

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

7₂

(19) 世界知识产权组织
国际局



(43) 国际公布日
2013 年 6 月 20 日 (20.06.2013)

W I P O | P C T

(10) 国际公布号

W O 2013/086933 A 1

- (51) 国际分类号 :
G01N3/00 (2006.01)
- (21) 国际申请号 :
PCT/CN2012/085336
- (22) 国际申请日 :
2012 年 11 月 27 日 (27.11.2012)
- (25) 申报语言 :
中文
- (26) 公布语言 :
中文
- (30) 优先权 :
201110415419.X 2011 年 12 月 13 日 (13.12.2011) CN
- (71) 申请人 (对除美国外的所有指定国): 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)。
- () 发明人 及
- () 申请人 (仅对美国): 轩福贞 (XUAN, Fuzhen)
[CN/CN]; 中国上海市徐汇区梅陇路 130 号, Shanghai 200237 (CN)。曹昱潔 (CAO, Yupeng) [CN/CN]; 中国上海市徐汇区梅陇路 130 号, Shanghai 200237

(CN)。惠虎 (HUI, Hu) [CN/CN]; 中国上海市徐汇区 34 路 130 号, Shanghai 200237 (CN)。李培宁 (LI, Peining) [CN/CN]; 中国上海市徐汇区梅陇路 130 号, Shanghai 200237 (CN)。王国珍 (WANG, Guozhen) [CN/CN]; 中国上海市徐汇区梅陇路 130 号, Shanghai 200237 (CN)。

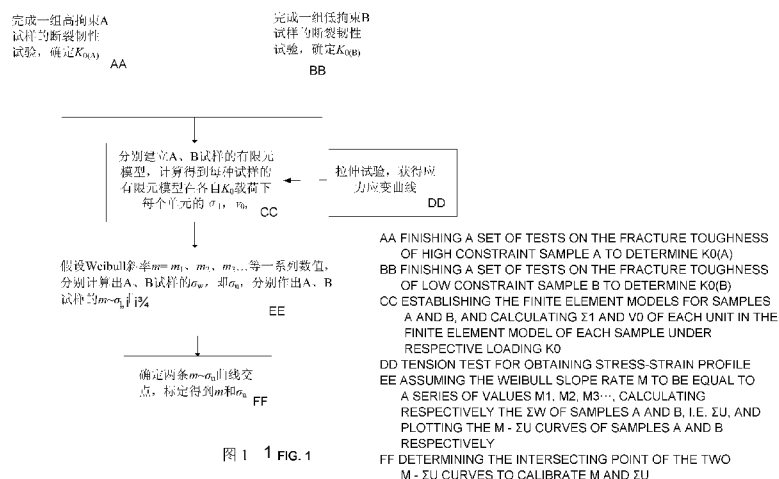
(74) 代理人 上海智信专利代理有限公司 (SHANGHAI ZHI XIN PATENT AGENT LTD); 中国上海市徐汇区斜土路 1223 号之俊大厦 26 楼, Shanghai 200032 (CN)。

(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, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, ML, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST,

[见续页]

(54) Title: METHOD FOR CALIBRATION OF PARAMETERS ASSESSING BRITTLE FRACTURE OF MATERIAL BASED ON BEREMIN MODEL

(54) 发明名称: 基于 Beremin 模型的材料脆性断裂评定参数的标定方法



(57) Abstract: A method for the calibration of parameters assessing the brittle fracture of a material based on a Beremin model: choosing at least two samples having different degrees of constraint, calculating the fracture toughness K_0 of each sample at the same calibrated temperature at an accumulated failure probability of 63.2% respectively by using data of a fracture toughness test on each sample; measuring the stress-strain profile at the calibrated temperature to establish a finite element model of each sample, and calculating the maximal main stress and unit volume of each unit in each sample under a loading of K_0 ; giving a different value to the Weibull slope rate m and calculating a Weibull size parameter σ_u of each sample, and plotting the relationship curve between m and σ_u of each sample; and obtaining the parameters assessing the brittle fracture of the material according to the coordinates of the intersecting point of the $m - \sigma_u$ curves. In comparison with conventional methods for calibration of parameters based on a toughness-translation Beremin model, the method has a smaller amount of calculation and can illustrate intuitively the convergence process of the calibration.

(57) 摘要:

[见续页]



SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ,
VC, VN, ZA, ZM, ZW。

CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD,
TG)。

- (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, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 叙亚 (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,

根据细则 4.17 的声明:

- 关于申请人有权申请并被授予专利(细则 4.17(ii))
- 发明人资格(细则 4.17(iv))

本国际公布:

- 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

一种基于 Beremin 模型的压力容器材料的脆性断裂评定参量标定方法, 通过选取至少两种具有不同拘束度的试样, 利用每种试样的断裂韧性试验数据, 分别计算得到每种试样在同一标定温度下累积失效概率为 63.2% 时的断裂韧性值 K_{IC} ; 测得在所述标定温度下的应力应变曲线, 建立每种试样的有限元模型, 分别计算得到每种试样在 K_{IC} 载荷下每个单元的最大主应力和单元体积; 赋予 Weibull 斜率 m 不同数值, 计算得到每种试样的 Weibull 尺度参量 σ_0 , 作出每种试样的 m 与 σ_0 之间的关系曲线; 根据 m - σ_0 曲线的交点坐标得到所述材料的脆性断裂评定参量。与传统的基于韧性换算模型的 Beremin 模型参量标定方法相比, 该方法计算量小, 可直观地显示标定的收敛过程。

