

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.04.015

滚压力对 GH4169 高温合金螺栓圆角滚压加工的影响

马震宇¹,徐锋¹,漆昌恒¹,何坤^{2,3},樊建军^{2,3},左敦稳¹

(1. 南京航空航天大学,江苏 南京 210016;

2. 河南航天精工制造有限公司,河南 信阳 464099;

3. 河南省紧固连接技术重点实验室,河南 信阳 464099)

摘要:通过滚压力单因素实验,研究滚压力的变化对 GH4169 高温合金螺栓圆角滚压强化后残余应力和疲劳寿命的影响。利用 ABAQUS 结合 Fe-safe 建立 GH4169 高温合金螺栓的圆角滚压和拉-拉疲劳有限元模型,并通过实验结果对模型进行有效性验证。实验结果表明:螺栓头下圆角处经滚压强化后疲劳寿命显著提高,实测寿命可由未滚压状态的 5.90 万次提升至 90.00 万次,头下圆角处寿命可提升至 598.77 万次。

关键词:GH4169 螺栓;圆角滚压;仿真分析;残余应力;疲劳寿命

中图分类号:TB302.3 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)04-0083-04

Effect of Rolling Pressure on Fillet Rolling of GH4169 Superalloy Bolt

MA Zhenyu¹, XU Feng¹, QI Changheng¹, HE Kun^{2,3}, FAN Jianjun^{2,3}, ZUO Dunwen¹

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Henan Aerospace Precision Machining Co., Ltd., Xinyang 464099, China;

3. Key Laboratory of Henan Fastening Connection Technology, Xinyang 464099, China)

Abstract: This paper studies the influence of rolling pressure on the residual stress and fatigue life of GH4169 superalloy bolt after fillet rolling strengthened by single factor experiment of rolling pressure. The finite element model of fillet rolling and tension-tension fatigue of GH4169 superalloy bolts is established by ABAQUS combined with Fe-safe, and the model's validity is verified by experiment results, which show that the fatigue life of the lower fillet of the bolt head is significantly improved after rolling strengthening, its measured life can be increased from about 59,000 times in the non-rolling state to about 900,000 times, and the life at the fillet of the head can be increased to about 5,987,700 times.

Keywords: GH4169 bolts; fillet rolling; simulation analysis; residual stress; fatigue life

0 引言

GH4169 高温合金是一种镍基高温合金,主要应用温度范围为-253℃~650℃。该合金因强度高且能够在高温复杂条件下长期可靠服役,被广泛应用于发动机和航空航天连接用螺栓^[1-3]。GH4169 螺栓是各种航空航天装备的关键基础零件,主要起紧固连接作用,工作中受变化的拉力载荷影响较大,因此,其质量对装备的总体寿命有重要影响。据统计,螺栓的主要失效形式是疲劳断裂,在螺栓的疲劳破坏中从螺栓头下圆角处断裂的约占 60%,从螺纹处断裂约占 25%,从螺纹与杆部连接处断裂约占 15%^[4-5]。由此可见从螺栓头下圆角处断裂是螺栓疲劳断裂的主要位置之一,圆角处的强度会直接影响到螺栓的机械强

度^[6-7]。螺栓头下圆角是应力集中区,通过滚压强化可以延缓应力集中区裂纹的萌生和扩展,提高螺栓的抗疲劳强度^[8-9]。但目前企业对螺栓头下圆角的滚压通常由工人通过经验手工操作,滚压参数不确定性大,后续检测成本高且周期长,难以得到普遍性规律和最优工艺参数,因此采用有限元仿真成为一种开展深入研究的有效手段^[10-13]。

本文利用 ABAQUS 结合 Fe-safe 建立 GH4169 高温合金螺栓的圆角滚压和拉-拉疲劳有限元模型,并通过实验验证了模型有效性。通过验证后的模型,选用不同的滚压力获得其对应的残余应力和疲劳寿命,将工艺参数、残余应力和疲劳寿命联系起来,分析其内在规律。

