

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2024 年 3 月 21 日 (21.03.2024)



(10) 国际公布号
WO 2024/055271 A1

- (51) 国际专利分类号:
G01N 3/32 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2022/119223
- (22) 国际申请日: 2022 年 9 月 16 日 (16.09.2022)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (71) 申请人: 华东理工大学(EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国上海市徐汇区梅陇路 130 号, Shanghai 200237 (CN)。
- (72) 发明人: 朱明亮(ZHU, Mingliang); 中国上海市徐汇区梅陇路 130 号华东理工大学机械与动力工程学院, Shanghai 200237 (CN)。 轩福贞(XUAN, Fuzhen); 中国上海市徐汇区梅陇路 130 号华

东理工大学机械与动力工程学院, Shanghai 200237 (CN)。 朱刚(ZHU, Gang); 中国上海市徐汇区梅陇路 130 号华东理工大学机械与动力工程学院, Shanghai 200237 (CN)。

(74) 代理人: 上海专利商标事务所有限公司(SHANGHAI PATENT & TRADEMARK LAW OFFICE, LLC); 中国上海市桂平路 435 号, Shanghai 200233 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA,

(54) Title: ANTI-FATIGUE AND SAFETY REGULATION AND CONTROL METHOD FOR SERVICE STRUCTURE HAVING ULTRA-LONG SERVICE LIFE IN EXTREME ENVIRONMENT

(54) 发明名称: 一种极端环境下超长寿命服役结构抗疲劳及安全调控方法

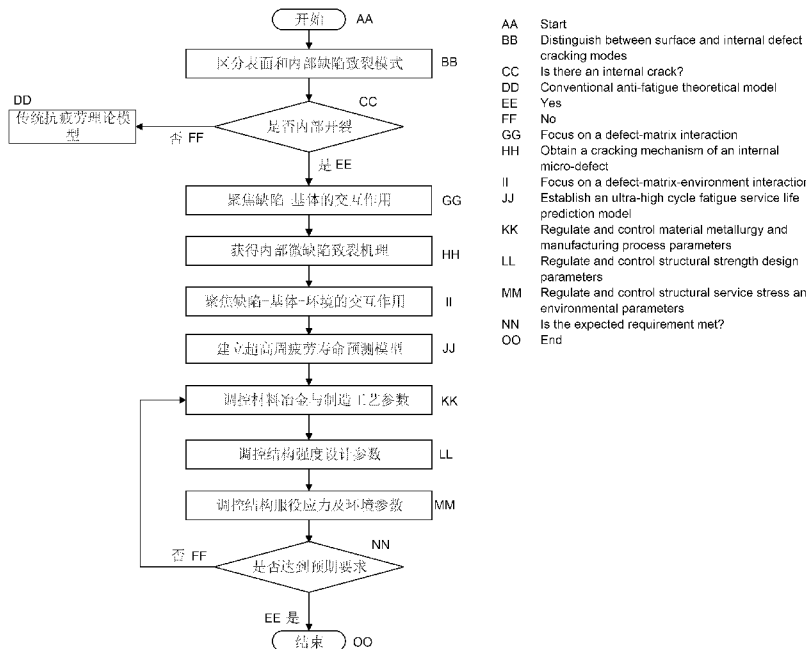


图 1

(57) Abstract: An anti-fatigue and safety regulation and control method for a service structure having an ultra-long service life in an extreme environment, the method comprising: determining a fatigue fracture mode of a service structure in a long service life stage; according to a defect-matrix interaction principle, obtaining a cracking mechanism of an ultra-high cycle internal fatigue defect in the service structure in an air environment; considering environmental factors, clarifying an internal defect-matrix-environment interaction

PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

- (84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

mechanism of ultra-high cycle fatigue under service conditions and acquire an environmental weakening coefficient; establishing a theoretical model for ultra-high cycle fatigue service life prediction related to a defect-load-service life relationship under service conditions; and on the basis of the concept of design/manufacturing integration, regulating and controlling material metallurgy and manufacturing process parameters, structural strength design parameters, and structural service stress and environmental parameters. The method can enhance the collaboration between design and manufacturing, shorten design and manufacturing processes, effectively increase the fatigue resistance of materials and the structure, and ensure the long-period service safety of the structure.

(57) 摘要: 一种极端环境下超长寿命服役结构抗疲劳及安全调控方法, 包括: 判断服役结构的长寿命阶段疲劳断裂模式; 根据缺陷-基体的交互作用原理, 获得服役结构空气环境下超高周疲劳内部缺陷致裂机理; 考虑环境因素, 明晰服役条件下超高周疲劳内部缺陷-基体-环境交互作用机理并获取环境削弱系数; 建立服役条件下的缺陷-载荷-寿命关联的超高周疲劳寿命预测理论模型; 基于设计/制造一体化理念对材料冶金与制造工艺参数、结构强度设计参数、结构服役应力与环境参数进行调控。该方法可以增强设计与制造的协同性, 缩短设计与制造流程, 有效提高材料与结构抗疲劳能力, 保障结构长周期服役安全。

一种极端环境下超长寿命服役结构抗疲劳及安全调控方法

5 技术领域

本发明涉及机械结构强度与高端装备智能制造领域，更具体的说，涉及一种极端环境下超长寿命服役结构抗疲劳及安全调控方法。

背景技术

10 结构的疲劳破坏是工程中最典型的失效形式之一。按照循环周次可分为低周疲劳、高周疲劳和超高周疲劳。

近二十年来，核电装备、发动机部件、汽车承力部件、铁路轮轴与轨道、飞机、海岸结构、桥梁等现代工程装备与构件呈现低应力、长寿命服役新趋势。

目前，可以通过以下两种方式提升长寿命服役结构的抗疲劳性能：

15 第一种方式是直接选用高强度材料；

但是，材料的强度水平越高，对缺陷或环境致裂敏感性也相应的提高，即依赖提高材料强度水平以获得高疲劳抗力是不可行的，这使人们意识到“结构的断裂不仅仅是材料的问题”；

第二种方式是现有广泛应用的表面强化技术；

20 主要基于抗疲劳制造的理念，通过改变材料表层的微观结构、化学成分和应力状态，可以延长结构疲劳寿命，然而，这种使结构表面发生强化的技术，却使结构在长寿命条件下的裂纹更容易在内部缺陷处萌生，表面强化技术抗疲劳的结果，是使结构最终呈现出超高周疲劳特性，使人们意识到“表面强并不能有效防断”。

