

船用钢/铝爆炸焊过渡接头的疲劳试验

徐双喜¹, 盛过¹, 骆伟², 谌伟¹, 陈家祥¹

(1. 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院, 武汉 430063; 2. 中国舰船研究设计中心, 武汉 430064)

摘要: 为了测试船用钢/铝爆炸焊过渡接头的疲劳性能, 基于有限元方法, 以钢/铝过渡接头为研究对象, 重点研究过渡接头结合界面的疲劳强度, 设计由3种材料组成的爆炸焊过渡接头试样, 并结合数值仿真, 对过渡接头试样在试验载荷下的受力进行分析, 得到应力集中和容易疲劳失效的位置。结合试验研究, 开展不同应力等级下过渡接头的疲劳试验, 获取试样疲劳断裂数据, 结合数值仿真和试验研究得到爆炸复合过渡接头整体应力分布和失效部位。通过疲劳试验发现试样断裂面均出现在铝合金和纯铝的界面处; 通过试样疲劳循环次数拟合得到了名义应力的 $S-N$ 曲线。该研究成果可用于指导船用爆炸复合结构的疲劳寿命预报, 为船舶轻量化设计提供参考。

关键词: 疲劳性能; 钢/铝过渡接头; 疲劳试验; $S-N$ 曲线; 轻量化

中图分类号: U668.1 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbge.2024.07.15

Fatigue Test of Ship Steel/Aluminum Explosive Welding Transition Joints

XU Shuangxi¹, SHENG Guo¹, LUO Wei², SHEN Wei¹, CHEN Jiexiang¹

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. China Shipbuilding Research and Design Center, Wuhan 430064, China)

Abstract: In order to test the fatigue performance of ship steel/aluminum explosive welding transition joints. Based on the finite element method (FEM), the steel/aluminum transition joint is taken as the research object, with a focus on the fatigue strength of the transition joint interface. An explosive welding transition joint specimen composed of three materials has been designed. And combined with numerical simulation, analyze the stress of the transition joint specimen under test load, and obtain the location of stress concentration and easy fatigue failure. Based on experimental research, fatigue tests were conducted on transition joints under different stress levels to obtain fatigue fracture data of the specimens. The overall stress distribution and failure location of the explosive composite transition joint were obtained through numerical simulation and experimental research. Through fatigue testing, it was found that the fracture surface of the specimen appeared at the interface between aluminum alloy and pure aluminum; the $S-N$ curve of nominal stress was obtained by fitting the number of fatigue cycles of the specimen. This research result can be used to guide the fatigue life prediction of ship explosive composite structures and provide reference for lightweight design of ships.

Key words: fatigue performance; steel/aluminum transition joint; fatigue test; $S-N$ curve; lightweight

0 引言

船舶轻量化能显著地提高船舶单位质量的装载量和航行速度, 从而有效实现节能、降耗和减排。钢/铝接头通过药物爆轰产生的冲击波高压驱动两块金属板碰撞形成^[1], 铝合金作为轻质材料已经在船舶上层

建筑上广泛应用^[2]。为了解决铝质上层建筑与钢质主船体不能直接焊接的问题^[3], 船用钢/铝爆炸焊过渡接头相较于传统铆接结构具有明显的优势^[4-5], 在现代实船建造过程中有着很好的应用前景。

收稿日期: 2023-08-20; 修回日期: 2024-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51979209)

作者简介: 徐双喜 (1983—), 男, 博士、教授。研究方向: 船舶与海洋工程结构安全性与可靠性。

目前, 我国对过渡接头的疲劳性能研究较少, 李敬勇等^[6]对铝-钛-钢爆炸焊过渡接头进行了弯曲疲劳试验并得到了应力寿命 $S-N$ 曲线, 为过渡接头疲劳寿命评估工作提供了依据。KAROLCZUK 等^[7]在界面上施加平行载荷的情况下, 对钢-钛组件进行了疲劳试验; BECKER 等^[8]对铝-钢过渡接头施加了垂直于界面方向的力, 进行了拉伸疲劳试验; 柴希阳等^[9]对铝-铝-钢与铝-钛-钢复合板开展了轴向拉-压疲劳试验, 测试了材料的条件疲劳强度和 $S-N$ 曲线, 发现铝-铝-钢复合板疲劳断裂主要发生于 1060 纯铝和钢结合界面处; BÖHM 等^[10]描述了钢/铝爆炸焊过渡接头在随机载荷条件下的疲劳寿命估算问题。

船舶结构疲劳性能一直备受关注, 船用钢/铝爆炸焊过渡接头界面出现疲劳开裂难以完全避免, 因为在船舶航行过程中, 船体结构会受到波浪带来的复杂载荷作用, 在交变应力作用下, 会出现疲劳现象, 过渡接头亦难以避免, 从而使过渡接头结合界面产生开裂现象。然而, 对于钢/铝过渡接头的疲劳性能研究还比较少, 因此, 有必要对过渡接头的疲劳性能进行研究。本文以未与板材焊接的钢/铝过渡接头为主要研究对象, 重点关注过渡接头结合界面的疲劳强度, 设计过渡接头试样, 进行试件的有限元分析和疲劳试验, 拟合得到名义应力的 $S-N$ 曲线。

1 试样设计及仿真分析

1.1 试样设计

出于满足舰船设计安全性要求和经济性等要求, 考虑钢/铝过渡接头板厚度和宽度的有限度。在本文相关试验以及仿真计算中, 采用常用的船体钢/铝过渡接头尺寸 (见图 1), 层间厚度为: 19 mm (945 钢)、6 mm (纯铝 1060)、9 mm (铝合金 5083), 以此过渡接头板作为试样设计制造的基础。为了研究钢/铝爆炸焊过渡接头结合界面处的疲劳强度, 结合文献[11-13], 对过渡接头板进行加工制造。将板沿厚度方向进行切割, 使钢-铝结合界面在 2 个夹持端的中间, 并在宽度变化处进行适当的倒圆处理, 最大程度上关注钢-铝结合界面处的疲劳寿命。考虑试样与实验机器的装配问题, 设计出过渡接头试样, 用于进行疲劳试验。过渡接头试样尺寸见图 2。

