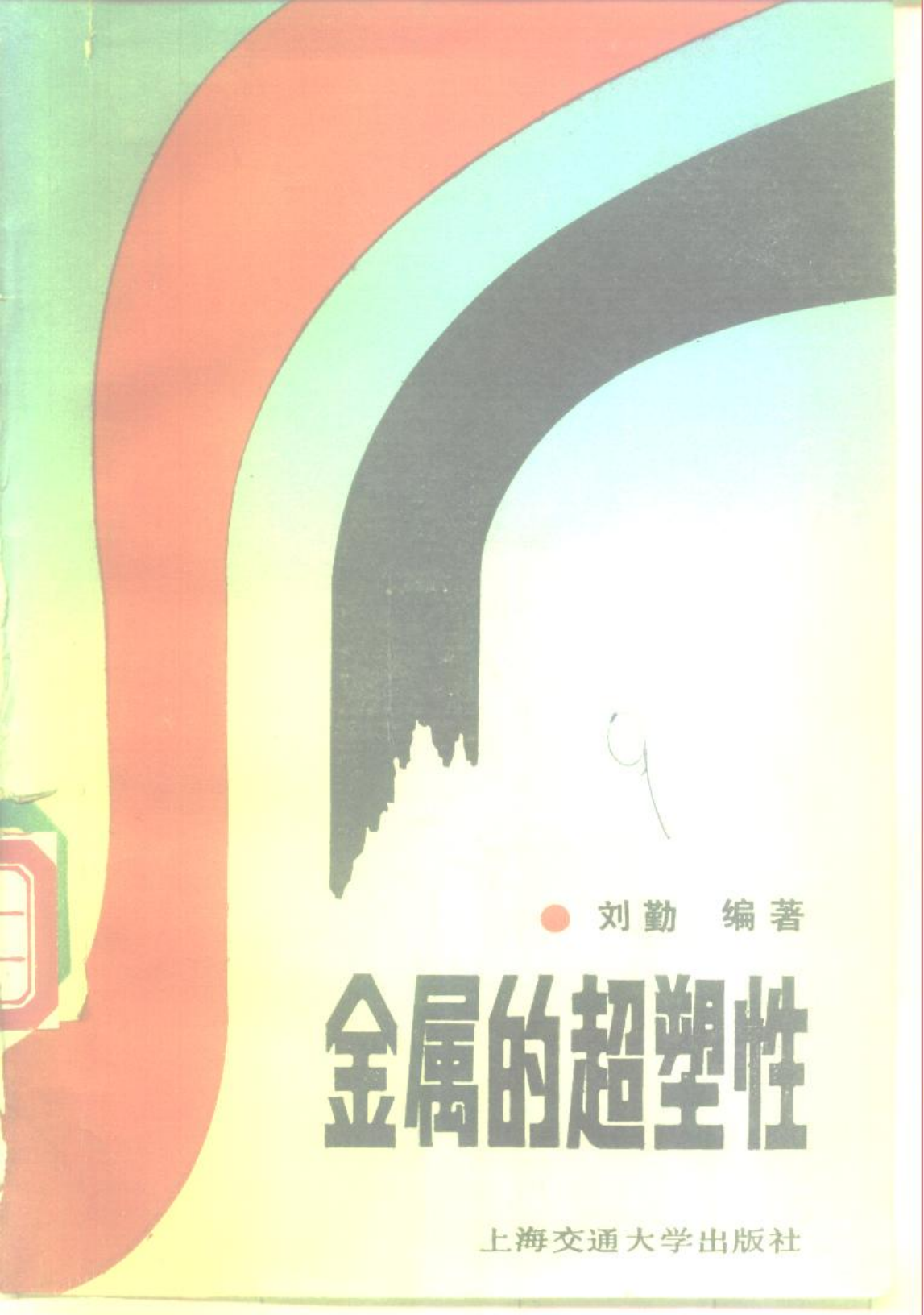




● 刘勤 编著

金属的超塑性

上海交通大学出版社

金属的超塑性

刘 勤 编 著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书分五篇,共二十三章。第一篇论述超塑性的意义、其理论的发展历史、超塑性成形的方法和优点,第二篇论述流变应力的应变速率敏感性指数、 m - δ 关系、C. L. m - δ 方程式、 m 值的测量方法和测真恒定应变速率的“变 v -定 $\dot{\epsilon}$ 法”,第三篇论述静态超塑性的参数、材料的类型、机理、激活能和测定方法,第四篇论述动态超塑性,机理和相变诱发塑性,第五篇论述锌合金、铝及其合金、铜合金、钛合金等其它有色金属及合金、铁合金、钢和铸铁的超塑性的产生及应用。

本书可供高等院校有关专业的师生和从事超塑性工作的科研和技术人员作参考。

金 属 的 超 塑 性

上海交通大学出版社出版

(淮海中路1884弄18号)

新华书店上海发行所发行

常熟市文化印刷厂印装

开本787×1092毫米 1/32 印张16.25 字数36,400

1989年1月第1版 1989年1月第1次印刷

印数: 1-1900

ISBN7-312-00838-Z/TG 科技书目: 184-238

定价: 3.15 元

序

超塑性研究的基本内容可以归纳为以下几项:

1. 超塑性力学

超塑性流动过程是一个由速率所控制的过程, 代表 $\sigma-\dot{\epsilon}$ 关系的基本方程式 $\sigma = k\dot{\epsilon}^m$ 在超塑性流动过程的研究中的应用是超塑性力学的基础, C.L. $m-\dot{\epsilon}$ 方程式的推导和应用在超塑性力学的发展中具有特定的意义。但是, 作为一个独立体系的超塑性力学研究, 还有大量的工作有待进行。

