

Numerical Method Study on Safety Assessment of Welding Defects of 5A06 Aluminum Alloy Based on Ultimate Load and Fracture Strength

Hongzhou Yan¹, Xiangguo Zeng^{1*}, Maobing Shuai², Yubin Li², Huayan Chen¹

¹College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu Sichuan

²China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan

Email: *xianguo_zeng@126.com

Received: Dec. 3rd, 2017; accepted: Dec. 19th, 2017; published: Dec. 29th, 2017

Abstract

In this paper, a numerical method for assessment the safety of 5A06 aluminum alloy strip with welded defects is established. First, the quantitative relationship between the limit stress and the length of the crack is established by the limit load analysis method, and then the failure assessment curve (FAC) can be obtained. For the 130 mm thick 5A06 Aluminum Alloy butt welding plate, welding residual stress distribution and residual stress intensity factor are obtained by SINTAP, and the stress intensity factor of the working load is calculated by the virtual crack closure technique (VCCT method), then the 5A06 Aluminum Alloy failure assessment diagram (FAD) is established. The numerical method proposed in this paper can be used to evaluate the safety of the bearing capacity under the condition of a given defect. On the contrary, under the given external load conditions, the limitation of the defect can be determined.

Keywords

Numerical Simulation, 5A06 Aluminum, Butt-Welded Plate Crack, FAD, Safety Assessment

基于极限载荷与断裂强度的5A06铝合金焊接缺陷安全性评定的数值方法研究

颜虹州¹, 曾祥国^{1*}, 帅茂兵², 李玉斌², 陈华燕¹

¹四川大学建筑与环境学院, 四川 成都

²中国工程物理研究院, 四川 绵阳

*通讯作者。

Email: xiangguo_zeng@126.com

收稿日期: 2017年12月3日; 录用日期: 2017年12月19日; 发布日期: 2017年12月29日

摘要

本文建立了一种针对5A06铝合金带焊接缺陷平板的安全性评定的数值方法。首先采用极限载荷分析法建立了极限应力和裂纹长度的定量关系,从而获得失效评估曲线(FAC)。对130 mm厚的5A06铝合金对接焊接平板,采用SINTAP标准获得焊接残余应力分布和残余应力强度因子,并用虚拟裂纹闭合技术(VCCT法)计算工作载荷作用下的应力强度因子,建立了5A06铝合金失效评估图(FAD)。论文提出的数值方法能够对给定缺陷条件下的承载能力进行安全性评定;相反,在给定外载荷条件下,对缺陷的容纳限值进行确定。

关键词

数值模拟, 5A06铝合金, 平板焊接裂纹, FAD技术, 安全性评估

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

焊接工艺已广泛运用于机械制造中,焊接接头作为结构构件中的薄弱环节,其安全性很大程度上影响到结构整体的安全程度。虽然现在焊接工艺越来越成熟,但焊接结构构件中要获得无缺陷的焊接接头,在技术上是相当困难的,也是不经济的,故焊接构件避免不了存在残余应力与焊接缺陷(孔洞、裂纹)。因此研究焊接结构构件满足使用要求下,将缺陷限制在多大的范围之内,使其对焊接结构构件的运行不致产生危害成为了一个重大课题。

自从 Dowling 和 Townley 基于“合于使用原则”提出失效评估图(FAD)技术[1]以后,因其同时考虑塑性破坏与脆性断裂而得到了广泛认可并迅速的得到发展,之后围绕着 FAD 技术的研究工作从未间断。如考虑循环加载[2]和混合加载[3]、高温和蠕变[4]、概率与可靠性[5] [6]、多裂纹[7]和韧性断裂[8]等的 FAD 评估。一些知名机构也基于 FAD 建立起了规范与标准,如 API 579, BS 7910, CEBG R6, JEME 和 SINTAP。并后续有基于规范进行比较验证与改进的研究工作。如基于应变的 FAD 评估[9] [10]、针对三维面裂纹提出的统一约束参数的 FAD 评估[11]。现失效评估图(FAD)技术可应用于管道与压力容器 [12]-[21]等众多领域的安全性评估当中。

虽然 FAD 技术应用广泛,然而针对焊接构件的 FAD 评估还有待进一步深入,当前很多的研究工作都是围绕着规范进行,如潘建宾[22]等运用 R6 规范讨论了裂纹位置对承载能力的影响,王元清[23]等人介绍 SINTAP 的 FAD 评估步骤,并与断裂判据 K_{IC} 进行了对比。Yun-Jae Kim 等人[24]阐述了欧洲工业结构完整性评定方法(SINTAP)中对于焊接接头强度不匹配的缺陷评定方法,给出了该方法的有限元和实验验证。其众多研究说明了标准的可靠性,然而规范的评价体系是同时满足多数材料的 FAD 评估,故针对部分材料的安全性评估十分保守,经济性差。故探究一种灵活的、针对各种材料的安全评估方式是十分

有意义的。

本文对 130 mm 厚的 5A06 铝合金对接焊接平板,采用 SINTAP 标准获得焊接残余应力分布和残余应力强度因子,并用虚拟裂纹闭合技术(VCCT 法)计算工作载荷作用下的应力强度因子,建立了 5A06 铝合金失效评估图(FAD)。论文提出的数值方法能够对给定缺陷条件下的承载能力进行安全性评定。

2. 失效评估曲线(FAC)的数值确定方法

2.1. 材料 5A06 铝合金力学性能参数

模型的材料为广泛用于航空航天等重要领域的 5A06 铝合金,模型为厚 130 mm 的超厚平板,焊接方式采用多层填丝激光焊(如图 2 所示),根据相关研究发现,其焊接接头拉伸强度可达到母材的 93%以上,延伸率为基材的 58%左右[25],故可在进行有限元分析时,焊缝区域的材料和母材区域材料取同一应力应变曲线。通过有限元商业软件 ANSYS 计算板件存在不同长度的中央裂纹下应力应变场,并为评估提供数据。

