

可变拘束试验 VARESTRAINT 是金属焊接性研究的重要手段

上海胤容电子有限公司，香港科德电子有限公司

徐蘭藻

摘要

VARESTRAINT（可变拘束）试验作为评估材料焊接性的一种方法，最初由美国著名学者 W. F. Savage 等人于上世纪 60 年代使用，后来又有人提出 TRANSVERSE VARESTRAINT 即横向可变拘束试验。由于 VARESTRAINT 试验方法合理实用，试样制备简单，操作方便，数据稳定，40 多年来在美国，欧洲及日本等著名的焊接研究机构及大专院校得到了广泛的应用和发展，在新型材料特别是高性能金属材料的研制开发等方面发挥了重要作用。本文作者就近几年这些国外机构的专家在 VARESTRAINT 研究方面的典型应用成果进行了分析和评说，并发表自己的一些见解。文章最后介绍了新型多功能可变拘束试验 MULTI-TASK VARESTRAINT 设备（MTV2500）的基本功能及重要特点。

关键词

可变拘束试验 焊接性评估 高性能金属材料 开发研制 重要手段

Varestraint, An Important Means for Weldability Research of Metals

Lanzao Xu

Shanghai Yinrong Electron Co., Ltd Hong Kong CoreTech Electronics Co., Ltd

Abstract: Varestraint is a testing process for evaluating the weldability of materials. Dr. W. F. Savage, a notable US Scholar, in the 1960's, first employed Varestraint. As

a follow up, researchers developed the Transverse Varestraint (Transvarestraint). For its simplification of the sample preparation, easy operation of the machine and validity of the data obtained, as a reasonable and practicable testing process, Varestraint Techniques have been widely used by famous welding research institutes including universities in the United States of America, Europe, Japan and in China for more than 40 years. Varestraint Weldability Testing has yielded outstanding achievements in new advanced material researches, especially in development of High Performance Metallic Materials.

This paper cites numerous achievements by international experts using the Varestraint weldability test method latest years. And the most recent standard Varestraint system MTV2500 and its basic Specifications and Performances are briefly analyzed.

Key Words:

Varestraint Testing Weldability Evaluating High Performance Metallic Materials
Research & Development Important means

1. 序言

众所周知，金属焊接性的研究对金属新材料的开发研制，金属焊件的设计制作，从而对工业大生产的迅速发展都有着重大的影响，一种金属新材料能否开发成功，除了铸造、轧制等问题外，其命运总是与其焊接性息息相关。

作者曾长期从事金属新材料的焊接性试验研究工作，更加认识到：研制一种新型的金属结构材料，当然需要合理而周密的原始流程设计，成份配比，各种相关加工工艺、机械性能以及使用性能的取舍，但从小炉试验开始到大炉直到中试，大生产，焊接性的试验研究应该始终伴随其左右。

新材料研制的周期很长，有效的焊接性试验研究往往可以使这个周期大大缩短。所以多年来，国内外的焊接技术人员跟新材料科研人员的合作越来越密切，新材料研究者也往往会在研制早期就寻求焊接工作者的配

合。作为焊接研究人员来说，非常渴望能够找到在实践中被证明行之有效而且可靠的焊接性试验手段。在眼前多达 1-2 百种焊接性试验方法中找出必要的若干种特别有效的方法，这确实困难但也是我们必须要做的事。

美国俄亥俄州立大学的 J.C.Lippold 等[1]长期从事新材料焊接性的研究，曾经感叹地说到：“时下有大量焊接性研究技术对高性能材料的高温裂纹敏感性进行定量分析。不幸的是，其中很少是标准化的，而在各实验室之间采用名义上相同的技术而试验结果却大相径庭”。Lippold 经过多年的研究，充分肯定了 Varestraint 的试验方法，他认为 Transverse Varestraint 试验可以被用来对大范围内的各种合金进行焊缝凝固裂纹敏感性的评估。他们还发明了一种新方法：即，使用 Transverse Varestraint 试验定量得到凝固裂纹温度区间 (SCTR)，而 SCTR 指标可以用来给各种合金分类评级，使人们在选用合金材料时思路清晰，目标明确。

2. 基本原理与发展概况

Varestraint 是一种评估材料焊接性的试验方法。通过改变焊件在焊接过程中的拘束条件，产生不同的应变状态，直至产生裂纹，从而评估其焊接热裂纹敏感性的一种焊接性试验方法。

Varestraint，即可变拘束度热裂纹试验，最初是由美国学者 W.F.Savage 等人于上世纪 60 年代提出[2]，后来又有人提出 Transverse Varestraint (Transvarestraint) 方法，即横向可变拘束试验。我国焊接工作者曾对此作过介绍[3]并提出：Varestraint 热裂纹试验方法能有效地使用于下述情况：