2. 超塑性流动过程的机理 除极个别情况为单晶体物质外, 超塑性材料一般均属多晶体物质。其流动过程可产生在晶界 (或相界) 间或晶粒内部。其原子运动可以是扩散性的, 也可以是非扩散性的。不同的材料在不同的试验条件下可在不同的区域产生不同的流动过程, 有关这一点, 还需要广泛地、系统地进行大量的工作。

3. 超塑性材料 材料的种类无限, 超塑性得到研究和发挥的金属材料还只有一百多种。非金属材料如陶瓷材料的研究还只刚刚开始。即使已经在超塑性上得到发挥的材料, 真正在实际中应用的还不多。不具有同素异晶转变的铜、铅和铋等一类的纯金属的超塑性的发挥还需要作大量的工作。最近有人将白口铸铁的总延伸率发挥到 1000% 以上。超高碳钢的超塑性的发挥对扩大可用金属材料的品种具有重要意义。

4. 超塑性加工工艺 所有的超塑性成形法, 包括真空成

形法、气压成形法、吹塑成形法、挤压成形法、深冲压成形法和无模拉伸成形法等，都已成功地得到了应用。其中，无模拉伸成形法是在发展超塑性成形技术的过程中创造出来的一种新的成形方法。

5. 其它 超塑性在其它领域内的应用也不可忽视，例如，在切削和切割、压焊和化学热处理等加工中，利用超塑性都可获得很大的经济效益。但这类工作有待于大力地、有系统地推行。

超塑性现象的发现虽然为时很早，但引起人们的重视只是近二三十年的事情。在美国，1962年才有关于超塑性的总结性的第一篇文章出现。笔者在60年代中期已开始研究超塑性的问题，于1965年年底写成一篇介绍超塑性的简短初稿，未等发表就散失了。后来又重新收集资料，写成一篇约5万字的稿子，对于超塑性的有关内容进行了全面总结，供校内外有关人员参阅。