5A06 铝合金板的应力应变曲线如图 1 所示[26],相关的力学性能参数如表 1 所示。

2.2. 有限元模型

针对图 2 所示的平板对焊工艺为:首先是激光自熔焊接区,然后是激光填丝焊。设模型中间位置存在穿透型平面裂纹,可将计算模型简化为二维带裂纹模型。

由于模型具有对称性,故可取 1/4 模型进行计算,使用四边形八节点单元(plane183),为保证计算精度,对于裂纹前沿做网格的局部细化,模型共 39675 个单元,划分网格及约束如图 3 所示。

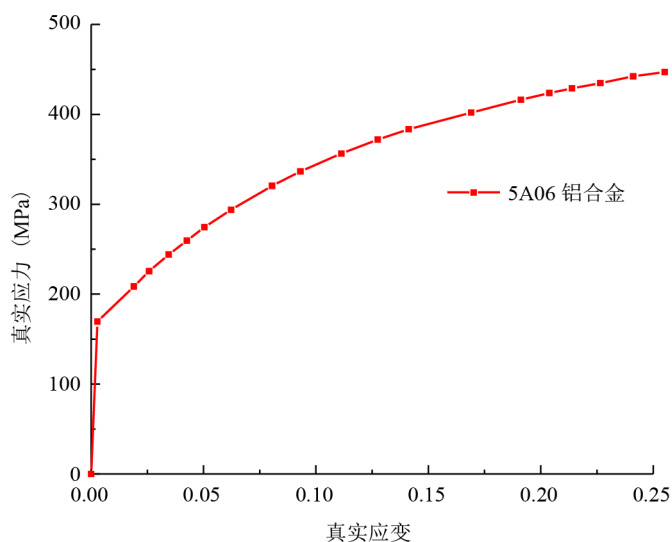


Figure 1. Real stress-strain curve of 5A06 aluminum alloy

图 1. 5A06 铝合金真实应力应变曲线

Table 1. Mechanical properties of 5A06 aluminum alloy

表 1. 5A06 铝合金材料力学性能

弹性模量 E(GPa)	抗拉强度 σ_b (MPa)	条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	伸长率 δ_{10} (%)
69.69	355	175	30.64

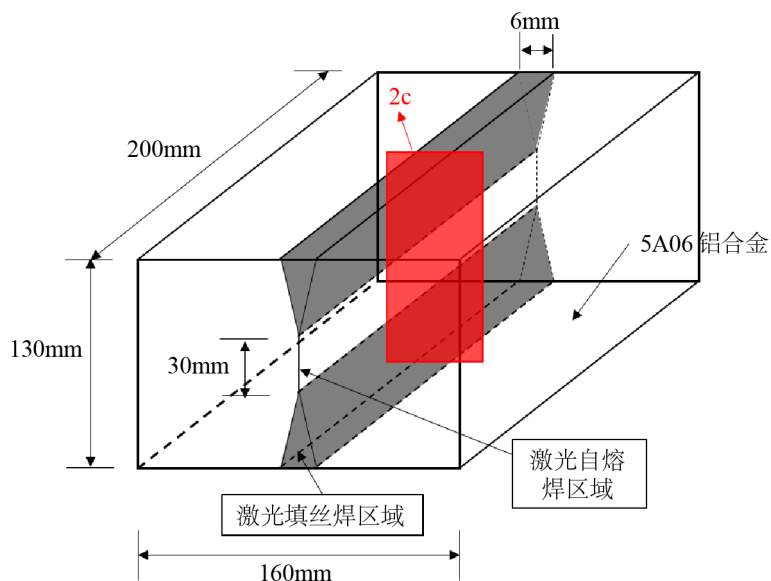


Figure 2. 3D model of 5A06 aluminum alloy plate with penetrating crack
图 2. 5A06 铝合金平板含穿透裂纹三维模型

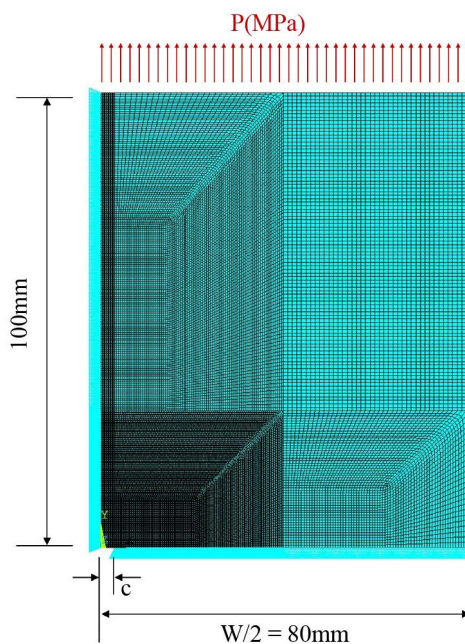


Figure 3. Meshing of two dimensional model with central crack
图 3. 含中央裂纹二维模型网格划分

3. 失效评估曲线(FAC)

3.1. 带裂纹 5A06 铝合金板确定极限应力 σ_{NC}

采用含中央穿透型裂纹平板确定 5A06 铝合金极限应力 σ_{NC} 和 FAC，矩形板的尺寸长为 200 mm，宽为 160 mm，半裂纹长度分别取为 4 mm，8 mm，12 mm，16 mm，20 mm。采用有限元方法计算获得的加载端应力(图 3 中的 P)与最大应变的关系曲线如图 4 所示。极限应力 σ_{NC} 的确定方式为：求出载荷—应

变曲线的弹性斜率，然后作出五倍弹性斜率直线，极限应力 σ_{NC} 定义为两线相交处的应力值[27]。采用以上方法确定的 5A06 铝合金不同裂纹长度下的极限应力 σ_{NC} 如表 2 所示。通过表 2 的数据，获得无因次极限应力比 σ_{NC}/σ_0 与裂纹长度与板宽比 $2c/W$ 的关系曲线如图 5 所示，通过数据拟合，得到其函数关系式为：

$$\frac{\sigma_{NC}}{\sigma_0} = 0.43 + 0.4e^{20c/W} + 0.18e^{66.7c/W} \quad (1)$$