- (1) 评估各种基本金属的热裂纹敏感性
- (2) 评估各种焊接材料的热裂纹敏感性
- (3) 测试某些特殊合金对基本金属热裂纹敏感性的影响
- (4) 测定裂纹产生的温度范围
- (5) 研究热裂纹产生的机理

Varestraint 由于在焊接热循环的条件下合理地模拟了应变的状态，这种应变还可以根据人为要求调节改变，加上试样制备简单，操作方便，数据稳定，只要配备一套 Varestraint 的专用设备，就可以进行包括低碳钢、低合金高强钢、不锈钢，Ni 基合金以及 Cu，Al，Ti 等有色金属及其合金

的焊接热裂纹敏感性试验，所以四十多年来，被国内外特别是美欧、日等国家的著名焊接研究所，工业高等院校大力推荐，广泛应用。在很多情况下 Vareststraint 方法被用于对重要的高性能金属材料进行焊接性，特别是凝固裂纹敏感性的试验研究，取得了非常显著的效果。

九十年代日本 Fu Kui 大学教授 Kiichi SAITO[4]使用热循环模拟和 Spot Vareststraint 方法，就 Nb 对 Incoloy 800 高温合金热影响区裂纹敏感性的影响进行了研究。结果显示，当合金中 Nb 的加入量超过 0.3%左右时，其裂纹敏感性迅速增大，而当加入量超过 1%左右时，裂纹敏感程度更加急剧上升，通过进一步的检验和分析，他们发现，这是一种液化裂纹，主要是由 NbC 等第二相物质在晶界液化构成。还发现如果 NbC 粒度直径小到大概在 $3.5\ \mu\text{m}$ ，热影响区就不会出现液化裂纹，假设可以做到直径更小于 $3.5\ \mu\text{m}$ ，即使 Nb 含量高，材料的热影响区裂纹敏感性也有可能降低。

美国 Oak Ridge 国家实验室的 J.F.King 等[5]在美国先进原子核系统办公室的赞助下，在美国能源部与联合碳公司的一个项目中使用 Spot Vareststraint 试验评估了 Ni 基高温合金 Hastelloy X 热裂纹敏感性的变化情况。从各试验炉号中还选择了一个典型的炉号，来测试焊接方法和填充金属对合金焊接性及焊件各种性能的影响。

Hastelloy X 是一种成熟的固溶强化型镍基合金，大量使用于核电、能源、航空航天等重要领域，虽然它的焊接性能较好，但作为重要结构材料，往往还要求在特定的时段对焊接性能及焊件使用性能进行充分的了解。

他们所用的 Spot Vareststraint 的试验方法如下：试验时，钨极氩弧焊枪对试板作点焊加热，使其充分加热并建立一个大致稳定的热场。在电弧切断的瞬间，使试件弯曲，应变随之增大。随后在焊接熔合区之外的热影响区采集裂纹数据，进行各种分析。

Vareststraint 还被用来对各种有色金属进行焊接性研究。

欧洲的 Leal Mendes da Silva[6]等人曾经通过 Vareststraint 及 Trans-vareststraint 试验，评估铝合金在采用填丝焊接过程中的凝固裂纹敏感性。

他们分别选择 Vareststraint, Transvareststraint 及三种裂纹定量分析的标

准，分析比较其中哪一种方法最为可靠。结果表明 Transvarestraint 以及最大裂纹长度的评定标准是最适合的。他们还用 Varestraint 和 Transvarestraint 试验方法对传统的脉冲熔化极气电焊和双脉冲熔化极气电焊新工艺进行了比较，试验结果表明，双脉冲气电焊工艺焊铝时，能使铝的凝固裂纹敏感性下降。

日本钢铁研究人员[7]应用 Transvarestraint 方法对三种不同钛合金的焊缝凝固裂纹进行了研究。试验结果发现，Ti-6Al-4V 钛合金在增强应变（Augmented Strain）高达 8.3% 时仍不发生开裂，而在 Ti-6Al-6V-2Sn, Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn 的焊缝金属中增强应变超过 0.5% 就会发生明显的开裂，而且裂纹随增强应变增大而增大，但当增强应变大于 5% 时，达到了裂纹的最大值，此后几乎保持不变。