25 因此，目前迫切需要发展新的方法及工艺技术，对超长寿命服役结构的疲劳断裂进行安全调控。

发明内容

本发明的目的是提供一种极端环境下超长寿命服役结构抗疲劳及安全调控方法，解决现有技术对超长寿命服役结构的疲劳破坏难以进行有效防断的问题。

为了实现上述目的，本发明提供了一种极端环境下超长寿命服役结构抗疲劳及安全调控方法，包括以下步骤：

步骤 S1、判断服役结构的长寿命阶段疲劳断裂模式，如果为内部缺陷致裂模式，则进入步骤 S2；

步骤 S2、根据缺陷-基体的交互作用原理，获得服役结构空气环境下超高周疲劳内部缺陷致裂机理；

步骤 S3、考虑环境因素，明晰服役条件下超高周疲劳内部缺陷-基体-环境交互作用机理并获取环境削弱系数；

步骤 S4、综合考虑环境因素，建立服役条件下的缺陷-载荷-寿命关联的超高周疲劳寿命预测理论模型；

步骤 S5、根据超高周疲劳寿命预测理论模型，基于设计/制造一体化理念对材料冶金与制造工艺参数、结构强度设计参数、结构服役应力与环境参数进行调控。

在一实施例中，所述步骤 S1，进一步包括以下步骤：

判断服役结构的长寿命阶段疲劳断裂模式，如果为表面缺陷致裂模式，则根据传统抗疲劳理论模型进行抗疲劳及安全调控。

在一实施例中，所述传统抗疲劳理论模型包括低周疲劳 Manson-Coffin 模型和高周疲劳 Basquin 模型。

在一实施例中，所述步骤 S2 的基体-缺陷交互作用原理为循环载荷下缺陷周围局部塑性导致基体微观组织损伤。

在一实施例中，所述步骤 S3 的缺陷-基体-环境的交互作用机理为循环载荷下缺陷周围局部塑性、化学元素与温度耦合作用导致基体微观组织损伤。

在一实施例中，所述步骤 S3 中的环境削弱系数 H 对应的表达式为：

$$H = \frac{\sigma_{(environment)}}{\sigma_{(air)}} \text{ 或 } H = \frac{N_{(environment)}}{N_{(air)}}$$

$\sigma_{(environment)}$ 为服役条件下的疲劳强度；

$\sigma_{(air)}$ 为空气环境下的疲劳强度；

$N_{(environment)}$ 为服役条件下的疲劳寿命；

$N_{(air)}$ 为空气环境下的疲劳寿命。

在一实施例中，所述步骤 S4 的超高周疲劳寿命预测理论模型，对应的

5 表达式为：

$$\left\{ \sigma_a (area)^{1/12} \right\}^{\alpha} N_f = C$$

$$Z = \sigma_a (area)^{1/6} D^{\beta} ;$$

$$D = (d - d_{inc}) / d ;$$

其中， σ_a 为疲劳应力幅；

10 $area$ 为微缺陷投影面积；

D 为缺陷的相对位置；

α ， C 均为拟合常数；

N_f 为疲劳寿命；

β 为材料常数；

15 d 为疲劳试棒直径；

d_{inc} 为缺陷的中心点到试棒外侧表面的最小距离；

Z 为疲劳寿命控制参量。

在一实施例中，所述步骤 S5 中根据超高周疲劳寿命预测理论模型，进行材料冶金与制造工艺参数调控，进一步包括以下步骤：

20 步骤 S511、根据超高周疲劳寿命预测理论模型，调控冶金与制作工艺，进行材料设计和材料制造；

步骤 S512、对材料进行疲劳测试，对测试数据进行评估；

步骤 S513、将评估结果与预期指标进行比较，如果评估结果满足预期指标要求，则当前材料为超长寿命抗疲劳材料，流程结束，如果评估结果不满足
25 预期指标要求，则对冶金与制造工艺参数进行调控后重新进入步骤 S511，直至评估结果满足预期指标要求。

在一实施例中，所述步骤 S5 中根据超高周疲劳寿命预测理论模型，进行结构强度设计参数调控，进一步包括以下步骤：

步骤 S521、根据服役结构的长寿命阶段疲劳断裂模式进行结构疲劳设计和材料疲劳设计，获得结构强度设计参数；

步骤 S522、基于超高周疲劳寿命预测理论模型对结构强度设计参数进行验证校核；

- 5 步骤 S523、将验证校核结果与设计要求进行比较，如果验证校核结果满足设计要求，则当前结构强度设计参数为超长寿命抗疲劳设计参数，流程结束，如果验证校核结果不满足设计要求，则重新进入步骤 S521，对结构强度设计参数进行调控，直至验证校核结果满足设计要求。

10 在一实施例中，所述步骤 S5 中根据超高周疲劳寿命预测理论模型，进行结构服役应力与环境参数调控，进一步包括以下步骤：

步骤 S531、将超高周疲劳寿命预测理论模型结合结构强度设计参数建立数字孪生模型；

步骤 S532、将数字孪生模型进行安全仿真分析；

- 15 步骤 S533、如果安全仿真输出结果为安全，则当前服役应力与环境参数符合要求，流程结束，如果安全仿真输出结果为不安全，则对服役应力与环境参数进行调控，重新进入步骤 S531，直至安全仿真输出结果为安全。

20 本发明提出的一种超长寿命服役结构抗疲劳及安全调控方法，将材料冶金、结构设计、制造工艺结合起来，统筹考虑服役结构的超高周疲劳失效问题，在抗疲劳设计时候同步考虑设计与制造的耦合效应，可以增强设计与制造的协同性，缩短设计与制造流程，有效提高材料与结构抗疲劳的能力，进而保障服役安全运维。

附图说明

- 25 本发明上述的以及其他的特征、性质和优势将通过下面结合附图和实施例的描述而变的更加明显，在附图中相同的附图标记始终表示相同的特征，其中：

图 1 揭示了根据本发明一实施例的基于设计/制造一体化的超长寿命服役结构抗疲劳及安全调控方法流程图；

图2揭示了根据本发明一实施例的超长寿命抗疲劳材料调控案例流程图；

图3揭示了根据本发明一实施例的超长寿命抗疲劳结构强度调控案例流程图；

图4揭示了根据本发明一实施例的超长寿命结构安全服役调控案例流程图。

5

具体实施方式

为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合附图及实施例，对本发明进行进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅用以解释发明，并不用于限定发明。

10 研究发现，经历长寿命循环加载的结构多从内部缺陷处起裂，使内部缺陷致裂成为了结构超高周疲劳失效的典型特征。

可以认为，在已知内部微缺陷是超高周疲劳断裂的本质属性基础上，含缺陷材料的抗疲劳应该把焦点放在缺陷-基体的相互作用关系以及能影响这种关系的外部环境因素上。

15 内部缺陷的产生与材料冶金因素有关，而材料基体的性能取决于设计和制造工艺，环境因素代表着服役条件，三者的结合要求材料设计、冶金与制造工艺及服役环境的协调与统一。