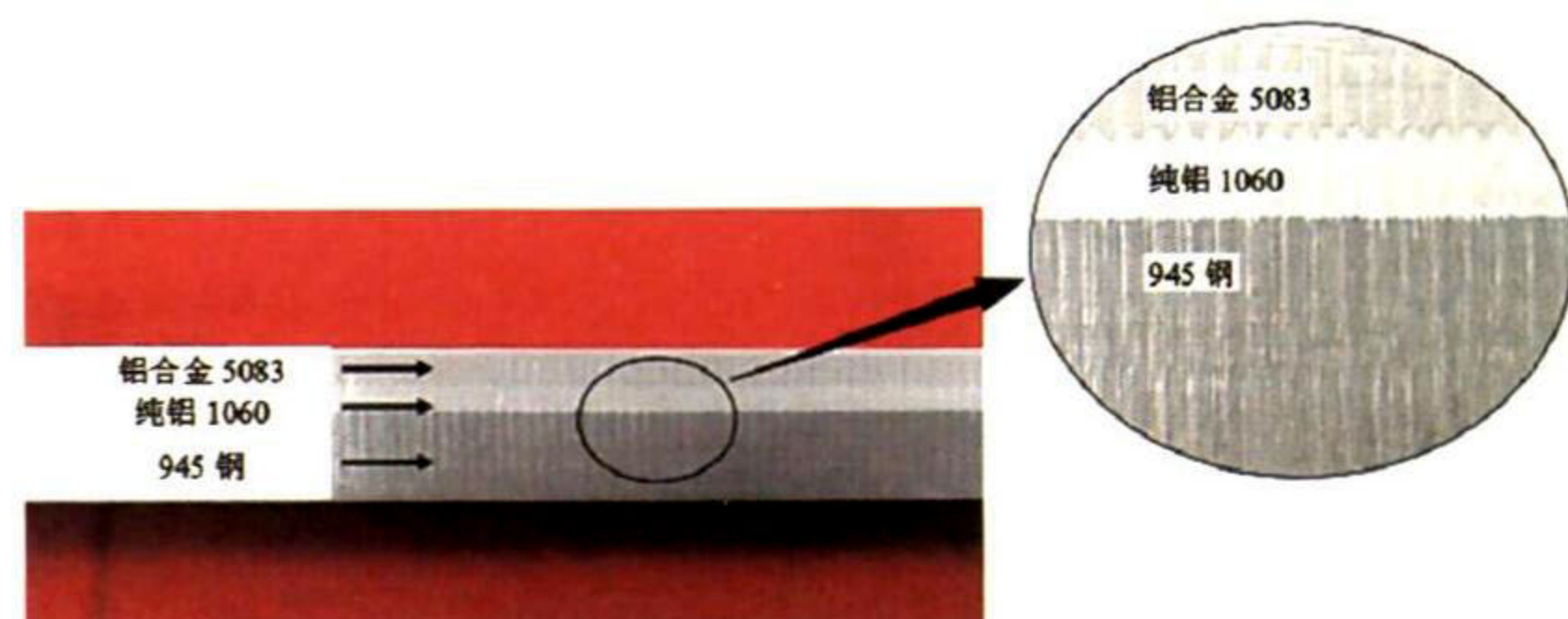


图 1 钢/铝过渡接头板

Fig.1 Steel/Aluminum Transition Joint Plate

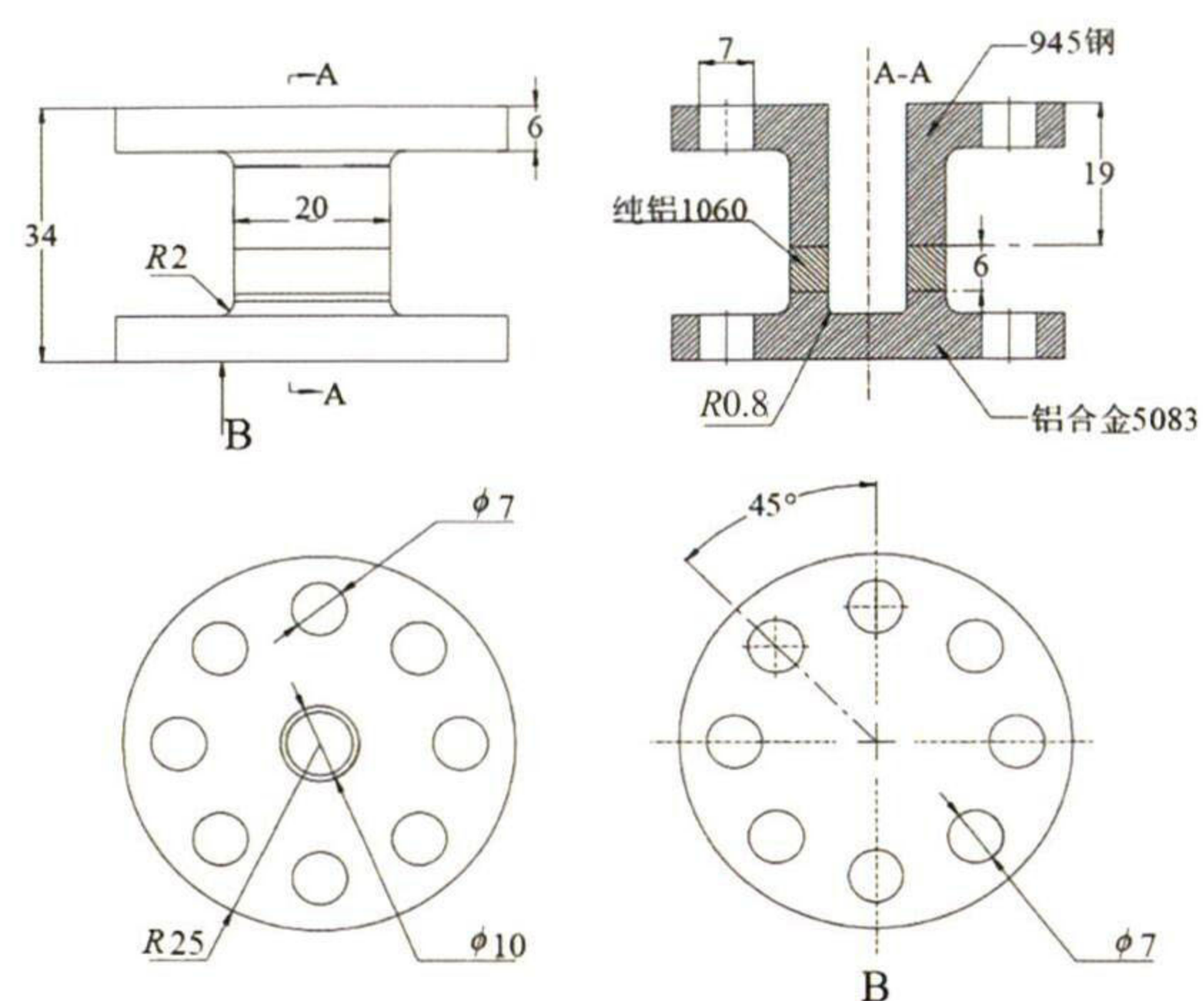


图 2 过渡接头试样尺寸图 (单位: mm)

Fig.2 Dimensional Diagram of Transition Joint Specimen (Unit: mm)

1.2 仿真分析

在进行疲劳试验之前, 运用有限元技术模拟试样受力情况, 推测过渡接头试样的潜在破坏位置以及可能产生应力集中的部位。对试样设计不合理的地方进行修改, 指导试验试样的制作, 提高经济性, 避免材料的浪费。试样的有限元仿真流程可从几何模型、模型网格、材料属性、约束条件和加载等方面讲述。