基于 Beremin 模型的材料脆性断裂评定参量的标定方法

技术领域

本发明属于压力容器与安全工程领域，具体涉及一种材料脆性断裂评定参量的标定方法，即基于 Beremin 解理断裂模型的压力容器材料脆性断裂评定参量的标定方法。

背景技术

核电已经成为世界能源结构的重要组成部分，目前我国有在用反应堆 11 座，按照国家“积极发展核电”的中长期发展规划，未来 15 年将新建 40 余座以 AP1000 为代表的第三代百万千瓦级先进压水堆核电机组，成为世界上核电工业发展最快的国家。作为反应堆的最核心部件，核压力容器采用铁素体钢制成，这类钢具有明显的韧脆转变现象。而且在服役期间其一直受中子辐照的影响，进一步导致材料的韧脆转变温度升高，即在规定的工作温度下的材料断裂韧性会下降。为了保障核反应堆压力容器结构完整性，核电站在设计及使用维护阶段均需要按多种可能出现的工况，进行压力容器的结构完整性评估，以保证不会发生脆断事故。其中，压力容器在服役辐照前后的材料（包括母材、焊缝及其热影响材料）韧脆转变区的断裂韧性是必须的基础数据之一。

局部法是评价压力容器材料脆性断裂失效的一种主要方法。其中 Beremin 解理断裂模型应用最广泛，已被列入著名的含缺陷评定规范 R6 中。Beremin 模型是由法国的 F.M Beremin 研究小组，在研究压力容器用钢脆性断裂过程中提出的一个解理断裂局部法模型。该模型非常适合解决拘束度效应对解理断裂韧性的影响，还擅长分析复杂加载条件下（例如多轴外载荷，高速绝热加载）的解理断裂问题。

Beremin 模型仅用 Weibull 斜率 m 和 Weibull 尺度参量 σ_0 两个参量来描述复杂的解理断裂事件，模型预测解理断裂的准确性与参量的数值密切相关。因此，Beremin 模型参量的标定方法是压力容器材料脆性断裂失效评价方法中的关键技术。

国外已报道有几种 Beremin 模型参量的标定方法。例如, Minami 等人于 1992 年在《International Journal of Fracture》杂志上发表的《Estimation procedure for the Weibull stress parameters used in the local approach》中,提出了基于单一拘束试样的标定方法; Gao 等人于 1998 年在《Engineering fracture mechanics》杂志上发表的《Calibration of Weibull stress parameters using fracture toughness data》中,提出了基于高低拘束不同试样的标定方法(GRD 标定法); Ruggieri 等人于 2000 年在《Engineering Fracture Mechanics》杂志上发表的《Transferability of elastic-plastic fracture toughness using the Weibull stress approach: significance of parameter calibration》中,在 GRD 标定法的基础上简化得到了一种 Beremin 模型参量标定方法(RGD 标定法)。

然而,现有方法均存在计算步骤繁琐,计算量大等弊端,有时需要编写程序完成计算。尤其是 Minami 等人提出的标定方法,必须通过专门编写的迭代求解程序才能计算得到模型参量 m 和 σ_u 。而采用 RGD 标定法时,首先需要完成从有限元模型中导出两种试样在不同载荷下每个单元的主应力和单元体积数据的工作,然后假设一系列不同的 m 值,利用导出的数据计算出这两种试样在这些载荷下的几十个 σ_w 应力值,最后再基于等 σ_w 应力的条件建立韧性换算图,计算量十分庞大。

此外,由 Minami 等人提出的标定方法基于单一拘束试样,得到的模型参量的不确定度很大,在不同拘束结构间的通用性较差。GRD 标定法和 RGD 标定法同时通过两种试样完成标定,但无法同时通过两种以上的试样标定参量。另外,当材料的 Beremin 模型参量存在多组近似解时,GRD 标定法和 RGD 标定法都只能给出其中一组最精确的解,而忽略其它近似解。

发明内容

针对现有 Beremin 模型参量标定方法中存在的问题和不足,本发明提供一种基于不同拘束试样 $m-\sigma_u$ 曲线交点的参量简化标定方法。该方法可同时通过多种不同拘束度的试样进行标定,在不影响标定精度的情况下,简便地计算得到 Beremin 模型参量,并且既能获得 Beremin 模型参量的精确解,同时又不会忽略多组近似解。

本发明的基于 Beremin 模型的材料脆性断裂评定参量的标定方法包括以

下步骤：

(1) 选取至少两种由相同材料制成但具有不同拘束度的试样，利用每种试样的断裂韧性试验数据，分别计算得到每种试样在同一标定温度下累积失效概率为 63.2% 时的断裂韧性值 K_0 ；

(2) 利用在所述同一标定温度下的应力应变曲线建立每种试样的有限元模型，分别计算得到每种试样在 K_0 载荷下每个单元的最大主应力 $\sigma_{1,i}$ 和单元体积 V_i ，其中 i 为单元序号；

(3) 赋予 Weibull 斜率 m 不同数值，根据下式分别计算得到每种试样的一组 Weibull 尺度参量 σ_u ，作出每种试样的 m 与 σ_u 之间的 Beremin 参量特征曲线；

$$\sigma_u = \sqrt[m]{\sum_i^n (\sigma_{1,i})^m \frac{V_i}{V_0}}$$

其中， n 表示断裂过程区共有 n 个单元， V_0 表示参考单元体积；

(4) 根据 Beremin 参量特征曲线的交点坐标得到所述材料的脆性断裂评定参量。

与 GRD 标定法和 RGD 标定法相比，本发明的标定计算方法避免了构建韧性换算模型(Toughness Scaling Model, TSM) 曲线图时的大量计算，只需要在 K_0 载荷下计算不同 m 取值时的 σ_u ，并且这个标定算法不会影响 Beremin 模型参量的标定精度，在标定获得 m 值的同时，即可获得 σ_u 的值。本发明提供的标定方法直观地显示了标定的收敛过程，可以通过附图 1 曲线相交所呈现出的不同情形来判断 (m, σ_u) 解的情况：如果各曲线只有一个交点，说明只能得到一组 Beremin 参量的解；如果各曲线在常见的 m 值范围内($5 < m < 40$) 相互平行不相交，则说明无法标定得到一组 Beremin 参量；如果各曲线在一段范围内基本重合，则表明存在多组 (m, σ_u) 的解。本发明的标定方法，在一张标定图上能够在多种试样(试样种类 ≥ 2) 之间同时标定 Beremin 模型参量，方便研究标定所得的参量在不同类型试样间的通用性。