在上海市金属学会恢复工作的第二年(1979年)，本书作者曾在该会主持下为有关科技人员作了关于超塑性的学术报告。不久，又在《机械工程材料》上系统地发表了5篇介绍超塑性的文章。推导的 $O.L.m-\delta$ 方程式，曾在日本塑性加工学会《塑性と加工》上刊登。有关该方程式的研究，笔者写了多篇论文，分别在《上海交通大学学报》、《金属学报》和国内外其它有关杂志上刊登或有关年会上宣读。本书主要是根据这些文章和研究成果并参考国内外新发表的有关资料编写的。

在研究工作中，有关 $O.L.m-\delta$ 方程式应用的实验工作方面，李寿民、夏锄、刘晓东、杨和根、袁世彪、顾伟忠、王盛辉和陈笑冰等同志付出了大量的劳动。在发展和应用“变 ν -定 δ 法”测恒定真应变速率方面，李寿民同志作了大量工作，在

此表示感谢。

作者学识浅薄，挂一漏万，错误和不足之处在所难免，尚希读者随时加以指正，是所至盼！

刘 勤 1988年2月

目 录

第一篇 总 论

第一章 超塑性概述及发展简史	(1)
第一节 超塑性的意义	(1)
第二节 超塑性的分级	(2)
第三节 超塑性的类型	(2)
第四节 超塑性研究简史	(4)
第五节 作为超塑性材料研究过的金属及合金	(10)
第二章 超塑性的特征、成形优点及典型工件的成形方法	(15)
第一节 超塑性的特征	(15)
第二节 超塑性成形方法及典型零件的超塑性成形举例	(23)
第三节 超塑性成形的优点	(29)

第二篇 流变应力的应变速率敏感性指数 m

第三章 基本论述	(36)
第一节 Hart 的分析结果	(36)
第二节 m 值与应变速率硬化理论	(38)
第三节 基本的超塑性流动曲线与 m 值	(40)
第四节 m 值与流变学模拟模型	(42)
第四章 对 $m-\dot{\epsilon}$ 关系研究的评述	(46)
第一节 概述	(46)

第二节	m 值随应变 δ 的变化, m_0 值的概念的建立 和测定方法	(47)
第三节	实测 $m-\delta_F$ 关系和 δ/m 值的建立	(52)
第四节	对已有的 $m-\delta_F$ 方程式的评介	(59)
第五章	O. L. $m-\delta$ 方程式	(72)
第一节	$m-\delta$ 关系曲线的分类及其转化规律	(72)
第二节	方程的推导	(74)
第三节	应用	(78)
第四节	“规划”的 O. L. $m-\delta$ 方程式	(85)
第五节	对影响 δ (包括 δ_i 和 δ_F) 值的几个因素的 讨论	(87)
第六章	m 值的测定方法	(91)
第一节	概述	(91)
第二节	拉伸试验法	(91)
第三节	双切变试验法	(98)
第四节	硬度试验法	(100)
第五节	A. Aran 对各种测 m_i 值的方法的比较	(107)
第七章	一个测恒定真应变速率 $\dot{\epsilon}$ 的方法(变 v -定 $\dot{\epsilon}$ 法)	(112)
第一节	概述	(112)
第二节	基本设想	(112)
第三节	几个关系式的推导	(114)
第四节	应用举例	(116)

第三篇 静态超塑性

第八章	主要参数及材料的基本类型	(119)
第一节	主要参数	(119)
第二节	材料的基本类型	(131)

第九章 短暂性超塑性	(145)
第一节 意义	(145)
第二节 晶粒的稳定度问题	(145)
第三节 对材料的基本要求	(149)
第四节 实例	(150)
第五节 短暂性超塑性的“好时机”问题	(152)
第十章 机理	(154)
第一节 概述	(154)
第二节 固溶-脱溶及准稳定组织的机理	(154)
第三节 晶界(或相界)滑移机理	(156)
第四节 晶内滑移机理	(169)
第五节 扩散蠕变机理	(177)
第六节 晶界(或相界)迁移或再结晶机理	(183)
第十一章 超塑性流动过程的激活能	(187)
第一节 概述	(187)
第二节 Arrhenius 方程式	(187)
第三节 恒定应力法	(190)
第四节 恒定速率法	(196)
第五节 改变温度法	(198)
第六节 关于 Q_c (或 Q_r) 和 Q_0 (或 Q_s) 的关系问题	(200)
第九节 激活能与超塑性流动过程机理	(204)

