

行业标准《钛合金残余应力测试方法 X 射线德拜环法》

编制说明（预审稿）

一、工作简况

1.1 任务来源

根据《工业和信息化部办公厅关于印发 2024 年第四批行业标准制修订计划的通知》（工信厅科[2024]352 号）的文件精神，国标（北京）检验认证有限公司（简称国标）负责行业标准《钛合金残余应力测试方法 X 射线德拜环法》的制定工作，项目计划编号 2024-1229T-YS。技术归口单位是全国有色金属标准化技术委员会，按计划要求，本标准应在 2025 年完成。

1.2 方法简介

本标准试验原理是采用单斜入射 X 射线，利用二维检测器获取的德拜环整周晶格形变信息，通过二维探测器得到德拜环的变化，测定不同方位的晶格形变，计算样品表面应力的方法，以下简称德拜环法。

2. 起草和验证单位简介

表 1 起草单位及所做工作

起草单位	所做工作	
国标（北京）检验认证有限公司	起草负责单位	调研现阶段检测需求和国内外检测方法现状，制定研究方案；完成试验样品的搜集和分发；完成分析方法研究工作；撰写标准文件、研究报告和编制说明；完成数据分析统计工作；广泛征求国内同行试验室及相关企业意见。
国合（青岛）测试评价有限公司、北京科技大学	第一验证单位	对标准文件和研究报告中的各项试验参数进行验证；提供试验样品的精密度数据；对标准文件、研究报告和编制说明提出相应的修改建议。
长三角先进材料研究院、西南交通大学、天津大学、南京航空航天大学	第二验证单位	提供试验样品的精密度数据；对标准文件、研究报告和编制说明提出相应的修改建议。
宝鸡钛业股份有限公司、有研工程技术研究院有限公司	样品提供	提供不同牌号、规格钛合金样品。

2.1 起草单位

国标（北京）检验认证有限公司（国标检验）是中国权威的第三方检验认证服务机构。2017年国合通用作为国家新材料测试评价平台-主中心，承担着近300种材料测试评价工作。国标检验作为有色金属行业测试评价标准主力编制起草单位，编制和起草了国际标准5项、国家/行业标准381项，其中国家标准174项，行业标准207项；研制国家有证标准样品/物质162个，非有证标准样品1168个。参与制修订的GB/T 5237《铝合金建筑型材》系列产品标准，直接推动国内铝合金建筑型材行业从无到有、由弱变强、由无序到规范的全过程，为整个规范行业发展做出了重大贡献；2018年全国有色金属标准化技术委员会授予国标检验GB/T 5237《铝合金建筑型材》国家标准研制创新示范基地和ISO28340：2013国际标准研制创新示范基地。截止2018年底，国标检验在标准的制修订方面荣获技术奖项一等奖18项，二等奖43项，三等奖30项，为推动有色行业的高质量发展提供了重要的支撑、引领和指导作用。

2.2 验证单位

一验证单位国合（青岛）测试评价有限公司、北京科技大学负责对试验中的条件试验及精密度试验进行验证工作。

二验证单位长三角先进材料研究院、西南交通大学、天津大学、南京航空航天大学负责对试验中精密度试验进行验证工作。

2.3 主要工作成员负责的工作情况

本标准主要起草人以及分工见下表。

标准主要起草人及分工

起草人	所做工作
邬小萍	标准工作整体协调和推进；试验方案确定；标准文件和编制说明编写；重复性验证试验。
崔文明、文磊、张瑞	对标准涉及各项仪器条件、样品条件等进行全面验证；对试验样品进行测定；对标准文件、编制说明提出修改建议。
郑方成、李士鹏、杨吟飞、张继旺	对试验样品进行测试，提供比对试验数据；对标准文件和编制说明提出修改建议。
刘宏伟、于洋、罗铮	提供不同牌号、规格钛合金样品；对标准文件和编制说明提出修改建议。

3. 主要工作过程

在2024年10月的有色标委会会议上，对本项目进行了任务落实。国标检验及参编单位立即成立了标准编制工作组，对目标任务进行分解，明确成员的任务要求，制定工作计划和进度安排。

2024年11月，标准编制组进行了充分讨论和分析内部讨论，根据试验条件要求，结合测试结果，形成了标准讨论稿，并由国标（北京）检验认证有限公司联合北京科技大学、国合（青岛）测试评价有限公司就《钛合金残余应力测试方法 X射线德拜环法》进行试验验证，形成初步试验报告。

2024年12月17日全国有色金属标准化技术委员会在哈尔滨召开了行业标准《钛合金残余应力测试方法-X射线德拜环法》讨论会，来自宝鸡钛业股份有限公司、国合（青岛）测试评价有限公司、有研工程技术研究院有限公司等单位的30余位专家参加了《钛合金残余应力测试方法 X射线德拜环法》的讨论，细

化试验条件及相关细节，进一步确定验证试验方案。

2025年1月，国标（北京）检验认证有限公司将样品分别发往一验单位北京科技大学、国合（青岛）测试评价有限公司进行试验条件的确认，经收集一验单位反馈的条件试验，一致认为条件试验均无问题。

2025年2月，国标（北京）检验认证有限公司将样品分别发往二验单位长三角先进材料研究院、西南交通大学、天津大学、南京航空航天大学进行重复性试验，经收集二验单位数据，编制组进行数据汇总及报告编制，形成征求意见稿。