附图说明

图 1 是本发明标定方法的主要流程示意图；

图 2 是本发明的 $m-\sigma_u$ 曲线交点标定法的示意图；

图 3 是根据本发明实施例 1 得到的 16MnR 钢的 Beremin 模型参量；

图 4 是根据 RGD 标定法得到的 16MnR 钢的 Beremin 模型参量；

图 5 是根据本发明实施例 2 得到的 A 508-III 钢的 Beremin 模型参量；

图 6 是根据 RGD 标定法得到的 A 508-III 钢的 Beremin 模型参量。

具体实施方式

本发明所述的基于 Beremin 模型的材料脆性断裂评定参量的标定方法的主要流程如图 1 所示，具体包括以下步骤：

(1) 选取至少两种由相同材料制成但具有不同拘束度的试样，例如高拘束度的试样 A 和低拘束度的试样 B，分别在韧脆转变区进行断裂韧性测试以获得两组断裂韧性数据 $K_{Jc(k),A}$ 、 $K_{Jc(j),B}$ ，其中， k, j 为试验序号，一般来说，每组中的数据个数越多，标定得到脆性断裂评定参量 m 和 σ_u 精度越高，因此，优选每组中的数据个数不少于 6 个，更优选地不少于 15 个。利用所述断裂韧性数据分别计算得到试样 A、B 在同一标定温度 T 下累积失效概率为 63.2% 的断裂韧性值 $K_{0(A)}$ 和 $K_{0(B)}$ 。

(1.1) 若在标定温度 $T=T_A=T_B$ 下分别进行试样 A 和试样 B 的断裂韧性测试，获得断裂韧性数据 $K_{Jc(k),A}$ 、 $K_{Jc(j),B}$ ，则直接计算在标定温度下累积失效概率为 63.2% 的断裂韧性值 $K_{0(A)}$ 和 $K_{0(B)}$ 。

(1.2) 若在不同试验温度 $T_A \neq T_B$ 下分别进行试样 A 和试样 B 的断裂韧性测试，获得不同温度下的断裂韧性数据 $K_{Jc(k),A}$ 、 $K_{Jc(j),B}$ ，则可先根据美国材料试验协会颁布的 ASTM E1921 标准测得材料的断裂韧性主曲线 (Master Curve)，再估算出两种试样在标定温度 T 下累积失效概率为 63.2% 的断裂韧性值 K_0 。

应当注意，根据断裂韧性主曲线估算两种试样在标定温度下的断裂韧性值是在假设发生脆性断裂的前提下进行的，然而试样 B 的拘束度较低，其韧脆转变区的试验温度 T_B 通常相对较低，试样 A 的拘束度较高，其韧脆转变区的试验温度 T_A 通常可选择相对较高的温度，而试样 B 在较高的试验温度 T_A 下的断裂模式很可能为韧性断裂，而非脆性断裂。因此，优选将高拘束度的试样 A 转换为低拘束度的试样 B 的试验温度 T_B 下的断裂韧性数据，根据 ASTM E1921 标准的要求也优选由高拘束 A 试样的断裂韧性数据按 E1921 标

准测得材料的断裂韧性主曲线(Master Curve), 从而获得在标定温度 $T=T_B$ 下累积失效概率为 63.2% 的断裂韧性值 $K_{0(A)}$ 。

(2) 在上述同一标定温度 T 下进行单轴拉伸试验, 从而获得材料的本构关系, 即应力应变曲线, 建立高拘束 A 试样、低拘束 B 试样的有限元模型, 分别导出试样 A 和试样 B 有限元模型在 $K_{0(A)}$ 和 $K_{0(B)}$ 载荷下每个单元的最大主应力 $\sigma_{1,i}$ 和单元体积 V_i 数据, 其中 i 为单元序号。

(3) Beremin 模型使用双参量 Weibull 函数预测结构发生解理断裂的累积失效概率 P_f , 如式 (1) 所示:

$$P_f(\sigma_w) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\int_{V_{pl}} \sigma_1^m dV}{\sigma_u^m V_0}\right)\right] = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\sigma_u}\right)^m\right] \quad (1)$$

式中 $\sigma = \sqrt[m]{\int_{V_{pl}} (\sigma_1)^m \frac{dV}{V_0}}$, 称为 Weibull 应力, 是解理断裂的驱动力; m 为

Weibull 斜率参量, 与铁素体钢中的微裂纹尺寸分布有关, 其大小反映了数据的统计分散性; σ_u 为 Weibull 尺度参量, 反映了材料的微观韧性, 从 Beremin 模型的表达式可以发现, σ_u 值等于累积失效概率 $P_f=63.2\%$ 时的 σ 值。

因此, 在 K_0 载荷下, 即在累积失效概率 $P_f=63.2\%$ 时, 可以得到式 (2):

$$\sigma_u = \sigma_w = \sqrt[m]{\int_{V_{pl}} (\sigma_1)^m \frac{dV}{V_0}} = \sqrt[m]{\sum_i (\sigma_{1,i})^m \frac{V_i}{V_0}} \quad (2)$$