超高周疲劳研究的最终目标是“寻求结构防断之法”，以保障结构的长寿命服役安全与可靠性。

20 基于上述分析，本发明提出的一种极端环境下超长寿命服役结构抗疲劳及安全调控方法，综合考虑材料强度、内部缺陷以及外部环境的影响，通过优化材料合金成分设计与冶金条件、结构制造工艺及服役条件等因素，建立“设计/制造一体化”的结构防断技术，进而实现服役结构的长寿命安全运维保障。

25 图1揭示了根据本发明一实施例的基于设计/制造一体化的超长寿命服役结构抗疲劳及安全调控方法流程图，如图1所示，本发明提出的一种极端环境下超长寿命服役结构抗疲劳及安全调控方法，包括以下步骤：

步骤S1、判断服役结构的长寿命阶段疲劳断裂模式，如果为内部缺陷致裂模式，则进入步骤S2；

步骤 S2、根据缺陷-基体的交互作用原理，获得服役结构空气环境下超高周疲劳内部缺陷致裂机理；

步骤 S3、考虑环境因素，明晰服役条件下超高周疲劳内部缺陷-基体-环境交互作用机理并获取环境削弱系数；

5 步骤 S4、综合考虑环境因素，建立服役条件下的缺陷-载荷-寿命关联的超高周疲劳寿命预测理论模型；

步骤 S5、根据超高周疲劳寿命预测理论模型，基于设计/制造一体化理念对材料冶金与制造工艺参数、结构强度设计参数、结构服役应力与环境参数进行调控。

10 本发明提供的基于设计/制造一体化的极端环境下超长寿命服役结构抗疲劳及安全调控方法及系统，在抗疲劳设计时同步考虑设计与制造的耦合效应，可以缩短设计与制造流程，有效提高材料与结构抗疲劳的能力。

作为共性基础技术，本方法体现着设计、制造和运维全寿命周期、一体化的防断调控路线，推动材料设计、冶金与制造工艺的兼容与协调，支撑系列高端装备超长寿命服役结构的防断设计、制造及其运行维护。

下文将对这些步骤进行详细描述。应理解，在本发明范围内，本发明的上述各技术特征和在下文（如实施例）中具体描述的各技术特征之间都可以互相组合，相互关联，从而构成优选的技术方案。

20 步骤 S1、判断服役结构的长寿命阶段疲劳断裂模式，如果为内部缺陷致裂模式，则进入步骤 S2。

更进一步的，如果为表面缺陷致裂模式，则根据传统抗疲劳理论模型进行抗疲劳及安全调控。

长寿命服役结构疲劳断裂模式分为表面缺陷致裂和内部缺陷致裂。

25 在步骤 S1 中对表面和内部致裂模式进行区分，如果是表面缺陷致裂模式，则按照传统抗疲劳理论模型进行抗疲劳设计，如果是内部缺陷致裂则进入步骤 S2 进行抗疲劳设计。

传统的抗疲劳理论模型主要包括低周疲劳 Manson-Coffin 模型和高周疲劳 Basquin 模型。

对于材料的疲劳损伤与寿命预测,经典的 Basquin 公式与 Manson-Coffin 公式分别选择应力幅与应变幅为参量进行评价。

Manson-Coffin 模型是局部应力应变法中著名的应变-寿命关系式模型,用于对恒幅疲劳有限寿命进行直接预测,涉及的材料除了整体材料,还有焊接接头及新材料等,还扩展应用到短疲劳、变幅疲劳等。

Basquin 模型用于描述疲劳寿命与应力之间的 S-N 曲线关系。

步骤 S2、根据缺陷-基体的交互作用,获得服役结构空气环境下超高周疲劳内部缺陷致裂机理。

所述的基体-缺陷交互作用原理为循环载荷下缺陷周围局部塑性导致基体微观组织损伤。

步骤 S3、考虑环境因素,明晰服役条件下超高周疲劳内部缺陷-基体-环境交互作用机理并获取环境削弱系数。

所述的缺陷-基体-环境的交互作用机理为循环载荷下缺陷周围局部塑性、化学元素与温度耦合作用导致基体微观组织损伤。

更进一步的,环境削弱系数 H 对应的表达式为:

$$H = \frac{\sigma_{(environment)}}{\sigma_{(air)}} \text{ 或 } H = \frac{N_{(environment)}}{N_{(air)}}$$

$\sigma_{(environment)}$ 为服役条件下的疲劳强度;

$\sigma_{(air)}$ 为空气环境下的疲劳强度;

$N_{(environment)}$ 为服役条件下的疲劳寿命;

$N_{(air)}$ 为空气环境下的疲劳寿命。

步骤 S4、综合考虑环境因素,建立服役环境下的缺陷-载荷-寿命关联的超高周疲劳寿命预测理论模型。

结合失效机理及环境削弱系数,基于内部微缺陷致裂机理的超高周疲劳寿命预测理论模型中综合考虑了内部微缺陷的几何尺寸、位置、形貌,基体性能影响因素和环境影响因素。

在本实施例中,超高周疲劳寿命预测理论模型,对应的表达式为:

$$\left\{ \sigma_a (area)^{1/12} \right\}^{\alpha} N_f = C$$

$$Z = \sigma_a (area)^{1/6} D^\beta ;$$

$$D = (d - d_{inc}) / d ;$$

其中, σ_a 为疲劳应力幅;

$area$ 为微缺陷投影面积;

5 D 为缺陷的相对位置;

α , C 均为拟合常数;

N_f 为疲劳寿命;

β 为材料常数;

d 为疲劳试棒直径;

10 d_{inc} 为缺陷的中心点到试棒外侧表面的最小距离;

Z 为疲劳寿命控制参量。

更具体的说, 所述 d_{inc} 可以是运用图像分析软件从疲劳断口扫描电镜照片上测量缺陷的中心点到试棒外侧表面的最小距离。

步骤 S5、根据超高周疲劳寿命预测理论模型, 基于设计/制造一体化的
15 理念对材料冶金与制造工艺参数、结构强度设计参数、结构服役应力与环境参数进行调控。

所述步骤 S5 中, 依据超高周疲劳寿命预测理论模型来调控材料冶金与制造工艺参数。

图 2 揭示了根据本发明一实施例的超长寿命抗疲劳材料调控案例流程图,
20 如图 2 所示, 步骤 S5 中根据超高周疲劳寿命预测理论模型, 进行材料冶金与制造工艺参数调控, 进一步包括以下步骤:

步骤 S511、根据超高周疲劳寿命预测理论模型, 调控冶金与制作工艺, 进行材料设计和材料制造;

