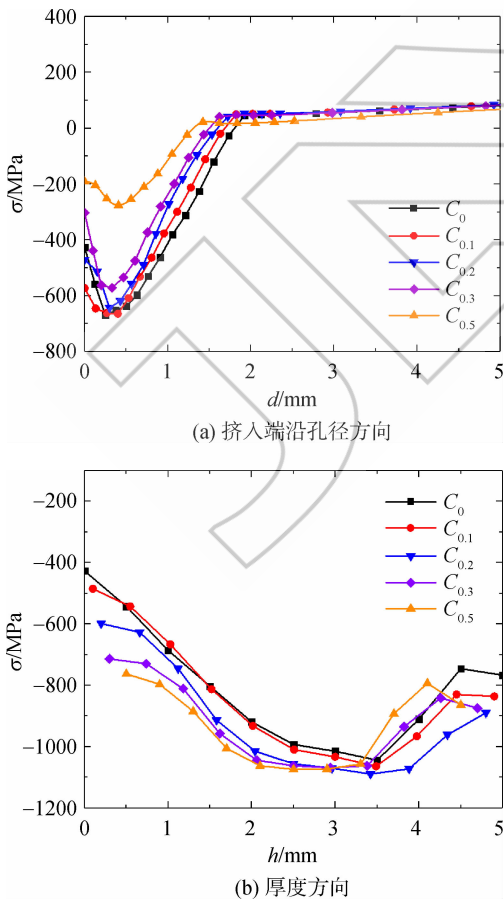
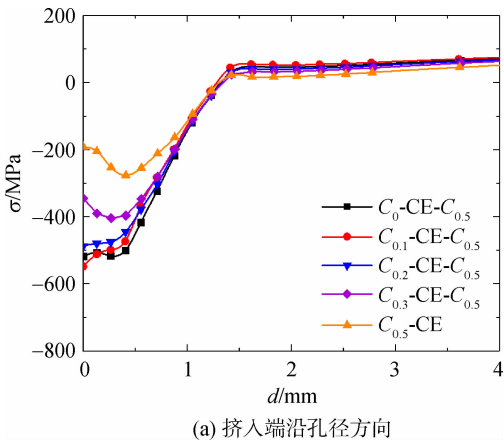


图 8 不同倒角尺寸的残余应力分布
Fig. 8 Residual stress distribution of different chamfering sizes



(a) 挤入端沿孔径方向

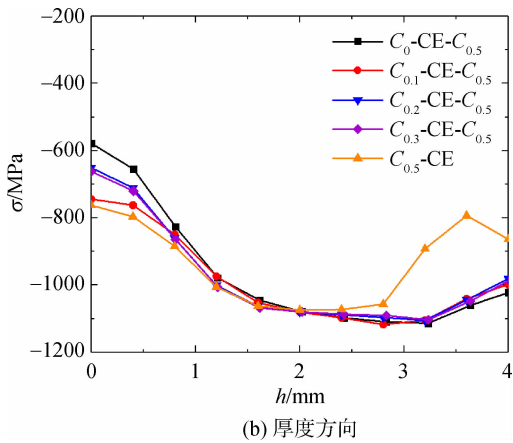


图 9 不同挤压-倒角顺序的残余应力分布对比
Fig. 9 Comparison of residual stress distribution in different CE-chamfering order

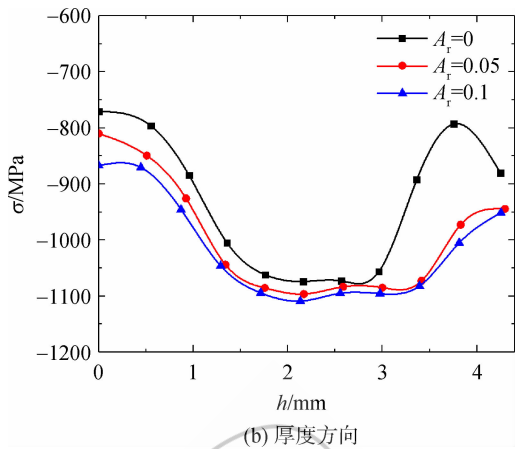


图 10 铰孔前后的残余应力分布对比
Fig. 10 Comparison of residual stress distribution before and after reaming

