

(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
2016 年 11 月 3 日 (03.11.2016)



(10) 国际公布号
WO 2016/173567 A2

- (51) 国际专利分类号: 无分类
- (21) 国际申请号: PCT/CN2016/084248
- (22) 国际申请日: 2016 年 6 月 1 日 (01.06.2016)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201610353421.1 2016 年 5 月 25 日 (25.05.2016) CN
- (71) 申请人: 华东理工大学 (EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国上海市梅陇路 130 号, Shanghai 200237 (CN)。上海汽轮机厂有限公司 (SHANGHAI TURBINE COMPANY LTD.) [CN/CN]; 中国上海市闵行区江川路 333 号, Shanghai 200240 (CN)。
- (72) 发明人: 轩福贞 (XUAN, Fuzhen); 中国上海市梅陇路 130 号, Shanghai 200237 (CN)。谈建平 (TAN, Jianping); 中国上海市梅陇路 130 号, Shanghai 200237

(CN)。宫建国 (GONG, Jianguo); 中国上海市梅陇路 130 号, Shanghai 200237 (CN)。刘霞 (LIU, Xia); 中国上海市闵行区江川路 333 号, Shanghai 200240 (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, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, 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, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

[见续页]

(54) Title: ANTI-FRACTURE DESIGN METHOD FOR NICKEL-BASED HIGH TEMPERATURE FASTENERS

(54) 发明名称: 镍基高温紧固件的防断裂设计方法

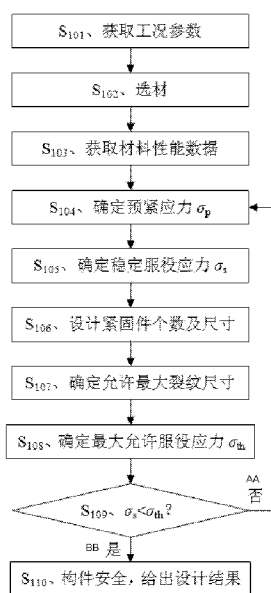


图 1

S101 OBTAIN CONDITION PARAMETERS
S102 SELECT MATERIAL
S103 OBTAIN MATERIAL PERFORMANCE DATA
S104 DETERMINE PRE-TENSION STRESS σ_p
S105 DETERMINE STABLE SERVICE STRESS σ_s
S106 DESIGN NUMBER AND SIZE OF FASTENERS
S107 DETERMINE PERMITTED MAXIMUM CRACK SIZE
S108 DETERMINE MAXIMUM PERMITTED SERVICE STRESS σ_{th}
S109 $\sigma_s < \sigma_{th}$?
S110 COMPONENTS ARE SAFE, PROVIDE DESIGN RESULT
AA NO
BB YES

(57) Abstract: The present invention relates to an anti-fracture design method for nickel-based high temperature fasteners, said method comprising the following steps: S₁, obtaining design condition parameters; S₂, selecting a fastener material; S₃, obtaining material performance data; S₄, determining pre-tension stress of a single fastener; S₅, determining service stress σ_s under stable conditions; S₆, designing the number n of fasteners, an effective cross-sectional area A and a distribution thereof; S₇, determining a permitted maximum crack size; S₈, in combination with a high temperature crack propagation threshold K_{th} , determining a maximum permitted service stress σ_{th} ; S₉, comparing whether the service stress σ_s is less than the maximum permitted service stress σ_{th} ; if so determined, the fasteners are safe within a design cycle; if not so determined, the method returns to S₄ and the pre-tension stress σ_p is reduced.

(57) 摘要: 本发明涉及镍基高温紧固件的防断裂设计方法, 该方法包括以下步骤: S₁、获取设计工况参数; S₂、选择紧固件材料; S₃、获取材料性能数据; S₄、确定单个紧固件的预紧应力; S₅、确定稳定工况下的服役应力 σ_s ; S₆、设计紧固件的个数 n、有效截面积 A 及其分布; S₇、确定允许的最大裂纹尺寸; S₈、结合高温裂纹扩展门槛值 K_{th} , 确定最大允许服役应力 σ_{th} ; S₉、比较服役应力 σ_s 是否小于最大允许服役应力 σ_{th} ; 若是则设计周期内该紧固件安全; 否则返回 S₄ 步并降低预紧应力 σ_p 。



(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, 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:

- 根据申请人的请求, 在条约第 21 条(2)(a)所规定的期限届满之前进行。
- 不包括国际检索报告, 在收到该报告后将重新公布(细则 48.2(g))。

镍基高温紧固件的防断裂设计方法

技术领域

本发明属于镍基高温紧固件领域，涉及一种镍基高温紧固件的防断裂设计方法，更具体地说，涉及以高强度、低韧性的镍基高温合金为材料的紧固件设计，如镍基高温螺栓、螺柱、螺母等的设计方法。

背景技术

为符合节能降耗、高效环保的原则，电力、炼化、冶金以及航空等领域的设备呈现出更高温度、更大压力、更长服役时间的发展趋势。如超临界电站单机组的功率已达 1000MW 以上，工作参数 600-650℃/32-35MPa，设计寿命达 30 年；先进航空发动机涡轮前进口温度高达 1980-2080℃，推重比达到 15-20 以上，最长机上寿命超过 4 万小时；目前致力发展的 700℃火电、第 4 代核电技术也均是基于高温高压参数以及长设计寿命。随着设备运行参数不断提升，现广泛使用的铁素体、马氏体以及奥氏体等耐热钢材料将不能满足部件对材料使用性能的要求，这些工艺设备的实现必须大量使用强度更高、蠕变特性更好的镍基高温合金。