1.2.1 几何模型

过渡接头试样几何模型见图 3。

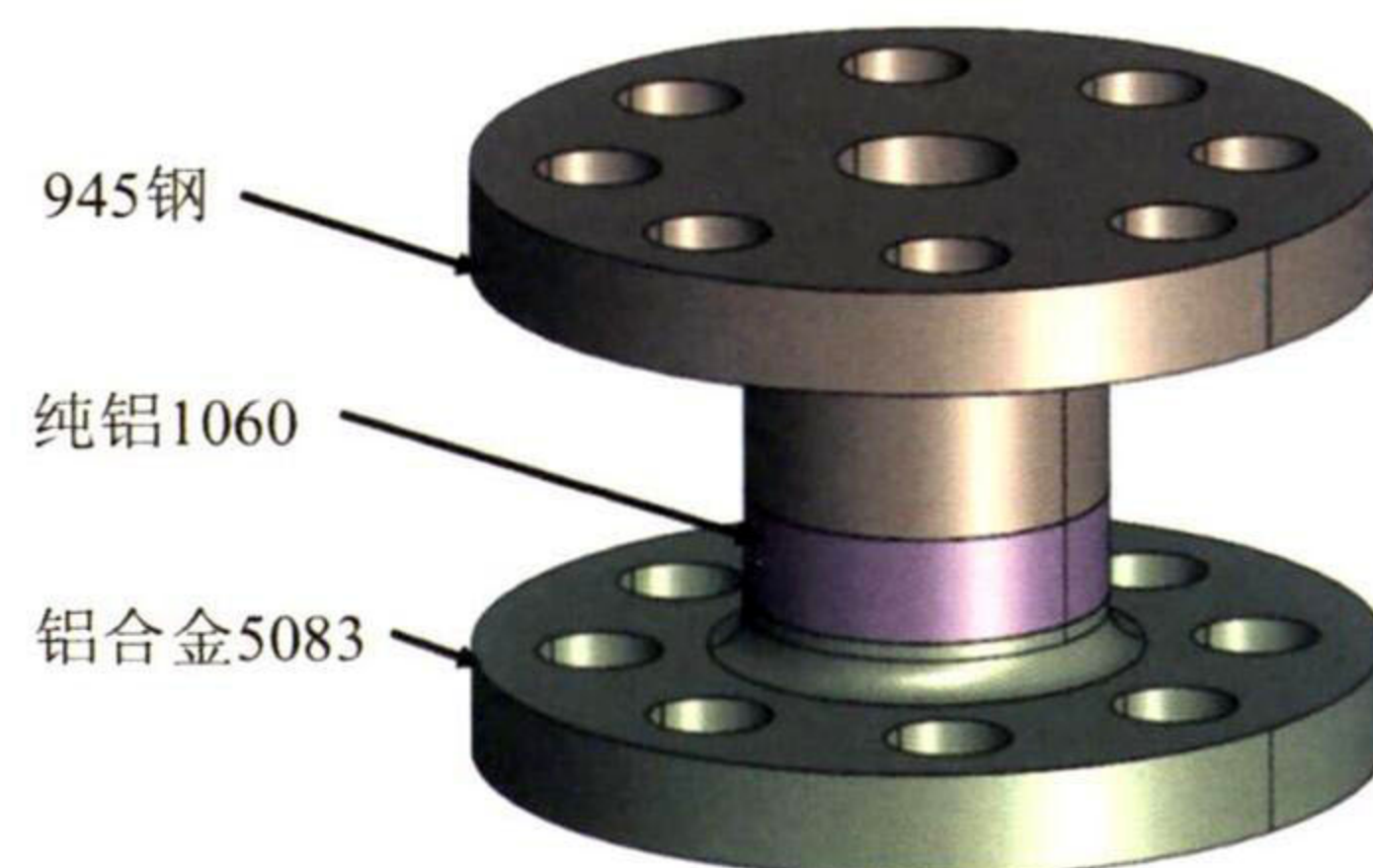


图 3 试样几何模型

Fig.3 Sample Geometric Model

1.2.2 模型网格

试样模型使用有限元软件 ANSYS Workbench 进行建模, 试样的有限元模型以六面体单元网格为主, 网格长宽高尺寸大小在 1 mm 左右, 考虑到过渡接头试样与试验机器配合的问题, 在过渡接头试样几何模型中上设置螺栓孔, 中部设有盲孔, 减少过渡接头结合界面的截面积。

1.2.3 材料属性

材料属性采用各向同性属性, 3 种材料的弹性模量 E 、泊松比 ν 、质量密度 ρ 的取值见表 1。根据表 1 中 3 种材料属性数据, 对有限元单元网格模型进行赋属性。

表 1 材料属性

Tab.1 Material Properties

材料	弹性模量/GPa	泊松比	质量密度/(g/cm ³)
945 钢	206	0.30	7.85
铝合金 5083	70	0.33	2.68
纯铝 1060	70	0.33	2.71

1.2.4 约束条件和加载

将模型两端分成固定端和拉伸端进行边界条件和载荷的施加，其中固定端对螺栓孔径表面施加固定支撑约束，模拟螺栓与试样连接，将其一端固定与试验平台上，其中拉伸端对螺栓孔径表面施加拉力载荷，模拟拉伸端通过螺栓连接受到试验机器的拉力。具体示意见图 4。