二、标准编制原则

（一）符合性

为满足材料或产品应用需求，标准格式严格按照 GB/T1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》、GB/T20001.4-2015《标准编写规则 第4部分：试验方法标准》、GB/T 6379.2-2004《测量方法与结果的准确度》的要求进行了编写。

（二）适用性和先进性

本标准为首次制定，以国标（北京）检验认证有限公司为主要起草单位，充分考虑相关企业对钛合金大型复杂形状构件、狭窄空间构件以及需现场检测试件的检测诉求的基础上编制而成，最大程度体现了国内外大多数企业对残余应力的测试水平，有利于规范钛切实可行，具有可操作性，同时充分考虑相关企业、使用单位等各方面的意见和建议，制定《钛合金残余应力测试方法-X射线德拜环法》。

三、标准主要内容的确定及主要试验和验证情况分析

1. 本标准在内容修订时主要编制依据

- （1）查阅相关标准并根据国内相关企业的具有检测情况，力求做到标准的合理性与实用性；
- （2）完全按照 GB/T1.1-2020 的要求进行格式和结构编写。

2. 标准制定的主要内容

近年来，随着 X 射线探测器技术的升级，探测效率和面积大幅提高，X 射线应力仪在引入全二维面探测器后，无需机械运动即可获得完整的二维德拜衍射环（相当于数百个一维衍射数据），基于德拜环的位置变化，可以获得材料中应变变量，从而可以高效便捷的推算出残余应力，也即 X 射线德拜环法。同时，该方法对样品尺寸、形状没有严格要求，适用于样品的在线检测，因此，极大的弥补了传统 X 射线应力法的空白，在材料制备过程、大型装备、服役构件及复杂零配件如齿轮、轴承、曲轴、叶片等中得到大量应用。

3.1 原理

德拜环法是采用单斜入射 X 射线，利用二维检测器获取的德拜环整周晶格形变信息，通过二维探测器得到德拜环的变化，测定不同方位的晶格形变，计算样品表面应力的方法。

图 1 所示为与样品表面法线成一定角度入射的 X 射线进行应力测量的德拜环法测量原理。以样品表面 O 点为测定位置，将测定应力的方向设为 x 轴，与应力垂直的方向设为 y 轴，将样品表面法线方向设为 z 轴。

在 xz 面内，X 射线从相对于 z 轴倾斜一定角度入射，垂直于入射 X 射线的二维探测器将采集到照射区域内晶粒的衍射 X 射线，如图 2 所示，从 y 轴方向看，德拜环的最高点，靠近样品法线的一侧为 -n 侧，最低点为 +n 侧。

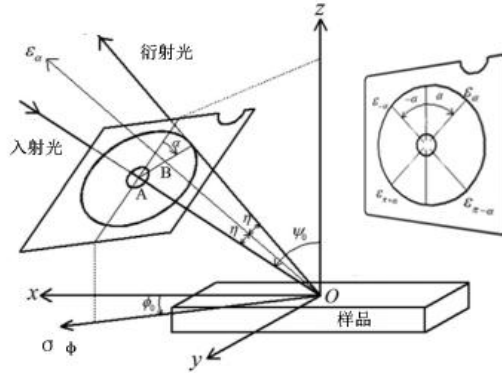


图 1 X 射线应力法-德拜环法原理图

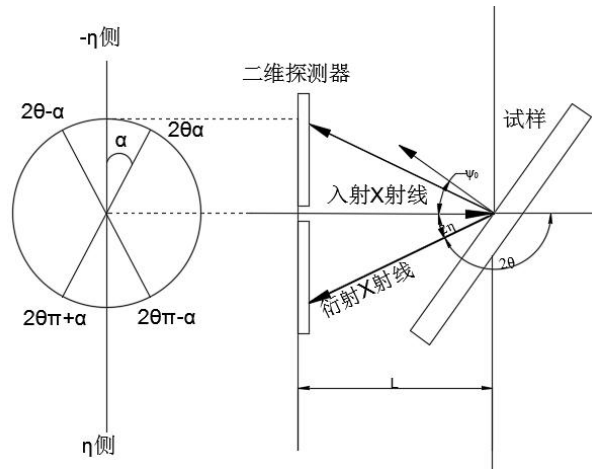


图 2 德拜环测量晶格形变原理图

从入射 X 射线侧观察，考虑以德拜环的中心 O 为原点的极坐标，以德拜环的最高点的 -n 侧为起点，定义顺时针旋转角 α ，对应于旋转角 α 的德拜环的半径 r_α 为：

$$r_\alpha = L \tan 2\eta_\alpha \quad (1)$$

其中，L 是样品与检测器的距离， $2\eta_\alpha$ 是衍射角 $2\theta_\alpha$ 的补角。

$$2\eta_\alpha = 180 - 2\theta_\alpha \quad (2)$$

由半径 r_α ，式(1)，式(2)可知衍射角 $2\theta_\alpha$ 为：

$$2\theta_\alpha = \left\{ \pi - \arctan \left(\frac{r_\alpha}{L} \right) \right\} \frac{180}{\pi} \quad (3)$$

由衍射角 2θ 可知相对于旋转角 α 的晶格应变 ε_α :

$$\varepsilon_\alpha = -(\theta_\alpha - \theta_0) \frac{\pi}{180} \cot \theta_0 \quad (4)$$