式中： σ_0 为不带裂纹的极限应力， σ_{NC} 为带裂纹的极限应力， c 为半裂纹长度， W 为板的宽度。

3.2. FAC 的确定方法

根据上节的公式(1)，由极限载荷分析法得到平板在特定裂纹长度下的极限应力 σ_{NC} ；通过公式(3)获得有限宽板修正因子，利用公式(2)换算得到无限宽板下的极限载荷 σ_{NC}^∞ 。利用几组不同裂纹下的极限载荷 σ_{NC}^∞ 和无缺陷存在下板的极限载荷 σ_0 ，代入基于固有缺陷模型[28]得到的 FAC 关系式(5)，拟合获得常数 δ_{aci} 和 K_{IFM} ，即可确定出 FAC。

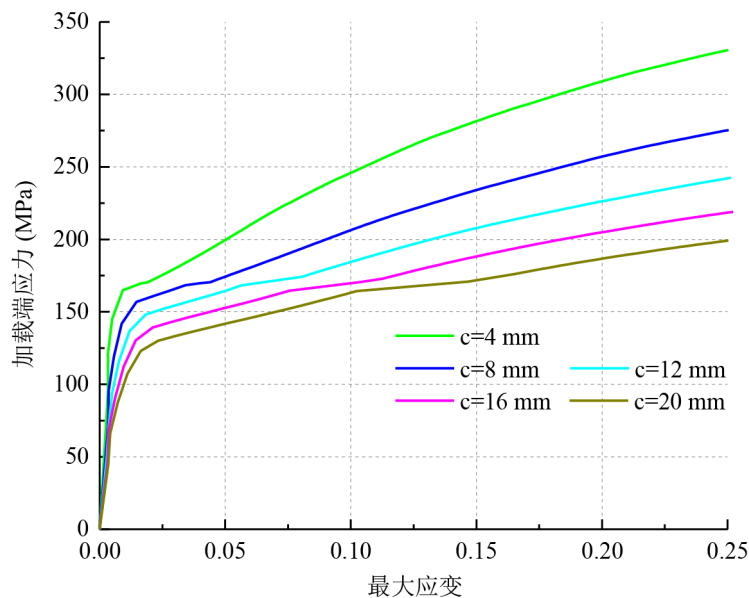


Figure 4. Load-end stress and maximum strain curve with different crack lengths
图 4. 不同裂纹长度对应的加载端应力与最大应变曲线

Table 2. Ultimate stress σ_{NC} with different cracks

表 2. 不同裂纹下的极限应力 σ_{NC}

W(mm)	c(mm)	σ_{NC} (MPa)	σ_0 (MPa)	$2c/W$	σ_{NC}/σ_0
160	4	245	345	0.05	0.71
160	8	205	345	0.10	0.59
160	12	185	345	0.15	0.54
160	16	170	345	0.20	0.49
160	20	158	345	0.25	0.47

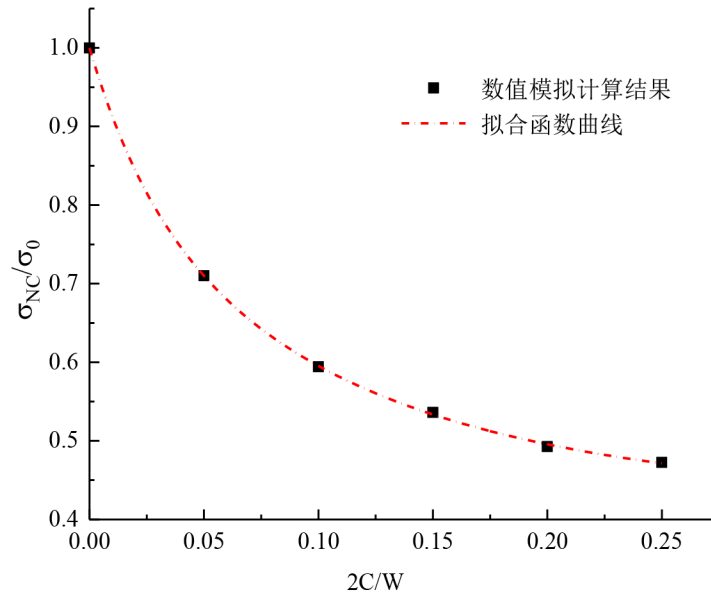


Figure 5. The relationship between the limit stress ratio and the dimensionless crack length

图 5. 极限应力比与无量纲裂纹长度的关系曲线

$$\sigma_{NC}^{\infty} = \sigma_{NC} Y \tag{2}$$

$$Y = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi c}{W}\right)} \tag{3}$$

$$K_Q \equiv \sigma_{NC}^{\infty} \sqrt{\pi c} \tag{4}$$

$$K_Q = K_{IFM} \left[1 - \delta_{aci} \left(\frac{\sigma_{NC}^{\infty}}{\sigma_0} \right) \right] \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_{NC}^{\infty}}{\sigma_0} \right)^2} \tag{5}$$

根据文[29], 裂纹长度与板宽之比 $2c/W > 0.086$ 时, 材料的破坏主要由塑性极限载荷控制; 当 $2c/W \leq 0.086$ 时, 材料的破坏主要由断裂准则控制。故本文使用极限载荷分析获得 FAC 曲线时, 将 $2c/W$ 控制在 0.025 以下以保证其合理性。通过式(1)得到不同裂纹长度下的极限载荷 σ_{NC} 后, 使用公式(2)与公式(3)转换为无限宽板的极限载荷值 σ_{NC}^{∞} , 再通过公式(4)计算得到对应的应力强度因子 K_Q , 最后利用公式(5)拟合曲线可得到断裂参数 K_{IFM} 与 δ_{aci} 如表 3 所示。获得的 FAC 曲线的函数关系式为:

$$K_Q = 47 \left[1 - 0.2102 \left(\frac{\sigma_{NC}^{\infty}}{\sigma_0} \right) \right] \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_{NC}^{\infty}}{\sigma_0} \right)^2} \tag{6}$$