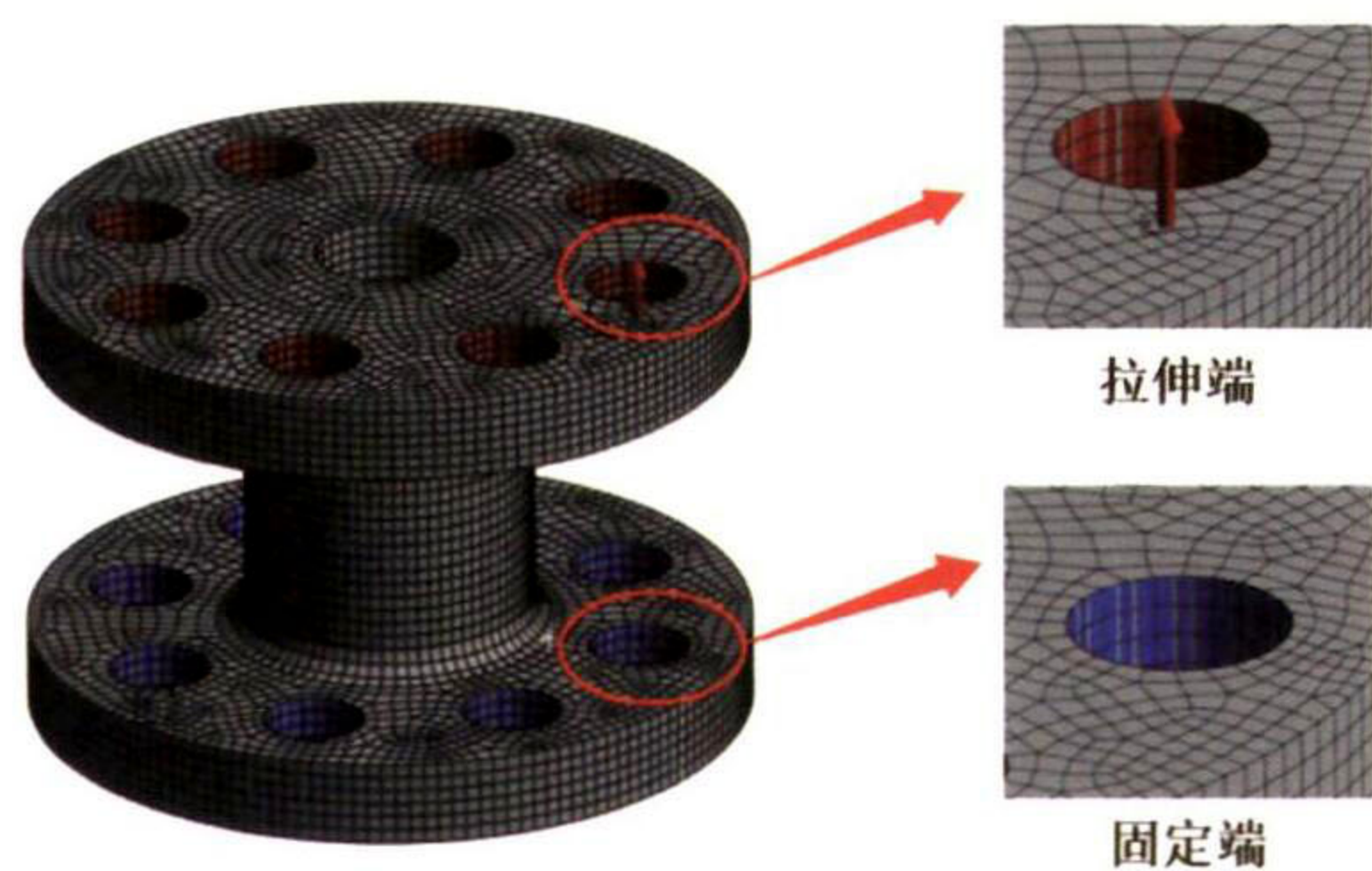


图 4 载荷和约束方式

Fig.4 Load and Constraint Methods

预测过渡接头试样的潜在破坏位置在过渡接头界面处，见图 5。图 5 中：关注点 1 为过渡接头钢和纯铝之间的界面；关注点 2 为过渡接头纯铝和铝合金之间的界面。

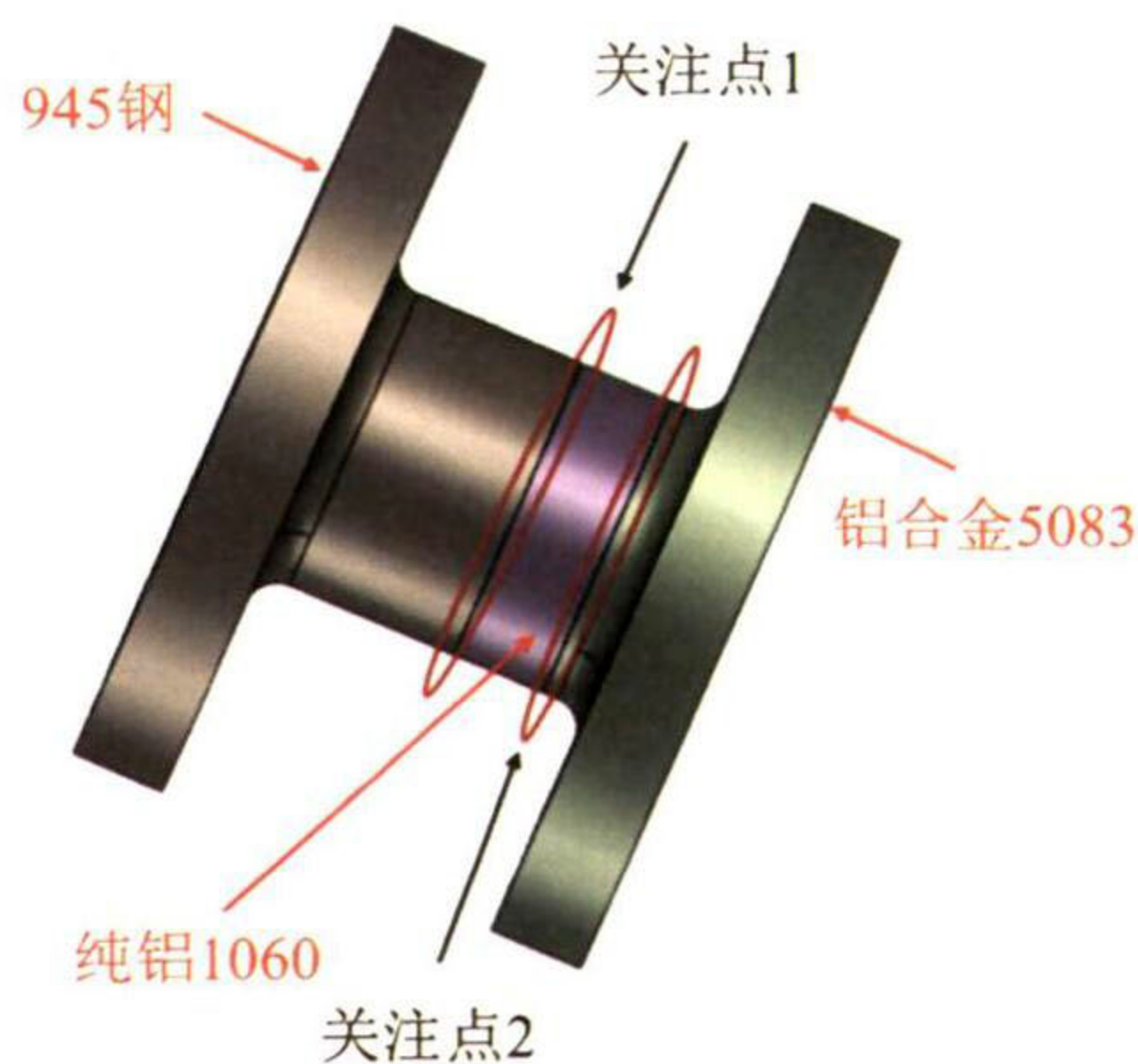


图 5 试样关注点示意图

Fig.5 Schematic Diagram of Sample Focus Points

1.2.5 有限元结果分析

为了研究过渡接头试样结构受力情况，以试样中间截面为参考，使过渡接头试样中部截面产生 50 MPa 的名义应力，通过对螺栓孔径表面施加拉力载荷达到这个目的。分析过渡接头试样受力特性，关注过渡接头试样潜在破坏位置的应力情况，应力结果见表 2。

表 2 试样应力结果

Tab.2 Sample Stress Results

试样	关注点	关注点位置	von Mises 应力结果/MPa
过渡接头试样	关注点 1	945 钢与纯铝 1060 结合界面	83.14
	关注点 2	铝合金 5083 与纯铝 1060 结合界面	63.09

过渡接头试样有限元模型整体应力见图 6(a)，其应力最大值处位于 945 钢一端的倒圆区域，大小为 294.96 MPa，此处应力水平较高，主要原因是倒圆区域处于试样模型截面变化的过渡处，由于试样有限元模型约束和加载位置以及几何结构的原因，两端螺栓孔位置应力较中间段偏大，试验时可通过增加垫片达到保护试样的目的。铝合金 5083 的倒圆区域应力见图 6(b)，应力最大值为 161.73 MPa，其余部位的应力过渡较为正常。945 钢与纯铝 1060 结合界面应力最大值为 83.14 MPa，见图 6(c)，铝合金 5083 与纯铝 1060 结合界面应力最大值为 63.09 MPa，见图 6(d)，2 个结合界面应力相近。由图 6(c)和图 6(d) 2 个界面的应力云图可知，结合界面的应力都大于图中其余部位的应力，因此，在两处界面处都有可能出现疲劳开裂。

1.3 收敛性分析

为验证上述有限元分析结果的准确性，对有限元模型进行网格收敛性分析。铝合金底盘离纯铝-铝合金

界面（关注点 2）距离较近，且倒圆区域处于试样模型截面变化的过渡处，需要判断铝合金 5083 一端倒圆过渡区域是否存在应力集中。通过网格逐步加密的方法进行计算可得到铝合金 5083 一端倒圆过渡区域应力值的变化趋势。

选取单元大小为 1 mm 时铝合金 5083 一端倒圆过渡区域应力最大处为网格收敛性分析子模型的应力测点，由于初始单元尺寸较小，以 1.25 倍的比例缩小单元尺寸，收敛性分析结果统计见表 3。

由表 3 可知，铝合金 5083 一端倒圆过渡区域在网格收敛性分析的过程中，随着单元数量的不断增加，对应一定单元尺寸下的应力并没有逐渐增大并趋向于某一极限值，且前 4 次迭代计算对应应力与最后一次迭代计算应力值的误差很小，所以该处并不属于应力集中区域，初始有限元计算时 1 mm 的单元尺寸已满足结果准确性的要求。

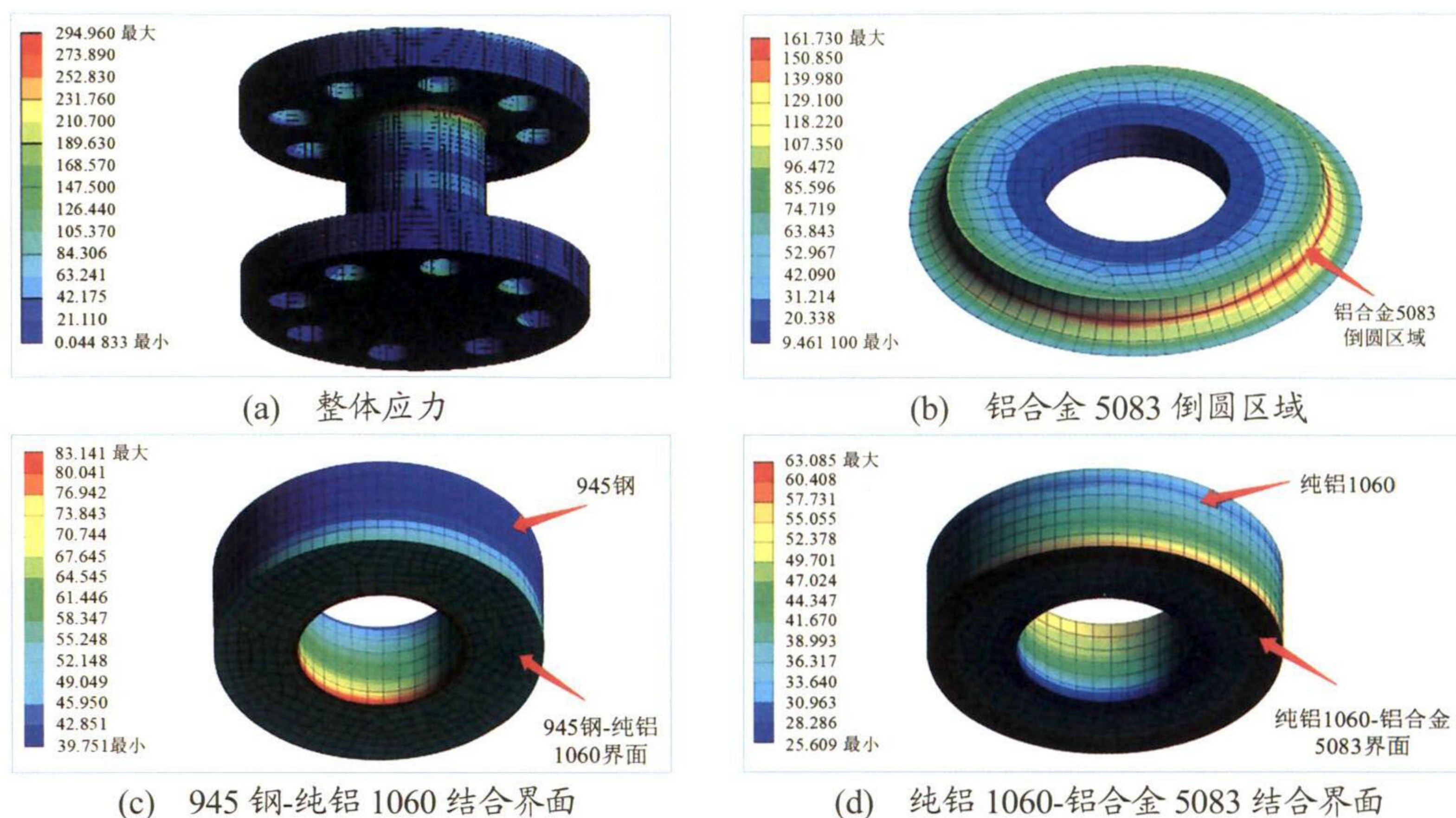


图6 试样 von Mises 应力云图 (单位: MPa)