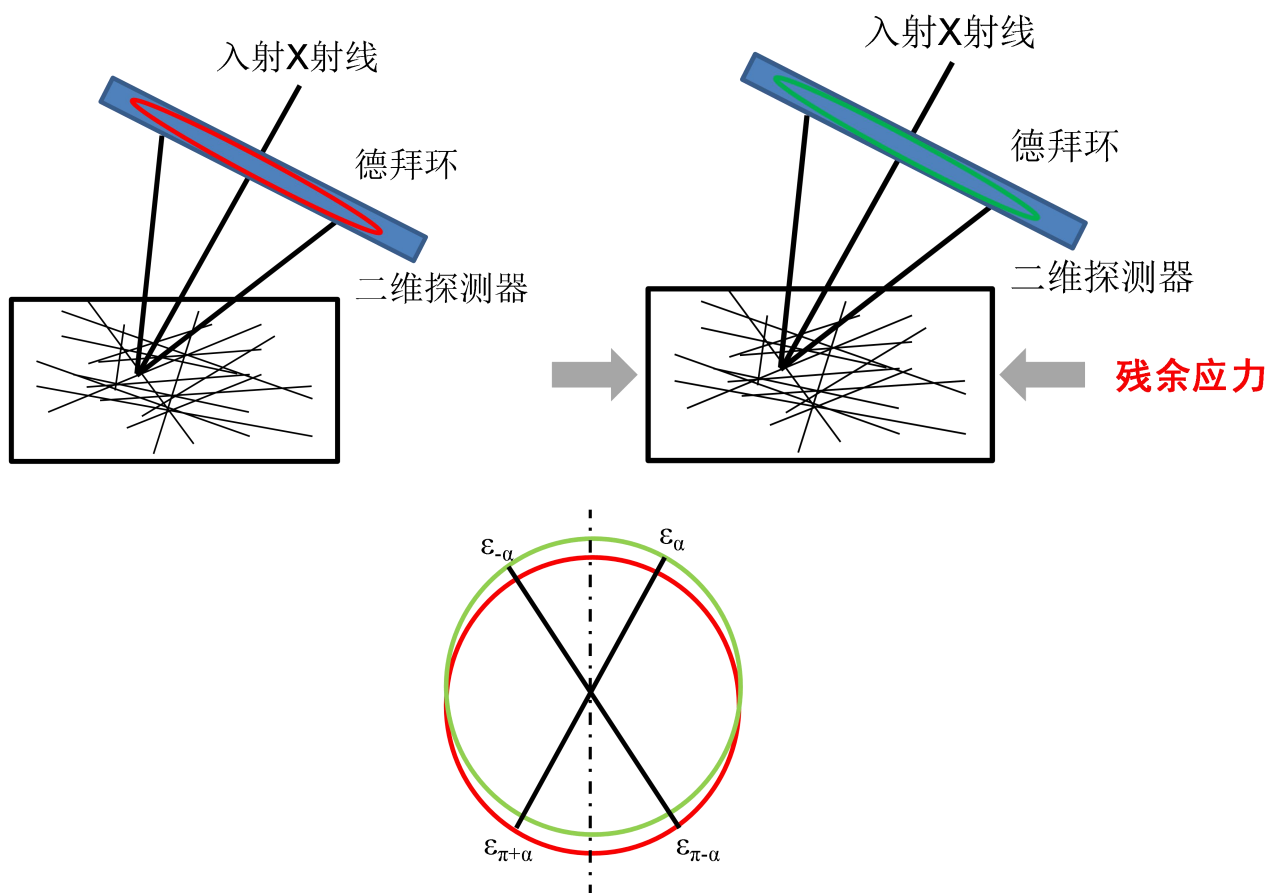


图3 单次入射后的德拜环变化图

为了计算应力值，除了针对旋转角 α 的晶格应变 ε_α 之外，还需要对角的晶格应变 $\varepsilon_{\pi+\alpha}$ 、旋转角 $\varepsilon_{-\alpha}$ 及其对角的晶格应变 $\varepsilon_{-\alpha}$ 和 $\varepsilon_{\pi-\alpha}$ 共 4 个晶格应变，如图 3 所示，由此，求 2 个应变差 $(\varepsilon_\alpha - \varepsilon_{\pi+\alpha})$ 和 $(\varepsilon_{-\alpha} - \varepsilon_{\pi-\alpha})$ ，将其平均值作为形变参数 $\varepsilon_{\alpha 1}$:

$$\varepsilon_{\alpha 1} = \frac{(\varepsilon_\alpha - \varepsilon_{\pi+\alpha}) + (\varepsilon_{-\alpha} - \varepsilon_{\pi-\alpha})}{2} \quad (5)$$

当样品表面层的应力状态为平面应力时，测量应力 σ_x 与应变参数 $\varepsilon_{\alpha 1}$ 有如下关系。

$$\sigma_x = -\frac{E_x}{1 + \nu_x} \frac{1}{\sin 2\eta \sin 2\psi_0} \frac{\partial \varepsilon_{\alpha 1}}{\partial \cos \alpha} \quad (6)$$