根据超高周疲劳寿命预测理论模型调控冶金与制造工艺, 材料设计与
25 制造的工艺参数均依据寿命预测理论模型来调控。

其中, 材料设计包括强化基体和减小夹杂物尺寸, 材料制造包括表面制造或内部制造。

步骤 S512、对材料进行疲劳测试, 对测试数据进行评估;

步骤 S513、将评估结果与预期指标进行比较，如果评估结果满足预期指标要求，则当前材料为超长寿命抗疲劳材料，流程结束，如果评估结果不满足预期指标要求，则对冶金与制造工艺参数进行调控后重新进入步骤 S511，直至评估结果满足预期指标要求。

- 5 所述步骤 S5 中，进一步依据超高周疲劳寿命预测理论模型，调控结构强度设计参数。

图 3 揭示了根据本发明一实施例的超长寿命抗疲劳结构强度调控案例流程，如图 3 所示，所述步骤 S5 中根据超高周疲劳寿命预测理论模型，进行结构强度设计参数调控，进一步包括以下步骤：

- 10 步骤 S521、根据服役结构的长寿命阶段疲劳断裂模式进行结构疲劳设计和材料疲劳设计，获得结构强度设计参数；

所述的结构强度设计参数依据超长寿命抗疲劳材料性能来调控。

根据服役结构的长寿命阶段疲劳断裂模式（简称失效模式）进行结构强度设计。

- 15 对于表面缺陷致裂模式（表面失效），进行结构疲劳设计；
对于内部缺陷致裂模式（内部失效），进行材料疲劳设计；
最终，结构疲劳设计和材料疲劳设计所获得的疲劳设计参数统一作为结构强度设计参数。

- 20 步骤 S522、基于超高周疲劳寿命预测理论模型对结构强度设计参数进行验证校核；

步骤 S523、将验证校核结果与设计要求进行比较，如果验证校核结果满足设计要求，则当前结构强度设计参数为超长寿命抗疲劳设计参数，流程结束，如果验证校核结果不满足设计要求，则重新进入步骤 S521，对结构强度设计参数进行调控，直至验证校核结果满足设计要求。

- 25 将超长寿命抗疲劳设计参数对应的设计模型作为超长寿命抗疲劳设计模型。

所述步骤 S5 中，进一步调控结构服役应力及环境参数，所述的结构服役应力及环境参数依据超长寿命抗疲劳材料及结构强度设计参数来调控。

图4揭示了根据本发明一实施例的超长寿命结构安全服役调控案例流程图，如图4所示，所述步骤S5中根据超高周疲劳寿命预测理论模型，进行结构服役应力与环境参数调控，进一步包括以下步骤：

5 步骤S531、将超高周疲劳寿命预测理论模型结合结构强度设计参数建立数字孪生模型；

服役应力与环境参数（以下简称服役参数）与上述步骤得到的超长寿命抗疲劳材料数据、失效机理等共同更新建立超高周疲劳寿命预测理论模型。

服役参数包括应力水平和环境参数。

10 根据建立的超高周疲劳寿命预测理论模型，结合结构强度设计参数来建立反映物理实体实时服役状态的数字模型，在本实施例中，该数字模型为数字孪生模型。

数字孪生是充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据，集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程，在虚拟空间中完成映射，从而反映相对应的实体装备的全生命周期过程。

15 步骤S532、将数字孪生模型进行安全仿真分析；

在本实施例中，将数字孪生模型嵌入仿真软件进行安全仿真分析。

20 步骤S533、如果安全仿真输出结果为安全，则当前服役应力与环境参数符合要求，流程结束，如果安全仿真输出结果为不安全，则对服役应力与环境参数进行调控，重新进入步骤S531，直至安全仿真输出结果为安全，获得安全可靠的应力水平及环境参数。

尽管为使解释简单化将上述方法图示并描述为一系列动作，但是应理解并领会，这些方法不受动作的次序所限，因为根据一个或多个实施例，一些动作可按不同次序发生和/或与来自本文中图示和描述或本文中未图示和描述但本领域技术人员可以理解的其他动作并发地发生。

25 为使本申请实施的目的、技术方案和优点更加清楚，下面以电站汽轮机叶片抗疲劳设计为例，并结合本申请实施例中的附图，对本申请实施例中的技术方案进行更加详细的描述。

从失效分析案例中可以获得汽轮机叶片的损伤模式为典型的环境超高

周疲劳损伤，按照本发明公开的超长寿命服役结构抗疲劳及安全调控方法对汽轮机叶片进行抗疲劳设计，具体步骤如下：

步骤 S1、确定汽轮机叶片的长寿命阶段疲劳断裂模式；

汽轮机叶片的长寿命阶段疲劳断裂模式包括表面缺陷致裂和内部缺陷致裂两种；

步骤 S2、针对内部缺陷致裂模式，进一步确定汽轮机叶片超高周疲劳内部缺陷致裂机理；

根据缺陷-基体的交互作用原理，汽轮机叶片空气环境下的超高周疲劳内部缺陷致裂原理为循环载荷下缺陷周围局部塑性导致基体微观组织损伤。

步骤 S3、考虑环境因素，明晰汽轮机叶片服役条件下超高周疲劳内部缺陷-基体-环境交互作用机理并获取环境削弱系数，获得汽轮机叶片服役条件（腐蚀环境）对超高周疲劳内部缺陷致裂机理的影响因素，并获取环境削弱系数；

因叶片在蒸汽或者盐水环境中服役，考虑环境影响，进一步表征发现缺陷周围存在大量的氢，所以环境的主要影响因素为氢的影响。

因此，叶片的超高周疲劳内部缺陷致裂机理需要考虑氢对缺陷周围基体微观组织疲劳损伤的影响。

步骤 S4、综合考虑环境因素，考虑基体-缺陷-氢的影响，结合失效机理及环境削弱系数建立缺陷-载荷-寿命关联的超高周疲劳寿命预测理论模型。

在本实施例中，超高周疲劳寿命预测理论模型 Z_p ，对应的表达式为：

$$\left\{ \sigma_a (area)^{1/12} \right\}^{\alpha} N_f = C$$

$$Z = \sigma_a (area)^{1/6} D^{\beta} ;$$

$$D = (d - d_{inc}) / d ;$$

其中， σ_a 为疲劳应力幅， $area$ 为微缺陷投影面积， α ， C 均为拟合常数， N_f 为疲劳寿命， D 为缺陷的相对位置， β 为材料常数，受环境的影响， d 为疲劳试棒直径， d_{inc} 为缺陷的中心点到试棒外侧表面的最小距离， Z 为疲劳寿命控制参量。

