

文章编号:1001-7372(2024)11-0076-13

冷扩止裂孔修复含 I 型裂纹钢板的 疲劳性能试验

柯 璐^{1,2}, 李友林¹, 李传习^{*1,2}, 陈 正^{1,2}, 陈爱龙¹, 冯 鹏³

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西大学 省部共建特色金属材料与组合
结构全寿命安全国家重点实验室, 广西 南宁 530004; 3. 清华大学 土木工程系, 北京 100084)

摘要: 在面外变形或高应力幅下, 传统止裂孔修复钢结构疲劳裂纹易出现裂纹穿孔发展(即裂纹二次萌生), 导致疲劳加固效果不佳。提出了一种钢结构疲劳裂纹的冷扩止裂孔修复技术, 其原理是通过芯棒对止裂孔进行冷扩以产生孔周残余压应力, 降低孔周疲劳应力水平, 达到延长疲劳寿命的目的。开展了冷扩止裂孔修复含 I 型裂纹钢板的冷扩试验和疲劳试验, 获得了止裂孔冷扩后孔周残余应变的分布规律, 明晰了疲劳荷载作用下冷扩止裂孔孔周残余应变的演化规律, 研究了冷扩率(0%、1%、2%)以及孔尖距(0、5、10 mm)对含 I 型裂纹钢板疲劳性能的影响, 揭示了冷扩止裂孔修复含 I 型裂纹钢板的增寿机理。研究结果表明: 同一孔尖距下, 冷扩率越大, 疲劳寿命提升幅度越大; 提高冷扩率(不超过 2%), 可以扩大孔周残余压应力分布范围, 提升残余压应力水平; 增大孔尖距会削弱冷扩止裂孔修复效果; 冷扩率为 2%、孔尖距为 0 mm 时具有最大疲劳寿命, 相较于孔尖距为 0 mm 的常规止裂孔试件, 试件疲劳总寿命提升了 50.82%。若继续增大冷扩率, 其疲劳寿命将有望提高更多, 提高幅度有待进一步研究。最后, 提出了基于名义 S-N 曲线和疲劳缺口系数的冷扩止裂孔孔周疲劳裂纹萌生寿命预测方法。分析表明: 在双对数坐标系下预测值与试验值吻合较好, 孔尖距为 0 mm 时, 误差在 ±5% 以内; 孔尖距为 5 mm 和 10 mm 时, 误差在 ±20% 以内。

关键词: 桥梁工程; 钢结构; 疲劳性能试验; 冷扩止裂孔; 残余应力; 疲劳加固

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

Experimental Investigation on Fatigue Performance of Cold-expanded Crack-stop Hole Repaired Steel Plates with Type I Cracks

KE Lu^{1,2}, LI You-lin¹, LI Chuan-xi^{*1,2}, CHEN Zheng^{1,2}, CHEN Ai-long¹, FENG Peng³

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China;
2. State Key Laboratory of Featured Metal Materials and Life-cycle Safety for Composite Structures,
Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China; 3. Department of Civil Engineering,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Under out-of-plane deformation or high fatigue stresses, conventional crack-stop hole repair of fatigue cracks in steel structures is susceptible to crack perforation (i. e., secondary crack initiation), thereby resulting in unsatisfactory fatigue strengthening. This study proposes cold-expanded crack-stop hole technology for repairing fatigue cracks in steel structures. This principle involves a cold-expanded crack-stop hole using a mandrel to induce residual compressive

收稿日期: 2024-07-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2600900); 广西科技重大专项(桂科 AA23073017)

作者简介: 柯 璐(1991-), 男, 湖北黄冈人, 副教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: kelu@gxu.edu.cn。

* 通讯作者: 李传习(1963-), 男, 湖南衡阳人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: lichuanxi2@163.com。

stress around the hole, thereby reducing the fatigue stress level and extending the fatigue life. Cold expansion tests of crack-stop holes and fatigue tests were conducted on steel plates with type I cracks. The distributions of residual strain around the hole after cold expansion were obtained, and the evolution of the residual strains during fatigue loading was clarified. The effects of cold expansion rates (0%, 1%, and 2%) and hole-to-crack tip distances (0, 5, and 10 mm) on the fatigue performance of steel plates with type I cracks were investigated, and the life-extending mechanisms for the cold-expanded crack-stop holes were revealed. The results indicate that, for a specified hole-to-crack tip distance, increasing the cold expansion rate can enhance the fatigue life. Increasing the cold expansion rate (not exceeding 2%) can extend the distribution range and value of residual compressive stress around the cold-expanded crack-stop holes. Increasing the hole-to-crack tip distance reduces the improvement of fatigue life by cold-expanded crack-stop holes. The maximum fatigue life can be obtained when the cold expansion rate and the hole-to-crack tip distance are 2% and 0 mm, respectively; Compared with the case of conventional crack-stop hole specimens with a hole-to-crack tip distance of 0 mm, the total fatigue life of the specimens increased by 50.82%. Further increasing the cold expansion rate may potentially enhance the fatigue life, which needs more studies. Finally, a model for predicting the initiation life of fatigue cracks around cold expanded crack-stop holes based on nominal $S-N$ curves and fatigue notch factors was proposed. Analysis results show that the predicted values agree well with experimental results in the log-log coordinate system, particularly when the hole-to-crack tip distance is 0 mm, with an error of $\pm 5\%$; for hole-to-crack tip distances of 5 and 10 mm, the error is $\pm 20\%$.

Keywords: bridge engineering; steel structures; fatigue performance test; cold-expanded crack-stop hole; residual stress; fatigue strengthening

Received 01 July 2024

Funding: National Key Research and Development Program of China (2021YFB2600900); Guangxi Science and Technology Major Program (AA23073017)

* Corresponding author. *E-mail address:* lichuanxi2@163.com.

<https://doi.org/10.19721/j.cnki.1001-7372.2024.11.006>

0 引言

钢结构具有自重轻、跨度大、抗震性好等优点,被广泛应用于公路与铁路桥梁^[1-2]。然而,在车辆循环荷载以及环境等因素作用下,钢结构的疲劳问题十分突出,严重威胁桥梁的服役安全^[3]。研究人员提出了众多钢结构疲劳裂纹修复与加固技术,包括止裂孔法^[4]、气动冲击和超声锤击法^[5]、焊接钢板法^[6]及粘贴 CFRP 补强法^[7-8]等。其中,止裂孔法是一种常用的钢结构疲劳裂纹临时处治技术,具有高效、经济且不影响交通等优势。该方法通过在疲劳裂纹扩展路径上距裂纹尖端一定距离处钻设一个圆孔,以降低裂纹尖端应力集中,达到延缓甚至阻止疲劳裂纹扩展的目的^[4]。然而,止裂孔法的修复效果

主要取决于止裂孔边缘的疲劳裂纹萌生寿命,在面外变形或高应力幅下其止裂效果将大幅度降低^[9]。因此,亟需开发一种更加有效的钢结构疲劳裂纹处治技术。

在航空航天领域,飞机、空间飞行器等结构件之间多采用螺栓和铆钉等方式进行连接,服役期间也面临严重的疲劳问题^[10-11]。为此,研究者们通过冷挤压技术,对连接孔进行扩孔处理来提高结构的疲劳强度。该方法的原理是连接孔在冷挤压处理后,孔周会产生一定范围的残余压应力区域,该残余压应力降低了疲劳荷载(尤其是拉-拉疲劳荷载)下的应力水平,从而提高连接孔的疲劳寿命^[12-13]。受此启发,将该冷挤压技术与止裂孔相结合,提出一种冷扩止裂孔疲劳裂纹修复技术,有望在保持经济及施