其中， E_x 是杨氏模量， ν_x 是泊松比。

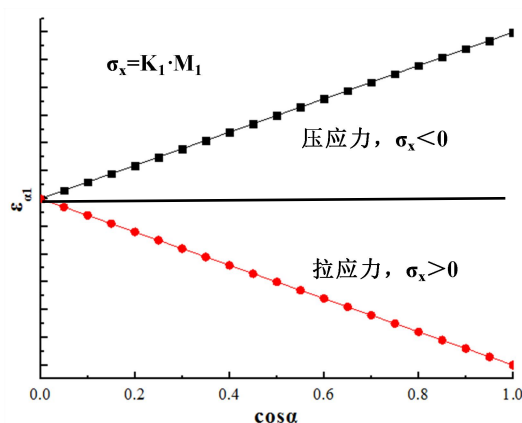


图 4 $\varepsilon_{\alpha 1}$ - $\cos\alpha$ 关系图

在实际应力测定中，在单个 X 射线入射角的方向上，从测得的德拜环开始，求出多个 α 的应变参数 $\varepsilon_{\alpha 1}$ ，横轴为 $\cos\alpha$ ，纵轴为 $\varepsilon_{\alpha 1}$ 。 $\cos\alpha$ 和 $\varepsilon_{\alpha 1}$ 的关系如图 4 所示，通过最小二乘法，确定近似直线的应力 M_1 ，由式 (7) 求出应力 σ_x 。

$$\sigma_x = K_1 \cdot M_1 \quad (7)$$

其中 K_1 被称为应力常数。

$$K_1 = -\frac{E_x}{1+\nu_x} \frac{1}{\sin 2\theta_0 \sin 2\psi_0} \quad (8)$$

M_1 是 $\varepsilon_{\alpha 1}$ - $\cos\alpha$ 关系图斜率，即：

$$M_1 = \frac{\partial \varepsilon_{\alpha 1}}{\partial \cos \alpha} \quad (9)$$

由于式(6)中 2η 的 α 的变化很小，用无应变时的 $2\eta_0$ 代替，并且 $2\eta_0$ 是无应变的衍射角 $2\theta_0$ 的补角，即：

$$2\eta_0 = 180 - 2\theta_0 \quad (10)$$

将 $\alpha=\pi/2(\cos\alpha=0)$ 代入式(5)后，应变参数 $\varepsilon_{\alpha 1}$ 为零。因此，图 4 的 $\varepsilon_{\alpha 1}$ - $\cos\alpha$ 关系图是通过原点的直线，通过最小二乘法确定直线的公式 M_1 。

3.2 测定范围的确定

在制定本标准时，参考了 GB/T7704-2017《无损检测 X 射线应力测定方法》，在 X 射线残余应力测试理论上结合日常检测样品的实际情况和设备精度，确定了方法适用范围：适用于具有足够结晶度，在特定波长的 X 射线照射下能得到连续德拜环的晶粒细小、无织构的各向同性的多晶钛合金材料。

3.3 衍射晶面的选择

在德拜环法应力测量所使用的 X 射线源的选择上，必须注意以下几点，即 X 射线应力测量是根据衍射

峰偏移来测量晶格应变的，通过晶格应变来计算应力，所以晶格应变的测量灵敏度最好大一些。

$$|\varepsilon_\alpha| = \left| \frac{d_\alpha - d_0}{d_0} \right| = |\theta_\alpha - \theta_0| \frac{\pi}{180} \cot \theta_0 \quad (11)$$

根据上式，灵敏度与 $\cot 2\theta$ 成比例，即衍射角 2θ 越接近 180° ，灵敏度越高。另外，由于 X 射线应力常数 K 与 $\cot \theta_0$ 成正比，而待测应力又与应力常数成正比，因此布拉格角 θ 越大 K 越小，应力的测量误差就越小。

$$K = -\frac{E}{2(1+\nu)} \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \cot \theta_0 \quad (12)$$

综上，为了减少测量误差，在应力测试过程中尽可能选择高角衍射线，为了获得高角度衍射，必须选择适当的特征 X 射线和衍射晶面的组合。

由于本标准方法所用靶材确定为 V 靶的 Ka 辐射，因此，在特征 X 射线确定的情况下，在高角衍射峰的前提下，衍射晶面的选择应遵循以下原则：

1) 多重因子高，在粉末衍射花样中，由具有相同晶面间距的同一晶形各晶面族衍射线重叠在底片的一个衍射线环上，其衍射强度相互叠加，如晶面族有 8 个晶面，则多重性因子为 8，多重因子越高，参与衍射的晶面越多，产生的衍射强度越大。

2) 峰背比（信噪比小）大，减少样品的吸收，选择合适的靶材，降低背底，选择合适的衍射晶面，增加衍射强度，增加峰背比，一般峰背比越大，误差越小。

基于以上考虑，为了减少测量误差，在应力测试过程中尽可能选择高角衍射线，本方法中已经确定的特征 X 射线为 Vka，其波长为 2.2691\AA ，基于钛合金的典型衍射特征，综合考虑，选择了 $\{103\}$ 、 $\{110\}$ 、 $\{102\}$ 三个衍射晶面进行测试，结果如下：