步骤 S5、根据超高周疲劳寿命预测理论模型，基于设计/制造一体化的理念对材料冶金与制造工艺参数、结构强度设计参数、结构服役应力与环境参数进行调控。

更具体的，步骤 S5 进一步包括以下步骤：

5 步骤 S51、如图 2 所示，进行材料冶金与制造工艺参数的调控，获得超长寿命抗疲劳材料；

步骤 S52、如图 3 所示，进行结构强度设计参数调控，获得超长寿命抗疲劳设计模型；

10 步骤 S53、如图 4 所示，进行结构服役应力与环境参数调控，保障设计服役安全。

本发明提出的一种超长寿命服役结构抗疲劳及安全调控方法，将材料冶金、结构设计、制造工艺结合起来，统筹考虑服役结构的超高周疲劳失效问题，在抗疲劳设计时候同步考虑设计与制造的耦合效应，可以缩短设计与制造
15 流程，有效提高材料与结构抗疲劳的能力，进而保障服役安全运维。

如本申请和权利要求书中所示，除非上下文明确提示例外情形，“一”、“一个”、“一种”和/或“该”等词并非特指单数，也可包括复数。一般说来，术语“包括”与“包含”仅提示包括已明确标识的步骤和元素，而
20 这些步骤和元素不构成一个排它性的罗列，方法或者设备也可能包含其他的步骤或元素。

本领域技术人员将进一步领会，结合本文中所公开的实施例来描述的各种解说性逻辑板块、模块、电路和算法步骤可实现为电子硬件、计算机软件或这两者的组合。为清楚地解说硬件与软件的这一可互换性，各种解
25 说性组件、框、模块、电路和步骤在上面是以其功能性的形式作一般化描述的。此类功能性是被实现为硬件还是软件取决于具体应用和施加于整体系统的设计约束。技术人员对于每种特定应用可用不同的方式来实现所描述的功能性，但这样的实现决策不应被解读成导致脱离了本发明的范围。

上述实施例是提供给熟悉本领域内的人员来实现或使用本发明的，熟悉本领域的人员可在不脱离本发明的发明思想的情况下，对上述实施例做出种种修改或变化，因而本发明的保护范围并不被上述实施例所限，而应该是符合权利要求书提到的创新性特征的最大范围。

权 利 要 求 书

1. 一种极端环境下超长寿命服役结构抗疲劳及安全调控方法,其特征在于,包括以下步骤:

5 步骤 S1、判断服役结构的长寿命阶段疲劳断裂模式, 如果为内部缺陷致裂模式, 则进入步骤 S2;

 步骤 S2、根据缺陷-基体的交互作用原理, 获得服役结构空气环境下超高周疲劳内部缺陷致裂机理;

10 步骤 S3、考虑环境因素, 明晰服役条件下超高周疲劳内部缺陷-基体-环境交互作用机理并获取环境削弱系数;

 步骤 S4、综合考虑环境因素, 建立服役条件下的缺陷-载荷-寿命关联的超高周疲劳寿命预测理论模型;

15 步骤 S5、根据超高周疲劳寿命预测理论模型, 基于设计/制造一体化理念对材料冶金与制造工艺参数、结构强度设计参数、结构服役应力与环境参数进行调控。

2. 根据权利要求 1 所述的极端环境下超长寿命服役结构抗疲劳及安全调控方法, 其特征在于, 所述步骤 S1, 进一步包括以下步骤:

20 判断服役结构的长寿命阶段疲劳断裂模式, 如果为表面缺陷致裂模式, 则根据传统抗疲劳理论模型进行抗疲劳及安全调控。

3. 根据权利要求 2 所述的极端环境下超长寿命服役结构抗疲劳及安全调控方法, 其特征在于, 所述传统抗疲劳理论模型包括低周疲劳 Manson-Coffin 模型和高周疲劳 Basquin 模型。

25

4. 根据权利要求 1 所述的极端环境下超长寿命服役结构抗疲劳及安全调控方法, 其特征在于, 所述步骤 S2 的基体-缺陷交互作用原理为循环载荷下缺陷周围局部塑性导致基体微观组织损伤。

5. 根据权利要求 1 所述的极端环境下超长寿命服役结构抗疲劳及安全调控方法, 其特征在于, 所述步骤 S3 的缺陷-基体-环境的交互作用机理为循环载荷下缺陷周围局部塑性、化学元素与温度耦合作用导致基体微观组织损伤。

5

6. 根据权利要求 1 所述的极端环境下超长寿命服役结构抗疲劳及安全调控方法, 其特征在于, 所述步骤 S3 中的环境削弱系数 H 对应的表达式为:

$$H = \frac{\sigma_{(environment)}}{\sigma_{(air)}} \text{ 或 } H = \frac{N_{(environment)}}{N_{(air)}}$$

$\sigma_{(environment)}$ 为服役条件下的疲劳强度;

10 $\sigma_{(air)}$ 为空气环境下的疲劳强度;

$N_{(environment)}$ 为服役条件下的疲劳寿命;

$N_{(air)}$ 为空气环境下的疲劳寿命。

15 7. 根据权利要求 1 所述的极端环境下超长寿命服役结构抗疲劳及安全调控方法, 其特征在于, 所述步骤 S4 的超高周疲劳寿命预测理论模型, 对应的表达式为:

$$\left\{ \sigma_a (area)^{1/12} \right\}^{\alpha} N_f = C$$

$$Z = \sigma_a (area)^{1/6} D^{\beta};$$

$$D = (d - d_{inc}) / d;$$

20 其中, σ_a 为疲劳应力幅;

$area$ 为微缺陷投影面积;

D 为缺陷的相对位置;

α, C 均为拟合常数;

N_f 为疲劳寿命;

25 β 为材料常数;

d 为疲劳试棒直径;

d_{inc} 为缺陷的中心点到试棒外侧表面的最小距离;

Z 为疲劳寿命控制参量。

8.根据权利要求 1 所述的极端环境下超长寿命服役结构抗疲劳及安全调控方法，其特征在于，所述步骤 S5 中根据超高周疲劳寿命预测理论模型，

5 进行材料冶金与制造工艺参数调控，进一步包括以下步骤：

步骤 S511、根据超高周疲劳寿命预测理论模型，调控冶金与制作工艺，进行材料设计和材料制造；

步骤 S512、对材料进行疲劳测试，对测试数据进行评估；

步骤 S513、将评估结果与预期指标进行比较，如果评估结果满足预期指标要求，则当前材料为超长寿命抗疲劳材料，流程结束，如果评估结果不满足预期指标要求，则对冶金与制造工艺参数进行调控后重新进入步骤 S511，直至评估结果满足预期指标要求。

9.根据权利要求 1 所述的极端环境下超长寿命服役结构抗疲劳及安全调控方法，其特征在于，所述步骤 S5 中根据超高周疲劳寿命预测理论模型，进行结构强度设计参数调控，进一步包括以下步骤：