工便捷等前提下,更加高效地提升止裂孔修复效果。

冷扩止裂孔在提升金属结构疲劳强度以及延长疲劳寿命方面已得到了有效验证。Pucillo 等^[14]研究了冷扩率 2% 和 4% 下钢轨的疲劳强度,发现冷扩止裂孔延缓了疲劳裂纹的萌生,且冷扩率越高,孔周应力水平越低,增寿效果越好。Faghih 等^[15]开展了含冷扩止裂孔镁合金板的疲劳试验,结果发现,当冷扩率从 0% 提高到 6% 时,疲劳极限从 80 MPa 提升到 150 MPa,并且还证实了 6% 冷扩率具有最佳增寿效果。此外,Burlat 等^[16]研究了冷扩率为 0%~5.58% 时 7475-T7351 铝合金板的疲劳寿命提升效果,结果表明,在 191、300 MPa 名义应力幅下,冷扩率为 5.58% 时,疲劳总寿命相较于未冷扩试件分别提升了 3.2 倍和 1.5 倍,裂纹扩展阶段寿命分别提升了 43 倍和 4.9 倍。可见,冷扩止裂孔对承受低应力幅结构的疲劳延寿效果极佳。另外,在疲劳裂纹萌生寿命预测方面,Wu 等^[17]通过引入疲劳缺口系数 K_f ,结合 $\epsilon-N$ 曲线来预测裂纹萌生寿命,结果表明预测值与试验值吻合较好。王幸等^[18]采用有限元模拟计算了冷扩率为 4% 的钛合金 TC4 中心孔板的孔周残余应力分布,采用弹塑性有限元并结合临界距离法对疲劳寿命进行了预测,发现预测值在 0.5~2.0 倍试验值之内。综上所述,目前有关冷扩止裂孔的研究多聚焦于镁、铝、钛等合金板材的研究,且主要考虑冷扩率的影响。然而,对于含初始疲劳裂纹的钢材,尤其是桥梁钢鲜有研究,疲劳裂纹不同扩展阶段的疲劳作用机理也尚不明确。因此,开展冷扩率和孔尖距(疲劳裂纹尖端到冷扩止裂孔边缘距离)的冷扩止裂孔修复含裂纹钢板结构疲劳试验研究,更加符合钢结构桥梁疲劳裂纹处治的实际情况,具有重要的工程意义。

本文通过含裂纹钢板的止裂孔冷扩试验和疲劳试验,明晰了疲劳加载过程中孔周残余应力的演化规律,掌握了止裂孔冷扩后孔周残余应力的分布情况,揭示了不同冷扩率和孔尖距下 I 型疲劳裂纹钢板的疲劳增寿机理。最后,提出了基于名义应力 $S-N$ 曲线和疲劳缺口系数的冷扩止裂孔周疲劳裂纹萌生寿命预测方法。研究结果可为钢结构桥梁的加固设计和加固后疲劳寿命预测提供参考。

1 试验方案

1.1 试验材料

本试验采用的钢材为 Q345qD 桥梁钢。参考《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》(GB/

T 228.1—2010),制备了 4 个狗骨拉伸试件,并在电子万能试验机上开展静力拉伸试验,加载速率为 $0.3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,获得的工程应力-应变关系如图 1 所示。结果表明,Q345qD 的弹性模量为 206 GPa,屈服强度为 373 MPa,拉伸强度为 475 MPa,断裂延伸率为 31.5%。此外,冷扩芯棒采用 Cr12MoV 模具钢,该钢属于莱氏体钢,具有优异的淬透性、淬硬性和耐磨性。为防止冷扩过程对芯棒造成磨损,采用二次淬火工艺来提高其硬度。

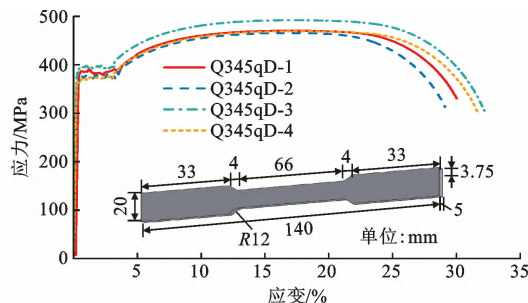


图 1 Q345qD 的工程应力-应变关系

Fig. 1 Engineering Stress-strain Curves of Q345qD

1.2 试件设计

参考《金属材料疲劳试验疲劳裂纹扩展方法》(GB/T 6398—2017),疲劳试件采用中心裂纹拉伸试件(Center Crack Tensile, CCT),试件的几何尺寸如图 2(a)所示。疲劳试件的所有缺口均采用线切割进行加工,试样的初始裂纹(预制裂纹)长 20 mm,宽 0.2 mm。此外,在中心裂纹两端的裂纹扩展前方钻设了 2 个直径为 10 mm 的止裂孔。本文将冷扩止裂孔边缘到预制裂纹尖端的距离定义为孔尖距 R ,并设置了 0、5、10 mm 三种工况,如图 2(b)所示。采用冷扩芯棒对止裂孔进行扩孔处理,包括冷扩段直径为 10.1、10.2 mm 两种尺寸,如图 3 所示。其目的在于研究不同冷扩率(即止裂孔直径的扩大比例)对疲劳寿命的影响。其中,冷扩率按式(1)进行计算,故直径为 10.1、10.2 mm 分别对应于 1% 和 2% 冷扩率。冷扩率为 0% 则表示未进行冷扩处理。

$$C_r = \frac{D-d}{d} \times 100\% \quad (1)$$

式中: C_r 为冷扩率; D 为冷扩芯棒冷扩段的直径; d 为止裂孔的直径。

本试验共制作了 16 个试件,每种工况进行了 2 次试验以保证试验的可重复性,具体的试件参数如表 1 所示。其中,试件编号以 CXDY- n 方式进行命名,其中 CX 表示冷扩率,DY 表示孔尖距, n 表示试件序号。例如,C0D5-1 为冷扩率为 0%,孔尖距为 5 mm

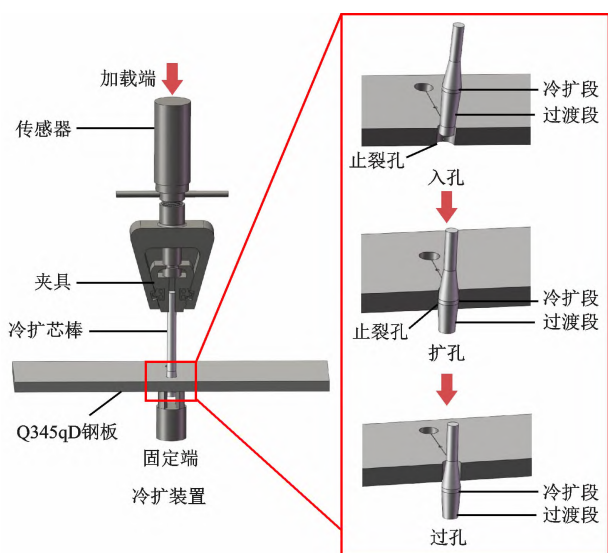


图5 止裂孔冷扩过程示意

Fig. 5 Schematic of Cold-expanded Process of Crack-stop Hole

1.4.2 疲劳加载与测试程序

在室温下,采用 MTS 647 电液伺服疲劳试验机开展疲劳试验,如图 6 所示。所有试件均采用正弦波循环载荷进行加载,加载频率为 5 Hz,且最大荷载为 80 kN,最小荷载为 8 kN,荷载幅为 72 kN,应力比为 0.1。