镍基高温紧固件是指以镍基合金为材料，高温环境下紧固两个或两个以上零件紧固连接成为一个整体时所采用的一类机械零件的总称，主要包括：螺栓、螺柱、螺母等，广泛应用于电力、炼化、冶金以及航空等领域。

现行的镍基高温紧固件的设计方法以强度理论为基础，一般流程为：获取工况参数、选材、确定预紧力、设计紧固件排布及尺寸、紧固件受力分析、各种工况下强度校核（考虑松弛影响）。

然而，镍基高温紧固件断裂事件屡见不鲜，如靖远第二发电有限公司汽轮机 GH4145 合金螺栓断裂（2011 年）、国产百万千瓦超临界电站发生大批 Inconel 783 合金螺栓断裂（2012 年）等，严重时造成停车、停产，导致巨大经济损失。究其原因是，镍基高温合金，虽然具有较高的高温强度及抗松弛性能，但其高温韧性具有显著的时间相关性，长时服役后的韧性较低。保障高温镍基紧固件在服役周期内不发生断裂成为了设计关键。对于这一类性能特性的材料，使用常规的基于强度理论的紧固件设计方法，虽然表象上表现出较高的安全系数，但并未考虑材料断裂性能这一关键的决定性因素，故而无法保障设备的安全运行。

因此，针对现有技术中常规紧固件设计方法并不适用于高温强度高但韧性并不优异的镍基高温紧固件这一问题，本领域迫切需要开发出一种高温环境下镍基材料紧固件的防断裂设计新方法。

5 发明内容

针对镍基高温合金强度高、韧性低的特点，本发明提出了高温环境下镍基材料紧固件的防断裂设计新方法，提供了一种新的紧固件强度设计工艺，从而解决了现有技术中存在的问题。

本发明提供了一种镍基高温紧固件的防断裂设计方法，该方法包括以下步骤：

10 S₁、获取设计工况参数，所述参数包括：设计温度 T 、环境介质、设计周期、被紧固材料牌号及结构尺寸、实现紧固功能所需的力 P ；

S₂、根据步骤 S₁ 中的设计温度 T 及环境介质选择紧固件材料；

15 S₃、获取材料性能数据，所述数据包括：紧固件材料和被紧固材料的线性膨胀系数 α_b 及 α_v ，紧固件材料的弹性模量 E 、拉伸性能、应力松弛性能、高温裂纹扩展门槛值 K_{th} ；

S₄、根据步骤 S₂ 中选择的材料，确定单个紧固件的预紧应力 σ_p ，其中， $\sigma_p = 0.5R_{p0.2}$ ，式中 $R_{p0.2}$ 表示紧固件的 0.2% 塑性延伸强度；

20 S₅、确定步骤 S₁ 中的设计温度 T 及设计周期下的应力松弛后的剩余应力 σ_r ，其中， σ_r 通过材料性能数据库查询获得，或者通过进行高温松弛试验测试获得松弛曲线，采用 origin 软件、excel 软件或手绘绘制松弛曲线，并对曲线进行外推或内插得到；计算稳定工况下的温度应力 $\sigma_t = E(\alpha_v - \alpha_b)T$ ；确定稳定工况下的服役应力 σ_s ，其中， σ_s 为 $\sigma_p + \sigma_t$ 和 σ_p 中较大者与 σ_r 比较取较小者；

S₆、设计紧固件的个数 n 、有效截面积 A 及其分布；

S₇、根据紧固件的无损检测规定，确定允许的最大裂纹尺寸；

25 S₈、假定步骤 S₇ 中确定的允许的最大裂纹尺寸垂直于紧固件受力方法，结合高温裂纹扩展门槛值 K_{th} ，计算得到最大允许服役应力 σ_{th} ，其中， $\sigma_{th} = K_{th} / (\sqrt{\pi a} F_1)$ ，式中 F_1 是通过应力强度因子手册查询或有限元法计算获得的， a 是裂纹长度；

S₉、比较步骤 S₅ 中的服役应力 σ_s 是否小于步骤 S₈ 中的最大允许服役应力 σ_{th} ；若是则执行步骤 S₁₀；否则返回步骤 S₄，并降低预紧应力 σ_p ；

30 S₁₀、设计周期该紧固件不会发生裂纹扩展，构件安全；给出紧固件材料、个

数 n 、有效截面积 A 及其分布。

在一个优选的实施方式中，步骤 S_3 中所述的材料性能数据是通过材料性能数据库查询获得的，若查询不到则需进行相应的试验测试获得。

在另一个优选的实施方式中，所述线性膨胀系数采用热膨胀仪测试获得；所述弹性模量 E 采用动态热机械分析仪测试获得；所述拉伸性能采用高温圆棒拉伸测试获得；所述应力松弛性能进行高温松弛试验测试获得；所述高温裂纹扩展阈值 K_{th} 采用紧凑拉伸试样进行高温裂纹扩展试验测试获得初始应力强度因子与裂纹起裂时间曲线，并将曲线外推或内插得到设计周期下的高温裂纹扩展阈值 K_{th} 。