其中: V_{pl} 表示断裂过程区体积, N 表示断裂过程区有 N 个单元, $\sigma_{1,i}$ 表示每个单元的最大主应力, V_i 表示每个单元的体积, V_0 表示参考单元体积, 定义断裂过程区的范围为 $\sigma_{1,i} \geq \lambda \sigma_{ys}$, 其中 λ 为常数, 一般取 1 或 2, σ_{ys} 为标定温度 T 下的材料屈服强度。

假设 Weibull 斜率 $m = m_1, m_2, m_3 \dots$ 等一系列数值 (通常取 $5 < m < 40$ 的整数), 利用步骤 (2) 中得到的 $\sigma_{1,i}$ 和 V_i 数据, 按式 (2) 计算出试样 A、试样 B 分别在 $K_{0(A)}$ 和 $K_{0(B)}$ 载荷下的一系列 Weibull 应力 σ 的值, 即等同于 Weibull 尺度参量 σ_u 的值, 作出如图 2 所示的两条 $m \sim \sigma_u$ 曲线, 即 Beremin 参量特征曲线。

(4) 找到图 2 中 A、B 试样的 $m \sim \sigma_u$ 曲线的交点 O , 根据该交点 O 的坐标即可得到所述材料的脆性断裂评定参量 m 和 σ_u 。

下面以具体实施例对本发明做更详细的说明。应理解，以下实施例仅用于说明的目的，而非用于限定本发明的范围。

实施例 1

材料为国产普通压力容器钢 16MnR。选取 0.5 英寸厚三点弯曲试样 (0.5T-SE(B) 试样) 作为高拘束度试样，试样宽度 W 与试样厚度 B 之比为 2:1。选取预制裂纹的夏比尺寸试样 (PCVN 试样) 作为低拘束度试样，试样宽度 W 等于试样厚度 B 。两种试样的名义裂纹深度均为 $a_0/W=0.5$ ，跨距 $S=4 \times W$ 。

根据本发明的基于 Beremin 模型的材料脆性断裂评定参量的标定方法包括以下步骤：

(1) 选择在 $T=-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下，进行两种试样的断裂韧性试验，测得断裂韧性数据 $K_{Jc(0.5T)}$ 、 $K_{Jc(PCVN)}$ 分别如表 1、表 2 所示。利用表 1、表 2 中 16MnR 钢的 $K_{Jc(0.5T)}$ 、 $K_{Jc(PCVN)}$ 数据，计算得到 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 0.5T-SE(B) 和 PCVN 两种尺寸试样的 K_0 值分别为 $K_{0(0.5T)}=126.9\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ， $K_{0(PCVN)}=208.4\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。

表 1

试样编号	$K_{Jc(0.5T)}(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$
16MnR0.5T-8	54.5
16MnR0.5T-10	55.6
16MnR0.5T-5	103.3
16MnR0.5T-4	103.6
16MnR0.5T-3	109.1
16MnR0.5T-7	111.7
16MnR0.5T-12	121.1
16MnR0.5T-6	128.4
16MnR0.5T-11	185.6
16MnR0.5T-9	202.7

表 2

试样编号	$K_{Jc(PCVN)} (MPa\sqrt{m})$
16MnRPCVN32	85.9
16MnRPCVN10	100.9
16MnRPCVN34	102.7
16MnRPCVN14	150.7
16MnRPCVN31	156.8
16MnRPCVN35	187.9
16MnRPCVN33	192.4
16MnRPCVN36	193.2
16MnRPCVN13	206.5
16MnRPCVN12	211.0
16MnRPCVN38	215.8
16MnRPCVN37	222.0
16MnRPCVN16	236.4
16MnRPCVN15	254.4
16MnRPCVN18	284.4
16MnRPCVN17	288.1

(2) 在 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下, 进行单轴拉伸试验获得 16MnR 钢的应力应变曲线, 分别建立 0.5T-SE(B) 试样、PCVN 试样的有限元模型, 从 0.5T-SE(B) 和 PCVN 试样的有限元模型分析中导出 $K_{0(0.5T)}$ 和 $K_{0(PCVN)}$ 载荷下的每个单元质心位置上的主应力 $\sigma_{1,i}$ 和体积元数据。定义断裂过程区为 $\sigma_{1,i} \geq \lambda \sigma_{ys}$, 其中 λ 为常数, 一般取 1 或 2, σ_{ys} 为标定温度下的材料屈服强度。这里, 取 $\lambda=1$, 将断裂过程区内的单元筛选出来。

(3) 假设 $m=6, 7, 8 \dots$ 等一系列数值, V_Q 取 $(50\text{ }\mu\text{m})^3$, 用这些不同的 m 值, 利用步骤 (2) 中筛选出的断裂过程区单元, 计算出两种试样分别在 $K_{0(Q5T)}$ 和 $K_{0(PCVN)}$ 载荷下的一系列 m 值, 而 $\sigma_u = \sigma_w$, 于是得到了如图 3 所示的两条 $m \sim \sigma_u$ 曲线。

(4) 找到图 3 中这两条曲线的交点, 根据该点的坐标即可得到 16MnR 钢的 Beremin 模型参量值 $m=7.3$ 和 $\sigma_w=6194\text{MPa}$ 。

按照 RGD 标定法, 如图 4 所示, 纵坐标为 $K_{0(0.5T)}=126.9\text{MPa}\sqrt{m}$ 及横坐标为 $K_{0(PCVN)}=208.4\text{MPa}\sqrt{m}$ 的坐标点 A 的位置落在 $m=7$ 和 $m=8$ 的两条 $K_{Jc(PCVN)} \sim K_{Jc(0.5T)}$ 曲线之间, 内插得到 $m=7.3$ 。用 $m=7.3$ 计算出载荷 $K_J=K_{0(0.5T)}$