用锡浴淬火方法对各种凝固结晶显微组织进行了分析，结果发现在它们的树枝状晶界都有 V、Fe、Cr 和（或）Cu 的显微偏析物。由于 Ti-6Al-6V-2Sn 和 Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn 合金中溶质元素的扩散速率在数量级上小于 Ti-6Al-4V 合金中溶质元素的扩散速率，在凝固结晶过程中 Ti-6Al-6V-2Sn 和 Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn 焊缝的显微偏析非常明显，正是由于其溶质元素在固体中反行扩散过小而造成的。由于显微偏析的结果，凝固结晶的温度区间就增大，形成残余低熔液化薄膜因而产生了裂纹。

为了评估这几种 Ti 合金的凝固裂纹敏感性，通过试验给出了凝固脆性温度区间（BTR）的结果。BTR 所指的是，当应变达到 5% 其结晶裂纹开始发生时的最低温度与液化温度之间的温度差。结果显示，Ti-6Al-6V-2Sn 的 BTR 是 175K，而 Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn 的 BTR 是 220K。这些数据几乎与当时一些镍基合金的 BTR 数值相似，而那些镍基合金的裂纹敏感性都很高。

前面已经提到的 J.C. Lippold 等[1]对近年来高性能材料在焊接性试验方面的进展进行了阐述，同时选择他们认为比较先进的试验方法 Varestraint（可变拘束度试验），Castpin tear test（铸销试验）和 Gleeble thermo-mechanical Simulator（焊接热循环模拟试验）进行了比较。

Lippold 等认为，BTR（凝固脆性温度区间）可以用来评估焊缝凝固裂

纹的敏感性，但可惜要真正测定 BTR 却十分困难。

他们应用 Transverse Vstraint 方法进行了一系列的试验，提出一个新的概念和方法，即凝固裂纹温度区间（SCTR）的概念。导出 SCTR 的过程如下：

在增强应变范围内进行试验，测量了熔合区最大裂纹长度（MCD），描绘了应变与最大裂纹长度（MCD）的关系曲线（见下图 1）。

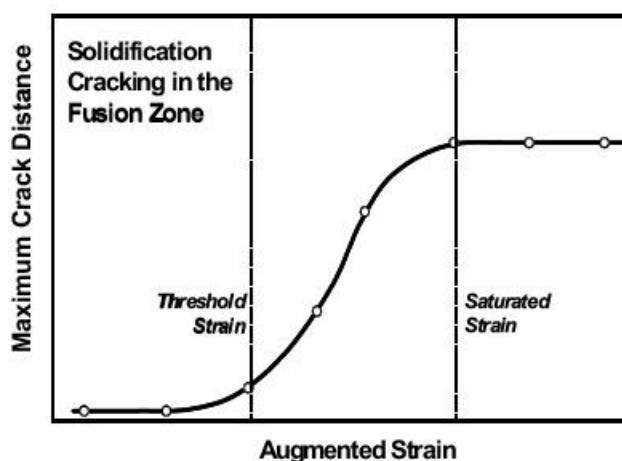


图 1
应变与最大裂纹长度(MCD)
的关系曲线

可以看到，在临界应变水平（称为饱和应变）之上，最大的裂纹长度（MCD）随应变的增大而不再增长。这种现象表明：在裂纹敏感区域的凝固裂纹长度已达最大值。用这种方法得到了裂纹开始发生时的应变和最大裂纹长度（MCD）不再增大时的应变，前者定义为起始应变，后者即为饱和应变。这批测试试样典型的应变范围是 0~7%。

大部分纯奥氏体不锈钢和 Ni 基合金的饱和应变水平是在 5~7% 之间。裂纹起始应变值通常是在 0.5~2% 范围内。虽然起始应变值可能是判断凝

固裂纹的一个重要标准，不过用饱和应变或其以上的 MCD 来确定和提供 SCTR 的数据更为方便。为了测定 SCTR，可以在焊缝熔池中插入一根热电偶测量凝固温度区间的冷却速度，随后根据以下公式得出 SCTR 值：