10 在另一个优选的实施方式中，所述设计周期下的高温裂纹扩展阈值 K_{th} 通过进行短时高温裂纹扩展试验，对测试数据依据 $K = Bt_i^\varphi$ 规律计算得到，式中， K 为应力强度因子， t_i 表示裂纹起裂时间， B 与 φ 为材料参数，由试验数据拟合得到；将设计周期代入拟合后的方程，计算获得该设计周期下的应力强度因子 K 即为裂纹扩展阈值 K_{th} 。

15 在另一个优选的实施方式中，在步骤 S_6 中，根据步骤 S_5 中得到的服役应力 σ_s ，综合考虑密封面尺寸和力 P ，根据 $P = nA\sigma_s$ ，设计紧固件的个数 n 、有效截面积 A 及其分布。

在另一个优选的实施方式中，步骤 S_7 中允许的最大裂纹尺寸根据无损检测技术的最小可检出缺陷尺寸及检测和制造成本综合考量确定。

20 在另一个优选的实施方式中，所述无损检测技术包括目视检测、磁粉检测和射线检测。

有益效果：

25 本发明针对现有技术中常规紧固件设计方法并不能保障高强度、低韧性的镍基高温紧固件的完整性，开发出一种高温环境下镍基材料紧固件的防断裂设计新方法，提供了一种新的紧固件强度设计工艺。

附图说明

30 附图是用以提供对本发明的进一步理解的，它只是构成本说明书的一部分以进一步解释本发明，并不构成对本发明的限制。

图 1 是根据本发明的较佳实施方式的流程框图。

图 2 是根据本发明的较佳实施方式的由松弛试样测试获得的不同初始载荷下的应力松弛曲线图。

图 3 是根据本发明的较佳实施方式的由紧凑拉伸试样测得的初始应力强度因子与起裂时间的曲线图。

图 4 是本申请实施例中螺栓形貌及其内外表面裂纹缺陷示意图。

具体实施方式

本发明提供了一种镍基高温紧固件的防断裂设计方法，该方法包括以下步骤：

10 S₁、获取设计工况参数，如设计温度 T 、环境介质、设计周期、被紧固构件的材料牌号及结构尺寸、实现紧固功能所需的力（密封力） P ；

S₂、根据步骤 S₁ 中的设计温度及环境介质选择紧固件材料；

S₃、获取材料性能数据，如紧固件材料和被紧固材料的线性膨胀系数 α_b 及 α_v 、紧固件材料的弹性模量 E 、拉伸性能、应力松弛性能、高温裂纹扩展门槛值 K_{th} ；

15 S₄、根据步骤 S₂ 中选择材料，确定单个紧固件的预紧应力，一般取 $\sigma_p = 0.5R_{p0.2}$ ，式中 $R_{p0.2}$ 表示紧固件的 0.2% 塑性延伸强度；

S₅、确定步骤 S₁ 中设计温度和设计周期下的应力松弛后的剩余应力 σ_r ；计算稳定工况下的温度应力 $\sigma_t = E(\alpha_v - \alpha_b)T$ ；确定稳定工况下的服役应力 σ_s ；

S₆、设计紧固件的个数 n 、有效截面积 A 及其分布；

20 S₇、根据紧固件的无损检测规定，确定允许的最大裂纹尺寸；

S₈、假定步骤 S₇ 中确定的允许的最大裂纹尺寸垂直于紧固件受力方法，结合高温裂纹扩展门槛值 K_{th} ，由下式计算得到最大允许服役应力 σ_{th}

$$\sigma_{th} = K_{th} / (\sqrt{\pi a} F_I)$$

其中 F_I 可通过应力强度因子手册查询或有限元法计算获得， a 是裂纹长度；

25 S₉、比较步骤 S₅ 中的服役应力 σ_s 是否小于步骤 S₈ 中的最大允许服役应力 σ_{th} ；若是则执行步骤 S₁₀；否则返回步骤 S₄，并降低预紧应力 σ_p ；

S₁₀、设计周期该紧固件不会发生裂纹扩展，构件安全；给出紧固件材料、个数 n 、有效截面积 A 及其分布。

在本发明中，在步骤 S₃ 中，上述材料性能数据可通过材料性能数据库查询获得，若查询不到则需进行相应的试验测试。

较佳地，线性膨胀系数可采用热膨胀仪测试获得；弹性模量可采用动态热机械分析仪测试获得；拉伸性能可采用高温圆棒拉伸测试获得；松弛性能可进行高温松弛试验测试获得；高温裂纹扩展门槛值可采用紧凑拉伸试样进行短时高温裂纹扩展试验测试获得初始应力强度因子与裂纹起裂时间曲线，曲线外推或内插得到设计周期下的裂纹扩展门槛值。

较佳地，初始应力强度因子与裂纹起裂时间曲线可采用 origin 软件、excel 软件或手绘进行绘制，并采用方程 $K = Bt_i^\varphi$ 方程进行拟合，式中 K 为应力强度因子， t_i 为裂纹起裂时间， B 与 φ 为材料参数，由试验数据拟合得到。将设计周期代入拟合后的方程，计算获得该设计周期下的应力强度因子 K 即为裂纹扩展门槛值 K_{th} 。