基金项目:河南省紧固连接技术重点实验室开放课题项目

第一作者简介:马震宇(1997—),男,河南焦作人,硕士研究生,研究方向为现代加工技术,295611635@qq.com。

1 实验方案

1.1 螺栓圆角滚压实验方案

螺栓样品为 GH4169 普通螺纹六角头螺栓,标准号为 Q/Dy1079—2012,规格为 M6×42-A,头下圆角 $R=0.6\text{ mm}$ 。

通过前期研究发现,滚压工艺参数中滚压力对残余应力和疲劳寿命的影响最为显著。因此设计滚压力单因素实验如表 1 所示,深入探究滚压力对滚压强化结果的影响。为减小实验误差,每组均选用 5 个样件进行实验。工艺参数为:滚压转速为 300 r/min,滚压时间为 2.5 s,滚压轮角度为 45° 。

表 1 单因素(滚压力)实验表 单位:N

序号	滚压力	序号	滚压力
1	50	9	600
2	100	10	750
3	150	11	1 250
4	200	12	1 750
5	250	13	2 250
6	300	14	2 750
7	375	15	3 250
8	450	16	3 750

1.2 残余应力检测和螺栓疲劳试验方案

本试验中,残余应力采用 X-350A 型 X 射线应力测定仪进行检测。测量方法选用侧倾固定 Ψ 法,定峰方法选用交相关法,电压选择 25 kV,电流选择 7 mA。本文中所述残余应力均为轴向残余应力。

拉-拉疲劳试验按 GJB715.30A—2002 标准在疲劳试验机上进行,拉-拉疲劳拉伸的最大载荷为 13.35 kN,最小载荷为 1.33 kN,是最大载荷的 10%,平均载荷为 7.34 kN,交变载荷为 6.01 kN,加载频率为 140 Hz。

2 有限元模型建立

2.1 螺栓圆角滚压有限元模型

滚压轮尺寸如图 1(a)所示,滚压轮圆角 $R=0.55\text{ mm}$,滚压轮三维图如图 1(b)所示。滚压轮材料为高强度钢,滚压过程中变形量微小,可假设为不发生形变,简化为刚体。实际滚压过程中的装配示意图如图 2(a)所示,有限元模型如图 2(b)

所示,滚压轮与螺栓的摩擦因数为 0.05。因本文主要的研究部位为螺栓圆角部位,所以忽略了螺栓的螺纹结构。

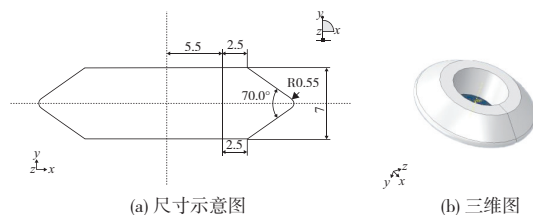


图 1 滚压轮尺寸及三维图

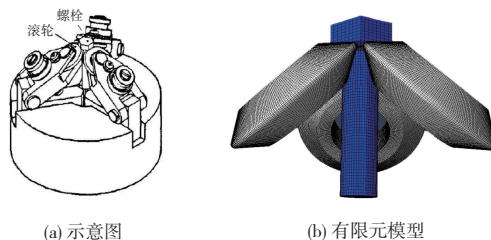


图 2 滚压装配示意图和有限元模型

本文所采用的 GH4169 高温合金螺栓的材料密度为 8.24 g/cm^3 ,弹性模量为 200 GPa,泊松比为 0.3,屈服强度为 1 050 MPa,抗拉强度为 1 350 MPa,延伸率为 20%,真应力-真应变数据如表 2 所示。滚压工艺参数中滚压力的选择范围为 50~3 750 N,滚压时间的选择为 2.5 s,滚压转速选择为 300 r/min,滚压轮角度为 45° 。

表 2 GH4169 高温合金真应力-真应变数据

真应变	0	0.05	0.10	0.15
真应力/MPa	1 050	1 169	1 258	1 320

在螺栓网格划分上,通过对螺栓整体切分以便可以采用六面体网格进行划分,网格划分结果如图 3 所示,其中剖面网格如图 3(a)所示,主视图网格如图 3(b)所示,俯视图网格如图 3(c)所示,仰视图网格 3(d)所示。