步骤 S521、根据服役结构的长寿命阶段疲劳断裂模式进行结构疲劳设计和材料疲劳设计，获得结构强度设计参数；

步骤 S522、基于超高周疲劳寿命预测理论模型对结构强度设计参数进行验证校核；

步骤 S523、将验证校核结果与设计要求进行比较，如果验证校核结果满足设计要求，则当前结构强度设计参数为超长寿命抗疲劳设计参数，流程结束，如果验证校核结果不满足设计要求，则重新进入步骤 S521，对结构强度设计参数进行调控，直至验证校核结果满足设计要求。

10.根据权利要求 1 所述的极端环境下超长寿命服役结构抗疲劳及安全调控方法，其特征在于，所述步骤 S5 中根据超高周疲劳寿命预测理论模型，进行结构服役应力与环境参数调控，进一步包括以下步骤：

步骤 S531、将超高周疲劳寿命预测理论模型结合结构强度设计参数建立数字孪生模型；

步骤 S532、将数字孪生模型进行安全仿真分析；

- 5 步骤 S533、如果安全仿真输出结果为安全，则当前服役应力与环境参数符合要求，流程结束，如果安全仿真输出结果为不安全，则对服役应力与环境参数进行调控，重新进入步骤 S531，直至安全仿真输出结果为安全。