$$\text{SCTR} = [\text{Cooling Rate}] \times [\text{MCD}/V]$$

即：凝固裂纹温度区间（SCTR）=冷却速度×（最大裂纹长度/焊接速度）

如下图 2 所示

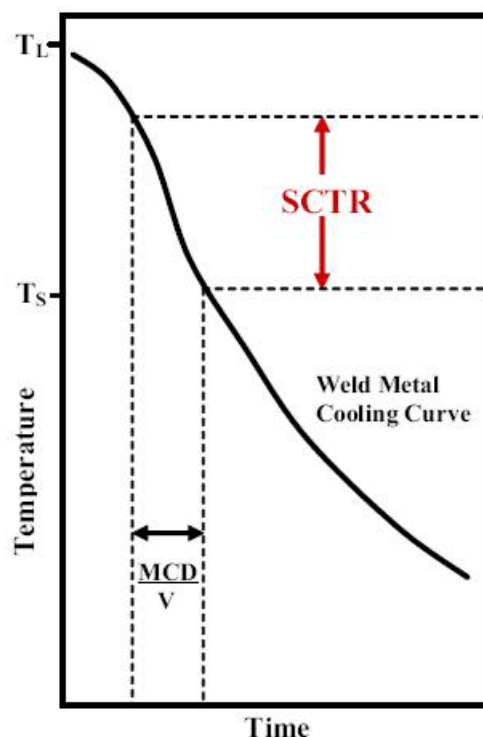


图 2

确定凝固裂纹温度区间（SCTR） 的温度与时间关系曲线

SCTR 可以直接用于比较裂纹敏感性。在拘束条件确定的情况下，可以作为选择合金的依据。如高拘束度之下，SCTR 值在 50°C 以下可以避免裂纹，而低拘束度的焊件， 150°C 的 SCTR 就足够了。

近年来，Varestraint 的应用已经越来越广泛和深入。Abdulhamids Al-Akel [8]等应用 Varestraint 方法就预热工艺对奥氏体焊件热裂纹敏感性的影响问题进行了研究。在他们的试验条件下，得到的结论是：在摄氏 200 度之下，热裂缝的敏感性随预热温度升高而下降，预热温度超过摄氏 200 度则热裂纹增加。

美国 Haynes Wire Company[9]等使用 Varestraint 试验来评价新型设计

的 Ni-Cr-Mo 合金，该高性能合金专用于浓缩湿法工艺磷酸设备中的关键部位。美国每年要生产数千万吨这样的磷酸，而其中 80% 用以制作化肥，量大面广，所以焊接试验的价值重大。通过一系列焊接性能试验和其后跟其它已推出的高耐腐蚀性镍合金进行组对比较，得到了性能满意的结论。

由于 Varestraint 试验的广泛开展，欧洲 CEN ISO/TR 2005 年一个技术报告文件[10]中还对 Varestraint 和 Transvarestraint 试验的原理，试样制备，试验程序和试验结果等都作了详细的叙述。

著名的美国爱迪逊焊接研究所把 Varestraint 列为一种常规的焊接性试验手段。他们的研究人员与美国许多高等院校等共同合作，成果十分可观。

标准的新型多功能 Varestraint (MULTI-TASK VARESTRAINT) 试验机如 MTV2500[11]可以进行传统的（即连续的）和同步式的试验。跟据需要可以进行点焊（Spot Varestraint）、横向（Transvarestraint）和纵向（Longitudinal Varestraint）的试验。连续的试验方法是指应变是在焊接完成之后施加于试样之上，而同步试验方法是在焊接的过程中施加应变。

Varestraint 的基本工作原理如下图 3 所示：

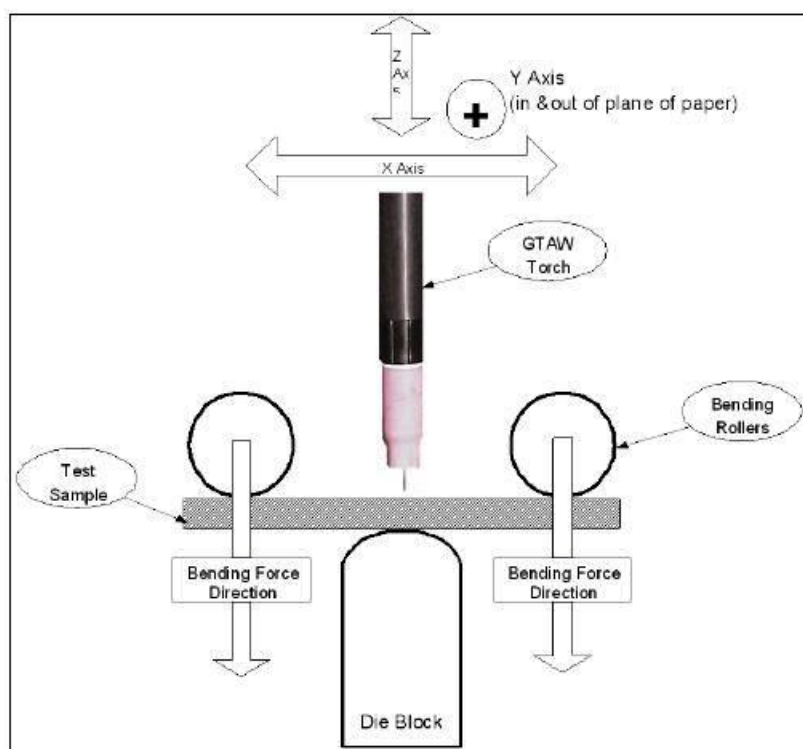


Figure 2. Schematic Illustrating the Basic Principle of the Varestraint Test.