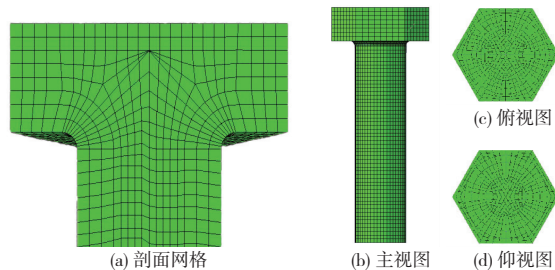


图 3 螺栓网格划分

2.2 螺栓疲劳仿真模型

疲劳试验示意图如图 4(a) 所示,根据疲劳试验建立的拉-拉疲劳仿真模型如图 4(b) 所示。通过将螺栓滚压后的残余应力场作为疲劳仿真的初始应力场,得到经滚压强化后螺栓在一个疲劳周期内的应力变化。最后将仿真结果作为初始条件导入 Fe-safe 求解疲劳寿命。

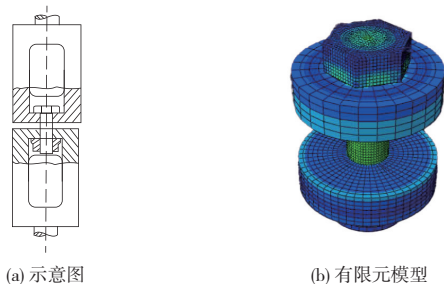


图 4 疲劳试验示意图和有限元模型

3 实验结果及分析讨论

3.1 实验结果及有限元模型验证

经过滚压实验和疲劳试验,得到未滚压螺栓的疲劳寿命平均值为 5.90 万次,疲劳断裂位置均为螺栓头下圆角处;得到滚压强化后(分别以序号 4 和序号 8 为例)螺栓的疲劳寿命平均值分别为 17.98 万次和 89.28 万次,疲劳断裂位置也均为螺栓头下圆角处。

通过有限元分析,得到未经滚压螺栓的疲劳有限元仿真结果如图 5(a) 所示,疲劳寿命最小处为螺栓头下圆角,最小疲劳寿命为 5.90 万次;序号 4 和序号 8 的有限元仿真结果分别如图 5(b) 和图 5(c) 所示,疲劳寿命最小处也为螺栓头下圆角,最小疲劳寿命分别为 18.84 万次和 91.41 万次。

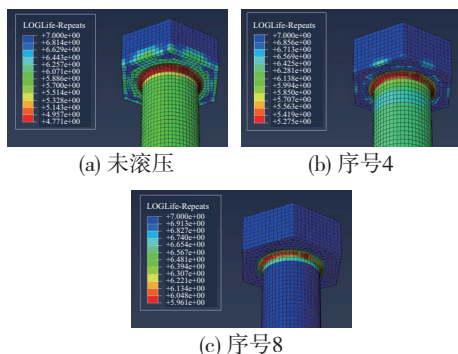


图 5 疲劳有限元仿真结果

全部实验和仿真结果如表 3 所示。通过将实测结果和仿真结果对照,发现除序号 1、序号 2 和

序号 3 外,采用本模型计算的疲劳寿命有限元仿真结果与实测值接近,且误差小于 5%,由此可验证本模型的有效性。序号组 1、序号组 2 和序号组 3 误差超过 5% 的原因分别为滚压前螺栓前序加工工序产生的残余应力干扰。

表 3 单因素(滚压力)实验结果

序号	残余应力 实测值 /MPa	残余应力 仿真值 /MPa	疲劳寿命 实测值/ 万次	疲劳寿命 仿真值/ 万次
1	-8	-12	7.92 ^①	8.71 ^①
2	-15	-18	9.55 ^①	10.15 ^①
3	-27	-32	11.92 ^①	12.83 ^①
4	-42	-48	17.98 ^①	18.84 ^①
5	-53	-58	20.34 ^①	21.15 ^①
6	-70	-75	23.56 ^①	24.23 ^①
7	-89	-93	46.77 ^①	47.16 ^①
8	-120	-126	89.28 ^①	91.41 ^①
9	-175	-183	>90.00 ^②	299.89 ^①
10	-224	-219	>90.00 ^②	598.77 ^①
11	-309	-314	>90.00 ^②	501.63 ^①
12	-382	-398	>90.00 ^②	412.34 ^①
13	-471	-490	>90.00 ^②	324.55 ^①
14	-532	-523	>90.00 ^②	231.43 ^①
15	-600	-623	>90.00 ^②	166.73 ^①
16	-748	-768	>90.00 ^②	95.66 ^①