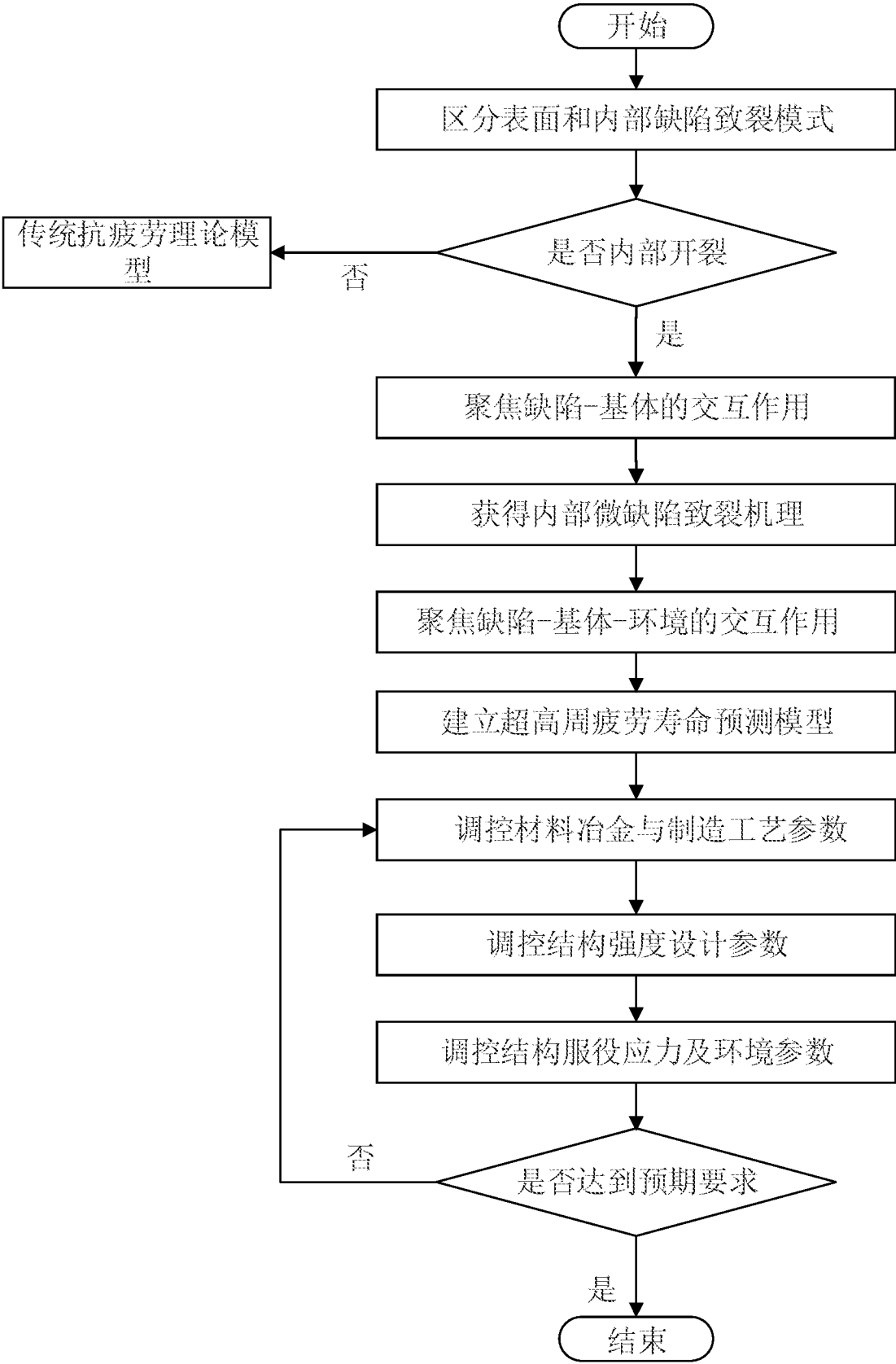


图 1

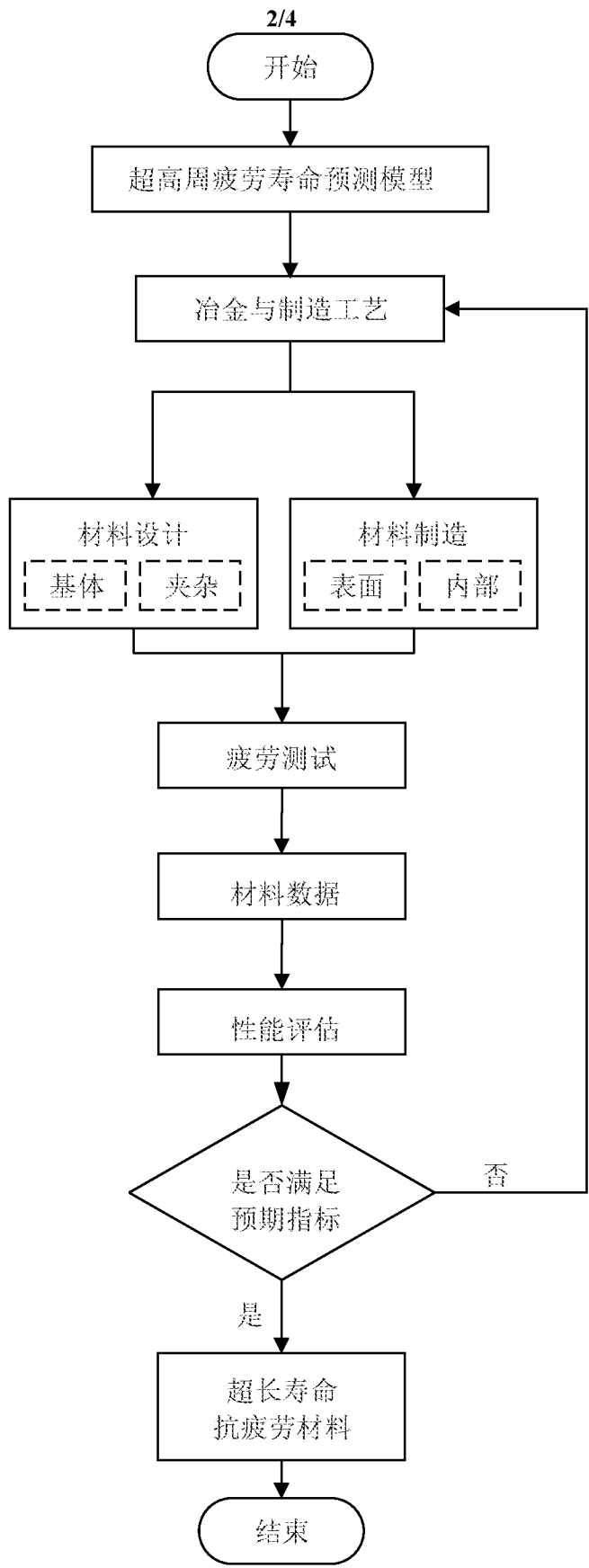


图 2

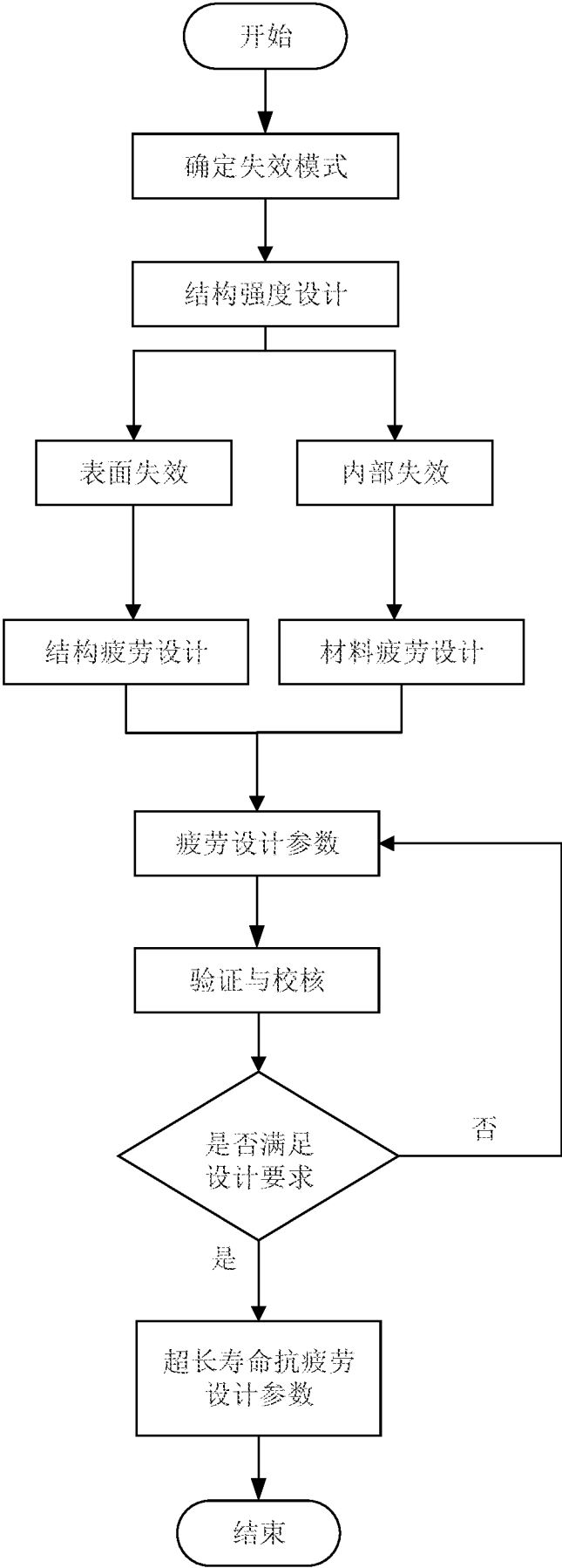


图 3

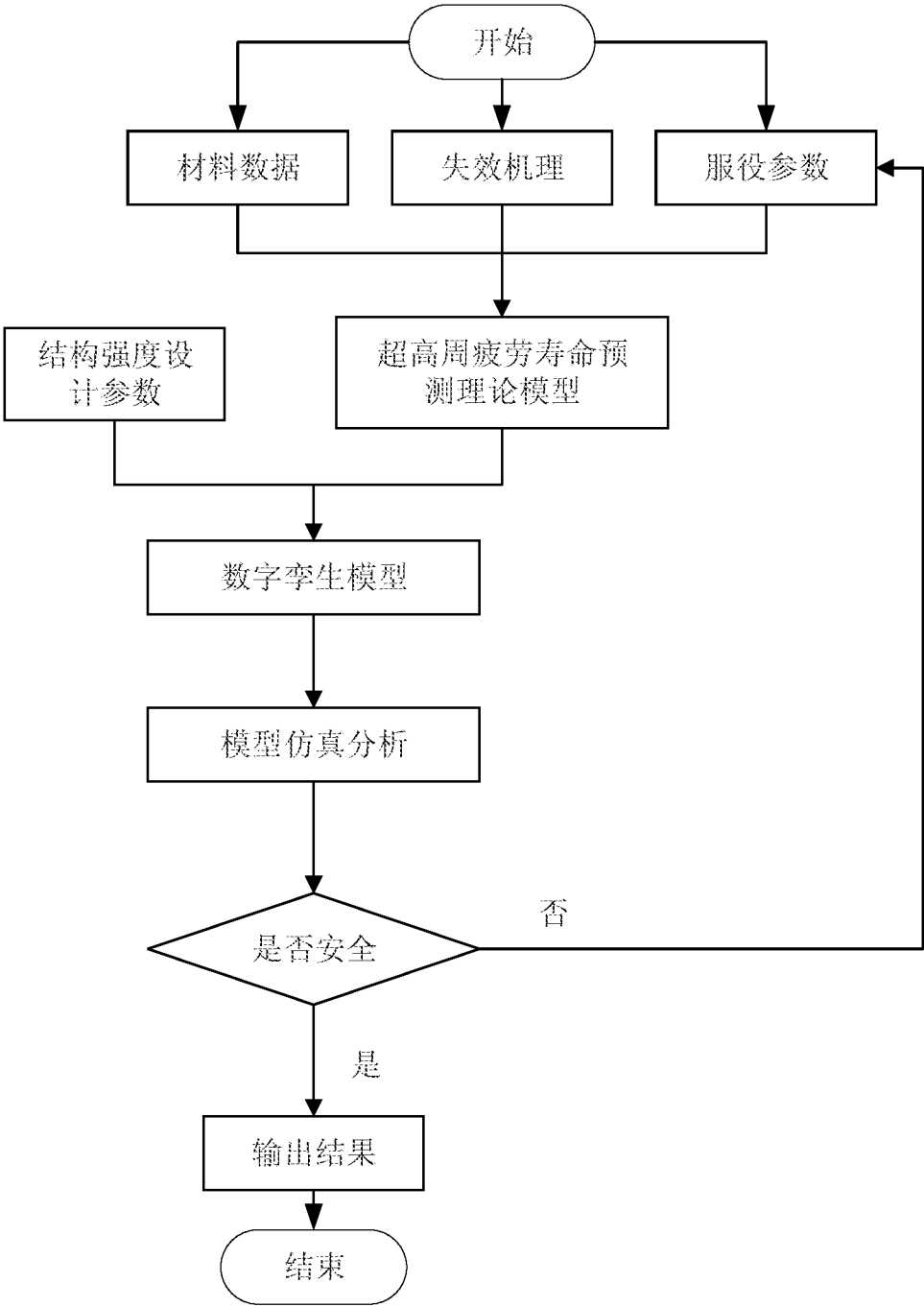


图 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2022/119223

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01N3/32(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC: G01N, G06F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNKI, CNTXT, WPABSC, ENTXTC, DWPI, CJFD: 华东理工大学, 朱明亮, 轩福贞, 朱刚, 裂纹, 缺陷, 基体, 超高周, 高周, 低周, 疲劳, 寿命, 安全, 服役, 载荷, 加载, 环境, 温度, crack, structure, defect, high-cycle, fatigue, life, safety, service, load, environment, temperature

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	CN 110609052 A (WUHAN IRON & STEEL CO., LTD.) 24 December 2019 (2019-12-24) description, paragraphs [0059]-[0089], and figures 1-5	1-10
Y	CN 110069858 A (INSTITUTE OF METAL RESEARCH, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 30 July 2019 (2019-07-30) description, paragraphs [0039]-[0057], and figure 1	1-10
A	CN 108613889 A (FOSHAN UNIVERSITY) 02 October 2018 (2018-10-02) entire document	1-10
A	CN 110020497 A (CHANGSHA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 16 July 2019 (2019-07-16) entire document	1-10
A	CN 113642192 A (BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 12 November 2021 (2021-11-12) entire document	1-10
A	CN 114282709 A (OCEAN UNIVERSITY OF CHINA et al.) 05 April 2022 (2022-04-05) entire document	1-10



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“D” document cited by the applicant in the international application

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

01 June 2023

Date of mailing of the international search report

14 June 2023

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District,
Beijing 100088

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2022/119223**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 115034578 A (POWERCHINA HUADONG ENGINEERING CORP., LTD.) 09 September 2022 (2022-09-09) entire document	1-10
A	JP 6944736 B1 (KOTOBUKI HOLDINGS CO., LTD.) 06 October 2021 (2021-10-06) entire document	1-10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2022/119223

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	110609052	A	24 December 2019	CN	110609052	B	07 June 2022
CN	110069858	A	30 July 2019	CN	110069858	B	07 April 2023