较佳地，在步骤 S_5 中， σ_r 可通过材料性能数据库查询获得，若查询不到可进行高温松弛试验测试获得松弛曲线，松弛曲线可采用 origin 软件、excel 软件或手绘进行绘制，进行外推或内插得到； σ_s 为 $\sigma_p + \sigma_t$ 和 σ_p 中较大者与 σ_r 比较取较小者。

较佳地，根据步骤 S_5 中工作状态下的服役应力 σ_s ，综合考虑密封面尺寸、密封力 P 等因素，根据 $P = nA\sigma_s$ ，设计紧固件的个数 n 、有效截面积 A 及其分布。

较佳地，在步骤 S_7 中，允许的最大裂纹尺寸可根据相应无损检测技术如目视检测、磁粉检测、射线检测的最小可检出缺陷尺寸及检测、制造成本综合考量确定。

以下参看附图。

图 1 是根据本发明的较佳实施方式的流程框图。如图 1 所示，本发明的镍基高温紧固件的防断裂设计方法包括以下步骤：

S_{101} 、获取工况参数：根据设计条件，如设计温度、环境介质、设计周期、被紧固构件的材料牌号及结构尺寸、实现紧固功能所需的力（密封力） P ，获取设计工况参数；

S_{102} 、选材：根据步骤 S_{101} 中的设计温度及环境介质，选择紧固件材料；

S_{103} 、获取材料性能数据：获取紧固件材料和被紧固材料的线性膨胀系数 α 、紧固件材料的高温弹性模量 E 、高温拉伸性能如 0.2% 塑性延伸强度 $R_{p0.2}$ 、紧固件材料的应力松弛性能、紧固件材料的高温裂纹扩展门槛值 K_{th} ；

S_{104} 、确定预紧应力 σ_p ：根据步骤 S_{102} 中选择的材料，确定单个紧固件的预紧应力，一般取 $\sigma_p = 0.5R_{p0.2}$ ；

S₁₀₅、确定稳定服役应力 σ_s ：确定设计温度和设计周期内的剩余应力 σ_r ； σ_r 可通过材料性能数据库查询获得，若查询不到可进行高温松弛试验测试获得松弛曲线，松弛曲线可采用 origin 软件、excel 软件或手绘进行绘制，进行外推或内插得到；

- 5 计算稳定工况下的温度应力 $\sigma_t = E(\alpha_v - \alpha_b)T$ ，其中 E 为弹性模量， α_v 为被紧固材料的线性膨胀系数， α_b 为紧固件材料的线性膨胀系数， T 为设计温度；

确定稳定工况下的服役应力 σ_s 为 $\sigma_p + \sigma_t$ 和 σ_p 中较大者与 σ_r 比较取较小者；

- S₁₀₆、确定紧固件个数及尺寸：根据步骤 S₁₀₅ 中工作状态下的服役应力 σ_s ，综合考虑密封面尺寸、密封力 P 等因素，根据 $P = nA\sigma_s$ ，设计紧固件的个数 n 、有效截面积 A 及其分布；
- 10

S₁₀₇、确定允许最大裂纹尺寸：根据紧固件的无损检测规定，确定允许的最大裂纹尺寸；

- S₁₀₈、确定最大允许服役应力 σ_{th} ：假定步骤 S₁₀₇ 确定的允许最大裂纹尺寸垂直于紧固件受力方法，结合高温裂纹扩展门槛值 K_{th} ，计算得到最大允许服役应力 σ_{th} ；最大允许服役应力 σ_{th} 可由下式计算得到
- 15

$$\sigma_{th} = K_{th} / (\sqrt{\pi a} F_1)$$

其中 F_1 可通过应力强度因子手册查询或有限元法计算获得， a 是裂纹长度；

- S₁₀₉、比较步骤 S₁₀₅ 中的服役应力 σ_s 是否小于步骤 S₁₀₈ 中的最大允许服役应力 σ_{th} ；若是则执行步骤 S₁₁₀；否则降低预紧应力 σ_p ，进行步骤 S₁₀₅ 至 S₁₁₀ 直至 $\sigma_s < \sigma_{th}$ ；
- 20

S₁₁₀、构件安全，给出设计结果：设计周期该紧固件不会发生裂纹扩展，构件安全；步骤 S₁₀₂ 及 S₁₀₆ 中确定的紧固件材料、紧固件的个数 n 、有效截面积 A 及其分布为本次设计结果。

- 图 4 是本申请实施例中螺栓形貌及其内外表面裂纹缺陷示意图。如图 4 所示， D_o 为螺栓外径， D_i 为螺栓内径， a 为裂纹长度， σ_s 为螺栓服役应力，外表面裂纹表示螺栓外表面存在裂纹的情况，内表面裂纹表示螺栓内表面存在裂纹的情况。
- 25

实施例

- 下面结合具体的实施例进一步阐述本发明。但是，应该明白，这些实施例仅用于说明本发明而不构成对本发明范围的限制。下列实施例中未注明具体条件的试验方法，通常按照常规条件，或按照制造厂商所建议的条件。除非另有说明，所有的百分
- 30