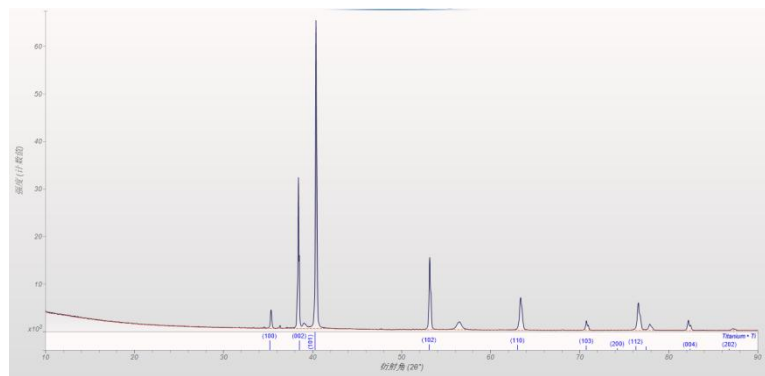
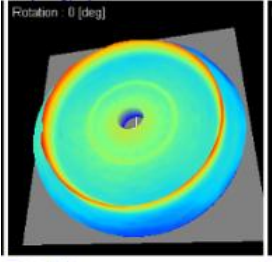
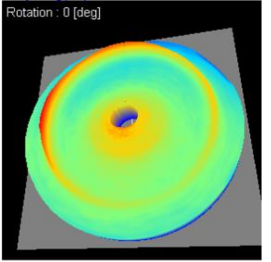
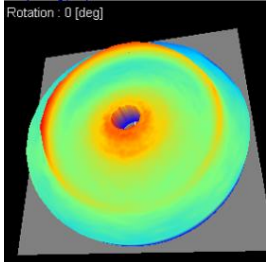


图 5 典型钛合金样品的 XRD 衍射图谱

表 1 衍射晶面的选择

晶面	{103}	{110}	{102}
多重因子	12	6	12
衍射角 (2θ)	140	116	93
峰背比			
测试结果			
1	-177	-175	-209

2	-176	-176	-167
3	-179	-190	-166
4	-177	-178	-176
5	-180	-170	-166
平均值	-178	-178	177
标准偏差	1.6	7.4	18.5
RSD%	0.9%	4.2%	10.4%
德拜环完整性			
	完整	完整	完整

*RSD%为连续五次获得。

从表中数据可以看出，尽管晶面{110}和{102}较{103}衍射强度、峰背比更高，但由于衍射角度较低，与高角的{103}晶面相比，会产生较大的测试精度，从标准偏差和相对标准偏差都可以看出，衍射晶面{110}和{102}的数据一致性较差，因此，不管是多重因子、重复性等各方面，{103}晶面都明显优于其他晶面，综合考虑下，选择钛合金的{103}晶面作为测试晶面，其衍射角 $2\theta=140^\circ$ 。

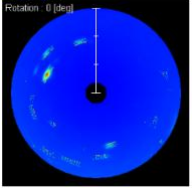
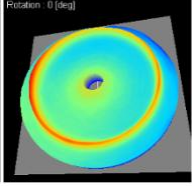
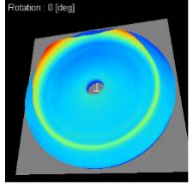
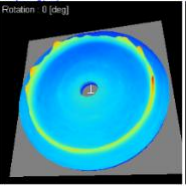
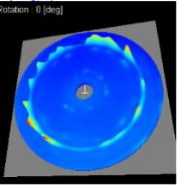
3.4 晶粒尺寸的确定

X射线德拜环法对样品晶粒尺寸有明确要求，对于粗晶材料，在有限的X射线照射区域以内，参与衍射的晶粒数量较少，衍射晶面法线在空间不呈均匀连续分布，因而衍射强度较低，且随旋转角 α 呈不规则波动，峰形较差，衍射峰值重复性差，难以达到应有的测量精度。

测试过程中，样品晶粒是否粗大或是否存在足够的晶粒数，一定程度上可以通过德拜环来判断，当德拜环的强度相对于旋转角 α 的衍射强度高低差过大或仅测量到斑点状德拜环时，结晶颗粒的数量不充分。当任意旋转角 α 具有足够的衍射强度，可以看作是连续环时，参与衍射的晶粒数量足够多，满足德拜环法进行残余应力测试的必要条件。

为了获得最佳的测试效果，采用了表4中不同晶粒尺寸的样品，进行残余应力测试，试验过程只改变表面粗糙度一个参数，而其它参数均使用仪器默认值，通过德拜环完整性及测试结果重复性考量晶粒尺寸的选择。

表 2 晶粒尺寸的选择

晶粒尺寸 测试次数	10 μ m	40 μ m	70 μ m	100 μ m	600 μ m
1	-112	-188	-150	-28	无有效数据 
2	-110	-189	-149	-34	
3	-113	-190	-155	-34	
4	-106	-186	-159	-36	
5	-110	-181	-154	-39	
平均值	-110	-187	-153	-34	
标准偏差	2.7	3.6	4.0	4.0	
RSD%	2.5%	1.9%	2.6%	11.8%	
德拜环完整程度	 完整	 完整	 完整， 强度波动小	 完整， 强度波动小	