根据公式(6), 画出 5A06 铝合金的失效评估曲线如图 6 所示。

4. 构建失效评估图(FAD)

由焊接引起的裂纹缺陷的安全性评估使用的失效评估图(FAD)包含两部分, 第一部分失效评估曲线(FAC)。第二部分失效评估点(FAP)参数。含中央穿透型裂纹的 5A06 铝合金板的失效评估曲线已经通过前面计算获得(图 6 所示), 以下将通过计算获得失效评估点(FAP)参数, 以构成失效评估图, 对含缺陷构件进行安全性评估。

Table 3. Fitting value of fracture parameters K_{IFM} and δ_{aci} of 5A06 aluminum alloy
表 3. 5A06 铝合金断裂参数 K_{IFM} 和 δ_{aci} 的拟合值

c(mm)	σ_{NC} (MPa)	σ_{NC}^{∞} (MPa)	σ_0 (MPa)	$\frac{\sigma_{NC}^{\infty}}{\sigma_0}$	K_Q (MPa·m ^{1/2})	K_{IFM} (MPa·m ^{1/2})	δ_{aci}
0.2	340	340	345	0.99	6.02		
0.4	336	336	345	0.97	8.42		
0.6	332	332	345	0.96	10.19		
0.8	328	328	345	0.95	11.63		
1.0	325	325	345	0.94	12.88		
1.2	321	321	345	0.93	13.93	47	0.2102
1.4	318	318	345	0.92	14.91		
1.6	314	314	345	0.91	15.74		
1.8	311	311	345	0.90	16.54		
2.0	308	308	345	0.89	17.27		

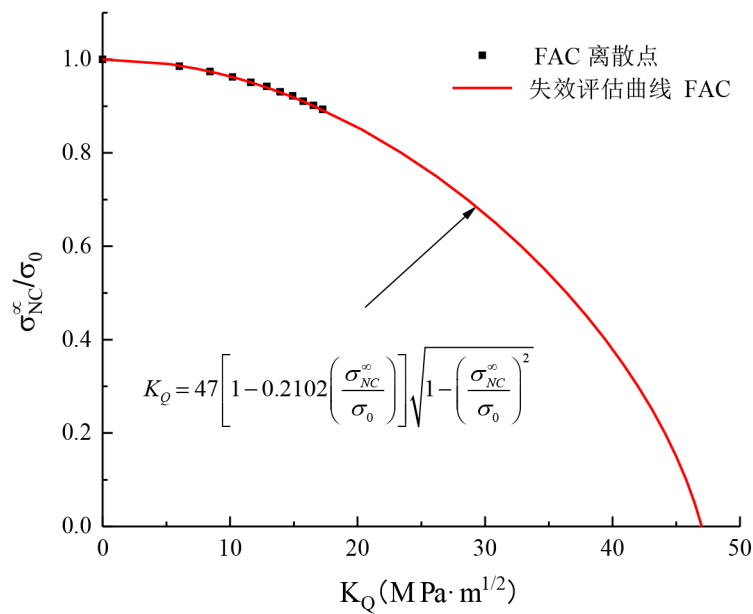


Figure 6. Failure assessment curve (FAC) obtained by fitting data points
图 6. 拟合数据点得到失效评估曲线(FAC)

4.1. 失效评估点(FAP)

失效评估点即是对结构含裂纹焊接缺陷时，能否安全地继续工作进行评估。本文考虑焊接残余应力的影响，评价 5A06 铝合金带不同长度的中央裂纹缺陷板能否在给定载荷下安全工作。失效评估点需要确定两个参数，载荷比和总应力强度因子，载荷比通过式(7)计算，总应力强度因子通过式(8)计算[28]。

$$\frac{\sigma_{NC}^{\infty}}{\sigma_0} = \frac{\sigma_{app} + \sigma_{res}}{\sigma_0} \tag{7}$$

$$K_{tot} = K_{app} + K_{res} \tag{8}$$

其中： σ_{app} 为施加的工作应力； σ_{res} 为残余应力； K_{app} 为工作应力下的应力强度因子； K_{res} 为残余应力强度因子。

4.1.1. 残余应力的分布与 K_{res} 的计算方法

根据 SINTAP 规范[30]，对于平板焊接，纵向简化后的残余应力沿焊缝对称分布，简化后构件沿纵向的焊接残余应力分布如图 7 所示，其中 σ_{yw} 表示材料屈服强度； σ_{res} 表示焊接残余应力； W_1 表示焊缝宽度； y_0 表示残余应力沿纵向分布的尺寸：

根据图 7 的残余应力分布图，可计算直板存在不同长度的中央穿透型裂纹(图 8 所示)下的焊接残余应力强度因子 K_{res} ，具体公式如下[30]：

$$\text{令 } a = \frac{2c}{2}, \quad b = \frac{W_1}{2};$$

当 $a \leq b$ 时，

$$K_{res} = \sigma_{yw} \sqrt{\pi a} \tag{9}$$

当 $b < a \leq y_0$ 时，

$$K_{res} = \sigma_{yw} \sqrt{\pi a} (2/\pi) \left\{ (2/\pi) - \frac{\left[(a^2 - b^2)^{1/2} - b\pi/2 + b \sin^{-1}(b/a) \right]}{(y_0 - b)} \right\} \tag{10}$$

当 $a > y_0$ 时，

$$K_{res} = \sigma_{yw} \sqrt{\pi a} (2/\pi) \left\{ \sin^{-1}(b/a) - \frac{\left[(a^2 - b^2)^{1/2} - (a^2 - b^2)^{1/2} - b \sin^{-1}(y_0/a) + b \sin^{-1}(b/a) \right]}{(y_0 - b)} \right\} \tag{11}$$