2 试验结果与分析

2.1 冷扩试验结果

2.1.1 荷载-位移曲线

图7显示了同一试件上2个止裂孔(实线和虚

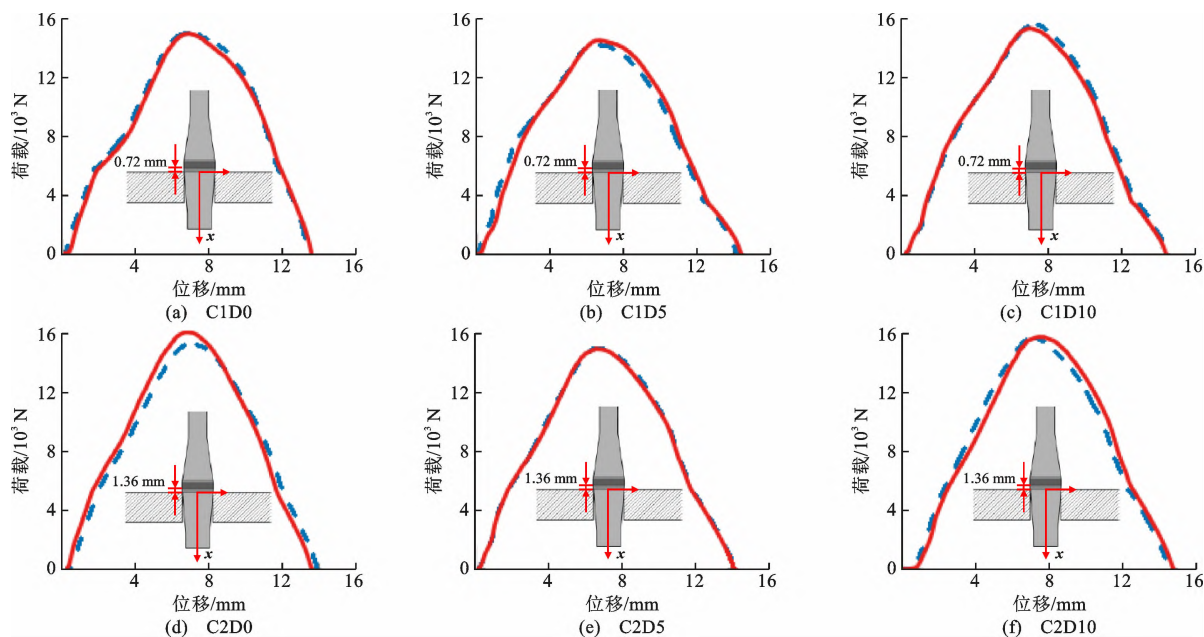


图7 荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement Curves

线)在冷扩过程中芯棒的荷载-位移关系。其中, x 轴表示冷扩芯棒向下挤压的位移,原点则表示冷扩芯棒的牵引段与止裂孔发生初始接触。由于芯棒牵引段存在一个直径为 10 mm 的截面(与止裂孔的直径相同),该截面到芯棒冷扩段截面的距离在 $C_r=1\%$ 和 2% 时分别为 0.72、1.36 mm。因此,1%和2%冷扩率下峰值荷载分别出现在 6.72、7.36 mm

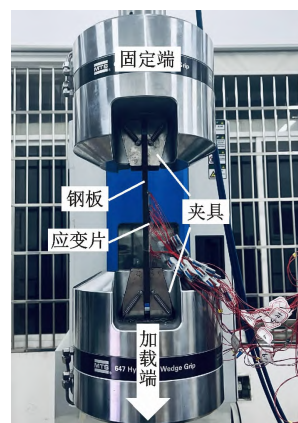


图6 疲劳加载程序

Fig. 6 Fatigue Loading Set-up

附近(对应于芯棒冷扩段与止裂孔厚度方向的中心截面相重合)。图7中实线和虚线吻合度较高,且峰值荷载相近,表明2个止裂孔冷扩程度维持在同一水平。此外,当冷扩率相同时,随着孔尖距的增加,峰值荷载基本保持不变,但最大位移有少许增大,表明孔尖距不会影响冷扩后残余应力的大小,但会改变其分布范围。3种孔尖距下,1%和2%冷扩率对应的平均峰值荷载分别为14.95、15.64 kN。可见,增大冷扩率将提高芯棒对止裂孔孔壁的挤压力,这有助于提高残余压应力大小。然而,本文中冷扩率从1%提高到2%时,峰值荷载仅提高4.62%,提高幅度相对较低。继续提高冷扩率,有望增大芯棒对止裂孔孔壁的挤压力,这有待进一步研究。

2.1.2 环向应变演化规律

由于孔周应变片的粘贴具有对称性,故本文绘制了孔周 6 个典型测点位置的应变-位移曲线,如图 8 所示。其中 a-b-c 段对应于止裂孔冷扩过程,可见随着芯棒位移的增加,应变均呈现出先增大后减小再增大的趋势。其中 a 为冷扩段刚进入止裂孔, b 为峰值应变, c 为谷值应变。当测点应变第 1 次达到峰值时,所对应的芯棒位移(如图 7 所示)并未处于止裂孔半厚度处,且孔周环向应变呈现出偏心现象,如图 8(a)所示, G4 的应变远大于 G1、G7、G10。随后,随着芯棒继续向下挤压,当荷载达到峰值荷载后,开始卸载,此时孔周材料会发生弹性回弹效应,导致环向应变逐渐减小,直至达到 c 点。先前的研究表明,该回弹效应主要是由材料切向(环向)压缩残余应力引起的^[19]。接下来,芯棒仍在止裂孔内向下移动,但应变值呈现出增大的趋势。这是因为冷扩段从出口端(如图 5 所示)开始挤出时,施加的轴向力转化为入口端的弯矩,促进了入口端(即贴应变侧)材料的回弹,导致环向应变增大^[20]。当芯棒完全从止裂孔移出时,该弯矩被移除,入口侧的应变保持不变并达到恒定值,即图中阶段 d。此时,止裂孔周产生了不可逆的塑性变形,应变片的数值大小即为冷扩完成后的残余应变。此外,图 8 中 G1、G2 和 G3 测点反映了沿止裂孔径向不同距离处的应变演化特征,结果表明,距孔边缘越远,产生的应变也越小,最终形成的残余压应力也越小。故将预制的中心裂纹尖端置于靠近孔边缘处,有可能对裂纹张开起到的约束作用更强。

2.1.3 环向残余应变分布

通过提取冷扩完成后粘贴于钢材表面的应变片数据,在极坐标系下绘制了冷扩率为 1% 和 2% 时不同孔尖距下的残余应变分布,如图 9 所示。从图 9 可以看出,冷扩后残余应变整体分布不均匀,这是因为钢棒和止裂孔都不可能是理想圆形,冷扩过程中芯棒的轴线与入口面无法一直保持垂直,导致孔周材料发生了不均匀的塑性变形,其他材料的相关研究也观察到类似现象^[21-22]。C1D0 和 C1D5 的偏心情况最为严重,均只有一侧发生了残余应变集中,而其余侧残余应变较小。从图 9 可以看出,同一冷扩率下,随着孔尖距的增大,残余应变分布范围随着孔尖距的增大而增大,表明预制的中心裂纹会在一定程度上影响冷扩残余应变的分布。这是因为当孔尖距为 0 mm 时,中心裂纹尖端位于止裂孔孔壁上,导致止裂孔周围存在一条狭窄的缺口。当挤压力卸除

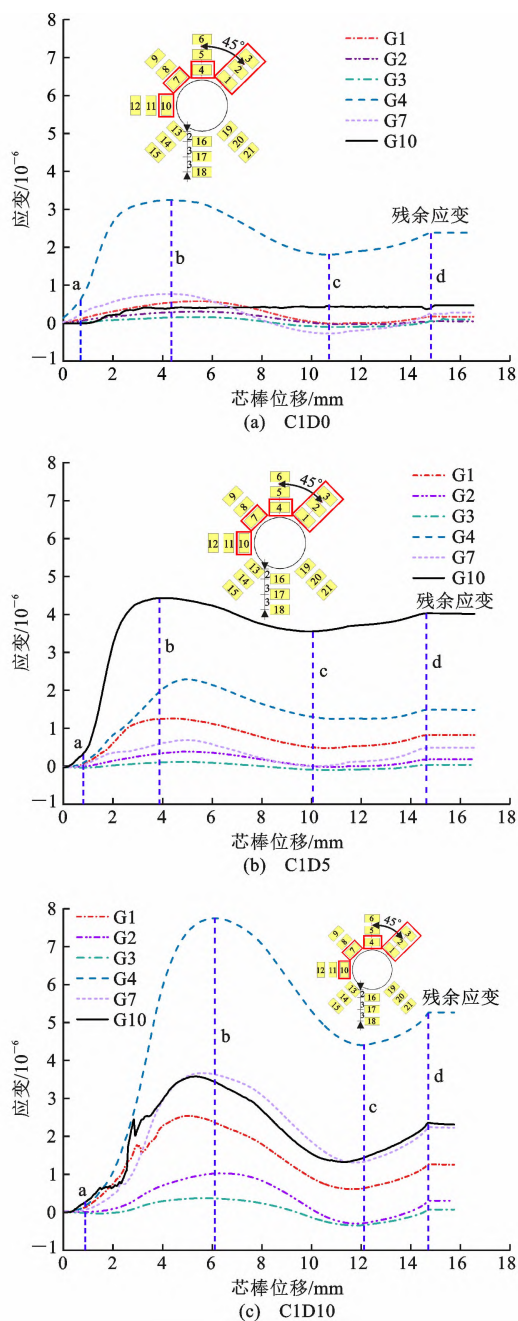


图 8 应变-位移演化

Fig. 8 Strain-displacement Evolution

(即冷扩完成)后,缺口的存在使得中心裂纹附近残余应变呈现非连续性特征。随着孔尖距的增大,中心裂纹对孔周材料塑性变形的影响削弱,故残余应变分布范围越大。然而,当孔尖距为 0 mm 时,试件具有最大的疲劳寿命(见 2.2.2 节),故残余压应变偏心 and 分布范围并不是影响疲劳寿命的关键因素。相反地,当孔尖距为 0 mm 时,预制的疲劳裂纹尖端完全处于残余压应力区域,如图 9(a)、(d)所示。此时,疲劳加载刚开始,残余压应力便可以有效地降低疲劳裂纹尖端应力水平。然而,针对于孔尖距为 5、