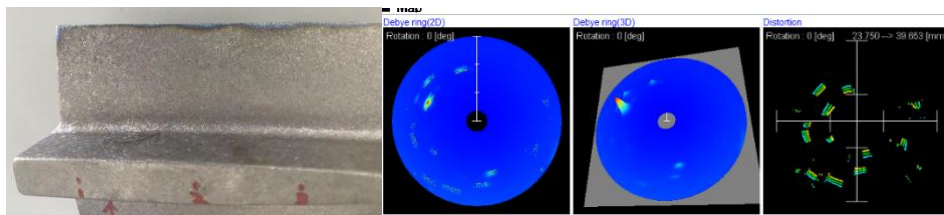


图 6 晶粒尺寸 600 μ m 的样品及德拜环采集情况

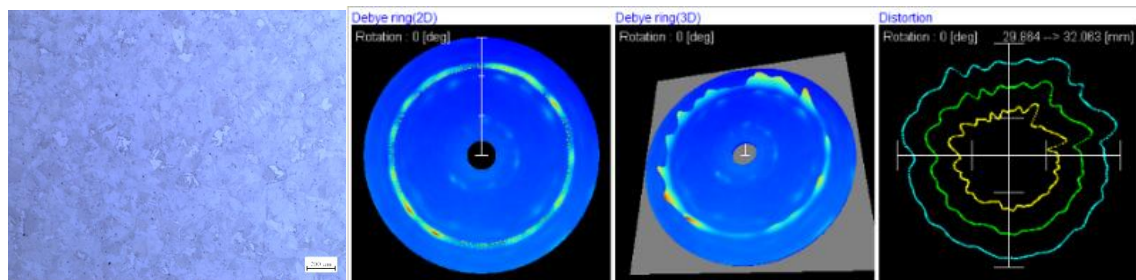


图 7 晶粒尺寸 100 μ m 的样品微观组织及德拜环采集情况

从表中可以看出，被测材料晶粒尺寸 $\leq 100 \mu\text{m}$ 时，均可获得较为完整的德拜环和测试重复性较好的测试结果，当晶粒尺寸 $600 \mu\text{m}$ 时，德拜环呈斑点状，说明采集的德拜环不完整，缺乏足够的晶粒参与衍射，导致测试结果的重复性差，因此，为保证在 X 射线照射区域内与旋转角 α 处的衍射面法线垂直面上有足够的晶粒数量参与衍射，被测材料的晶粒尺寸应在 $10\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$ 范围内。

同理，样品应为各向同性材料，无明显的择优取向，如果有较强的择优取向，德拜环的衍射强度就会因旋转角 α 而产生偏差， $\cos\alpha$ 曲线图就会大幅度波动。在这种情况下，不符合本标准的均质材料的假设，测

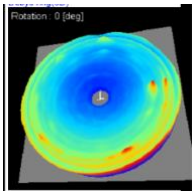
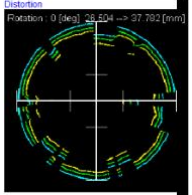
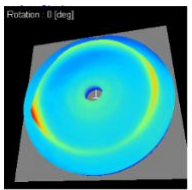
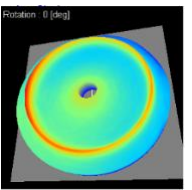
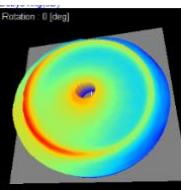
定结果的可靠性降低。

3.5 表面粗糙度的确定

由于钛合金对于 X 射线有效穿透深度在 10 μm 左右，非常浅，如果表面粗糙度较粗，表面凹凸位置的晶粒就会不同程度的参与衍射，导致衍射峰发生偏移，导致测试结果的可靠性降低，因此，测试位置表面应足够平滑。

为了进一步研究表面粗糙度对测试结果的影响，采用了表 5 中选取的几种不同表面粗糙度的样品，进行残余应力测试，实验采用控制变量法，只改变表面粗糙度一个参数，而其它参数均使用仪器默认值。

表 3 表面粗糙度的选择

晶粒尺寸	0.2 μm	2 μm	6 μm	14 μm
测试次数				
1	-573	-353	-239	无效数据 
2	-591	-350	-246	
3	-577	-339	-263	
4	-591	-348	-234	
5	-593	-343	-239	
平均值	-585	-347	-244	
标准偏差	9.3	5.6	11.3	
RSD%	1.60%	1.60%	4.60%	
德拜环完整程度				

从表中可以看出，随着表面粗糙度的增大，测试结果的重复性有所下降，但总体影响不大，但表面粗糙度为 14 μm 时，衍射峰无规则偏移严重，导致数据无效，因此，表面粗糙度 Ra 应尽量小，综合考虑钛合金的有效穿透深度，测试样品的表面粗糙度应不大于 10 μm 。

另外，应防止因加工或热影响而改变样品的应力状态，应无氧化层等附着，如果测量表面形成了氧化层，必须通过砂纸或氧化铝悬浮液研磨等方法去除表面形成的物质。但是通过这种方式去除，可能会产生新的加工变质层和残留应力，这时可能需要通过电解研磨等方式去除新的影响层。

3.8 仪器条件的选择

为了获得最佳检测效果，本阶段分别使用了零应力样品和测试样品，采用表 5 中的重要仪器参数进行了研究，确定了最佳的仪器参数选取依据主要为德拜环完整性、测试结果重复性指标。实验采用控制变量法，每次只改变一个参数，而其它参数均使用仪器默认值。仪器默认参数如下：