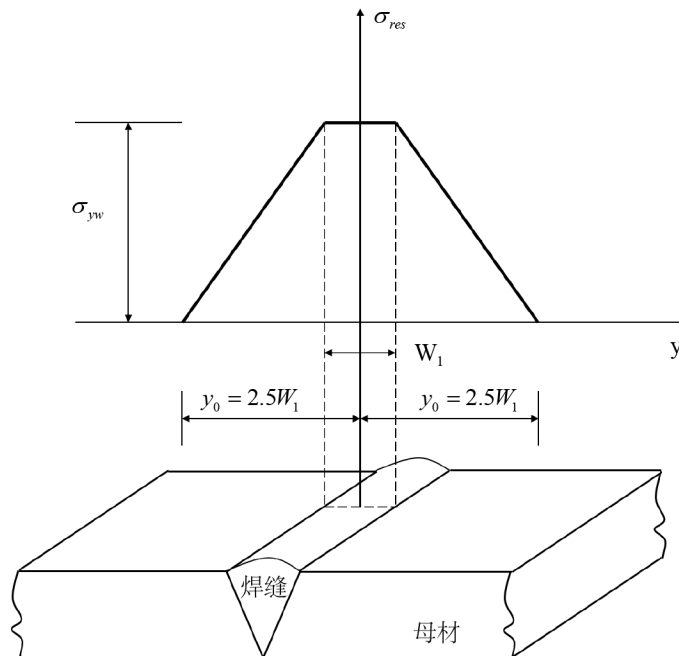


Figure 7. Longitudinal welding residual stress distribution diagram
图 7. 平板纵向的焊接残余应力分布图

4.1.2. K_{app} 的计算方法

采用数值方法计算评估点裂纹应力强度因子 K_{app} ，首先计算裂纹尖端的应力应变场，相应的有限元模型参见图 3 所示，对于断裂参数的计算方法选用精度可靠，且对有限元网格尺寸大小不敏感的虚拟裂纹闭合技术(VCCT) [31] [32]。该方法假定裂纹扩展 Δc 引起的系统势能改变(减小)等于闭合裂纹至原来长度所作的功，其表达式如下：

$$W = \frac{1}{2} \int_0^{\Delta c} u(r) \sigma(r - \Delta c) dr \quad (12)$$

其中 u 是图 10 所示的相对位移， σ 是应力， r 是到裂纹前沿的距离， Δc 指裂纹扩展的长度。因此，能量释放率 G 的表达式如(13)式：

$$G = \lim_{\Delta c \rightarrow 0} \frac{W}{\Delta c} = \lim_{\Delta c \rightarrow 0} \frac{1}{2\Delta c} \int_0^{\Delta c} u(r) \sigma(\Delta c - r) dr \quad (13)$$

要将图 9 中的裂纹闭合达到图 10 所示状态所需的功 $W = Fu/2$ ，其中 F 是图 10 中 i 的节点力， u 是图 10 中 i 和 i' 之间的距离。从而，我们可以根据方程(14)得到应力强度因子 K_{app} 。

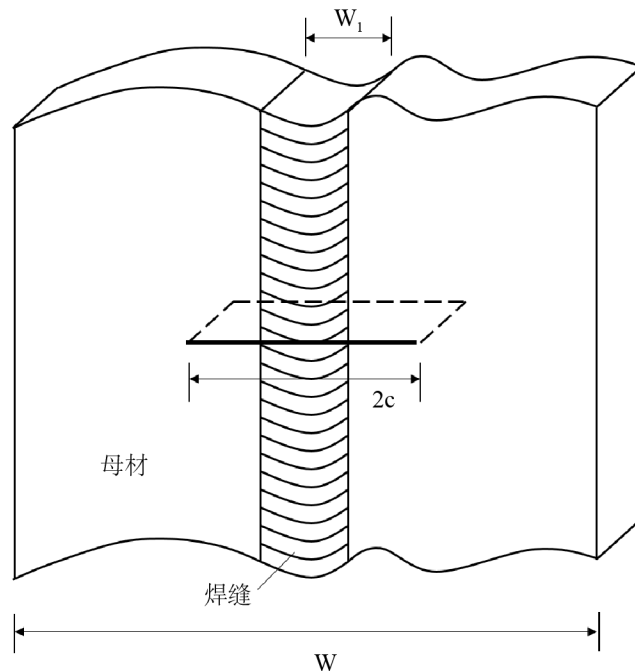


Figure 8. Diagrammatic sketch of a plate with a central crack defect
图 8. 平板含中央裂纹缺陷示意图

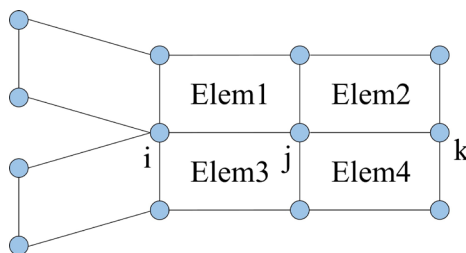


Figure 9. Virtual crack closure model
图 9. 虚拟裂纹闭合模型

$$K_{app} = \sqrt{GE} \tag{14}$$

式中： G 为能量释放率， E 为材料的弹性模量

4.1.3. 5A06 铝合金板焊接残余应力分布与 K_{res} 的计算

已知 5A06 铝合金材料的屈服强度 σ_{yw} 为 175 MPa，焊缝宽度 $W_1 = 6$ mm，利用图 7 可获得 5A06 铝合金材料残余应力场的分布(图 11 所示)，使用公式(9)，(10)和(11)可算得不同裂纹长度 $2c$ 下的 K_{res} ，并获得 K_{res} 与裂纹长度 c 关系曲线(图 13 所示)。

4.1.4. 5A06 铝合金板在不同工况下应力强度因子 K_{app} 的计算

采用有限元法计算了 5A06 铝合金板不同工作应力 σ_{app} 作用下裂纹前沿的应力与应变场，再使用 VCCT 法计算裂纹前沿的应力强度因子 K_{app} 。表 4 列出了不同裂纹长度，不同工作载荷下裂纹前沿应力强度因子。