或 $K_{Ic(PCVN)}$ 时的 σ_u 值, 得到 $\sigma_u=6194\text{MPa}$ 。本发明的标定方法标定的 16MnR 钢的 Beremin 模型参量值与 RGD 标定法的结果相同。

实施例 2

材料为国产核压力容器用 A508-III 钢锻件。选取 0.5T-SE(B) 试样作为高拘束度试样, 试样宽度 W 与试样厚度 B 之比为 2:1。选取 PCVN 试样作为低拘束度试样, 试样宽度 W 等于试样厚度 B 。两种试样的名义裂纹深度均为 $a_0/W=0.5$, 跨距 $S=4 \times W$ 。

根据本发明的基于 Beremin 模型的材料脆性断裂评定参量的标定方法包括以下步骤:

(1) 选择在 -81°C 、 -60°C 和 -40°C 下, 进行 0.5T-SE(B) 试样的断裂韧性试验。在 -100°C 下, 进行 PCVN 试样的断裂韧性试验。测得断裂韧性数据 $K_{Ic(Q5T)}$ 、 $K_{Ic(PCVN)}$ 分别如表 3、表 4 所示。利用表 4 中 A508-III 钢的 $K_{Ic(PCVN)}$ 数据, 计算得到 -100°C 下 PCVN 试样的 K_0 值为 $K_{0(PCVN)}=117.8\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。利用表 3 中的 A508-III 钢的 $K_{Ic(Q5T)}$ 数据, 按照 ASTM E1921 的多温度计算方法, 得到 A508-III 钢的断裂韧性主曲线 ($E_Q=-61^\circ\text{C}$), 进一步计算得到 -100°C 下 0.5T-SE(B) 试样的 K_0 值为 $K_{0(0.5T)}=76.5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。

表 3

试验温度 ($^\circ\text{C}$)	试样编号	$K_{Ic(0.5T)} (\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$
-81	3A17	66.4
	3A13	70.1
	3A11	78.0
	3A15	81.2
	3A14	89.6
	3A16	104.2
	3A12	109.8
-60	2A13	110.8
	3A1A	112.6
	2A11	113.3
	2A12	126.5
	2A14	142.7
	2A15	147.6
-40	3A19	161.1
	3A18	208.6

表 4

试验温度 (°C)	试样编号	$K_{Jc(PCVN)} (MPa\sqrt{m})$
-100	1A1B	73.8
	1A1L	92.3
	1A1D	93.4
	1A15	101.9
	1A14	104.6
	1A1A	106.2
	1A18	107.1
	1A19	108.5
	1A1C	114.2
	1A17	149.2
	1A16	153.0

(2) 在-100°C 下, 进行单轴拉伸试验获得 A508-III 钢的应力应变曲线, 分别建立 0.5T-SE(B) 试样、PCVN 试样的有限元模型, 从 0.5T-SE(B) 和 PCVN 试样的有限元模型分析中导出 $K_{0(0.5T)}$ 和 $K_{0(PCVN)}$ 载荷下的每个单元质心位置上的主应力 $\sigma_{T,i}$ 和体积 V_i 数据。定义断裂过程区为 $\sigma_i \geq \sigma_{ys}$ 的区域, 将断裂过程区内的单元筛选出来。

(3) 假设 $m=10, 11, 12, \dots$ 等一系列数值, V_0 取 $(50 \mu m)^3$, 用这些不同的 m 值, 利用步骤(2) 中筛选出的断裂过程区单元, 计算出两种试样分别在 $K_{0(0.5T)}$ 和 $K_{0(PCVN)}$ 载荷下的一系列 $\sim$ 值, 而 $\sigma_u = \sigma_w$, 于是得到了如图 5 所示的两条 $m \sim \sigma_u$ 曲线。

(4) 找到图 5 中这两条曲线的交点, 根据该点的坐标即可得到 A 508- III 钢的 Beremin 模型参量值 $m=17.7$ 和 $\sim=2486MPa$ 。

按照 RGD 标定法, 如图 6 所示, 得到 $m=17.7$ 。用 $m=17.7$ 计算出载荷 $K_J = K_{0(0.5T)}$ 或 $K_{0(PCVN)}$ 时的 $\sim$ 值, 得到 $\sim=2486MPa$ 。本发明的标定法确定的 A508-III 钢的 Beremin 模型参量值与 RGD 标定法的结果一致。

本发明的标定计算方法避免了构建韧性换算模型曲线图时的大量计算, 只需要在 K_0 载荷下, 取一系列 m 值分别计算出对应的 σ_u 值, 构成每种拘束度不同的试样的 $m \sim \sigma_u$ 曲线, 确定这些曲线的交点坐标, 从而标定得到了 m 和 σ_u 的值。通过以上标定计算的实例可以发现, 与 RGD 标定法相比, 本发明的标

定法的计算量明显小很多,而且它的标定结果与RGD 标定法的结果是一样的。

与RGD 标定法相比(图4和图6),由图3和图5可见,本发明的标定方法直观地显示了标定过程,可以通过 $\pi_1 \sim \sigma_u$ 曲线相交所呈现出的不同情形来判断 (m, σ_u) 解的情况。图3和图5中,16MnR 钢的两条 $m \sim \sigma_u$ 曲线和A 508-III 钢的两条 $m \sim \sigma_u$ 曲线均在一定范围内十分接近,按照本发明的标定法的原理,找到了多组 (m, σ_u) 的近似解,特别是实施例2中这一现象十分明显。而如果用RGD 标定法将会忽略这些 (m, σ_u) 的解,只能给出1组最精确解。