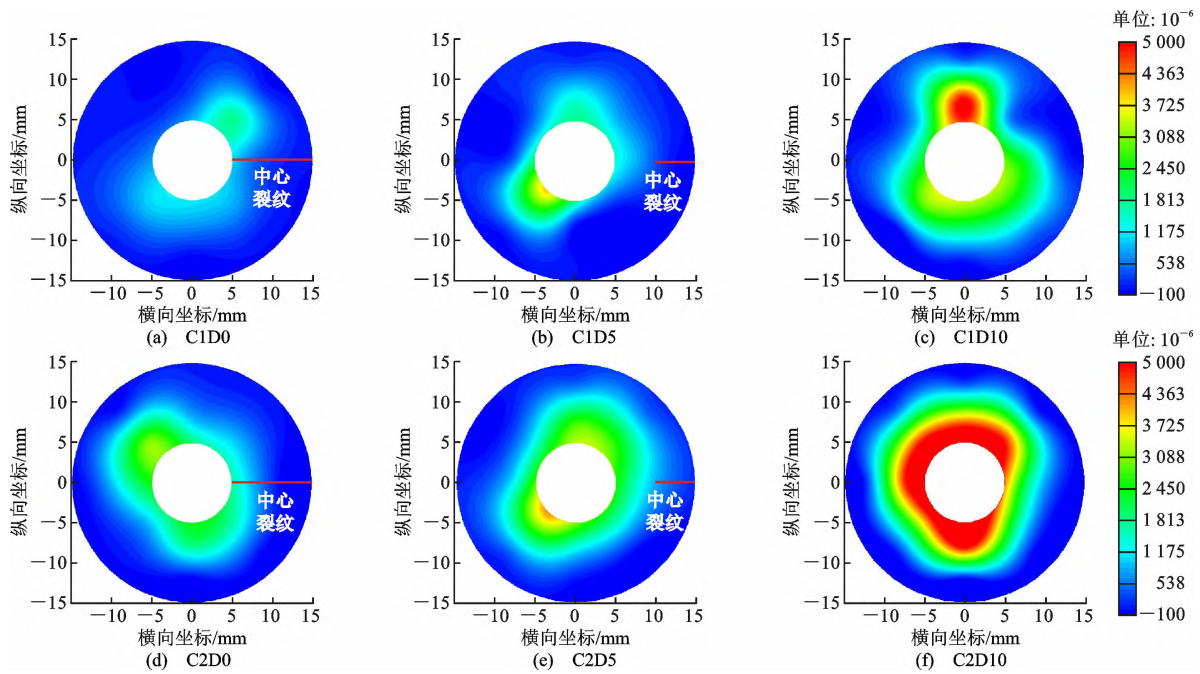


图 9 不同冷扩率和孔尖距下冷扩止裂孔孔周残余环向应变分布

Fig. 9 Residual Strain Distribution Around Cold-expanded Crack-stop Holes Under Different Cold Expansion Rates and Hole-to-crack Tip Distances

10 mm 的情况,分别在距离冷扩止裂孔孔心 7.5、10 mm 以外时,残余应变接近于 0,表明可以忽略预制裂纹受残余压应力的影响。综上所述,将冷扩止裂孔设置在疲劳裂纹尖端使其一开始就受到残余压应力的作用,是一种高效延长疲劳寿命的有效途径。

2.2 疲劳试验结果

2.2.1 破坏模式

表 2 总结了所有试件的破坏模式及疲劳寿命。其中,试件发生破坏时的荷载循环次数即为总的疲劳寿命 N_t ,可划分为 3 个阶段,如图 10 所示。这 3 个阶段包括:①预制裂纹扩展期(AB 段),即预制裂纹首次扩展至冷扩止裂孔孔周 B 点的阶段,该阶段疲劳寿命记为 N_1 ;②孔周裂纹萌生期,即疲劳裂纹扩展到孔边缘 B 点至孔周 C 点裂纹萌生的阶段,该阶段疲劳寿命记为 N_2 ;③裂纹穿孔发展期(CD 段),即疲劳裂纹从 C 点二次萌生并持续扩展直至试件断裂(D 点)的阶段,该阶段疲劳寿命记为 N_3 。

图 11 展示了疲劳试件 2 种典型的破坏模式以及断裂面特征。其中,2 种破坏模式分别指的是:疲劳裂纹从一个冷扩止裂孔处萌生并扩展至钢板边缘而发生断裂失效,称为单侧疲劳破坏;另一种是疲劳裂纹在 2 个冷扩止裂孔处均萌生并进行扩展,但由于中心疲劳裂纹两端扩展不同步,导致一侧疲劳裂纹先扩展至钢板边缘而发生断裂失效,另一侧则未完全扩展至钢板边缘,称为双侧疲劳断裂。从表 2

表 2 所有试件的疲劳寿命

Table 2 Fatigue Life of All Specimens

试件 编号	冷扩率/ %	孔尖距/ mm	疲劳寿命/万次				破坏 模式
			N_1	N_2	N_3	N_t	
C0D0-1	0	0	-	33.13	4.22	37.35	a
C0D0-2			-	29.78	3.80	33.58	a
C0D5-1		5	4.88	13.73	6.24	24.58	a
C0D5-2			4.86	7.58	0.99	13.43	a
C1D0-1	1	0	-	38.01	2.55	40.56	a
C1D0-2			-	39.67	2.66	42.33	a
C1D5-1		5	3.53	18.50	2.13	24.16	b
C1D5-2			4.06	16.95	1.19	22.20	b
C1D10-1		10	10.02	2.78	1.82	14.62	b
C1D10-2			10.93	3.59	0.59	15.11	b
C2D0-1	2	0	-	49.72	4.57	54.29	a
C2D0-2			-	48.24	4.43	52.67	a
C2D5-1		5	4.04	19.94	1.72	25.70	b
C2D5-2			4.03	18.40	2.72	25.15	b
C2D10-1		10	11.98	4.54	2.95	19.47	a
C2D10-2			14.85	3.11	4.88	22.84	a

注:a 为单侧疲劳断裂;b 为双侧疲劳断裂。

可以看出,单侧疲劳破坏占据主导地位,这很大程度上取决于止裂孔冷扩后,2 个孔的孔周残余应力分布不一致。对于 2 种破坏模式试件而言,在裂纹扩展及断裂区域均观察到平整的断裂面,表明试件经历了稳定扩展。此外,在断裂测靠近钢板边缘区域还观察到了明显的撕裂形状,表明疲劳裂纹扩展经