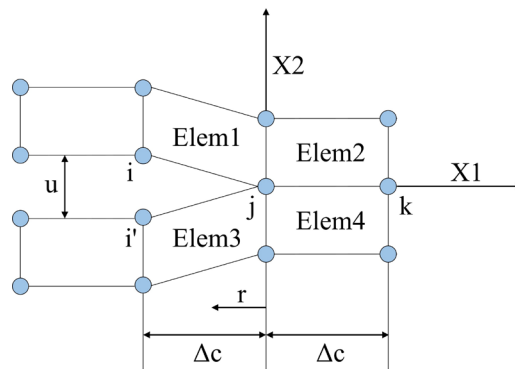


Figure 10. The model of crack extension is Δc
图 10. 裂纹扩展 Δc 的模型

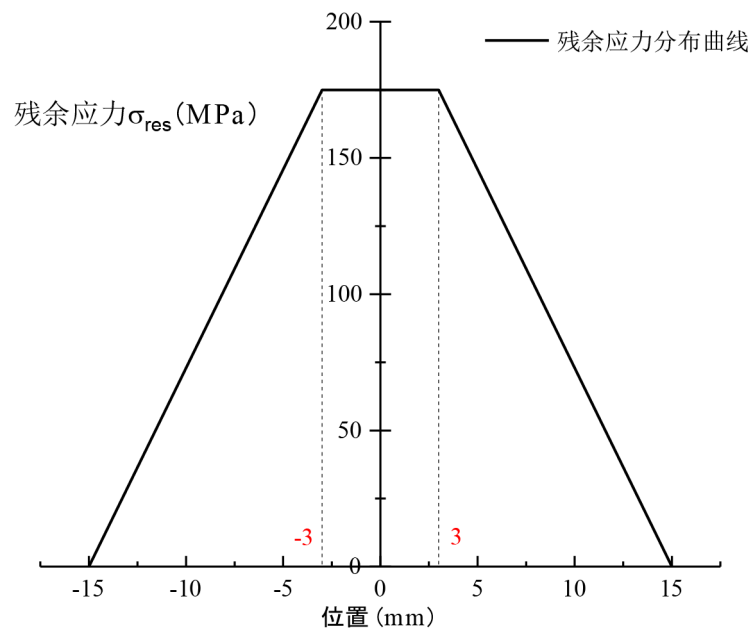


Figure 11. Residual stress distribution of 5A06 aluminum alloy
图 11. 5A06 铝合金材料焊接残余应力分布示意图

4.2. 5A06 铝合金含中央穿透型裂纹安全性评估(FAD)

利用 SINTAP 提供的焊接残余应力 σ_{res} (图 11 所示)和对应焊接残余应力 σ_{res} 的应力强度因子 K_{res} (图 12 所示), 通过表 4、式(7)和式(8)可计算得到评估点的参数(如表 5 和表 6 所示), 结合图 6 的失效评估曲线 FAC, 作出不同长度的穿透型裂纹的焊接平板的 FAD 如图 13 所示。

5. 结果与讨论

如图 5 所示, 采用有限元计算和极限载荷分析方法得到的极限应力随着裂纹长度的增加而减小, 获得了极限应力与裂纹尺寸的定量关系, 采用该方法获得了 5A06 铝合金的 FAC 曲线, 克服了由实验获得 FAC 存在的失效状态的检测困难, 周期长, 成本高, 不便于应用等不足。残余应力的分布与焊缝的尺寸和屈服应力直接相关。如图 12 所示, 在残余应力作用下应力强度因子随着裂纹长度的增加而先增加后减

Table 4. Stress intensity factors under different working conditions

表 4. 不同工况下应力强度因子

点	2c(mm)	40 MPa	80 MPa	120 MPa
		K_{app}^{40} (MPa·m ^{1/2})	K_{app}^{80} (MPa·m ^{1/2})	K_{app}^{120} (MPa·m ^{1/2})
A	4	3.38	6.23	9.53
B	8	4.63	8.58	13.83
C	12	5.52	10.49	17.18
D	16	6.24	12.23	20.21
E	20	6.89	13.77	23.00
F	24	7.52	15.30	25.66
G	28	8.11	16.77	28.27

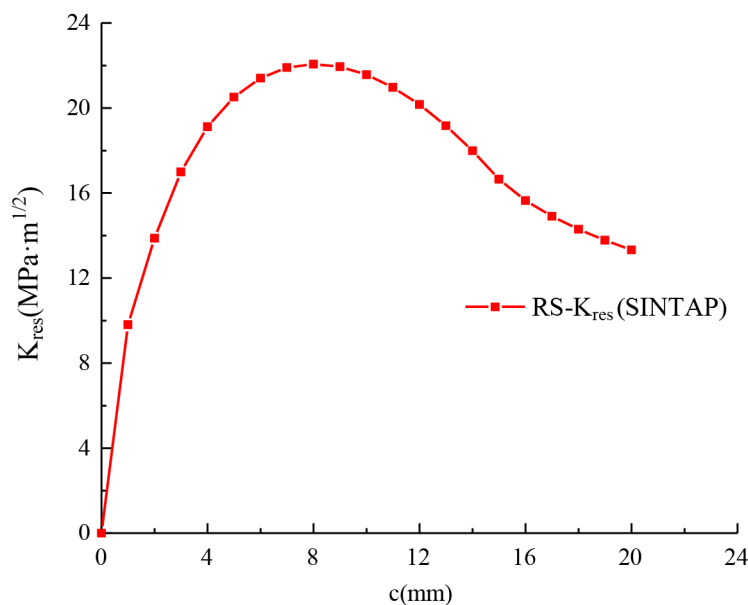


Figure 12. The relationship between the residual stress intensity factor and the half crack length

图 12. 残余应力强度因子随半裂纹长度 c 变化图

Table 5. Fracture parameters of 5A06 aluminum alloy with residual stress and working load (40 MPa)