权 利 要 求 书

1、一种基于 Beremin 模型的材料脆性断裂评定参量的标定方法，其特征在于，该方法包括以下步骤：

(1) 选取至少两种由相同材料制成但具有不同拘束度的试样，利用每种试样的断裂韧性试验数据，分别计算得到每种试样在同一标定温度下累积失效概率为 63.2% 时的断裂韧性值 K_0 ；

(2) 利用在所述同一标定温度下的应力应变曲线建立每种试样的有限元模型，分别计算得到每种试样在 K_0 载荷下每个单元的最大主应力 $\sigma_{1,i}$ 和单元体积 V_i ，其中 i 为单元序号；

(3) 赋予 Weibull 斜率 m 不同数值，根据下式分别计算得到每种试样的一组 Weibull 尺度参量 σ_u ，作出每种试样的 m 与 σ_u 之间的 Beremin 参量特征曲线；

$$\sigma_u = \sqrt[m]{\sum_i^n (\sigma_{1,i})^m \frac{V_i}{V_0}}$$

其中， n 表示断裂过程区共有 n 个单元， V_0 表示参考单元体积；

(4) 根据 Beremin 参量特征曲线的交点坐标得到所述材料的脆性断裂评定参量。

2、如权利要求 1 所述的基于 Beremin 模型的材料脆性断裂评定参量的标定方法，其特征在于，所述步骤 (1) 中，在所述同一标定温度下进行每种试样的断裂韧性测试以获得所述断裂韧性试验数据。

3、如权利要求 1 所述的基于 Beremin 模型的材料脆性断裂评定参量的标定方法，其特征在于，所述步骤 (1) 中，在不同温度下进行每种试样的断裂韧性测试以获得所述断裂韧性试验数据，根据预设的断裂韧性主曲线计算每种试样在所述同一标定温度下累积失效概率为 63.2% 时的断裂韧性值 K_0 。

4、如权利要求 3 所述的基于 Beremin 模型的材料脆性断裂评定参量的标

定方法，其特征在于，所述步骤（1）中，所述同一标定温度为所述不同温度中的最低温度。

5、如权利要求 1 所述的基于 Beremin 模型的材料脆性断裂评定参量的标定方法，其特征在于，所述步骤（2）中，在所述同一标定温度下进行单轴拉伸试验以获得所述应力应变曲线。

6、如权利要求 5 所述的基于 Beremin 模型的材料脆性断裂评定参量的标定方法，其特征在于，所述步骤（3）中， m 的取值为大于 5 且小于 40 的整数。

7、如权利要求 6 所述的基于 Beremin 模型的材料脆性断裂评定参量的标定方法，其特征在于，所述步骤（3）中，断裂过程区的范围为 $\sigma_{1,i} \geq \lambda \sigma_{ys}$ ，其中 λ 为常数， σ_{ys} 为所述标定温度下的材料屈服强度。

8、如权利要求 7 所述的基于 Beremin 模型的材料脆性断裂评定参量的标定方法，其特征在于，所述步骤（3）中， λ 的取值为 1 或 2。

9、如权利要求 1 所述的基于 Beremin 模型的材料脆性断裂评定参量的标定方法，其特征在于，所述步骤（1）中，每种试样的断裂韧性试验数据的个数不少于 6 个。

10、如权利要求 9 所述的基于 Beremin 模型的材料脆性断裂评定参量的标定方法，其特征在于，所述步骤（1）中，每种试样的断裂韧性试验数据的个数不少于 15 个。