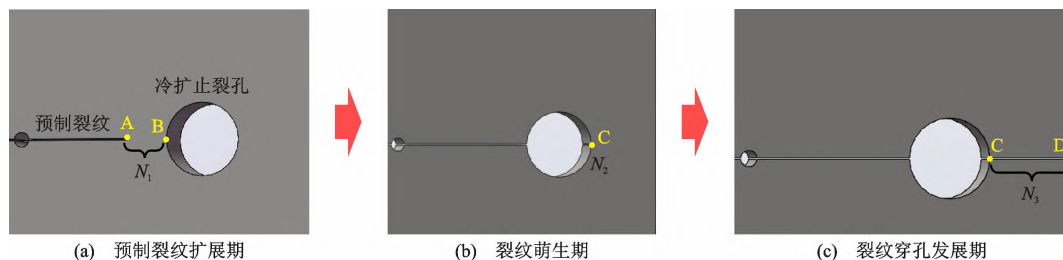


图 10 三个疲劳裂纹扩展阶段

Fig. 10 Three Stages of Fatigue Crack Propagation

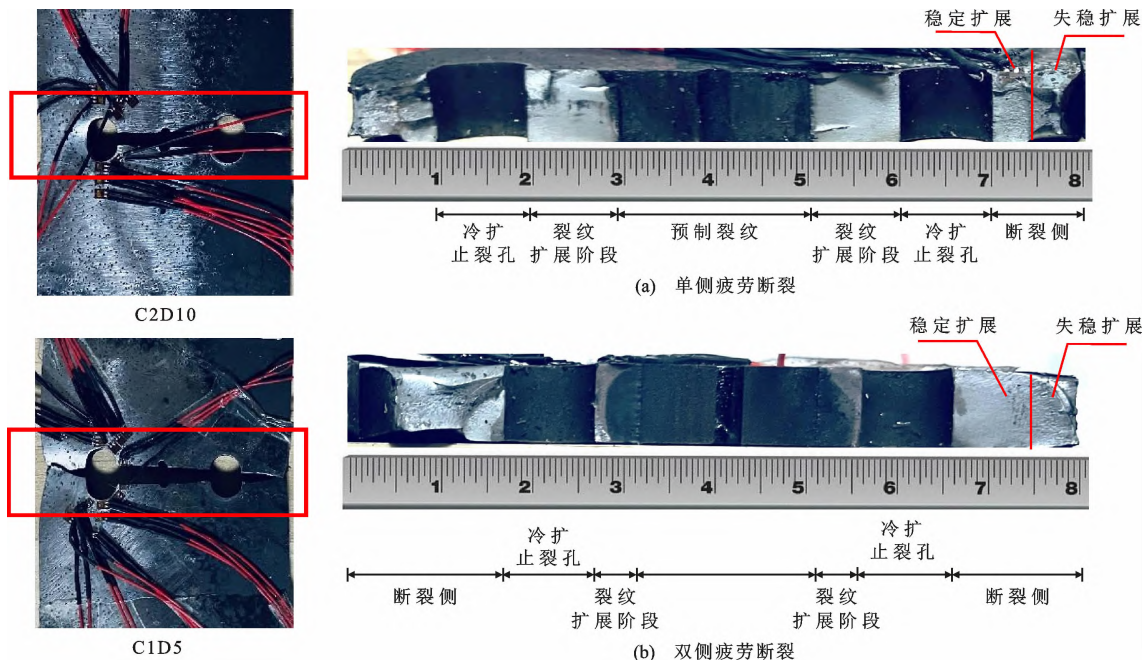


图 11 试件典型破坏模式及断面特征

Fig. 11 Typical Failure Modes and Fracture Surface Characteristics of Specimens

历了失稳扩展。

2.2.2 疲劳寿命

图 12 展示了各试件总的疲劳寿命 N_t 随孔尖距和冷扩率的变化情况。可以看出,当孔尖距为 0 mm,且无论冷扩与否,试件总是具有最高的疲劳寿命。此外,针对于孔尖距为 0、5 mm,疲劳裂纹寿命 N_2 总是占有总疲劳寿命的最大比例。尤其是孔尖距为 0 mm 时,冷扩率为 0%、1% 和 2%,疲劳寿命 N_2 分别占据总疲劳寿命 N_t 的 88.71%、93.70% 和 91.59%。可见,将止裂孔钻设在疲劳裂纹尖端前端时,由冷扩过程产生的残余压应力效应得到了充分发挥,大幅降低疲劳裂纹尖端的拉应力水平,导致需要更多的荷载循环次数使孔边缘发生疲劳裂纹萌生。然而,孔尖距为 10 mm 时,疲劳寿命 N_1 占据主导地位,这可能是由于疲劳裂纹在首次扩展至孔边缘之前,在疲劳拉应力作用下,削减了孔周大部分残余压应力。此外,图中结果还表明随着冷扩率的

增大,试件的疲劳寿命也随之提高,且在孔尖距相同情况下,C2D0、C2D5、C2D10 相对于 C0D0、C0D5、C0D10 分别提高了 50.82%、33.77% 和 42.30%。综上可见,确定合理的孔尖距与冷扩率对提高试件的疲劳寿命具有重要的影响。在本项研究中,孔尖距为 0 mm 且冷扩率为 2% 时具有最高疲劳寿命,相较于孔尖距为 0 mm 的常规止裂孔试件,疲劳总寿命提升了 50.82%。

2.2.3 疲劳加载过程孔周环向应变演化

图 13 为不同冷扩率下,孔尖距为 0、5 mm 时疲劳峰值荷载对应的关键测点应变随疲劳次数变化的 $\epsilon-N$ 曲线。由于孔尖距为 10 mm 试件的应变片在试验过程中过早剥落等原因,导致数据采集不完全,故此处未绘制相应 $\epsilon-N$ 曲线。图 13 中 G10、G11 和 G12 分别对应图 4 中的第 10 号、11 号和 12 号应变片,反映了裂纹扩展 3 个阶段的应变演化趋势。需要注意的是,裂纹穿过应变片时,数值陡增或陡减,表

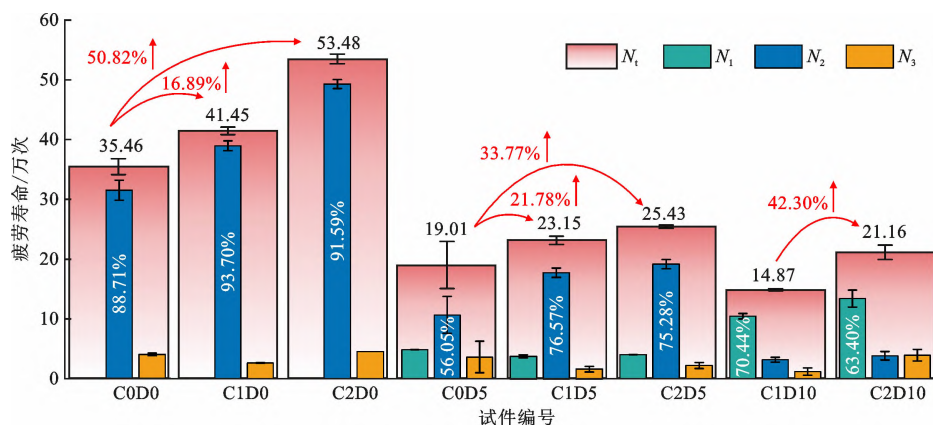
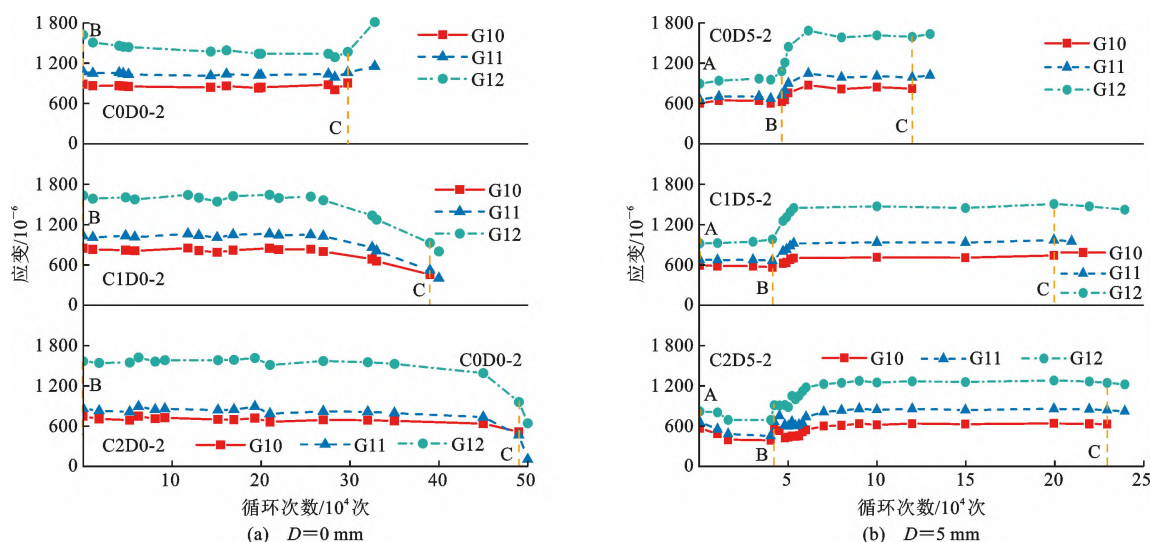