Fig.6 Stress Cloud Map of Sample von Mises (Unit: MPa)

表3 收敛性分析结果统计

Tab.3 Statistics of Convergence Analysis Results

位置	迭代次数	单元尺寸/mm	单元数量/个	应力/MPa	与最后一次迭代计算误差
铝合金 5083 一端倒圆过渡区域	1	1.00	29 888	161.73	9.49%
	2	0.80	57 751	153.22	3.73%
	3	0.64	118 920	149.31	1.08%
	4	0.51	212 796	148.78	0.72%
	5	0.41	420 135	147.71	—

2 试样疲劳试验

2.1 疲劳试验方法

试验在 MTS 液压疲劳试验机上开展, 试验机器作业区域见图 7, 加载装置为±25 cm 的传感器, 试验在室温中进行。结合材料力学性能, 首先选用较低正弦加载波波峰值 20 MPa 对应的应力水平进行疲劳试验, 通过对应寿命次数摸索得到疲劳试验各级峰值对应的应力水平, 最终选取了峰值为 20 MPa、30 MPa、35 MPa、40 MPa 和 45 MPa 所对应的 5 级应力水平进行疲劳试验。加载形式为正弦波, 应力比 $R \approx 0.1$, 正弦波波形频率控制在 5 Hz。应力水平加载值见图 8。

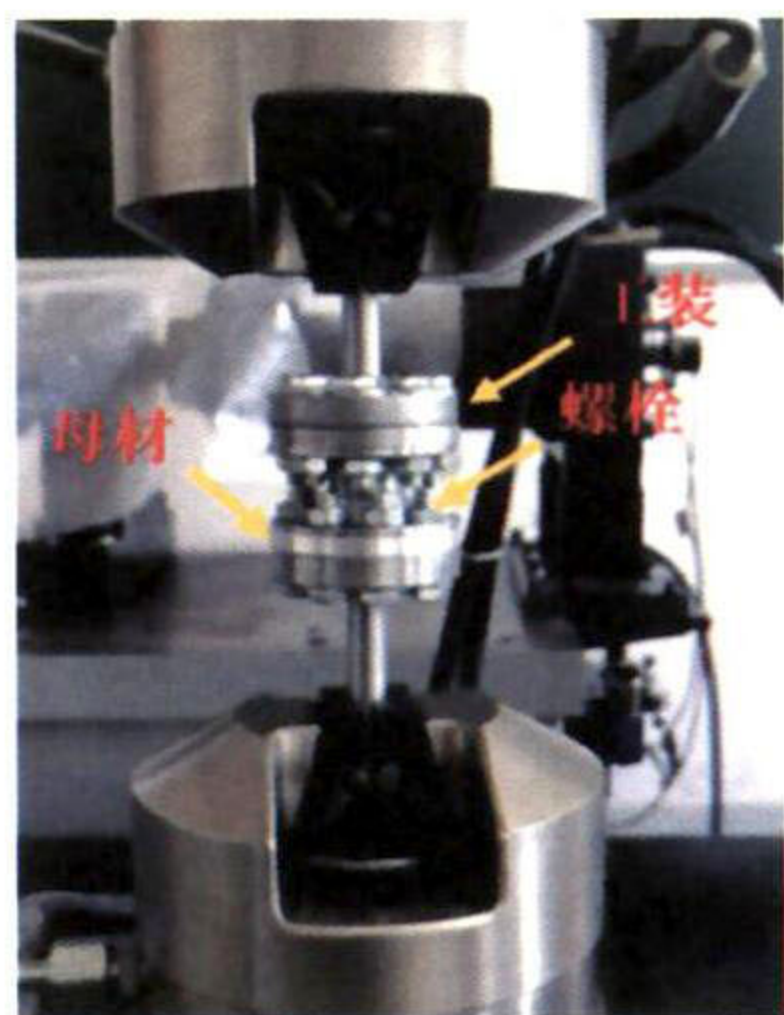


图7 试验工装

Fig.7 Experimental Equipment

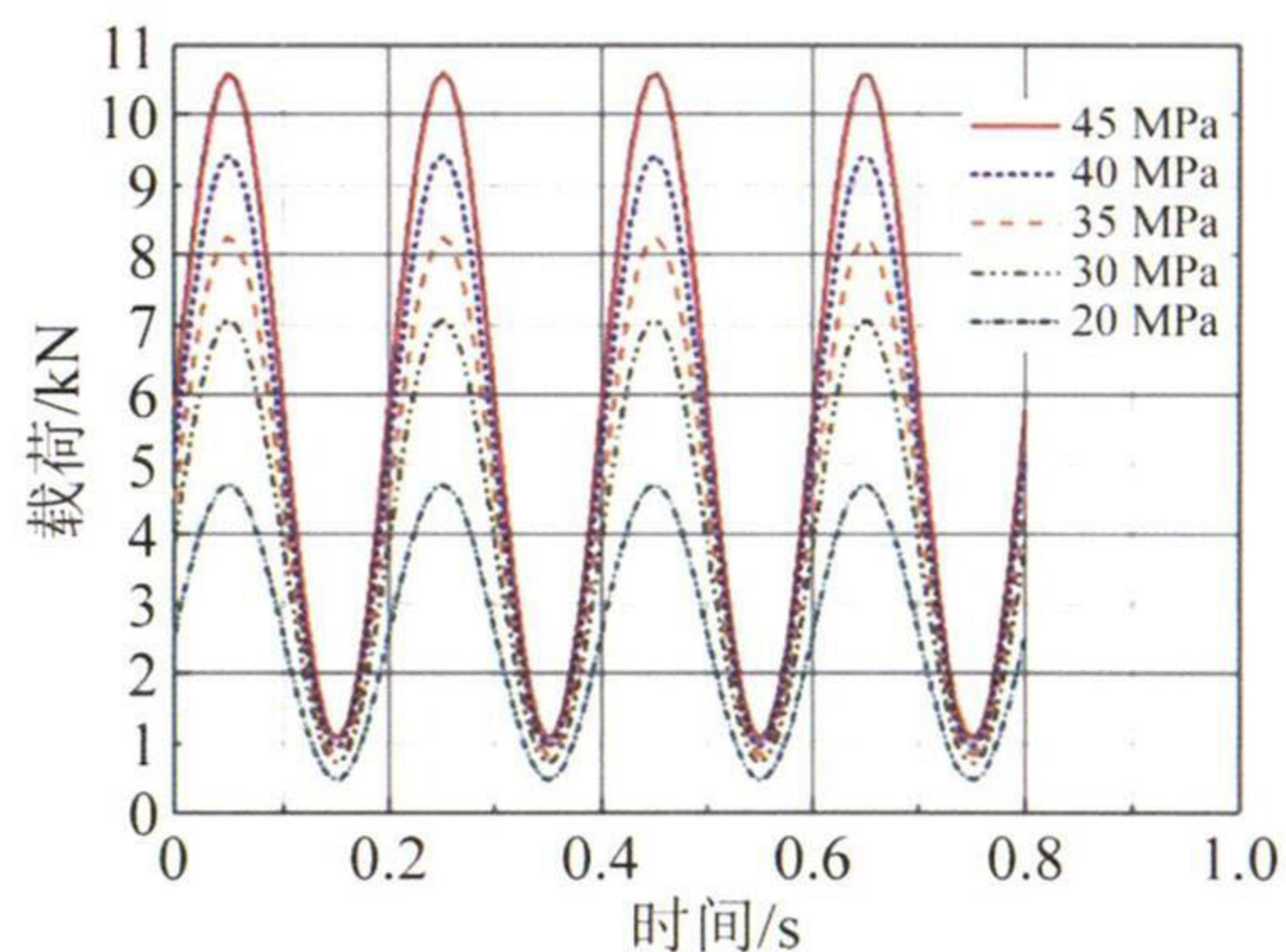


图8 试样加载波

Fig.8 Sample Loading Wave

2.2 疲劳试验分析

2.2.1 断口分析

过渡接头试样疲劳断裂见图 9。由图 9 可知: 经疲劳试验后, 试样断裂面均出现在铝合金和纯铝的界面处, 这说明铝合金和纯铝结合界面处的疲劳强度低于纯铝和钢结合界面处的疲劳强度。