第四篇 动态超塑性

第十二章 主要参数、测试方法和研究现状	(209)
第一节 概述	(209)
第二节 主要工艺参数	(210)
第三节 试验方法及曲线	(217)

第四节	研究现状	(223)
第十三章	机理	(240)
第一节	相变过程表现的行为	(240)
第二节	$(\delta/\text{周})-\sigma$ 关系	(243)
第三节	$(\delta_{\text{基}}/\text{半周})-\sigma$ 和 $(\delta_{1/2}/\text{半周})-\sigma$ 关系的位置 问题	(247)
第四节	应力和点缺陷的作用	(248)
第十四章	相变诱发塑性	(257)
第一节	概述	(257)
第二节	在应力作用下准稳定奥氏体向马氏体 转变	(258)
第三节	影响相变诱发塑性的因素	(265)
第四节	研究概况	(274)
第五节	诱塑钢的性能和用途	(283)

第五篇 超塑性金属材料

第十五章	锌合金	(285)
第一节	概述	(285)
第二节	Zn-22% Al 共析合金	(286)
第三节	Zn-5% Al 共晶合金	(300)
第十六章	纯铝及其合金	(308)
第一节	已经研究过的纯铝和铝基合金	(308)
第二节	纯铝	(308)
第三节	Al-Cu 系合金	(311)
第四节	Al-Zn 系合金	(316)
第五节	Al-Oa 系合金	(320)
第六节	Al-Si 系合金	(326)

第十七章 铜合金	(328)
第一节 已研究过的铜合金系	(328)
第二节 Cu-Zn 系合金	(329)
第三节 Cu-Al 系合金	(338)
第四节 Cu-P 和 Cu-Mg 合金	(346)
第十八章 钛合金	(349)
第一节 钛及钛合金中的元素	(349)
第二节 Ti-6Al-4V 合金	(351)
第三节 Ti-8Mn、Ti-15Mo 和 Ti-13 Cr-11V-3Al 合金(大 β 晶粒组织)	(364)
第十九章 其它有色合金	(373)
第一节 镁合金	(373)
第二节 锡合金	(379)
第三节 铅合金	(390)
第四节 Ag-Cu 共晶合金	(393)
第五节 Co-10Al 合金	(397)
第六节 Cr-30 Co 合金	(399)
第七节 W-Re 合金	(401)
第二十章 铁合金	(405)
第一节 概述	(405)
第二节 Fe-Ni-Cr 合金(析出型)	(405)
第三节 Fe-Cr 及 Fe-Ni 合金(相变型)	(415)
第四节 Fe-Ni-Mo-Ti 合金(相变型)	(422)
第二十一章 钢	(429)
第一节 可能的超塑性材料类型	(429)
第二节 亚共析钢	(431)
第三节 共析钢	(443)

第四节	过共析钢	(451)
第二十二章	铸铁	(463)
第一节	概述	(463)
第二节	球墨铸铁的微细晶粒超塑性	(464)
第三节	球墨铸铁的相变超塑性	(470)
第四节	白口铸铁的微细晶粒超塑性	(475)
第二十三章	超塑性金属材料的空化与空洞	(480)
第一节	概述	(480)
第二节	空化机理	(481)
第三节	空化的动力学	(487)
第四节	影响空化的因素	(489)
第五节	压缩变形与空化	(499)
第六节	空化与断裂	(503)

第一篇 总 论

第一章 超塑性概述及发展简史

第一节 超塑性的意义

材料(包括金属和非金属材料)在特定的内在及外在条件下显示出的异常高的塑性称为超塑性^[1]。超塑性目前一般用材料的总延伸率(拉伸试棒在拉断时的延伸率)来衡量,但也不排斥用其它试验(例如压缩、扭转、疲劳及硬度试验^[2])结果来衡量。