图 12 试件疲劳寿命比较

Fig. 12 Fatigue Life of All Specimens

图 13 疲劳峰值荷载下的 ε - N 曲线Fig. 13 ε - N Curves Under Fatigue Peak Load

明应变片被破坏,故图 13 中仅绘制了裂纹穿孔发展期部分应变数据点。

从图 13(a)可以看出:孔尖距为 0 mm 时,随着荷载循环次数的增加,应变在裂纹萌生期(BC 段)维持稳态变化,直至裂纹进入穿孔发展期(C 点之后),应变开始发生陡增或陡减直至应变片破坏;此外,随着冷扩率的增加,试件在 BC 段的应变数值越小,裂纹萌生寿命越大。在孔尖距为 5 mm 工况下也观察到类似的现象。由图 13(b)可知:孔尖距为 5 mm 时,随着荷载循环次数的增加,试件在预制裂纹扩展期(AB 段)的应变呈现稳定变化;当达到 B 点时,疲劳裂纹开始进入到孔边缘萌生阶段,3 个测点处的应变值也逐渐增加,表明此时孔周的残余应力开始逐渐降低;随后,疲劳裂纹完全进入萌生阶段,3 个测点的应变呈现出小幅波动;最后,疲劳裂纹穿过 G10 测点,便较快进入了稳定和失稳扩展阶段,导致

G11 和 G12 测点应变片失效时的荷载循环次数与 G10 差异甚小。此外,图 13 结果还表明,同一荷载循环次数下,G10、G11 和 G12 的应变值逐渐增大,越靠近冷扩止裂孔,残余压应力越大。当冷扩率相同时,孔尖距为 5 mm 的试件在 BC 段均有一段呈现出应变增加的趋势,这表明疲劳荷载作用在裂纹萌生初期会削弱部分残余应力,导致同一冷扩率下,孔尖距为 5 mm 试件的裂纹萌生期寿命低于孔尖距为 0 mm 试件的裂纹萌生期寿命。

图 14 分别展示了 3 种冷扩率下,孔尖距为 0、5 mm 试件在预制裂纹扩展期、孔周裂纹萌生期和裂纹穿孔发展期之初峰值疲劳荷载下的孔周环向应变分布。值得注意的是,由于孔尖距为 0 mm 试件不存在预制裂纹扩展期,故本文绘制了初始疲劳加载,即第 1 个荷载循环时的应变云图。图 14(a)结果表明,疲劳加载至孔周裂纹萌生期,左侧应变集中范围

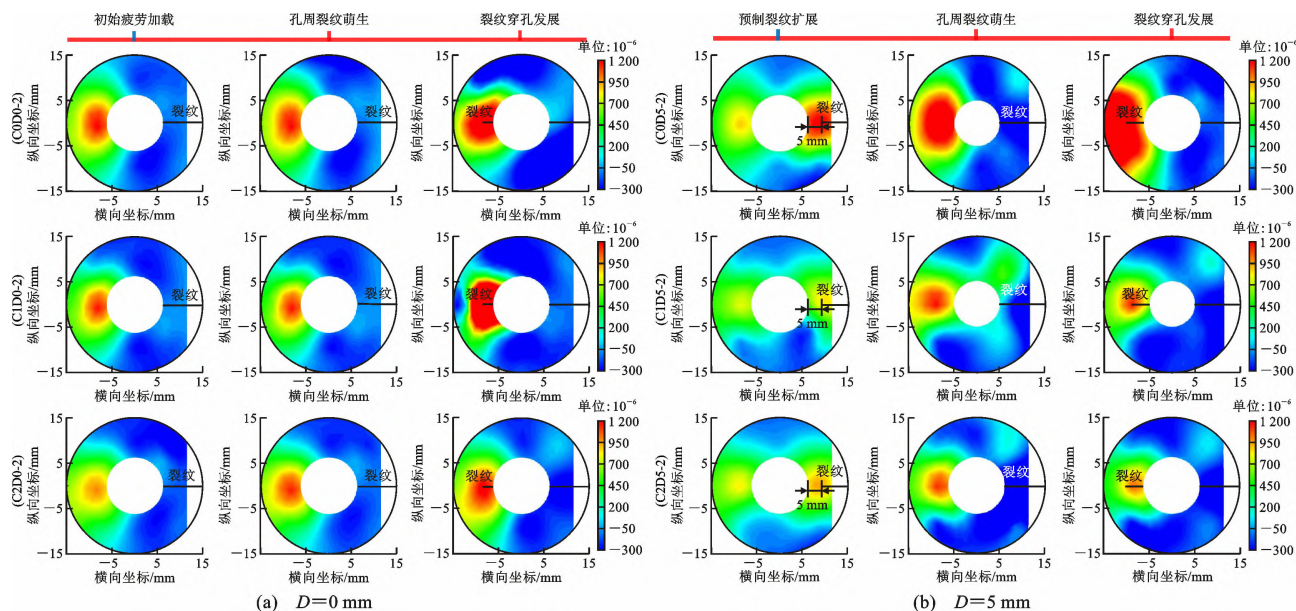


图 14 峰值疲劳荷载下冷扩止裂孔周环向应变分布

Fig. 14 Strain Distribution Around Cold-expanded Crack-stop Holes Under Different Crack Stages of Peak Fatigue Load

几乎相同,这印证了上述孔尖距为 0 mm 时,AB 段应变呈现平稳变化趋势。当疲劳裂纹进入穿孔发展期,由于裂纹穿过 G10 应变片,故较大区域内存在应变高度集中现象,在孔尖距为 5 mm 中也观察到了类似的现象。此外,由图 14(b)可知,当疲劳裂纹处于预制裂纹扩展期,冷扩止裂孔左右两侧的拉应变集中范围和大小均随着冷扩率的增大而减小,表明冷扩率越大,产生的残余压应力越大。当疲劳裂纹处于孔周裂纹萌生期,随着冷扩率的增大,冷扩止裂孔左侧边缘处的拉应变集中范围逐渐较小,说明需要更多荷载循环次数来消除残余压应力的抑制作用,使之能达到疲劳裂纹萌生时所需要最小应力强度因子条件。这也证明了冷扩率越大,孔周裂纹萌生期的疲劳寿命 N_2 越大。在孔尖距为 0 mm 工况下也具有相类似的现象,此处不再赘述。此外,图 14 的结果还表明,当冷扩率相同,且处于裂纹萌生期时,孔尖距为 5 mm 的拉应变集中范围略大于孔尖距为 0 mm 试件,故增大孔尖距将降低裂纹萌生期的疲劳寿命。综上所述,提高冷扩率是抑制疲劳裂纹扩展、延长疲劳寿命的一种重要途径。不仅如此,将孔间距设置为 0 mm 将更有利于提高疲劳裂纹萌生寿命。

3 疲劳裂纹萌生寿命预测

构建疲劳裂纹萌生寿命模型尤为重要。然而,需注意的是孔尖距为 10 mm 的情况,疲劳寿命 N_1 占据主导地位,孔周残余应力分布较为复杂且部分

试件的应变未能采集完整,故仅对 C2D10-2 试件进行了寿命预测。本文采用名义 $S-N$ 曲线并结合疲劳缺口系数的方法进行疲劳萌生寿命预测。材料的名义 $S-N$ 曲线一般表达式如下

$$c = S_a^m N \quad (2)$$

式中: S_a 为应力幅, $S_a = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{2}$; $S_{\max}$ 、 $S_{\min}$ 分别为疲劳荷载下的最大应力和最小应力; N 为疲劳寿命; m 、 c 为材料常数,先前的学者针对 Q345qD 的 $S-N$ 曲线开展了大量试验,故在此基础上,本文的 m 和 c 分别取 -0.087 1、789.768 8^[23]。