图 10 为过渡接头试样断面图。由图 10 可知: 断面呈现波浪形。波浪形界面是爆炸焊接的典型界面^[14-15], 当异种材料进行爆炸焊接时, 上方飞板向下高速撞

击,在驻点附近形成了高温高压区,高温高压将界面金属熔化并相互流动,最终形成波浪形界面。

2.2.2 数据分析

过渡接头试样疲劳试验数据记录见表4。根据峰值和应力比($R \approx 0.1$)可以确定出试验的目标设定值和应力幅值。目标设定值即为疲劳试验加载波形的中轴线位置上的数值,应力幅值为上限和下限的差值。循环次数为试样断裂破坏或次数超过2 000 000次的试验中止次数。

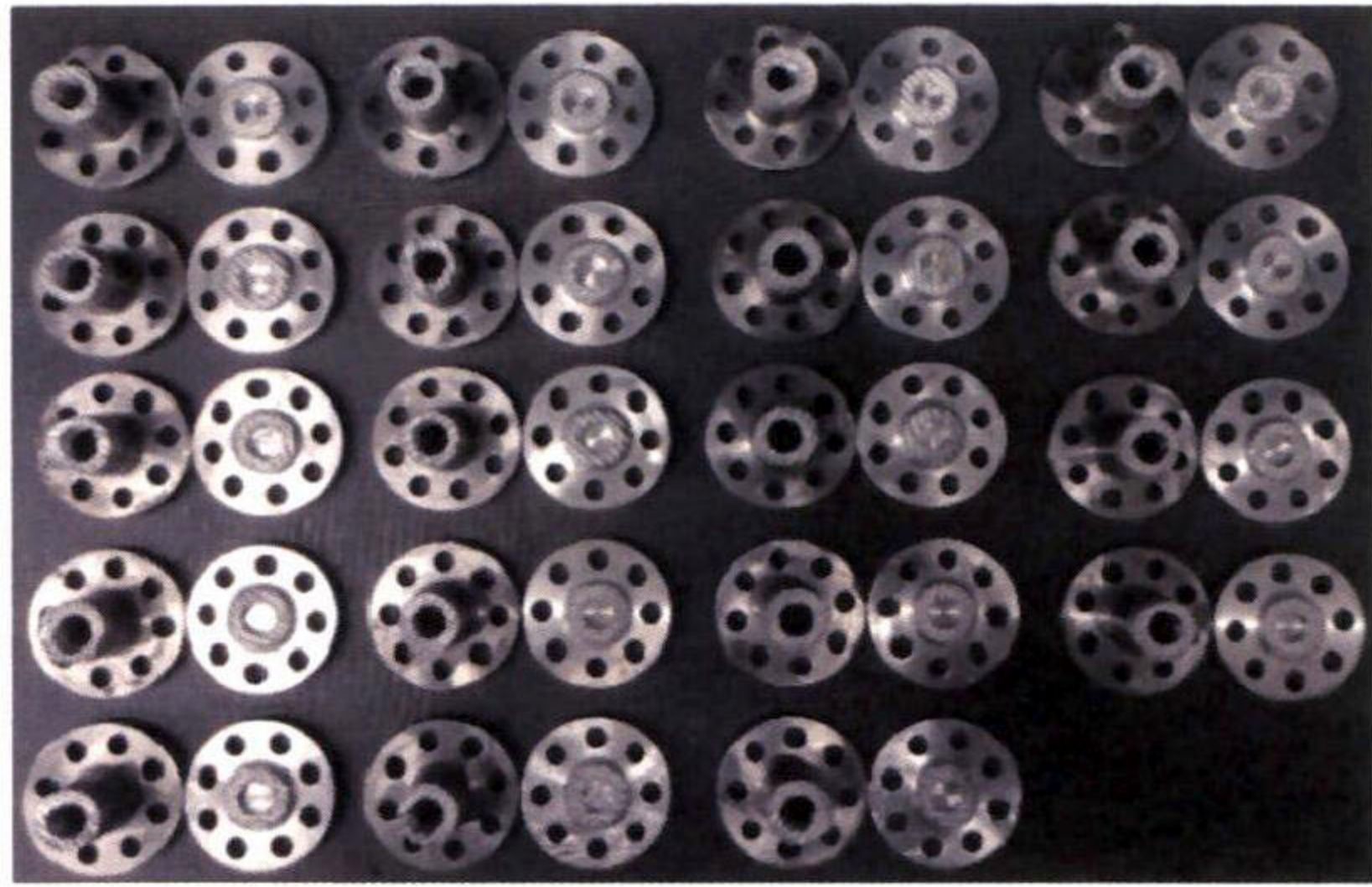


图9 过渡接头试样断裂图

Fig.9 Fracture Diagram of Transition Joint Specimen

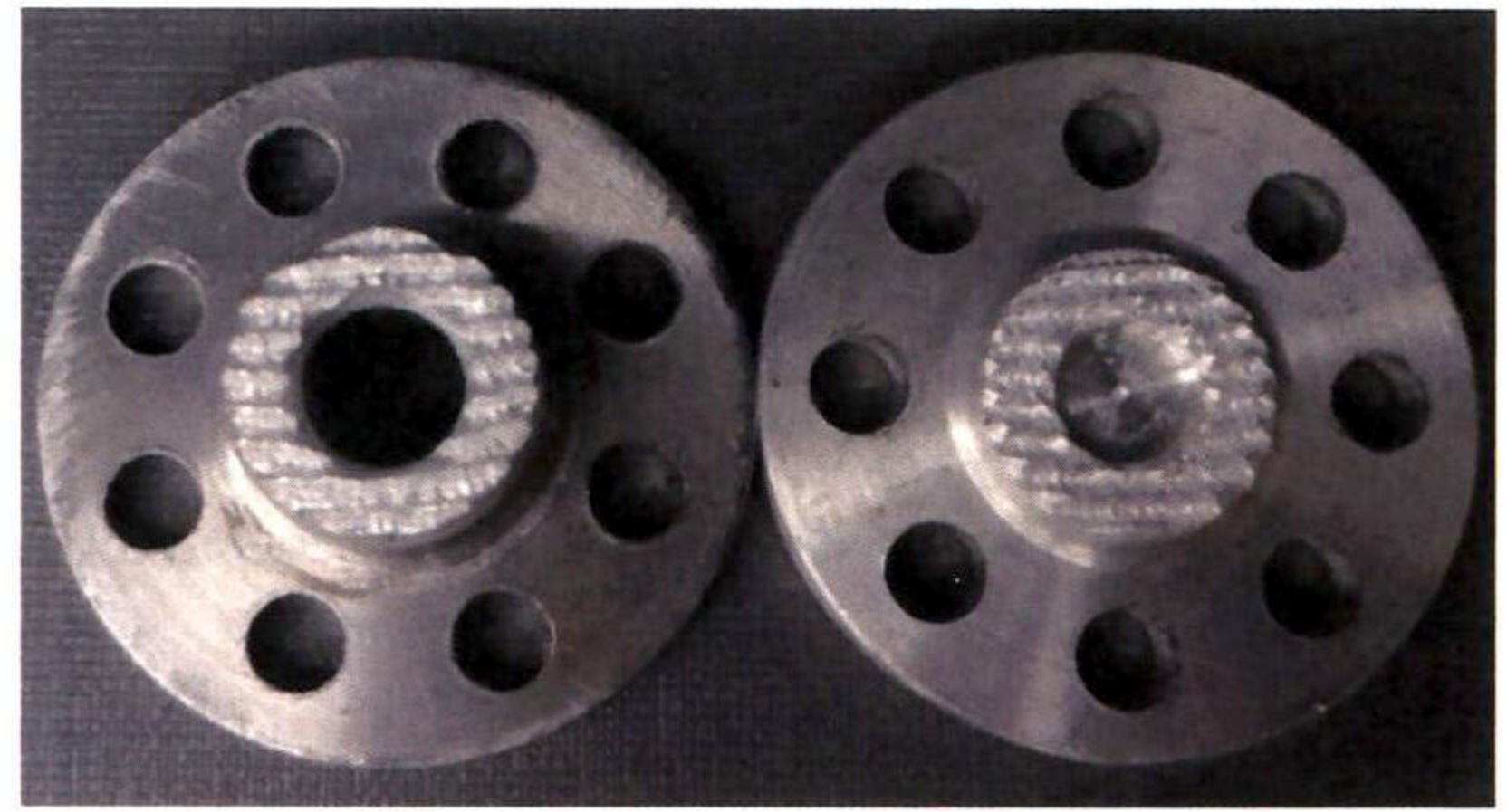


图10 过渡接头试样断面图

Fig.10 Cross Section Diagram of Transition Joint Specimen

表4 过渡接头试样数据记录表

Tab.4 Transition Joint Sample Data Record Table

试样编号	峰值/MPa	试验力加载				循环次数/次
		目标值/kN	幅值/kN	上限/kN	下限/kN	
1	45	5.83	4.77	10.60	1.06	30 812
2		5.83	4.77	10.60	1.06	36 505
3		5.83	4.77	10.60	1.06	102 910
4	40	5.18	4.24	9.42	0.94	44 161
5		5.18	4.24	9.42	0.94	619 250
6		5.18	4.24	9.42	0.94	203 939
7		5.18	4.24	9.42	0.94	212 030
8	35	5.18	4.24	9.42	0.94	212 065
9		4.54	3.71	8.25	0.82	585 148
10		4.54	3.71	8.25	0.82	412 997
11		4.54	3.71	8.25	0.82	206 095
12		4.54	3.71	8.25	0.82	222 483
13		4.54	3.71	8.25	0.82	1 147 003
14		4.54	3.71	8.25	0.82	80 008
15		4.54	3.71	8.25	0.82	82 238