注①疲劳拉伸断裂位置为螺栓头下;②疲劳拉伸断裂位置为螺栓螺纹。

3.2 残余应力分析

为探究螺栓滚压强化工艺参数中滚压力对螺栓头下圆角处残余应力的影响,选择固定滚压转速为 300 r/min 和滚压时间为 2.5 s,对滚压力开展单因素实验,实验结果和仿真结果分别见表 3 中第 2 列和第 3 列。滚压力变化对螺栓头下圆角处残余应力的影响如图 6 所示。

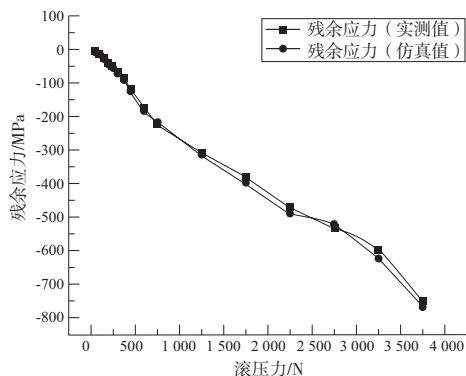


图 6 滚压力对残余应力的影响

通过图 6 可知,经过滚压后螺栓头下圆角处残余应力实测值与仿真值存在一定差异,但差异较小且总体变化趋势一致。经过滚压后螺栓头下圆角处残余应力均为负值,表现为残余压应力,且随滚压力的增大残余压应力也不断增大。在滚压力超过 750 N 前,滚压力的变化对残余压应力的影响较显著;滚压力在 750~3 250 N 之间时,滚压力的变化对残余压应力的影响减弱;在滚压力超过 3 250 N 后,滚压力的变化对残余压应力的影响程度又有所增加。

通过有限元仿真深入研究不同滚压力下螺栓头下圆角处沿深度方向的路径和残余应力分布分别如图 7(a) 和图 7(b) 所示。从图 7 中可以发现:螺栓圆角滚压位置的残余应力为压应力,随滚压力的增加,螺栓的最大压应力也随之增加;随着深度增加,压应力逐渐减小并转变为拉应力。从图 7 中还可以发现:当滚压力较小时(滚压力不大于 200 N),螺栓深度路径方向上的最大残余应力所在位置为圆角表面下约 0.05 mm 处;随滚压力增大(滚压力大于 200 N 且不大于 1 750 N),最大残余应力所在位置转移至圆角表面;随滚压力进一步增大,最大残余应力所在位置又转移至圆角表面以下。通过实验验证发现:仿真数据和实验结果总体趋势一致,规律变化拐点滚压力值存在一定差距,但差距较小,在可控范围内。拐点值存在差距的原因一方面是由于仿真模型存在一定误差,另一方面是由于滚压设备对滚压力控制精确度不够(本刊为黑白印刷,相关疑问请咨询作者)。

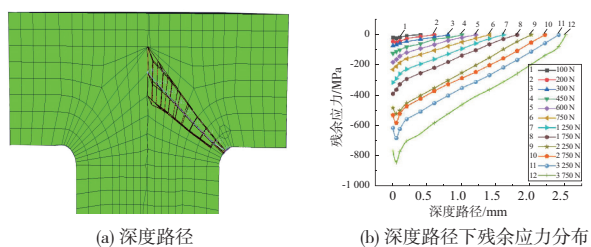


图 7 不同滚压力下螺栓头下圆角处残余应力分布

3.3 疲劳寿命分析

通过疲劳试验得到螺栓的疲劳寿命实测值见表 3 第 4 列,发现随滚压力的增大,螺栓疲劳断裂的位置由螺栓头下圆角处转变为螺栓螺纹处。因试验用螺栓螺纹处的最大疲劳寿命约为 90.00 万次,所以当头下圆角处疲劳寿命大于 90.00 万次后,无法再通过疲劳寿命实测值反映螺栓头下圆角处的疲劳寿命。此时,可通过验证后的有限元