比和份数按重量计。

实施例 1:

5 某汽轮机高温蒸汽阀门需要进行阀门螺栓设计。螺栓设计温度为 560°C ，大气环境，设计周期 100000 小时，阀门所需的密封力为 8500000N，阀门材料为 GX12CrMoWVNbN10-1-1，阀门密封面外径为 1695mm，内径为 1085mm。

工艺流程如下：

10 一、获取设计工况参数。螺栓设计温度 T 为 560°C ，阀门材料为 GX12CrMoWVNbN10-1-1，阀门密封面外径为 1695mm、内径为 1085mm，阀门所需的密封力 P 为 8500000N。

GX12CrMoWVNbN10-1-1 钢化学成分 (质量分数, %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	W	V	N	Nb	Fe
0.14	0.28	0.93	0.008	0.006	9.51	0.99	0.73	0.99	0.19	0.048	0.086	剩余

二、根据 560℃ 设计温度选择螺栓材料为 Inconel 783 合金。

5

Inconel 783 合金化学成分 (质量分数, %)

C	Mn	S	P	Si	Cr	Ni	Fe	Al	Nb	Ti	B	Cu	Co
0.01	0.025	0.002	0.004	0.038	2.99	28.24	26.04	5.24	2.99	0.20	0.0049	0.009	剩余

三、采用热膨胀仪 (德国耐驰) 测试获得 Inconel 783 合金 560℃ 下的线性膨胀系数 α_b 为 $1.22E-5$ $1/^\circ\text{C}$, GX12CrMoWVNbN10-1-1 钢 560℃ 下的线性膨胀系数 α_v 为 $1.24E-5$ $1/^\circ\text{C}$ 。采用静态法测试获得 560℃ 下的弹性模量 E 为 144 GPa。进行
10 560℃ 下圆棒拉伸试验, 测试获得 0.2% 塑性延伸强度 $R_{p0.2}$ 为 630 MPa。进行 560℃ 下应力松弛试样, 测试获得不同载荷下的应力松弛性能, 采用 origin 软件绘制剩余应力 σ 与时间 t 曲线, 见图 2。采用紧凑拉伸试样, 进行 560℃ 空气环境下的高温裂纹扩展试验, 获得初始应力强度因子 K 与裂纹起裂时间 t_i 曲线, 采用 origin 软件绘制并拟合曲线 $K = 52t_i^{-0.14}$, 曲线外推得到 100000 小时时的裂纹扩展门槛值
15 为 $10.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (m 表示米), 见图 3。

四、确定单个螺栓的预紧应力, $\sigma_p = 0.5R_{p0.2} = 0.5 \times 630 \text{ MPa} = 315 \text{ MPa}$ 。

五、根据 Inconel 783 合金 560℃ 不同载荷下的应力松弛曲线, 外推获得 100000 小时后的剩余应力 σ_r 为 300 MPa。计算稳定工况下的温度应力 $\sigma_t = E(\alpha_v - \alpha_b)T = 144000 \times (1.24E-5 - 1.22E-5) \times 560 = 16 \text{ MPa}$ 。确定稳定工况下的服役应力
20 $\sigma_s = [(\sigma_p + \sigma_t, \sigma_p)_{\max}, \sigma_r]_{\min} = [(315 + 16, 315)_{\max}, 300]_{\min} = 300 \text{ MPa}$ 。

六、综合考虑密封面尺寸、密封力 P 等因素, 根据 $P = nA\sigma_s$, 确定螺栓个数为 24 个, 螺栓有效截面积为 1180 mm^2 。考虑到施工等要求, 设计螺栓外径 D_o 为 46mm, 内径 D_i 为 25mm。如图 4 所示。

七、根据无损检测规定, 允许的最大裂纹尺寸为 1mm 深的线缺陷。

八、当允许的最大裂纹垂直于紧固件受力方法为最危险工况, 如图 4 所示,
25 结合高温裂纹扩展门槛值 $K_{th} = 10.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, 计算最大允许服役应力 σ_{th}

$$\sigma_{th} = K_{th} / (\sqrt{\pi a F_1})$$

其中 F_I 可通过应力强度因子手册查询获得, 内、外表面裂纹的 F_I 值均为 1.19。最大允许服役应力 σ_{th} 为 156 MPa。

九、明显, 稳定工况下的服役应力 σ_s 大于最大允许服役应力 σ_{th} 。降低预紧应力 σ_p 为 140MPa。进行五至九步分析, 详细如下:

- 5 9-5、计算得到稳定工况下的服役应力 $\sigma_s = [[\sigma_p + \sigma_t, \sigma_p]_{\max}, \sigma_r]_{\min} = [[140 + 16, 140]_{\max}, 300]_{\min} = 156 \text{ MPa}$;

9-6、确定螺栓个数为 24 个, 螺栓有效截面积为 2280 mm^2 , 螺栓外径 D_o 为 60mm, 内径 D_i 为 25mm;

9-7、根据无损检测规定, 允许的最大裂纹尺寸为 1mm 深的线缺陷;