16	30	4.54	3.71	8.25	0.82	549 527
17		3.89	3.18	7.07	0.71	20 600
18		3.89	3.18	7.07	0.71	443 160
19		3.89	3.18	7.07	0.71	>2 000 000
20		3.89	3.18	7.07	0.71	>2 000 000
21	20	3.89	3.18	7.07	0.71	>2 000 000
22		2.59	2.12	4.71	0.47	>2 000 000

2.3 S-N 曲线绘制

疲劳评估是基于疲劳试验得到的 $S-N$ 曲线, 设计 $S-N$ 曲线时基于试验数据得到的 50%存活概率的平均 $S-N$ 曲线以下 2 倍标准差制定。

存活率 $P_s=50\%$ 对应的 $S-N$ 曲线为

$$\lg N = 22.23 - 10.62 \lg S \quad (1)$$

存活率 $P_s=2.3\%$ 对应的 $S-N$ 曲线为

$$\lg N = 22.60 - 10.62 \lg S \quad (2)$$

存活率 $P_s=97.7\%$ 对应的 $S-N$ 曲线为

$$\lg N = 21.90 - 10.62 \lg S \quad (3)$$

根据试验结果绘制名义应力的 $S-N$ 曲线。挑选寿命次数比较集中的峰值分别为 30 MPa、35 MPa、40 MPa 和 50 MPa 所对应的数据绘制名义应力的 $S-N$ 曲线, 图 11 为基于试验数据得到的过渡接头试样试验疲劳评估 $S-N$ 曲线。

由图 11 可知: 疲劳寿命 $N_{ref}=2.0 \times 10^6$ 次时对应的疲劳强度为 29.39 MPa, 在不同应力水平下疲劳强度变化程度的曲线斜率负倒数为 $m=10.62$, 数据分散程度的分散带指数 $T_\sigma=1.15$ 。

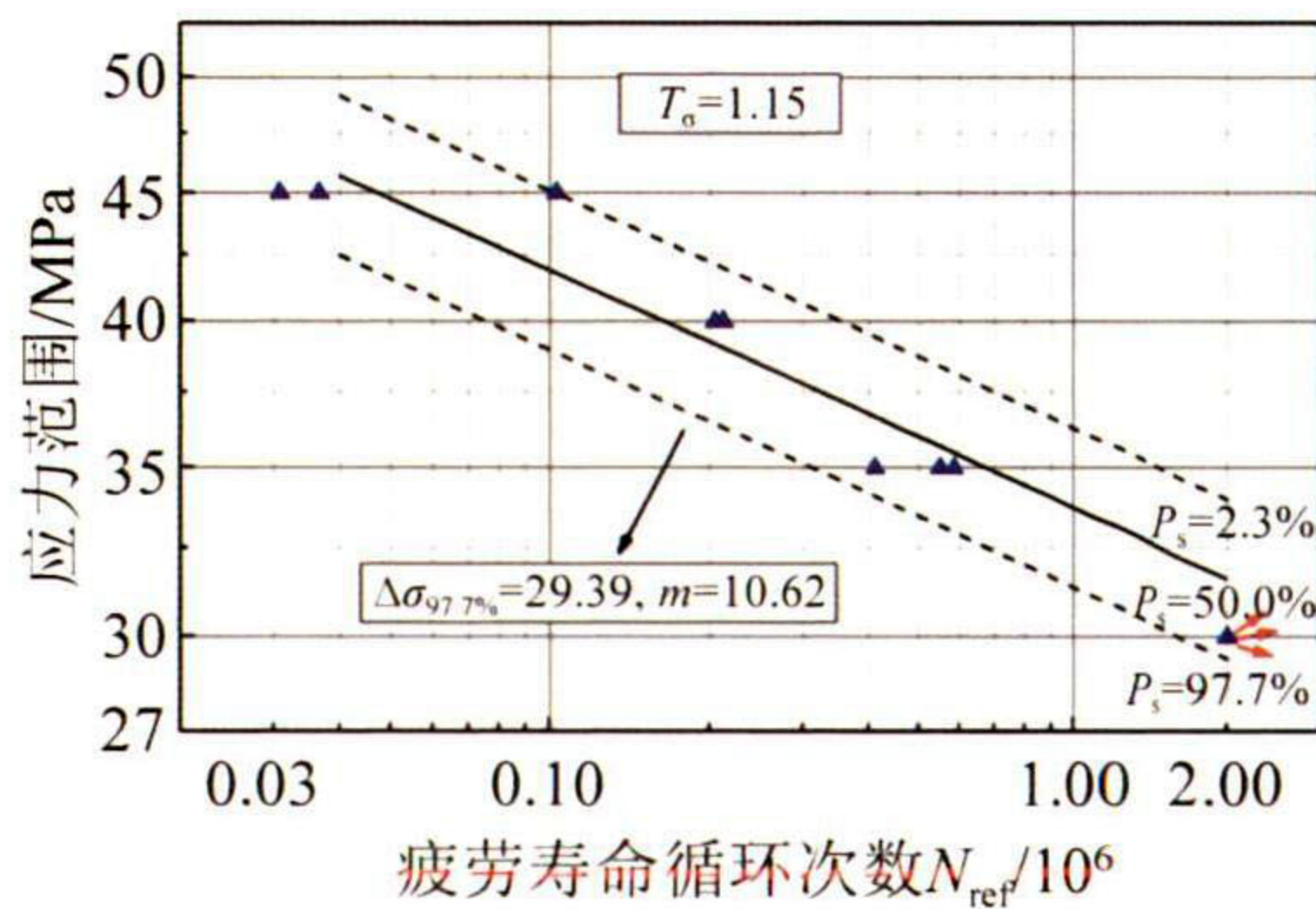


图 11 过渡接头试样 $S-N$ 曲线

Fig.11 S-N Curves of Transition Joint Specimen

3 结论

1) 为了探究钢/铝爆炸焊过渡接头的疲劳性能, 设计了基于 3 种不同材料的爆炸焊过渡接头的拉伸疲劳试样, 得到了爆炸复合接头疲劳失效位置和典型失效模式。

2) 基于有限元方法, 模拟得到了爆炸复合接头应力集中和容易疲劳失效的位置。通过疲劳试验发现试样断裂面均出现在铝合金和纯铝的界面处, 界面断裂形貌呈现波浪形, 这说明爆炸复合连接界面是过渡接头疲劳失效的关键部位。