超塑性的出现首先取决于材料的内在条件,如化学成分、显微组织(包括晶粒大小、形状及分布等)及是否具有相变(包括同素异晶转变,有序-无序转变及固溶-脱溶变化等)能力。

具备上述内在条件的材料,在适当的外在或试验条件下便会产生超塑性。试验条件包括温度、加热方式(恒温或温度循环)及应变速率等^[3~5]。

对非金属材料(包括陶瓷和有机材料)的超塑性,虽然有人曾经研究过^[6,7],但目前积累的资料还不多。

在超塑性状态下的金属材料,除具有高的总延伸率以外,还具有低的流变应力(约为 $9.8 \sim 98 \text{ N/mm}^2$),极易发生变形,这在一些熔点较低有色金属表现得尤为明显。

第二节 超塑性的分级

一般以总延伸率为 100 % 作为划分超塑性和非超塑性材料的界限, 总延伸率能达到或超过这个界限的材料称为超塑性材料。

碳素结构钢在热轧状态下的延伸率值最高不会超过 30~40 %。有色金属及其合金的延伸率较高, 如铝、铜及其合金一般为 50~60 %, 有时可达 100~150 %。在超塑性状态下, 某些有色金属材料的延伸率有时会达到 500 %。最早发现的总延伸率达到 2000 % 的超塑性材料是 Bi-Sn 共晶合金^[8]。目前已有许多合金的总延伸率达到或大大地超过了这个值^[9]。

根据现有超塑性材料的延伸率的高低, 可以将已经研究过的超塑性材料分为三级:

1. 100~500 % 级 例如, Mg-0.5 % Zr (150 %)^[9], 球墨铸铁(超过 200 %)^[10], 低碳钢 (500 %)^[11] 及低合金钢 (400 %)^[12] 等。

2. 500~1000 % 级 例如, Sn-1 % Bi 合金 (500 %)^[9], Sn-Pb 共晶合金 (700 %)^[9], Co-10 % Al 合金 (850 %)^[9], Sn-5 % Bi 合金 (1000 %)^[9] 及 Mg-6 % Zn-0.5 % Zr (1000 %) 等。

3. 1000~2000 % (及以上) 级 例如, Zn-22 % Al 共析合金 (1500 %)^[9], Bi-Sn 共晶合金 (1950 %)^[8] 及 Mg-Al 共晶合金 (2100 %)^[9] 等。

第三节 超塑性的类型

超塑性可以分为以下四类:

一、静态超塑性

静态超塑性也称微细晶粒超塑性、恒温超塑性或组织超塑性。它要求材料具有微细而稳定的等轴晶粒组织,即所谓晶粒的“三化”(微细化、等轴化及稳定化)。晶粒的微细度一般为 $0.5\sim 5\mu\text{m}$,最大不超过 $10\mu\text{m}$ 。但也有例外,如 β 钛合金($\sim 500\mu\text{m}$)、 β 黄铜($\sim 3\text{mm}$)^[13]、纯铝($\sim 100\mu\text{m}$)^[14]和Sn-Sb合金($\sim 200\mu\text{m}$)^[17]等,虽具有粗大的晶粒,也会出现超塑性,故对这类材料不必考虑在超塑性变形前作晶粒的微细化处理。

具备“三化”条件的材料,在 $0.5T_m\sim T_m\text{K}$ (T_m 为材料的熔点)范围^①内某一定的温度时以适当的应变速率($10^{-5}\sim 10^{-1}\text{min}^{-1}$)进行拉伸或变形,便会出现超塑性。