- 10 9-8、当允许最大裂纹垂直于紧固件受力方法为最危险工况, 结合高温裂纹扩展门槛值 K_{th} , 计算最大允许服役应力 σ_{th}

$$\sigma_{th} = K_{th} / (\sqrt{\pi a} F_I)$$

其中 F_I 可通过应力强度因子手册查询获得, 内、外表面裂纹的 F_I 值均为 1.16。最大允许服役应力 σ_{th} 为 160 MPa。

- 15 9-9、稳定工况下的服役应力 σ_s 小于最大允许服役应力 σ_{th} 。

十、560℃, 100000 小时设计周期内螺栓不会发生裂纹扩展, 构件安全。该高温蒸汽阀门需要螺栓 24 个, 螺栓直径 $D_o=60\text{mm}$, 内径 $D_i=25\text{mm}$, 材料为 Inconel 783 合金。

- 20 上述所列的实施例仅仅是本发明的较佳实施例, 并非用来限定本发明的实施范围。即凡依据本发明申请专利范围的内容所作的等效变化和修饰, 都应为本发明的技术范畴。

- 25 在本发明提及的所有文献都在本申请中引用作为参考, 就如同每一篇文献被单独引用作为参考那样。此外应理解, 在阅读了本发明的上述讲授内容之后, 本领域技术人员可以对本发明作各种改动或修改, 这些等价形式同样落于本申请所附权利要求书所限定的范围。

权 利 要 求

1. 一种镍基高温紧固件的防断裂设计方法，该方法包括以下步骤：

S₁、获取设计工况参数，所述参数包括：设计温度 T、环境介质、设计周期、
5 被紧固材料牌号及结构尺寸、实现紧固功能所需的力 P；

S₂、根据步骤 S₁ 中的设计温度 T 及环境介质选择紧固件材料；

S₃、获取材料性能数据，所述数据包括：紧固件材料和被紧固材料的线性膨胀系数 α_b 及 α_v ，紧固件材料的弹性模量 E、拉伸性能、应力松弛性能、高温裂纹扩展门槛值 K_{th} ；

10 S₄、根据步骤 S₂ 中选择的材料，确定单个紧固件的预紧应力 σ_p ，其中，
 $\sigma_p = 0.5R_{p0.2}$ ，式中 $R_{p0.2}$ 表示紧固件的 0.2% 塑性延伸强度；

S₅、确定步骤 S₁ 中的设计温度 T 及设计周期下的应力松弛后的剩余应力 σ_r ，
其中， σ_r 通过材料性能数据库查询获得，或者进行高温松弛试验测试获得松弛曲线，采用 origin 软件、excel 软件或手绘绘制松弛曲线，并对曲线进行外推或内插
15 得到；计算稳定工况下的温度应力 $\sigma_t = E(\alpha_v - \alpha_b)T$ ；确定稳定工况下的服役应力 σ_s ，
其中， σ_s 为 $\sigma_p + \sigma_t$ 和 σ_p 中较大者与 σ_r 比较取较小者；

S₆、设计紧固件的个数 n、有效截面积 A 及其分布；

S₇、根据紧固件的无损检测规定，确定允许的最大裂纹尺寸；

S₈、假定步骤 S₇ 中确定的允许的最大裂纹尺寸垂直于紧固件受力方法，结合
20 高温裂纹扩展门槛值 K_{th} ，计算得到最大允许服役应力 σ_{th} ，其中， $\sigma_{th} = K_{th} / (\sqrt{\pi a} F_1)$ ，
式中 F_1 是通过应力强度因子手册查询或有限元法计算获得的，a 是裂纹长度；

S₉、比较步骤 S₅ 中的服役应力 σ_s 是否小于步骤 S₈ 中的最大允许服役应力 σ_{th} ；
若是则执行步骤 S₁₀；否则返回步骤 S₄，并降低预紧应力 σ_p ；

S₁₀、设计周期该紧固件不会发生裂纹扩展，构件安全；给出紧固件材料、个
25 数 n、有效截面积 A 及其分布。

2. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，步骤 S₃ 中所述的材料性能数据是通过材料性能数据库查询获得的，若查询不到则需进行相应的试验测试获得。

3. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述线性膨胀系数采用热膨胀仪测试获得；所述弹性模量 E 采用动态热机械分析仪测试获得；所述拉伸性能采用
30 高温圆棒拉伸测试获得；所述应力松弛性能进行高温松弛试验测试获得；所述高

温裂纹扩展门槛值 K_{th} 采用紧凑拉伸试样进行高温裂纹扩展试验测试获得初始应力强度因子与裂纹起裂时间曲线，并将曲线外推或内插得到设计周期下的高温裂纹扩展门槛值 K_{th} 。

4. 如权利要求 3 所述的方法，其特征在于，所述设计周期下的高温裂纹扩展门槛值 K_{th} 通过进行短时高温裂纹扩展试验，对测试数据依据 $K = Bt_i^\varphi$ 规律计算得到，式中， K 为应力强度因子， t_i 表示裂纹起裂时间， B 与 φ 为材料参数，由试验数据拟合得到；将设计周期代入拟合后的方程，计算获得该设计周期下的应力强度因子 K 即为裂纹扩展门槛值 K_{th} 。

5. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，在步骤 S_6 中，根据步骤 S_5 中得到的服役应力 σ_s ，综合考虑密封面尺寸和力 P ，根据 $P = nA\sigma_s$ ，设计紧固件的个数 n 、有效截面积 A 及其分布。

6. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，步骤 S_7 中允许的最大裂纹尺寸根据无损检测技术的最小可检出缺陷尺寸及检测和制造成本综合考量确定。

7. 如权利要求 6 所述的方法，其特征在于，所述无损检测技术包括目视检测、磁粉检测和射线检测。

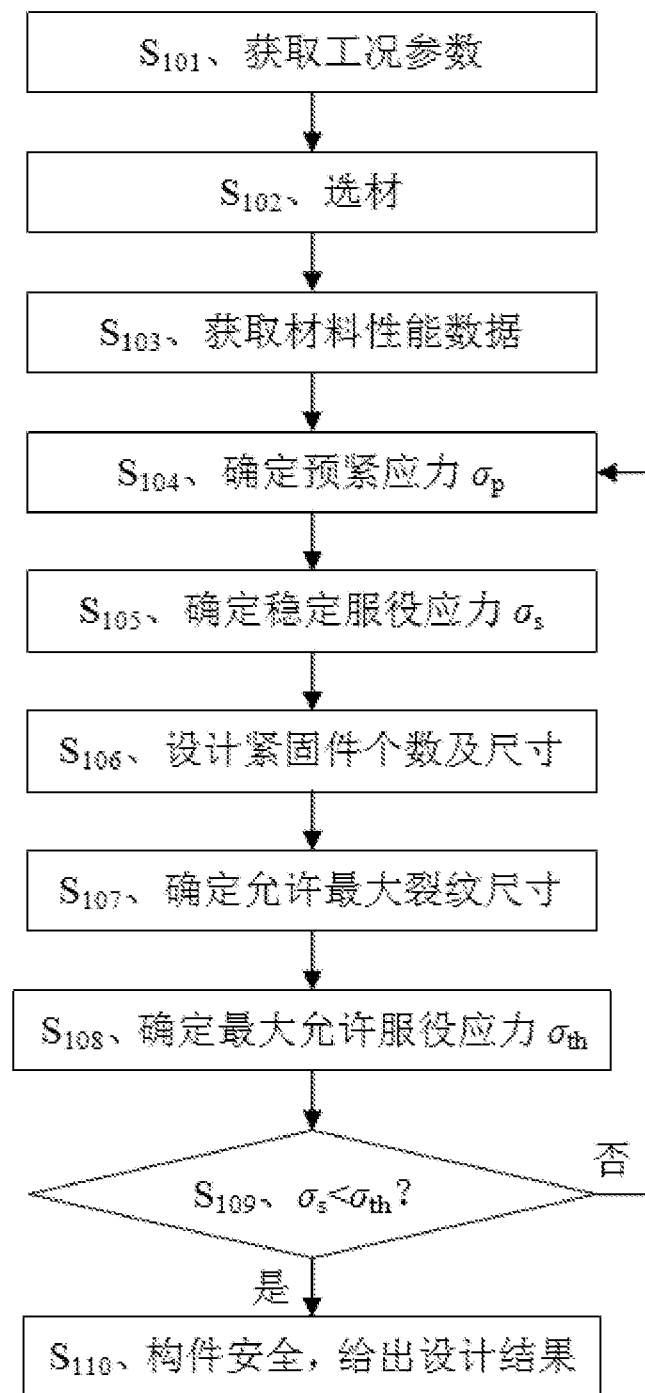


图 1

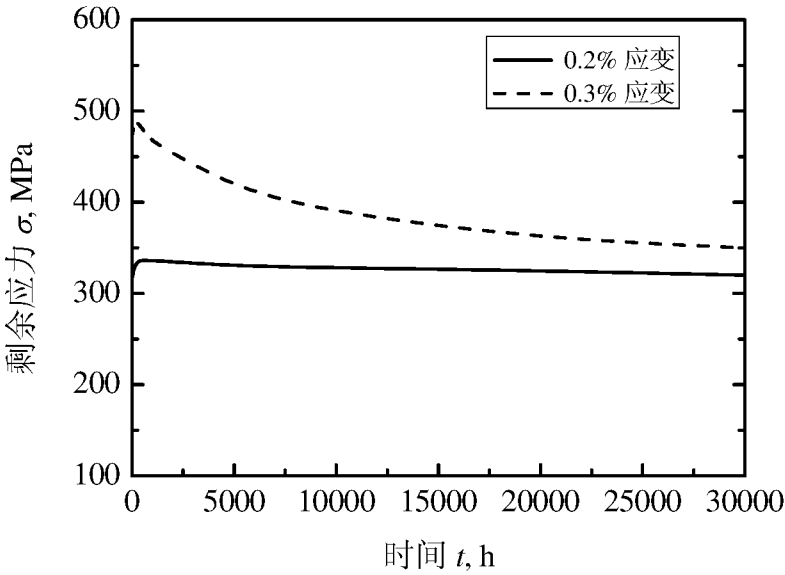


图 2

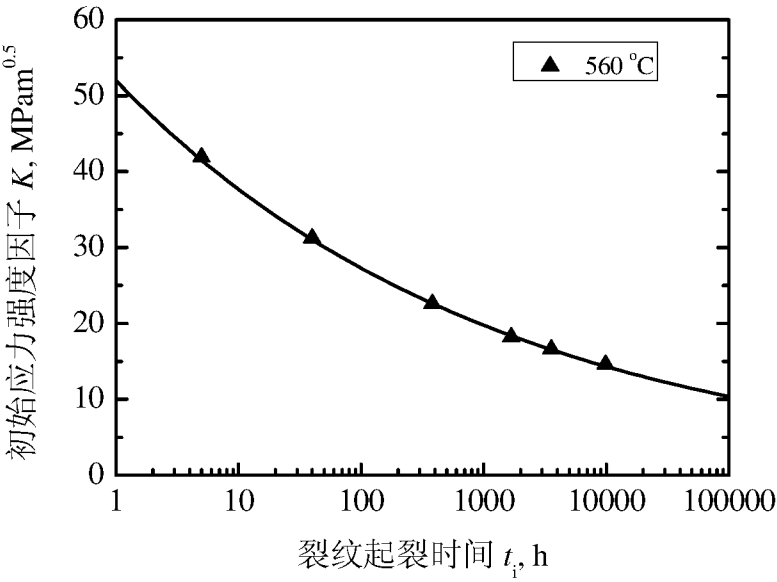


图 3

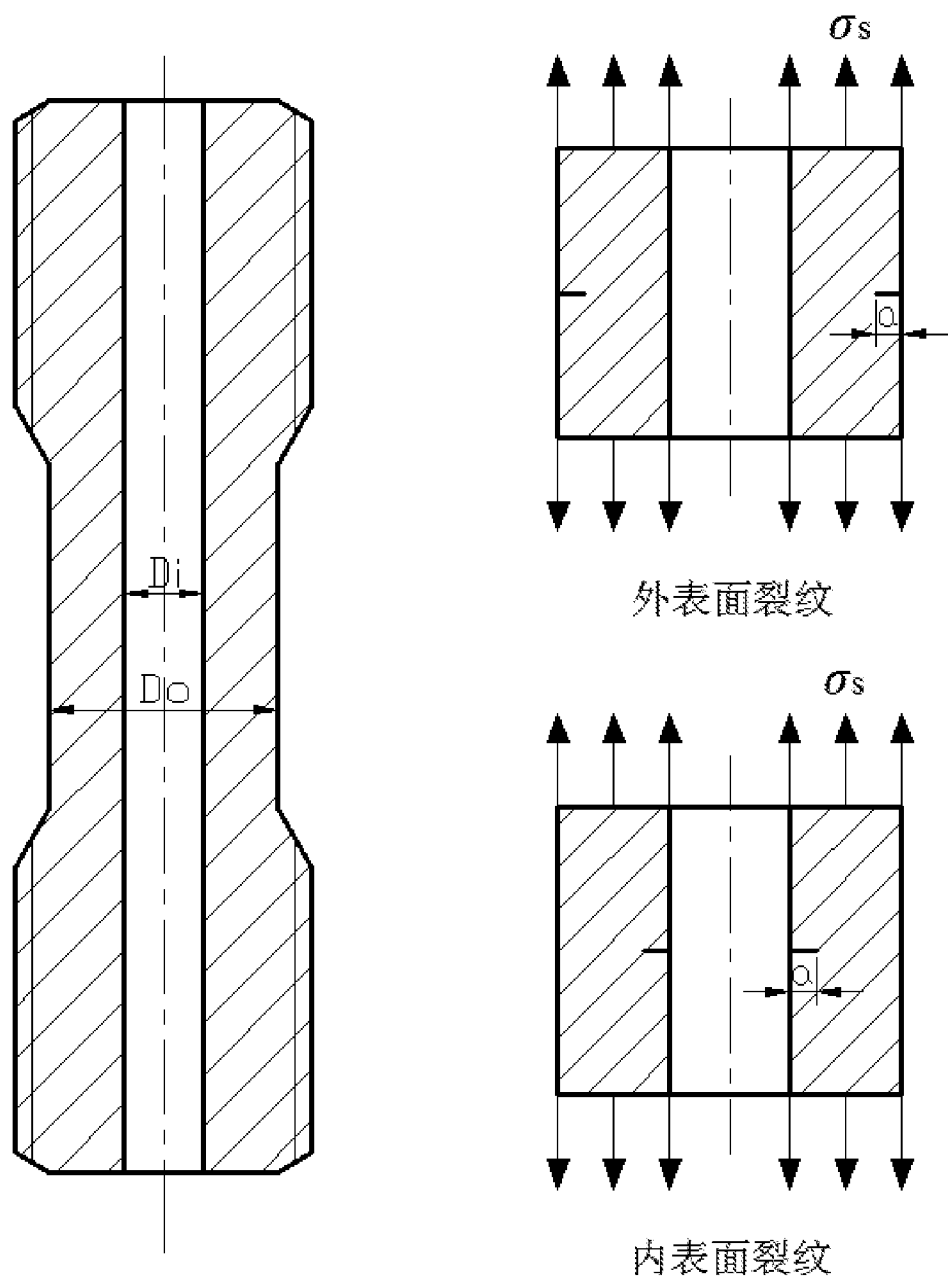


图 4