3) 通过一系列爆炸复合接头疲劳试验拟合得到特征 $S-N$ 曲线方程 $\lg N = 21.90 - 10.62 \lg S$, 可用于指导船用爆炸复合结构的疲劳寿命预报。

4) 通过进行疲劳试验探究了船用钢/铝爆炸焊过渡接头的疲劳性能, 可为船舶轻量化设计提供参考。

参考文献:

- [1] CORIGLIANO P, CRUPI V, GUGLIELMINO E. Non-Linear Finite Element Simulation of Explosive Welded Joints of Dissimilar Metals for Shipbuilding Applications[J]. Ocean Engineering, 2018, 160: 346-353.
- [2] 黄健, 邱文, 张吉, 等. 钢铝过渡接头的应用研究[J]. 船舶与海洋工程, 2016, 32(4): 54-58.
HUANG J, QIU W, ZHENG J, et al. Study on the Application of Steel-Aluminum Transition Joint[J]. Naval Architecture and Ocean Engineering, 2016, 32(4): 54-58. (in Chinese)
- [3] ACARER M, DEMIR B. An Investigation of Mechanical and Metallurgical Properties of Explosive Welded Aluminum-Dual Phase Steel[J]. Materials Letters, 2008, 62(25): 4158-4160.
- [4] FINDIK F. Recent Developments in Explosive Welding[J]. Materials & Design, 2011, 32(3): 1081-1093.
- [5] YOUNG G A, BANKER J G. Explosion Welded, Bi-Metallic Solutions to Dissimilar Metal Joining[C]//13th Offshore Symposium. 2004.
- [6] 李敬勇, 赵路遇. 船舶结构用铝-钛-钢复合过渡接头疲劳性能研究[J]. 船舶工程, 1997(6): 35-37.
LI J Y, ZHAO L Y. Study on Fatigue Performance of Al-Alloy/Titanium/Steel Compound Transition Joints on Ship Structure[J]. Ship Engineering, 1997(6): 35-37. (in Chinese)
- [7] KAROLCZUK A, KOWALSKI M, BANSKI R, et al. Fatigue Phenomena in Explosively Welded Steel-Titanium Clad Components Subjected to Push-Pull Loading[J]. International Journal of Fatigue, 2013, 48: 101-108.
- [8] BECKER N, GAUTHIER D, VIDAL E E. Fatigue Properties of Steel to Aluminum Transition Joints Produced by Explosion Welding[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 139: 105736.
- [9] 柴希阳, 穆晓彪, 罗小兵, 等. 铝-铝-钢与铝-钛-钢复合板疲劳性能对比研究[J]. 材料开发与应用, 2022, 37(6): 32-38.
CHAI X Y, MU X B, LUO X B, et al. Comparative Study on Fatigue Properties of Al-Al-Steel and Al-Ti-Steel Clad Plates[J]. Development and Application of Materials, 2022, 37(6): 32-38. (in Chinese)
- [10] BÖHM M, KOWALSKI M. Fatigue Life Estimation of Explosive Cladded Transition Joints with the Use of the Spectral Method for the Case of a Random Sea State[J]. Marine Structures, 2020, 71: 102739.

(下转第 148 页)

- Ming Research and Development, 2020, 40(6): 140-143.
(in Chinese)
- [58] DAI Y, XUE C, SU Q, et al. Numerical Analysis on Hydrodynamic Characteristics of a Deep-Sea Mining Vehicle under Three Typical Motions[J]. Ocean Engineering, 2021, 235: 109446.
- [59] DAI Y, XUE C, SU Q. An Integrated Dynamic Model and optimized Fuzzy Controller for Path Tracking of Deep-Sea Mining Vehicle[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(3): 249.
- [60] 黄瑞铭, 李翔晟. 深海集矿车速度控制与轨迹跟踪设计及实现[J]. 矿冶工程, 2019, 39(3): 20-24.
HUANG R M, LI X S. Design and Test of Speed Control and Trajectory Tracking for Deep-Sea Mining Vehicle[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019, 39(3): 20-24. (in Chinese)
- [61] YOON S M, HONG S, PARK S J, et al. Track Velocity Control of Crawler Type Underwater Mining Robot through Shallow-Water Test[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(10): 3291-3298.
- [62] YEU T K, YOON S M, HONG S, et al. Steering Performance Test of Underwater Mining Robot[C]//2014 Oceans-St. John's. 2014.
- [63] 吴友华, 陈昱衡, 侯井宝, 等. 深海采矿车行走速度控制器设计[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(5): 150-155.
WU Y H, CHEN Y H, HOU J B, et al. Control Model Design on Travel Speed of Deep-Sea Mining Vehicle[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(5): 150-155. (in Chinese)
- [64] LIU Y, GUO S S. Trajectory Tracking Control of Deep Sea Mining Vehicle Based on Iterative Learning Algorithm [C]//2017 International Conference Advanced Engineering and Technology Research. 2017.
- [65] LI L, LI H, ZOU Y H, et al. Simulation of Deep-Sea Extremophiles Sampling System and Experimental Study [C]//International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering. 2011.
- [66] 毛竞航, 吕海宁, 杨建民, 等. 基于模糊 PID 的深海采矿机器人路径跟踪控制[J]. 海洋工程, 2021, 39(5): 151-161.
MAO J H, LYU H N, YANG J M, et al. Path Following Control of Deep Sea Mining Vehicle Based on Fuzzy PID [J]. The Ocean Engineering, 2021, 39(5): 151-161. (in Chinese)
- [67] HERZOG K, SCHULTE E, ATMANAND M A, et al. Slip Control System for a Deep-Sea Mining Machine[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2007, 4(2): 282-286.
- [68] OUYANG H, WANG S P. Slip Control for Deep Sea Mining Vehicle: Sliding Mode Control Approach[C]//35th Chinese Control Conference (CCC). 2016.
- [69] 陈波. 钴结壳采矿车行走路径控制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
CHEN B. Research on Tracking Predetermined Path for the Cobalt Crust Mining Vehicle[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- =====
- (上接第 127 页)
- [11] 余洋. 船用铝合金/钢复合接头承载能力提高方法研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
YU Y. Research on Improving the Bearing Capacity of Aluminum Alloy/Steel Composite Joints for Ship Engineering[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019.
- [12] 刘扣森. 高性能铝-钢爆炸复合过渡接头研制及应用研究[D]. 江苏镇江: 江苏科技大学, 2011.
LIU Q S. Research on the Development and Application of High Performance Aluminum Steel Explosive Composite Transition Joint[D]. Zhenjiang, Jiangsu: Jiangsu University of Science and Technology, 2011.
- [13] 王晓宇. 船体钢铝复合接头连接结构疲劳性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
WANG X Y. Research on Fatigue Performance of Ship Hull Steel Aluminum Composite Joint Connection Structure[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021.
- [14] 曾翔宇, 李晓杰, 王小红, 等. 爆炸焊接波状界面的形成和发展[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(6): 1977-1983.
ZENG X Y, LI X J, WANG X H, et al. Formation and Development of Explosive Welding Wave Interface[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(6): 1977-1983. (in Chinese)
- [15] 张婷婷, 王文先, 魏屹, 等. 钛/铝/镁爆炸焊复合板波形界面及力学性能[J]. 焊接学报, 2017, 38(8): 33-36.
ZAHNG T T, WANG W X, WEI Y, et al. Wavy Interface and Mechanical Properties of Explosive Welded Ti/Al/Mg Cladded Plate[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(8): 33-36. (in Chinese)