二、动态超塑性

动态超塑性借助相变过程产生,或称相变超塑性^[4]。相变过程包括同素异晶转变、有序和无序转变及固溶和脱溶过程等。

动态超塑性是在相变温度范围上下通过温度循环(外在条件)的积累而成的,故亦称环境超塑性^[15]。

此外,一些热膨胀时呈各向异性的金属(如铋及铈^[15-16])。在一定的温度范围内受到温度循环作用,也能产生超塑性。例如,在 $400\sim 600^\circ\text{C}$,给铈以600次的温度循环,可使其总延伸率达到430%左右。铈虽是一种具有多晶转变的金属,但该温度范围并非其相变范围。在 $150\sim 300^\circ\text{C}$,使纯铈(不

① 仅对无固态转变的金属或合金而言。有固态转变者将受到限制(第七章将详细介绍)。

具有同素异晶转变)受到 1664 次的温度循环, 也可使总延伸率达到 158% 左右。

在热的作用下不具有各向异性, 也不发生相变的金属, 如纯铝, 经 500 次的温度循环, 其长度约增加 75%^[16]。

这种提高锌、铀及铝的塑性的办法, 对所有的材料可能都是适用的, 也许可成为提高材料塑性的一个重要途径。

三、相变诱发塑性

相变诱发塑性^[17~22] 是材料由准稳定奥氏体向马氏体转变时产生的塑性, 是相变超塑性的一种。但它不借助于温度循环, 并且只有在含有足够的镍和锰等稳定奥氏体元素的钢中才会产生^[74]。

四、其它

除上述三类超塑性以外, 还有其它类型的超塑性, 例如通过再结晶过程产生的再结晶超塑性。在再结晶过程中, 会出现从旧晶粒到新晶粒的原子扩散流动并形成微细的等轴晶粒, 这些都会促使超塑性的产生。

再结晶超塑性在恒温下依靠新的微细等轴晶粒的形成而产生, 故和静态超塑性相似。但同时又借助从旧晶粒到新晶粒的转变过程而产生, 故又和动态超塑性相似。然而, 这种从旧晶粒到新晶粒的转变过程是不可逆的, 故又和动态超塑性有所不同^[75]。

目前, 已将再结晶超塑性作为临时或短暂超塑性进行研究并加以利用^[23]。

第四节 超塑性研究简史

超塑性研究史可分为以下三个时期^[1],

一、萌芽时期

1920~1945 年为超塑性研究的萌芽时期,在这一时期内,发现了一些金属材料的塑性的异常现象。

1920 年, Rosenhain、Haughton 及 Bingham 等在研究 Zn-Al-Cu 系合金时,发现 Zn-4 Cu-7 Al 三元合金的轧制板以高速进行弯曲时立即断裂,但缓慢地进行弯曲时虽弯曲至 180° 也不断裂。这表明,变形速率与金属材料的塑性之间存在着重要关系。

1924 年, Sauveur^[25] 将一根铁棒的一端加热,另一端保持冷却,使两端间存在温度梯度,并加以一定的载荷使铁棒发生扭曲,发现铁棒中在接近相变温度范围处的扭曲量特别大。相继对此问题进行研究的,在 1926 年有 Koref^[26],在 1928 年有 Jenkins^[27],在 1932 年有 Scheil^[28] 等。Jenkins 研究了轧制的 Cd-Zn 及 Pb-Sn 共晶合金,发现后者在低应力、长时间的作用下,能够缓慢伸长,总延伸率可达 400%。

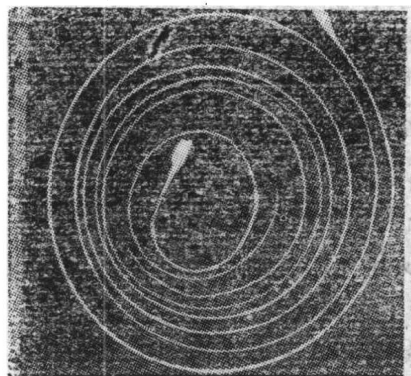


图 1-1 Bi-Sn 共晶合金试棒拉伸到 1950% 时的情况
图右边为试棒的原来形状