表 4 默认的仪器参数

参数	样品距离 (mm)	入射角 (°)	α 角的有效范围 (°)
数值	39	25	18~90

3.8.1 入射距离的确定

样品表面上的测量点与二维检测器之间的距离称为入射距离 L ，需根据二维检测器的尺寸，确定所选择的衍射面的衍射形貌，使其能够测量德拜环的整个周长，样品距离越大，德拜环半径就会变大，接受光的检测器的每角度像素数量就会变大，可以物理地提高角度分辨率。由于发散角引起的衍射角的波动反而增加，因此即使增加样品距离也未必能提高测量精度。

在德拜环法的 X 射线应力测量中，德拜环全周的峰值位置对应应力值的测试起着关键作用。为此，首先要适当地改变样品距离，确认包括 $Ti\{103\}$ 衍射背景在内的衍射强度曲线的全貌，然后根据二维检测器的尺寸进行选择。从选定的衍射面的衍射强度曲线到相同范围的背景能拉开的测角，确定对于德拜环全周范围能够充分确保的样品距离。

在德拜环法的 X 射线应力测量中，德拜环全周的峰值位置对应应力值起着决定作用。为此，首先要适当地改变样品距离，确定包括衍射背景在内的衍射强度曲线的全貌，然后根据二维检测器的尺寸进行选择，确保能够获得从选定的衍射面的衍射强度曲线到相同范围的背景能拉开的入射角，

为了获得最佳的测试效果，采用了表 5 中选择的入射距离，对重要的仪器条件参数进行了研究，确定最佳的仪器参数，选取依据主要为德拜环完整性、测试重复性。其他条件使用默认值，测试了入射距离分别为 25mm、30mm、35mm、39mm 条件下的应力值，测试结果如下：

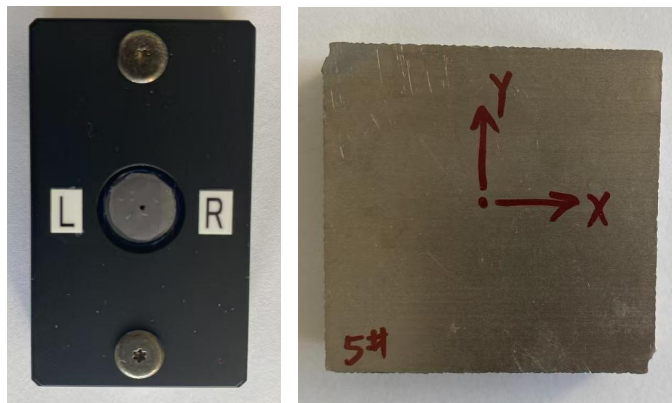
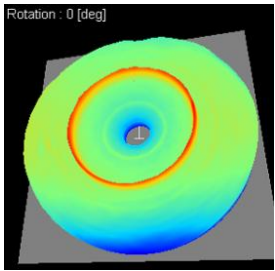
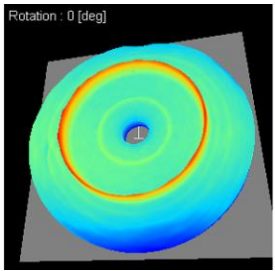
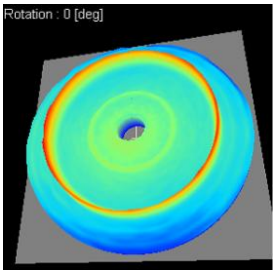
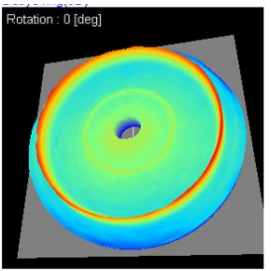


图 8 零应力标准样品及实际样品

表 5 标准样品不同测试距离的残余应力测试结果

测试次数	测试角度 (mm)			
	25	30	35	39
1	-9	-8	-8	-14
2	-5	-6	-6	-11
3	-7	-5	-4	-9
4	-8	-6	-3	-11
5	-5	-5	-4	-8
平均值	-7	-6	-5	-11
标准偏差	1.8	1.2	2.0	2.3

表 6 实际样品 (TC1 板材) 不同测试距离的残余应力测试结果

测试次数	测试距离 (mm)			
	25	30	35	39
1	-243	-201	-228	-206
2	-242	-199	-228	-205
3	-246	-208	-229	-207
4	-250	-202	-232	-208
5	-241	-206	-229	-203
平均值	-244	-203	-229	-206
标准偏差	3.646917	3.701351	1.643168	1.923538
RSD%	1.50%	1.80%	0.70%	0.90%
德拜环完整度	 完整	 完整	 完整	 完整