会出现残余应力明显增大的现象。

根据以上分析可知,采用挤压-倒角至最终值 0.5 mm 的顺序、挤压前初始倒角尺寸应小于芯棒的过盈量可以获得更有利的残余应力分布。

2.3 铰削量

利用最终倒角尺寸 0.5 mm 的孔挤压模型研究修正轮廓范围内铰削量对周向残余应力的影响,数值模拟结果如图 10 所示。可以看出,①在挤入端沿孔径方向,铰削使得残余应力重新分布。重新分布后得到的最小残余压应力和最大残余拉应力均减小,其变化量与铰削量成正比。②当铰削量 A_r 为 0.05 mm 时,挤入端孔边倒角外圆处附近残余压应力从 -191 MPa 增加至 -173 MPa,会给挤压强化效果带来不利影响;而当铰削量增大至 0.1 mm 时,残余压应力值减小为 -187 MPa,但此时孔壁残余压应力层去除较多,亦不利于提高抗疲劳性能。③在孔壁表面沿厚度方向,铰削会使得残余应力减小,其变化量与铰削量成正比。此外,铰削会明显改善挤出端 1 mm 残余

应力明显增大导致的应力梯度。

孔边挤入端为危险位置,且残余应力极小值通常在孔边较小深度范围内取得,故铰削会削弱孔挤压强化效果。对于必须进行轮廓修正的孔,铰削量不宜选取过大以免去除残余应力较小的部分材料,给疲劳寿命带来不利影响。

3 结 论

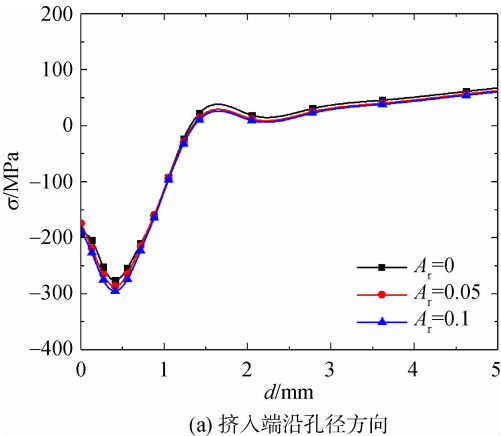
1) 倒角尺寸会影响 GH4169 孔挤压强化效果,小于芯棒过盈量的初始倒角利于在挤入端孔边及孔壁获得更小的残余应力,从而更利于提高抗疲劳性能。

2) 与 $C_{0.5}$ -孔挤压的工艺顺序相比,采用孔挤压- $C_{0.5}$ 工艺顺序可在 GH4169 平板试件孔边获得更有利的残余应力分布。同时,挤压前初始倒角的尺寸小于芯棒过盈量可获得更有利的残余应力分布。

3) 修正轮廓范围选取的铰削量对 GH4169 挤压后残余应力分布的影响较小。但铰孔可使挤入端倒角处残余应力的增大,或大量去除残余压应力值较小的部分材料,给强化效果造成不利影响。综合考虑后,在实际工艺实施时应尽量避免挤压强化后的铰孔处理,或者根据孔边应力与应力层的综合影响确定合理的铰削量。

参考文献:

[1] 杜金辉,邓群,曲敬龙,等.我国航空发动机用 GH4169 合金现状与发展[C]//第八届(2011)中国钢铁年会论文集.北京:中国金属学会,2011:1-5.
[2] FU Yucan,GE Ende,SU Honghua,et al. Cold expansion technology of connection holes in aircraft structures;a re-