模型进行仿真分析得到螺栓的疲劳寿命仿真值,对螺栓头下圆角处寿命进行预测,结果见表 3 第 5 列。通过以上数据,得到滚压力对螺栓疲劳寿命的影响如图 8 所示。

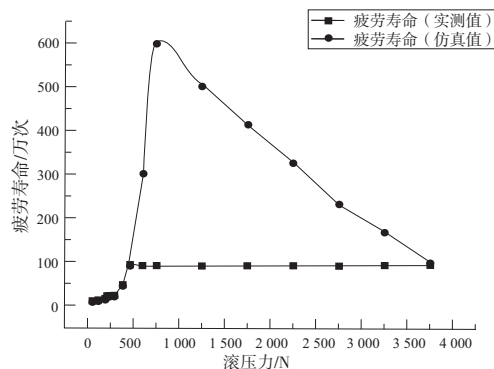


图 8 滚压力对疲劳寿命的影响

从图 8 中可以发现,螺栓疲劳拉伸结果从断螺栓头下到断螺栓螺纹的临界滚压力约为 450 N。随滚压力的增加,螺栓头下圆角处的疲劳寿命迅速增加,并在滚压力约为 750 N 时达到最大值,约为 598.77 万次,头下圆角处的疲劳寿命与滚压前相比提升了近 100 倍。但受限于螺栓螺纹的疲劳寿命,螺栓整体的疲劳寿命实测值仅为 90.00 万次,与滚压前相比仅提升了近 15 倍。随着滚压力的进一步增加,螺栓的疲劳寿命又开始迅速下降。

通过综合分析螺栓头下圆角残余应力和塑性变形情况,可知产生此疲劳寿命随滚压力变化先增加后减小现象的原因为:随滚压力的增加,螺栓头下圆角处的残余压应力增大,残余压应力能够有效地抵消疲劳拉伸产生的载荷,因此疲劳寿命增加;但当滚压力过大,滚压会使螺栓头下圆角处的塑性变形量超差,导致圆角处过渡不平滑而产生较大的应力集中,从而使疲劳寿命减小。

4 结语

1) GH4169 高温合金螺栓头下圆角处经滚压强化后疲劳寿命显著提高,实测寿命可由未滚压状态的 5.90 万次提升至 90.00 万次,螺栓头下圆角处寿命可提升至 598.77 万次,滚压工艺可显著提高螺栓的疲劳寿命。

2) 当滚压转速为 300 r/min 和滚压时间为 2.5 s 时,随滚压力的增大残余压应力也不断增大。在滚压力超过 750 N 前,滚压力的变化对残余压应力的影响较显著;滚压力在 750~3 250 N 之间

(下转第 122 页)

- [5] 张华彪. 转子突加不平衡的碰摩响应[J]. 动力学与控制学报, 2017, 15(6): 558-562.
- [6] ZHANG H B, CHEN Y S, LI J. Bifurcation on synchronous full annular rub of rigid-rotor elastic-support system[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2012, 33(7): 865-880.
- [7] 张华彪, 陈予恕. 非线性转子的反向全周碰摩响应[J]. 振动与冲击, 2013, 32(10): 84-90.
- [8] 张力, 马艳红, 梁智超, 等. 转子系统碰摩约束模型与振动响应分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(9): 1631-1637.
- [9] MA H, YIN F L, TAI X Y, et al. Vibration response analysis caused by rubbing between rotating blade and casing [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(5): 1983-1995.
- [10] YU K, MA H, HAN H Z, et al. Second order multi-synchrosqueezing transform for rub-impact detection of rotor systems [J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 140: 321-349.
- [11] MA H, LU Y, WU Z, et al. Vibration response analysis of a rotational shaft - disk - blade system with blade-tip rubbing [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2016, 107: 110-125.
- [12] MA H, YIN F L, WU Z Y, et al. Nonlinear vibration response analysis of a rotor-blade system with blade-tip rubbing[J]. Nonlinear Dynamics, 2016, 84(3): 1225-1258.
- [13] LI B Q, MA H, JIN Z, et al. Rotating Blade-Casing Rubbing Simulation Considering Casing Flexibility [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 148: 118-134.
- [14] SUN C Z, CHEN Y S, HOU L. Nonlinear dynamical behaviors of a complicated dual-rotor aero-engine with rub-impact[J]. Archive of Applied Mechanics, 2018, 88(8): 1305-1324.
- [15] FRISWELL M I, PENNY J E T, GARVEY S D, et al. Dynamics of Rotating Machines [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2010.
- [16] 杨喜关. 航空发动机反向旋转双转子系统及中介轴承动力特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [17] 邓四二, 贾群义, 薛进学. 滚动轴承设计原理 [M]. 2 版. 北京: 中国标准出版社, 2014: 132-136.
- [18] 闻邦椿, 武新华, 丁千. 等. 故障旋转机械非线性动力学的理论与试验 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.