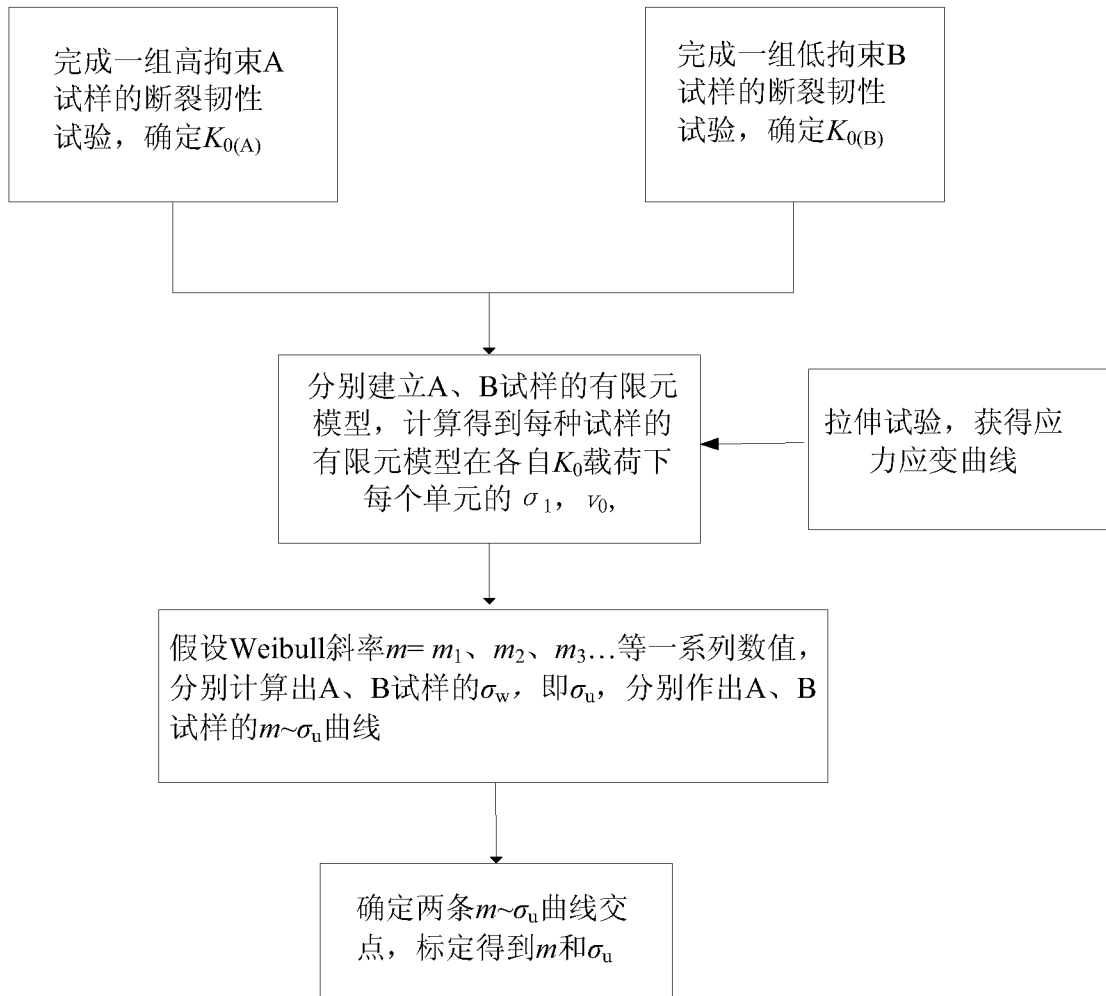


图 1

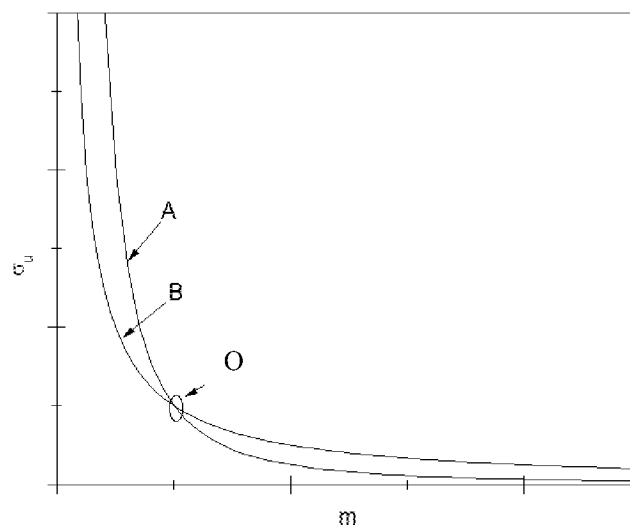


图 2

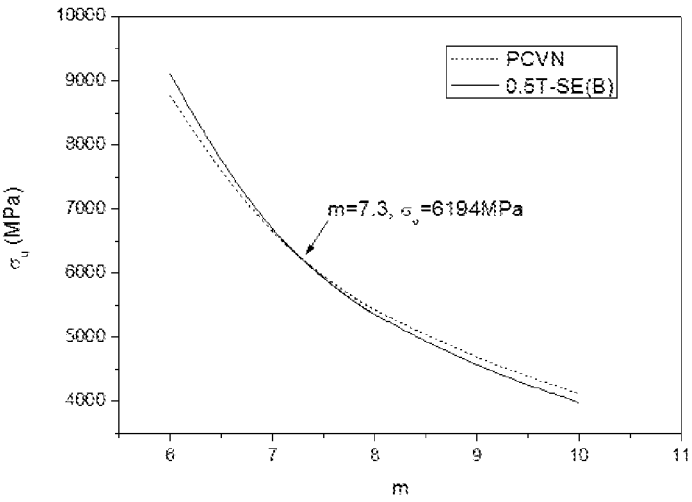


图 3

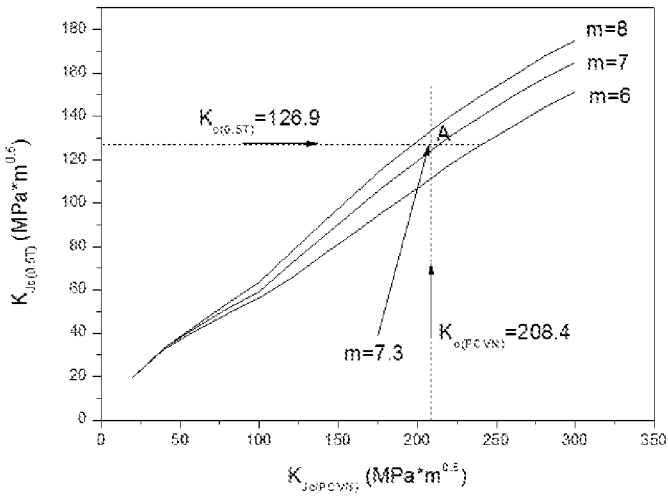


图 4

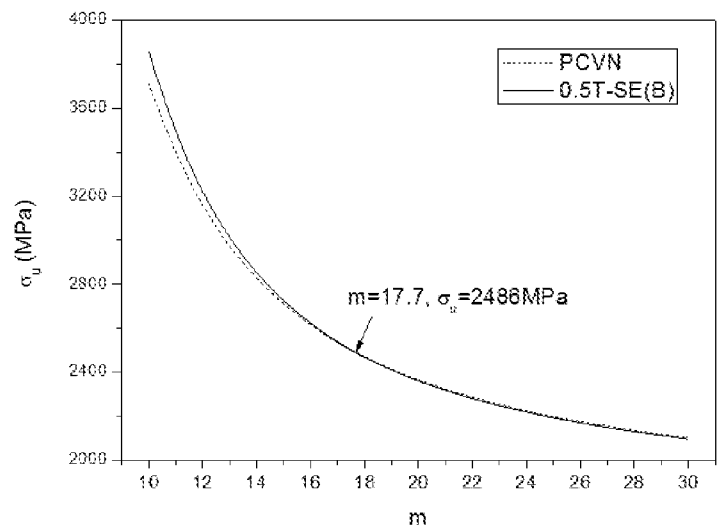


图 5

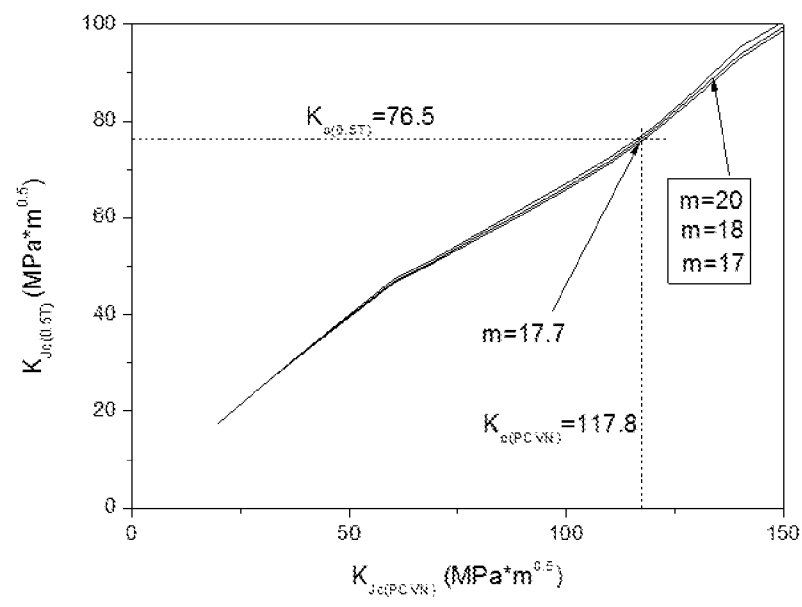


图 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2012/085336

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01N 3/00 (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 3/+

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)

CNABS, CNTXT, CNKI, VEN, ISI Web of Knowledge, Beremin, Weibull, stress, fracture, master curve, calibration

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 102494940 A (UNIV EAST CHINA SCI&TECHNOLOGY) 13 June 2012 (13.06.2012) the whole document	1-10
A	US 2007060465 A I (SAXON GLASS TECHNOLOGIES INC) 15 March 2007 (15.03.2007) the whole document	1-10
A	Yupeng Cao et al. Inferring the temperature dependence of Beremin cleavage model parameters from the Master Curve. Nuclear Engineering and Design January 2011, Vol. 241, page 39- page 45	1-10
A	Claudio Ruggieri et al. Transferability of elastic-plastic fracture toughness using the Weibull stress approach: significance of parameter calibration. Engineering Fracture Mechanics December 2000, Vol. 67, page 101- page 117	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

"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
25 February 2013 (25.02.2013)

Date of mailing of the international search report
07 March 2013 (07.03.2013)

Name and mailing address of the ISA
State Intellectual Property Office of the P. R. China
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao
Haidian District, Beijing 100088, China
Facsimile No. (86-10) 62019451

Authorized officer
GAO, Yiyang
Telephone No. (86-10) 62085655

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2012/085336

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	Claudio Ruggieri et al. Transferability of elastic-plastic fracture toughness using the Weibull stress approach: significance of parameter calibration. Engineering Fracture Mechanics December 2000, Vol. 67, page 101- page 117	1-10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2012/085336