表 5. 残余应力和工作载荷(40 MPa)作用下 5A06 铝合金的断裂参数

point	$2c/(mm)$	Residual stress (Figure 12 & Figure 13)			Residual stress + Mechanical load 40 MPa		
		$\sigma_{res}/(MPa)$	$K_{res}/(MPa \cdot m^{1/2})$	σ_{res}/σ_0	$\sigma_{tot}/(MPa)$	$K_{tot}/(MPa \cdot m^{1/2})$	σ_{tot}/σ_0
A	4	175	13.87	0.51	215	17.25	0.62
B	8	160	19.12	0.46	200	23.75	0.58
C	12	131	21.41	0.38	171	26.93	0.50
D	16	102	22.07	0.30	142	28.31	0.41
E	20	73	21.57	0.21	113	28.46	0.33
F	24	44	20.16	0.13	84	27.68	0.24
G	28	15	18.00	0.04	55	26.11	0.16

Table 6. Fracture parameters of 5A06 aluminum alloy with residual stress and working load (80 MPa and 120 MPa)

表 6. 残余应力和工作载荷(80 MPa 和 120 MPa)作用下 5A06 铝合金的断裂参数

point	$2c/(mm)$	Residual stress + Mechanical load 80 MPa			Residual stress + Mechanical load 120 MPa		
		$\sigma_{res}/(MPa)$	$K_{res}/(MPa \cdot m^{1/2})$	σ_{tot}/σ_0	σ_{res}/σ_0	$K_{tot}/(MPa \cdot m^{1/2})$	σ_{tot}/σ_0
A	4	255	20.10	0.74	295	23.40	0.86
B	8	240	27.70	0.70	280	32.95	0.81
C	12	211	31.90	0.61	251	38.59	0.73
D	16	182	34.30	0.53	222	42.28	0.64
E	20	153	35.34	0.44	193	44.57	0.56
F	24	124	35.46	0.36	164	45.82	0.48
G	28	95	34.77	0.28	135	46.27	0.39

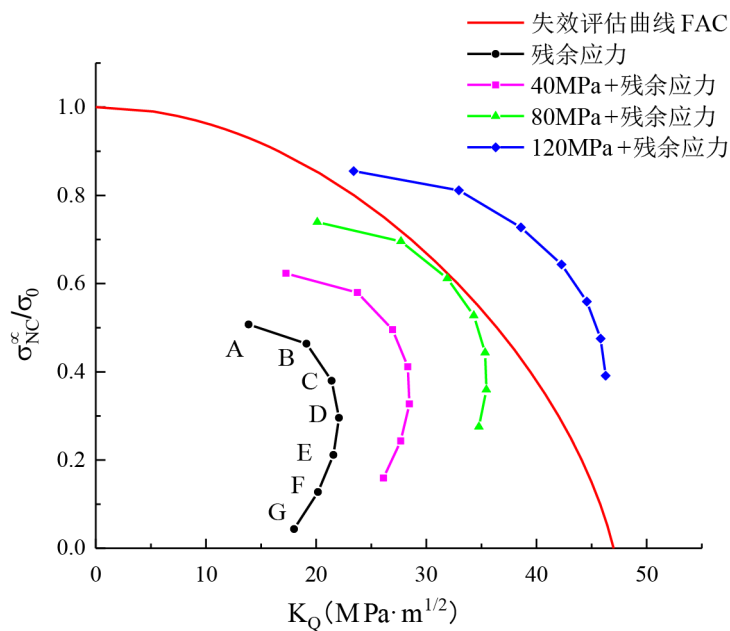


Figure 13. Failure assessment diagram of 5A06 aluminum alloy

图 13. 5A06 铝合金的失效评估图(FAD)

小。故在焊接时应尽量减少焊缝宽度，减少残余应力影响范围，有利于焊接结构的安全。图 13 所示，当只有残余应力作用时，构件处于安全状态；当工作载荷达到 80 MPa，构件的裂纹长度为 12 mm 时，构件处于临界状态；当工作载荷达到 120 MPa，构件在给定的几种裂纹长度下均处于危险状态。残余应力的存在，对构件的安全性评估影响较大。故对结构进行安全评估时，考虑焊接残余应力是十分必要的。

致 谢

感谢国家重点研发计划项目(No:2016YFB1102100)经费资助。

参考文献 (References)