- view and prospect[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(4): 961-973.
- [3] 陈清良, 葛恩德, 陈雪梅, 等. 冷挤压抗疲劳制造技术在钛合金构件中的应用[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(6): 57-60.
- CHEN Qingliang, GE Ende, CHEN Xuemei, et al. Application of cold expansion anti-fatigue manufacture technique in titanium alloy structures[J]. Machine Building and Automation, 2017, 46(6): 57-60. (in Chinese)
- [4] LIU Jun, SHAO Xiaojun, LIU Yongshou, et al. Effect of cold expansion on fatigue performance of open hole. [J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 477(1): 271-276.
- [5] 王欣, 胡仁高, 胡博, 等. 孔挤压对于高温合金 GH4169 孔结构高温疲劳性能的影响[J]. 航空动力学报, 2017, 32(1): 89-95.
- WANG Xin, HU Rengao, HU Bo, et al. Effect of hole-expansion on high-temperature fatigue property of GH4169 superalloy hole structure[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(1): 89-95. (in Chinese)
- [6] JANG J S, DAVE K, CHO M Y. The effect of cold expansion on the fatigue life of the chamfered holes[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2008, 130(3): 1-7.
- [7] 侯帅, 朱有利, 王燕礼, 等. 孔边倒角对直接芯棒孔冷挤压残余应力场的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2015, 38(3): 89-92.
- HOU Shuai, ZHU Youli, WANG Yanli, et al. Effects of chamfering on residual stress distribution of directly cold expanded mandrel hole[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2015, 38(3): 89-92. (in Chinese)
- [8] 何世平, 张曦, 伍小平. 铰孔和疲劳对冷挤压孔周残余应力的影响[J]. 实验力学, 1996, 11(4): 463-467.
- HE Shiping, ZHANG Xi, WU Xiaoping, et al. The influence of reaming and fatigue on the residual stress around cold-expanded holes[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1996, 11(4): 463-467. (in Chinese)
- [9] MAXIMOV J T, DUNCHEVA G V, GANEV N, et al. Modeling of residual stress distribution around fastener holes in thin plates after symmetric cold expansion[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2014, 36: 355-369.
- [10] YUAN Xin, YUE Zhufeng, WEN Shifeng, et al. Numerical and experimental investigation of the cold expansion process with split sleeve in titanium alloy TC4[J]. International Journal of Fatigue, 2015, 77: 78-85.
- [11] LIU Yongshou, SHAO Xiaojun, LIU Jun, et al. Finite element method and experimental investigation on the residual stress field and fatigue performance of cold expansion hole[J]. Materials and Design, 2010, 31(3): 1208-1215.
- [12] 朱有利, 侯帅, 王燕礼, 等. 芯棒锥面结构对孔冷挤压强化残余应力场的影响. [J]. 材料科学与工艺, 2015, 23(4): 87-92.
- ZHU Youli, HOU Shuai, WANG Yanli, et al. Effects of cone surface profile of mandrel on residual stress distribution of cold expansion strengthening of hole[J]. Materials Science and Technology, 2015, 23(4): 87-92. (in Chinese)
- [13] BALTACH A, DJEBLI A, BENDOUBA M, et al. Numerical analysis and optimization of the residual stresses distribution induced by cold expansion technique[J]. Fracture and Structural Integrity, 2018, 12(46): 252-265.
- [14] 王幸, 徐武, 张晓晶, 等. TC4 板冷挤压强化寿命预测与试验验证[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(8): 1610-1618.
- WANG Xing, XU Wu, ZHANG Xiaojing, et al. Numerical prediction and experimental verification of fatigue life of TC4 plate strengthened by cold expansion[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(8): 1610-1618. (in Chinese)
- [15] HUANG Yongjie, GUAN Zhidong, LI Haitao, et al. Effects of chamfering, cold expansion, bolt clamping and their combinations on fatigue life of aluminum-lithium alloy single plate[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(1): 1-13.
- [16] 何志明, 张晓晶, 刘天琦, 等. 300M 钢耳片孔挤压强化全过程有限元模拟[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(4): 783-791.
- HE Zhiming, ZHANG Xiaojing, LIU Tianqi, et al. Numerical simulation of whole process of cold expansion in 300M steel lug[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(4): 783-791. (in Chinese)
- [17] LIU Hui, HU Dianyin, WANG Rongqiao, et al. Experimental and numerical investigations on the influence of cold expansion on low cycle fatigue life of bolt holes in aeroengine superalloy disk at elevated temperature[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 132: 105390. 1-105390. 11.
- [18] 靳盛哲, 胡殿印, 刘辉, 等. 镍基高温合金 GH4169 孔挤压强化数值模拟方法及参数影响[J]. 航空动力学报, 2020, 35(1): 30-40.
- JIN Shengzhe, HU Dianyin, LIU Hui, et al. Numerical simulation method and investigation of cold expansion processing parameters of nickel-based superalloy GH4169[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(1): 30-40. (in Chinese)
- [19] 中国金属学会高温材料分会. 中国高温合金手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [20] RAHMAN S. Accuracy of numerical methods in determination of residual stresses due to cold expansion in metallic materials[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2011, 64(4/5): 465-469.
- [21] 杜旭, 张腾, 何廷宇, 等. 孔冷挤压有限元仿真中的铰削分界面位置确定方法[J]. 航空学报, 2019, 40(4): 263-275.
- DU Xu, ZHANG Teng, HE Tingyu, et al. Determining position of reaming interface in cold expansion FEM simulation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(4): 263-275. (in Chinese)