通常, $S-N$ 曲线法用于光滑(无缺口)试件疲劳萌生寿命的计算。然而,本文在疲劳裂纹扩展前端钻设了止裂孔,可将其视作带缺口工作的试件。因此,在进行孔周疲劳裂纹萌生寿命预测时,需要引入一个疲劳缺口系数 K_f 将缺口名义应力幅转换成无缺口名义应力幅进行计算,其表达式如下所示

$$S_N = K_f S_q \quad (3)$$

式中: S_N 为光滑试件的疲劳极限应力幅; S_q 为缺口试件的疲劳极限应力幅。

赵少汴等^[24]总结了金属材料光滑与缺口试件的疲劳 $S-N$ 曲线,如图 15 所示。可将光滑试件的疲劳 $S-N$ 曲线转换成缺口试件的疲劳 $S-N$ 曲线,从而获得对应名义缺口应力幅 $S_{q,a}$ 下的疲劳寿命。本研究取 10^6 循环次数对应的应力幅值为光滑和缺口试件的疲劳极限应力幅。

求解疲劳缺口系数 K_f 的方法有很多,目前最

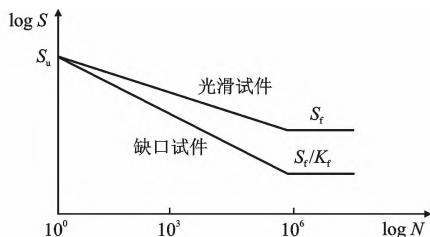
图 15 光滑与缺口试件名义 $S-N$ 曲线

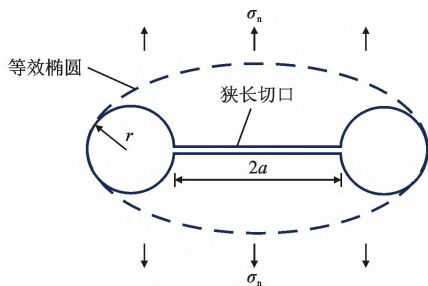
Fig. 15 Smooth and Notched Specimen Nominal $S-N$ Curves
常用的是敏感度法,其利用了理论应力集中系数 K_t 和疲劳缺口敏感度 q 对 K_t 进行计算,一般表达式如下

$$K_t = 1 + q(K_t - 1) \quad (4)$$

式中:理论应力集中系数 K_t 可根据 Matsumoto 等^[25]提出的等效椭圆法进行计算,如式(5)所示

$$K_t = 1 + \sqrt{2 + \frac{a}{r}} \quad (5)$$

式中: a 为裂纹长度的一半,对于孔尖距为 0、5 mm 试件, a 分别为 10、15 mm; r 为止裂孔的半径,等效椭圆示意图如图 16 所示。

图 16 等效椭圆示意^[25]Fig. 16 Equivalent Ellipse Diagram^[25]

疲劳缺口敏感度 q 可根据 Neuber 公式求解

$$q = 1 / \left[1 + \left(\frac{d'}{d} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (6)$$

式中: d' 为 Neuber 参数,可通过查询《抗疲劳设计手册》进行取值,本文取 0.58^[24]; d 为缺口半径。

综上,表 3 总结了孔尖距为 0、5 mm 工况时的关键计算参数。

表 3 孔尖距为 0、5、10 mm 的关键计算参数及
缺口试件名义 $S-N$ 曲线

Table 3 Key Calculation Parameters for Hole-to-crack
Tip Distances of 0 mm, 5 mm and 10 mm

孔尖距 D/mm	q	K_t	K_f	$S_{q,a}/\text{MPa}$	缺口试件名义 $S-N$ 曲线
0	0.75	3.83	3.12	90.00	$\log S_q = -0.169 5 \log N + 2.897 5$
5		4.46	3.60	120.00	$\log S_q = -0.179 8 \log N + 2.897 5$
10		5.00	4.00	180.00	$\log S_q = -0.187 4 \log N + 2.897 5$

对于冷扩率为 0% 试件,不考虑残余应力的影响,可按照上诉计算步骤根据名义缺口应力幅直接进行疲劳萌生寿命预测。对于冷扩率为 1% 和 2% 试件,在计算冷扩试件的孔周疲劳裂纹萌生寿命前,需计算出疲劳裂纹扩展截面的名义应变幅 ϵ_n ; 然后,计算出 G10 测点的应变 ϵ_{G10} 和 ϵ_n 的差值,从而获得残余压应力的,再与缺口应力幅相加,计算出实际缺口应力幅 $S_{q,b}$; 最后再根据上述计算式(2)、(3)推导出缺口试件的疲劳 $S-N$ 曲线,并计算出相应试件的疲劳萌生寿命。具体计算过程如图 17 所示。

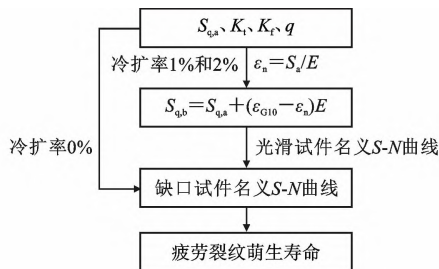


图 17 疲劳萌生寿命计算流程

Fig. 17 Fatigue Crack Initiation Life Calculation Process

表 4 总结了上述计算流程的关键参数。其中,对于孔尖距为 0 mm 的情形, ϵ_{G10} 取疲劳加载初期的应变值;而对于孔尖距为 5 mm 的情形, ϵ_{G10} 取疲劳裂纹刚扩展至孔周时的应变值,这是因为此时刚进入孔周裂纹萌生期。需说明的是,此处未能对所有试件进行疲劳寿命预测,这是因为试验过程中应变片遭受破坏,导致未能采集到应变数据。

表 4 疲劳裂纹萌生寿命计算关键参数及预测结果

Table 4 Key Parameters of Fatigue Crack Initial Life
Calculation and Prediction Results

编号	$\epsilon_n/10^{-6}$	$\epsilon_{G10}/10^{-6}$	$(\epsilon_{G10} - \epsilon_n)E/\text{MPa}$	$S_{q,b}/\text{MPa}$	预测值/ 万次
CoD0-2	436.89	-	-	-	36.72
C1D0-2		423.44	-2.77	87.23	44.17
C2D0-2		402.61	-7.06	82.94	59.46
CoD5-1	582.52	-	-	-	3.56
CoD5-2		-	-	-	3.56
C1D5-1		531.00	-10.61	109.39	5.95
C1D5-2		500.40	-16.92	103.08	8.29
C2D5-1		453.89	-26.50	93.50	14.26
C2D5-2		490.56	-18.94	101.06	9.25
C2D10-2	873.79	694.32	-36.97	143.03	0.91

结合表 3、4,可以计算出试件孔边缘疲劳裂纹萌生寿命,将试验值与预测值绘制在双对数坐标系下,如图 18 所示。结果表明,对数寿命试验值与预测值的误差在 $\pm 20\%$ 以内,尤其是孔间距为 0 mm

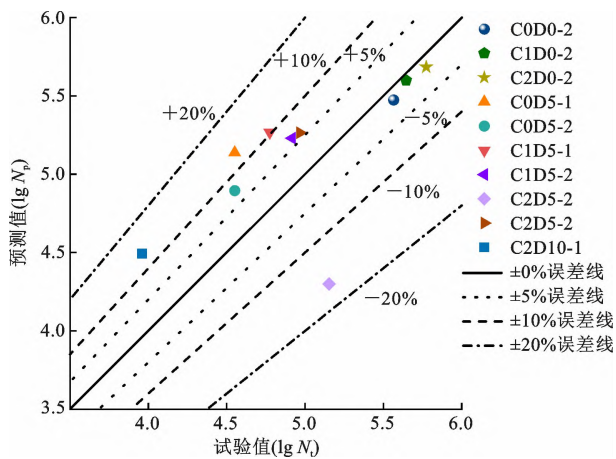


图 18 试验值与预测值的比较

Fig. 18 Comparison of Tested and Predicted Values

工况,预测值与试验值吻合较好,误差在 5% 以内。对于孔间距为 5 mm 工况,除 C2D5-2 外,所有预测值均大于试验值,且对数寿命的最小误差为 5.67% (C2D5-2)。此外,虽然仅对 C2D10-2 的疲劳寿命进行了预测,对数寿命的误差为 11.86%,但对于疲劳寿命预测而言,精度在可接受范围内。