- [1] Dowling, A.R. and Townley, C.H.A. (1975) The Effect of Defects on Structural Failure: A Two-Criteria Approach. *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, **3**, 77-107. [https://doi.org/10.1016/0308-0161\(75\)90014-9](https://doi.org/10.1016/0308-0161(75)90014-9)
- [2] Donzella, G. and Mazzu, A. (2012) Extension to Finite Life of a Failure Assessment Diagram for Contact Fatigue Loading. *International Journal of Fatigue*, **44**, 217-224. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.04.014>
- [3] Flom, Y. (2012) Evaluation of Brazed Joints Using Failure Assessment Diagram. In: *5th International Brazing and Soldering Conference*.
- [4] Ainsworth, R.A. (1993) The Use of a Failure Assessment Diagram for Initiation and Propagation of Defects at High Temperature. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, **16**, 1091-1108. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1993.tb00080.x>
- [5] Yu, Z., Zheng, Z. and Zhong, Q. (2012) Improved Reliability Analysis Method Based on the Failure Assessment Diagram. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, **25**, 832-837. <https://doi.org/10.3901/CJME.2012.04.832>
- [6] Zhao, J.P., Huang, W.L. and Dai, S.H. (1997) A New Concept: Probabilistic Failure Assessment Diagram. *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, **71**, 165-168. [https://doi.org/10.1016/S0308-0161\(96\)00063-4](https://doi.org/10.1016/S0308-0161(96)00063-4)
- [7] Konosu, S. (2009) Assessment Procedure for Multiple Crack like Flaws in Failure Assessment Diagram (FAD). *Journal of Pressure Vessel Technology*, **131**, 041402. <https://doi.org/10.1115/1.3122026>
- [8] Bilby, B.A., Howard, I.C. and Li, Z.H. (1995) Failure Assessment Diagrams. IV The Inclusion of Constraint Parameters. *Proceedings Mathematical & Physical Sciences*, **448**, 281-291. <https://doi.org/10.1098/rspa.1995.0017>
- [9] Budden, P.J. and Ainsworth, R.A. (2012) The Shape of a Strain-Based Failure Assessment Diagram. *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, **89**, 59-66. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2011.09.004>
- [10] Ainsworth, R.A., Budden, P.J., Oh, C.Y., et al. (2013) The Treatment of Secondary Strains within a Strain-Based Failure Assessment Diagram. *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, **104**, 14-20. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2013.01.001>
- [11] Mu, M.Y., Wang, G.Z., Xuan, F.Z., et al. (2017) Fracture Assessment Based on Unified Constraint Parameter for Pressurized Pipes with Circumferential Surface Cracks. *Engineering Fracture Mechanics*, **175**, 201-218. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.02.004>
- [12] Budden, P.J., Sharples, J.K. and Dowling, A.R. (2000) The R6 Procedure: Recent Developments and Comparison with Alternative Approaches. *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, **77**, 895-903. [https://doi.org/10.1016/S0308-0161\(01\)00012-6](https://doi.org/10.1016/S0308-0161(01)00012-6)
- [13] Garwood, S.J., Leggatt, R.H. and Ingham, T. (1997) Structural Collapse, the Failure Assessment Diagram and "Off-the-Shelf" Operation. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, **17**, 1418-31. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1994.tb00785.x>
- [14] Zerbst, U., Hamann, R. and Beeck, F. (1998) Engineering Failure Assessment Methods Applied to Pressurised Components. *Nuclear Engineering & Design*, **200**, 371-382. [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(00\)00252-1](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(00)00252-1)
- [15] Kanno, S., Hasegawa, K., Shimizu, T., et al. (1992) Analysis of Leak and Break Behavior in a Failure Assessment Diagram for Carbon Steel Pipes. *Nuclear Engineering & Design*, **138**, 251-258. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(92\)90064-3](https://doi.org/10.1016/0029-5493(92)90064-3)
- [16] Kim, Y.J., Shim, D.J., Huh, N.S., et al. (2004) Elastic-Plastic Fracture Mechanics Assessment of Test Data for Circumferential Cracked Pipes. *Engineering Fracture Mechanics*, **71**, 173-191. [https://doi.org/10.1016/S0013-7944\(03\)00095-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(03)00095-X)
- [17] Lee, J.S., Ju, J.B., Jang, J.I., et al. (2004) Weld Crack Assessments in API X65 Pipeline: Failure Assessment Diagrams with Variations in Representative Mechanical Properties. *Materials Science & Engineering A*, **373**, 122-130. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.12.039>

- [18] Cravero, S. and Ruggieri, C. (2006) Structural Integrity Analysis of Axially Cracked Pipelines using Conventional and Constraint-Modified Failure Assessment Diagrams. *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, **83**, 607-617. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2006.04.004>
- [19] Pluvinae, G. (2006) Pipe-Defect Assessment Based on the Limit Analysis, Failure-Assessment Diagram, and Subcritical Crack Growth. *Materials Science*, **42**, 127-139. <https://doi.org/10.1007/s11003-006-0065-x>
- [20] Kamaya, M. and Machida, H. (2010) Reference Stress Method for Evaluation of Failure Assessment Curve of Cracked Pipes in Nuclear Power Plants. *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, **87**, 66-73. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2009.11.002>
- [21] Oyamada, K., Konosu, S. and Ohno, T. (2011) Proposal of Reference Stress for a Surface Flaw on a Cylindrical Component from a Review-with-Comparison of the Local Metal Loss Assessment Rule between API 579-1 and the p-M, Diagram Method. *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, **88**, 507-517.
- [22] 潘建宾, 王国珍, 轩福贞, 等. 核压力容器接管安全端不同焊接结构的失效评定图[J]. 核技术, 2017, 40(5): 82-88.
- [23] 王元清, 廖小伟, 周晖, 等. 基于 SINTAP-FAD 方法的含裂纹缺陷钢结构构件安全性评定研究[J]. 工程力学, 2017, 34(5): 42-51.
- [24] Kim, Y.J., Kocak, M., Ainsworth, R.A., et al. (2000) SINTAP Defect Assessment Procedure for Strength Mis-Matched Structures. *Engineering Fracture Mechanics*, **67**, 529-546. [https://doi.org/10.1016/S0013-7944\(00\)00072-2](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(00)00072-2)
- [25] 余阳春, 王春明, 余圣甫. 5A06 铝合金的激光填丝焊接接头组织与性能[J]. 激光技术, 2010, 34(1): 34-36.
- [26] 王伟年. 不同应力状态 5A06 铝合金板材断裂预测[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [27] Kirkwood, M.G., Carmichael, G.D.T. and Moffat, D.G. (1986) Finite Element Stress Analysis of an Equal Diameter Branch Pipe Intersection Subjected to Out-of-Plane and Twisting Moments. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, **21**, 9-16. <https://doi.org/10.1243/03093247V211009>
- [28] Rajakumar, S. and Christopher, T. (2011) Fracture Strength of Centre Surface Cracked Tensile Specimens Made of 2219-T87 Al Alloy Welding. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, **21**, 2568-2575. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61093-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61093-5)
- [29] 王生楠, 于红艳. 含裂纹结构的极限载荷分析[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(7): 863-865.
- [30] Leggate, R.H. and Sanderson, R.M. (1999) Stress Intensity Due to Residual Stresses. HSC Publications.
- [31] 解德, 钱勤, 李长安. 断裂力学中的数值计算方法及工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [32] Sung, P.H., Yang, W.H. and Kim, C. (2002) Stress Intensity Factors for Elliptical Arc through Cracks in Mechanical Joints by Virtual Crack Closure Technique. *KSME International Journal*, **16**, 182-191. <https://doi.org/10.1007/BF03185169>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7613, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ms@hanspub.org