图 3 Varestraint 试验的基本原理示意图

典型的连续试验方法是：氩弧焊枪根据程序设定点火，行走一定距离后，在电流下降沿开始的时候，油压缸活塞抓住凸头和压辊以一定的速度向下行走一定的距离，试样就会压在模块上，并在焊缝上得到一个给定的应变值。

一台完整的 Varestraint 试验机可以完成以下类型的试验：

纵向 Varestraint:

连续式（传统式）：弯曲延时时间是根据电弧断开（电流下降沿末端）而定。

同步式：弯曲定位根据电弧行走开始的数据（行走延时的最后）而定。

横向 Varestraint:

连续式（传统式）：弯曲延时时间是根据电弧断开（电流下降沿末端）而定。

同步式：弯曲定位根据电弧行走开始的数据（行走延时的最后）而定。

点焊 Varestraint：弯曲延时时间由电流上升沿的末端决定，焊接时间不包括电流的上升沿和下降沿

试验参数举例如下：

焊缝长度

焊枪开始位置

行走速度

行走延时

弯曲速率

行程

弯曲位置

弯曲保持时间： 自动 ； 固定

试样自动释放。

试验全过程由电脑控制，自动完成。

另外该系统还应用了一种[12]通过画面显示的用户接口让使用者方便地建立各种试验参数；集各种独特功能于一体，是最新的一款标准机型。

由于 Varestraint 试验方式合理而实用，而且试样制备简单，操作方便，数据稳定，40 多年来得到了广泛深入的应用和发展。我国一些著名的大学，科研机构曾使用这种方法进行过焊接性研究。最近，我国某特大型钢铁集团公司的研究院专门从美国进口了一台新型多功能 Varestraint 试验机 MTV2500，用于焊接与表面技术研究所的试验研究工作；同时把它作为一个公共试验平台，为该系统从事焊接和新材料试验研究人员提供重要的实验手段。

3. 结束语

Varestraint 作为新型材料焊接性试验的一个重要手段之一，已经为我国广大的焊接工作者所高度重视。希望将来 Varestraint 会建立一个统一的试验标准和共同交流的平台，这项工作不仅是国内的还应该是国际性的。相信 Varestraint 将会与其它高效的焊接性试验方法一起，为我国重大工业高性能新型材料的研制，重大金属设备及结构的焊接工艺评估及施工质量保障等领域作出应有的贡献。

参考文献

- [1]Recent Developments in Weldability Testing for Advanced Materials
John C. Lippold ,Welding Engineering Program ,The Ohio State University
Columbus ,OH USA , 2005 ASM International
- [2]W. F. Savage,& C. D. Lundin., The Varestraint Test , W .J., October
1965,P433s
- [3]金属的可焊性试验 吴世初 上海科学技术文献出版社 1983 年 12 月
- [4] Memoire of Fukui University of Technology ,Vol.23.Part1 1993
- [5]Weldability Evaluations And Weldment Properties of Hastelloy X
J.F.King, H.E McCoy and P. L.Rittenhouse
Oak Ridge National Laboratory

[6]Performance assessment of the (Trans)Varestraint test for determining Solidification cracking susceptibility when using welding processes with filler metal

Measurement science and Technology ,Volume 15, Issue 11, 2004

[7]Weld Cracking and Solidification Behavior of Titanium Alloys

Nippon steel Technical Report No,85 January 2002

[8]Effect of Preheating on Hot Cracking Susceptibility of Welded Austinitic Stainless Steels

Abdulhamid S Al-Akal, A.k.Abdelatif, F, Abo Ghasbia

The 6th Saudi Engineering Conference, KFUPM, Dhahran, December 2002

[9] The Welding Characteristics of A New Ni-Cr-Mo Alloy Designed To Resist Wet Process Phosphoric Acid

G. M. Chirieleison, Haynes Wire Company

G. L. Hoback and P. Grook, Haynes International Inc.

[10]Destructive Tests On Welds in metallic materials-Hot cracking Tests for weldments- Arc Welding Processes-Part 3: Externally Loaded tests (ISO/TR 17641-3:2005)

[11]System Description Multi-Task Varestraint MTV 2500 Weldability Testing System D.L.Wright Inc. July 18, 2006

[12] Varestraint Brochure D.L.Wright Inc. 2010-02-08