收稿日期: 2023 - 08 - 30

(上接第 86 页)

时, 滚压力的变化对残余压应力的影响减弱; 在滚压力超过 3 250 N 后, 滚压力的变化对残余压应力的影响程度又有所增加。

3) 当滚压转速为 300 r/min 和滚压时间为 2.5 s 时, 螺栓疲劳拉伸结果从断螺栓头下到断螺栓螺纹的临界滚压力值约为 450 N。随滚压力的增加, 螺栓头下圆角处的疲劳寿命迅速增加, 并在滚压力约为 750 N 时达到最大值。但随着滚压力的进一步增加, 螺栓的疲劳寿命又开始迅速下降。

参考文献:

- [1] 钟丽琼. 表面形变强化残余应力场对 Inconel718 高温合金高周疲劳性能的影响规律研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
- [2] 廖英岚. 激光选区熔化成形 GH4169 高温合金的残余应力研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [3] YANG J, LIU D X, ZHANG X H, et al. The effect of ultrasonic surface rolling process on the fretting fatigue property of GH4169 superalloy [J]. International Journal of Fatigue, 2020, 133: 105373.
- [4] 王勉, 王自勤. Tc16 螺栓头下圆角滚压工艺参数与疲劳强度研究 [J]. 贵州工业大学学报 (自然科学版), 2008, 37(5): 108-110.
- [5] 韩坤鹏, 张定华, 姚倡锋, 等. 滚压强化表面状态特征的疲劳演化及抗疲劳机制研究进展 [J]. 航空学报, 2021, 42(10): 524302.
- [6] HÖNNIGE J, SEOW C E, GANGULY S, et al. Study of residual stress and microstructural evolution in as-deposited and inter-pass rolled wire plus arc additively manufactured Inconel 718 alloy after ageing treatment [J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 801: 140368.
- [7] UNGLAUB J, HENSEL J, WIMPORY R, et al. Analysis of residual stress state in deep-rolled HT-bolts [C] // Materials Research Proceedings Residual Stresses, [S. l. : s. n.], 2018. .
- [8] 周新建, 程树, 肖乾. 铁路轨检车轴箱螺栓强度分析 [J]. 机械制造与自动化, 2016, 45(2): 77-80.
- [9] REGGIANI B. Experimental investigation on the effect of shot peening and deep rolling on the fatigue response of high strength fasteners [J]. Metals, 2019, 9(10): 1093.
- [10] 黄晓东, 杜爱民. 基于 ABAQUS 的曲轴圆角滚压数值分析 [J]. 科技信息 (学术研究), 2007(30): 353-354.
- [11] 黄稳, 杜伟, 凡志磊, 等. 复合材料结构中螺栓拧紧的有限元仿真研究 [J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(6): 127-131.
- [12] 杨秀芝, 张锐, 王健, 等. 基于 ANSYS 的曲轴圆角滚压特性分析 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2015, 38(9): 1180-1183.
- [13] 袁武华, 邓建伟, 申庆援, 等. 圆角滚压对螺栓残余应力分布及疲劳寿命的影响 [J]. 锻压技术, 2023, 48(1): 108-114.

收稿日期: 2023 - 09 - 15