4 结 语

(1)提出的冷扩止裂孔钢结构疲劳裂纹修复技术,可有效提高含 I 型裂纹钢板的疲劳寿命。止裂孔完成冷扩后,孔周存在残余压应力,且越靠近孔边缘,残余压应力越大。当 I 型疲劳裂纹扩展至冷扩止裂孔周残余压应力区时,会降低裂纹尖端的疲劳应力水平,从而延长结构疲劳寿命。

(2)同一孔尖距下,增大冷扩率(0%~2%)可提高冷扩止裂孔周残余压应力大小和分布范围,从而增强疲劳延寿效果。然而,同一冷扩率,孔尖距越大,疲劳裂纹扩展至冷扩止裂孔时,危险截面上的名义应力越大,疲劳裂纹越容易二次萌生,导致冷扩止裂孔对含 I 型裂纹钢板疲劳寿命的提升效果被削弱。

(3)3 种冷扩率下,孔尖距为 0 mm 时,试件均具有最大的总疲劳寿命,并且疲劳裂纹萌生寿命 N_2 占据总寿命的 88% 以上,表明将冷扩止裂孔设置于疲劳裂纹尖端可以充分发挥冷扩止裂孔的止裂效应。此外,孔尖距为 0 mm 且冷扩率为 2% 时,冷扩止裂孔修复含裂纹钢板的疲劳寿命最高,相较于孔尖距为 0 mm 的常规止裂孔扩试件,其疲劳总寿命提高了 50.82%。

(4)基于名义应力 $S-N$ 曲线和疲劳缺口系数,

提出了冷扩止裂孔周疲劳萌生寿命预测方法,该方法的预测值与试验值在双对数坐标系下吻合较好。孔尖距为 0 mm 时,误差在 $\pm 5\%$ 以内;孔尖距为 5、10 mm 时,误差在 $\pm 20\%$ 以内。

(5)本研究提出的冷扩止裂孔技术目前处于初步探索阶段,且仅考虑了 2 种冷扩率,未能明晰冷扩率与残余压应力之间的关系,下一步将开展更多冷扩率下的疲劳试验研究。此外,本研究的止裂孔冷扩工艺导致残余压应力存在偏心和分布不均的现象,如何改进冷扩工艺以减小偏心以及构建冷扩工艺优化方法是下一步研究的重点。

参考文献:

References:

- [1] KE L, QIU M D, CHEN Z, et al. An interpretable machine learning model for predicting bond strength of CFRP-steel epoxy-bonded interface [J]. Composite Structures, 2023, 326: 117639.
- [2] LI Y L, KE L, LI C X, et al. Retardation mechanisms and modeling of fatigue crack growth of a high-strength steel after single overload [J]. International Journal of Fatigue, 2024, 183: 108267.
- [3] 李传习,柯 璐,陈卓异,等. 正交异性钢桥面板弧形切口及其 CFRP 补强的疲劳性能[J]. 中国公路学报, 2021, 34(5): 63-75.
LI Chuan-xi, KE Lu, CHEN Zhuo-yi, et al. Fatigue behavior and CFRP reinforcement of diaphragm cutouts in orthotropic steel bridge decks [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34 (5): 63-75.
- [4] 张清华,李 俊,崔 闯,等. 钢桥面板疲劳开裂加固处治关键问题研究进展[J]. 中国公路学报, 2024, 37(5): 246-266.
ZHANG Qing-hua, LI Jun, CUI Chuang, et al. Reinforcement and treatment of fatigue cracking in orthotropic steel bridge decks: A review [J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37 (5): 246-266.
- [5] WANG C S, ZHAI M S, DUAN L, et al. Cold reinforcement and evaluation of steel bridges with fatigue cracks [J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23 (4): 04018014.
- [6] YANG Y M, ZHAO J, ZHANG S S, et al. Effect of mechanical anchorage on the bond performance of double overlapped CFRP-to-steel joints [J]. Composite Structures, 2021, 267: 113902.
- [7] 任 翔,张泽亚,孙亚民,等. 大温差循环作用下 CFRP 板-钢界面黏结性能试验[J]. 中国公路学报, 2024, 37(10): 116-127.
REN Xiang, ZHANG Ze-ya, SUN Ya-min, et al. Study of interfacial bond between carbon fiber reinforced polymer plates and steel under large temperature difference cycles action [J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37 (10): 116-127.

- [8] ZHU F R, KE L, FENG Z, et al. Enhancing bond performance of CFRP-steel epoxy-bonded interface by electrospun nanofiber veils [J]. *Thin-walled Structures*, 2024, 198: 111765.
- [9] YAO Y, JI B H, FU Z Q, et al. Optimization of stop-hole parameters for cracks at diaphragm-to-rib weld in steel bridges [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 162: 105747.
- [10] MASOUDI NEJAD R, BERTO F, WHEATLEY G, et al. On fatigue life prediction of Al-alloy 2024 plates in riveted joints [J]. *Structures*, 2021, 33: 1715-1720.
- [11] DHANYA M S, MANWATKAR S K, GUPTA R K, et al. Failure analysis of EN24 steel M5 shear bolt used in aerospace applications [J]. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2022, 22 (6): 2305-2316.
- [12] WANG C G, ZOU F, ZHOU E T, et al. Effect of split sleeve cold expansion on microstructure and fatigue performance of 7075-T6 aluminum alloy holes [J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 167: 107339.
- [13] 林忠亮,白清顺,唐伟,等. 压合衬套冷挤压强化的残余应力的数值模拟[J]. *材料导报*, 2024, 38(3): 192-199.
LIN Zhong-liang, BAI Qing-shun, TANG Wei, et al. Numerical simulation on the residual stress of compression bushing in cold expansion strengthening [J]. *Materials Reports*, 2024, 38 (3): 192-199.
- [14] PUCILLO G P. The effects of the cold expansion degree on the fatigue crack growth rate in rail steel [J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 164: 107130.
- [15] FAGHIH S, BEHRAVESH S B, KUMAR SHAHA S, et al. Effect of split sleeve cold expansion on fatigue and fracture of rolled AZ31B magnesium alloy [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2023, 123: 103715.
- [16] BURLAT M, JULIEN D, LÉVESQUE M, et al. Effect of local cold working on the fatigue life of 7475-T7351 aluminum alloy hole specimens [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75 (8): 2042-2061.
- [17] WU H. On the prediction of initiation life for fatigue crack emanating from small cold expanded holes [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212 (9): 1819-1824.
- [18] 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 Xiao-jing, 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.
- [19] CHAKHERLOU T N, VOGWELL J. A novel method of cold expansion which creates near-uniform compressive tangential residual stress around a fastener hole [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2004, 27 (5): 343-351.
- [20] FAGHIH S, SHAHA S K, BEHRAVESH S B, et al. Split sleeve cold expansion of AZ31B sheet: Microstructure, texture and residual stress [J]. *Materials & Design*, 2020, 186: 108213.
- [21] LIU J, SHAO X J, LIU Y S, et al. Effect of cold expansion on fatigue performance of open holes [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 477 (1/2): 271-276.
- [22] YUAN X, YUE Z F, WEN S F, 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.
- [23] 贾单锋,廖小伟,崔佳. Q345qD 桥梁钢高周疲劳性能及 γ -P-S-N 曲线试验研究[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2016, 49(增 1): 122-128.
JIAO Dang-feng, LIAO Xiao-wei, CUI Jia. Experimental study on high cycle fatigue behavior and γ -P-S-N curves of bridge steel Q345qD [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2016, 49 (S1): 122-128.
- [24] 赵少汴. 抗疲劳设计手册[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2015.
ZHAO Shao-bian. *Anti-fatigue design manual* [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2015.
- [25] MATSUMOTO R, ISHIKAWA T, KITANE Y. Estimation of stress concentration factor at stop-hole repair strengthened by bonded patches [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2024, 213: 108421.