CN	108613889	A	02 October 2018	None			
CN	110020497	A	16 July 2019	None			
CN	113642192	A	12 November 2021	None			
CN	114282709	A	05 April 2022	None			
CN	115034578	A	09 September 2022	None			
JP	6944736	B1	06 October 2021	TW	202244476	A	16 November 2022
				JP	2022107231	A	21 July 2022
				WO	2022149297	A1	14 July 2022

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2022/119223

A. 主题的分类 G01N3/32(2006.01)i 按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类		
B. 检索领域 检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号) IPC: G01N, G06F 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用)) CNKI, CNTXT, WPABSC, ENTXTC, DWPI, CJFD; 华东理工大学, 朱明亮, 轩福贞, 朱刚, 裂纹, 缺陷, 基体, 超高周, 高周, 低周, 疲劳, 寿命, 安全, 服役, 载荷, 加载, 环境, 温度, crack, structure, defect, high-cycle, fatigue, life, safety, service, load, environment, temperature		
C. 相关文件		
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
Y	CN 110609052 A (武汉钢铁有限公司) 2019年12月24日 (2019 - 12 - 24) 说明书第[0059]-[0089]段及图1-5	1-10
Y	CN 110069858 A (中国科学院金属研究所) 2019年7月30日 (2019 - 07 - 30) 说明书第[0039]-[0057]段及图1	1-10
A	CN 108613889 A (佛山科学技术学院) 2018年10月2日 (2018 - 10 - 02) 全文	1-10
A	CN 110020497 A (长沙理工大学) 2019年7月16日 (2019 - 07 - 16) 全文	1-10
A	CN 113642192 A (北京理工大学) 2021年11月12日 (2021 - 11 - 12) 全文	1-10
A	CN 114282709 A (中国海洋大学 等) 2022年4月5日 (2022 - 04 - 05) 全文	1-10
☒ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。		
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “D” 申请人在国际申请中引证的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件		
国际检索实际完成的日期 2023年6月1日		国际检索报告邮寄日期 2023年6月14日
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088		授权官员 郑睿 电话号码 (+86) 010-53962447

C. 相关文件		
类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 115034578 A (中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司) 2022年9月9日 (2022 - 09 - 09) 全文	1-10
A	JP 6944736 B1 (KOTOBUKI HOLDINGS CO., LTD.) 2021年10月6日 (2021 - 10 - 06) 全文	1-10

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2022/119223

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	110609052	A	2019年12月24日	CN 110609052 B	2022年6月7日
CN	110069858	A	2019年7月30日	CN 110069858 B	2023年4月7日
CN	108613889	A	2018年10月2日	无	
CN	110020497	A	2019年7月16日	无	
CN	113642192	A	2021年11月12日	无	
CN	114282709	A	2022年4月5日	无	
CN	115034578	A	2022年9月9日	无	
JP	6944736	B1	2021年10月6日	TW 202244476 A	2022年11月16日
				JP 2022107231 A	2022年7月21日
				WO 2022149297 A1	2022年7月14日