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 102494940 A	13.06.2012	None	
US 2007060465 A	15.03.2007	US 8304078 B	06.11.2012
		WO 2007032961 A	22.03.2007
		US 2012198989 A	09.08.2012

A. 主题的分类

G01N3/00 (2006.01)1

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: G01N3/+

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))

CNABS, CNTXT, CNKI, YEN, ISI Web of Knowledge, Beremin, Weibull, stress, fracture, master curve, calibration, 威布尔, 韦布尔, 断裂, 脆性, 脆裂, 韧性, 拘束度, 标定

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
PX	CN102494940A (华东理工大学) 13.06 月 2012 (13.06.2012) 全文	1-10
A	US2007060465A1 (SAXON GLASS TECHNOLOGIES INC) 15.3 月 2007 (15.03.2007) 全文	1-10
A	Yupeng Cao 等 Inferring the temperature dependence of Beremin cleavage model parameters from the Master Curve. 《Nuclear Engineering and Design》1 月 2011, 第 241 卷, 第 39-45 页	1-10
A	Claudio Ruggieri 等 Transferability of elastic-plastic fracture toughness using the Weibull stress approach: significance of parameter calibration. 《Engineering Fracture Mechanics》12 月 2000 年, 第 67 卷, 第 101~117 页	1-10
A	Vladislav Kozak 等 The Weibull stress parameters calibration upon the toughness scaling model between cracks having different constraint. 《Nuclear Engineering and Design》12 月 2005, 第 235 卷, 第 1889~1896 页	1-10

☐ 其余文件在 c 栏的续页中列出。

☐ 因 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

"E" 在国际申请日的 3/4 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

25.2 月 2013 (25.02.2013)

国际检索报告邮寄日期

07.3 月 2013 (07.03.2013)

ISA/CN 的名称和邮寄地址:

中华人民共和国国家知识产权局

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路 6 号 100088

传真号: (86-10)62019451

受权官员

高懿颖

电话号码: (86-10) 62085655

国际检索报告

关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2012/085336

检索报告中引用的 专利文件	公布日期	同族专利	公布日期
CN102494940A	13.06.2012	无	
US2007060465A	15.03.2007	US8304078B	06.11.2012
		WO2007032961A	22.03.2007
		US2012198989A	09.08.2012