入射距离 L 与德拜环半径 r_α 相关, L 越大, 德拜环的半径越大, 因此, 在二维探测器尺寸一定的情况下, 适当调整入射距离, 可以获得最佳的测试结果, 从表中可以看出, 样品距离 25mm、30mm、35mm、39mm 都可以获得完整的德拜环形貌, 随着样品距离的增加, 德拜环的角分辨率越高, 且入射距离为 39mm 时, 测试结果更为可靠, 另外, 对于一些大型复杂构件, 过小的入射距离可能探测到样品表面, 因此, 综合考虑样品规格的复杂程度、分辨率、测试精度等, 故推荐默认参数入射距离为 39mm。

$$r_\alpha = L \tan 2\eta_\alpha$$

3.8.2 入射角度的确定

X 射线的有效穿透深度最高不超过 $10 \mu\text{m}$, 且随着 X 射线入射角的增大而减小。为了获得最佳的检测

效果，采用了表 5 中选择的入射角，对重要的仪器条件参数进行了研究，确定最佳的仪器参数，选取依据主要为德拜环完整性、测试重复性。

其他条件使用默认值，测试了入射角分别为 25°、30°、35° 条件下的应力值，测试结果如下：

表 7 标准样品不同测试角度的残余应力测试结果

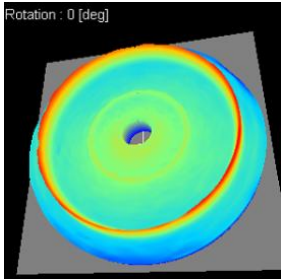
测试次数	测试角度 (°)		
	25	30	35
1	-14	-16	-25
2	-11	-18	-23
3	-9	-14	-29
4	-11	-13	-26
5	-8	-15	-23
平均值	-11	-15	-25
标准偏差	2.3	1.9	2.5
德拜环完整性	 <p style="text-align: center;">完整</p>		

表 8 实际样品 (TC1 板材) 不同测试角度的残余应力测试结果

测试次数	测试角度 (°)		
	25	30	35
1	-210	-226	-216
2	-211	-229	-215
3	-203	-220	-213
4	-202	-226	-220
5	-206	-231	-217
平均值	-206	-226	-216
标准偏差	4.0	4.2	2.6
RSD%	2%	1.80%	1.20%

从表中可以看出，入射角 25°、30°、35° 均可以达到较好的测试效果，但考虑入射角越大，X 射线穿透的有效深度越小，综合考虑样品状态、X 射线穿透深度等的影响，故推荐默认参数的 25°。

3.8.3 α 角的有效范围的确定

在实际应力测定中，在单个 X 射线入射角的方向上，从采集的德拜环中，求出多个 α 的应变参数 $\epsilon\alpha_1$ ，横轴为 $\cos\alpha$ ，纵轴为 $\epsilon\alpha_1$ ，制作 $\cos\alpha$ 和 $\epsilon\alpha_1$ 的关系，旋转角 α 的选择一般在 $0 < \cos\alpha < 1.0$ 的范围内以 $\cos\alpha = 0.05$ 均等选取，为了进一步研究不同 α 角的有效范围对测试结果的影响，在其他条件使用默认值的情况下，使用

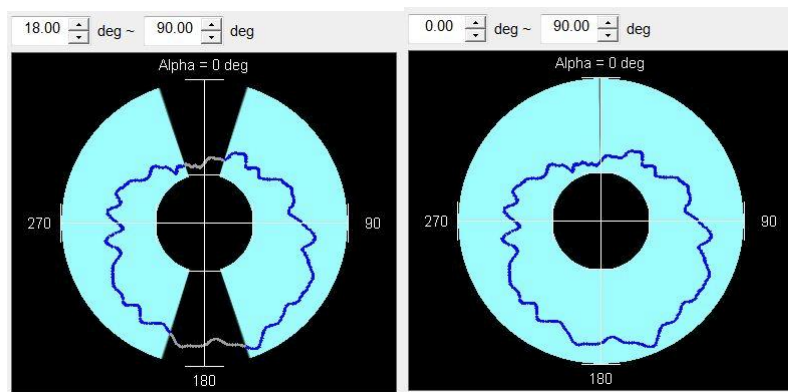
零应力标准样品和实际测试样品测试了 α 角的有效范围分别为 18~90° 及 0~90° 的应力值，测试结果如下：

表 9 零应力标准样品不同 α 角的有效范围的残余应力测试结果

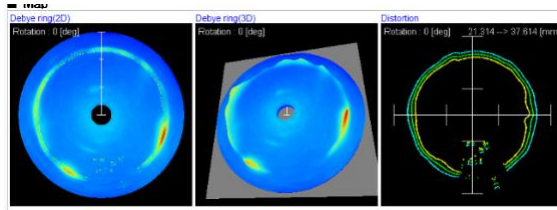
测试次数	α 角的有效范围	
	18~90° (默认)	0~90°
1	-14	-10
2	-11	-10
3	-9	-11
4	-11	-15
5	-8	-11
平均值	-11	-11
标准偏差	2.3	2.1

表 10 实际样品 (TA15 板材) 不同 α 角的有效范围的残余应力测试结果

测试次数	α 角的有效范围	
	18~90° (默认)	0~90°
1	356	362
2	360	367
3	355	362
4	351	358
5	353	361
平均值	355	362
标准偏差	3.4	3.2
RSD%	0.96%	0.88%



从表中可以看出， α 角的有效范围分别为 18~90° (默认) 及 0~90° 均可以获得较好测试结果，且总体影响不大，因此，推荐采用默认参数，即 α 角的有效范围为 18~90°。但需要特别注意，如果德拜环由于某种原因出现被遮挡等情况，如图 所示，测量出的德拜环可能会有一部分缺失，在这种情况下，建议适当的调整 α 角的有效范围，在有效的 $\cos a$ 范围中提取数据进行数据处理。



3.12 方法的准确度

使用了各牌号的实际样品，按照样品实际测试需求采用最佳实验条件，分别对样品中心位置 X 和 Y 两个方向进行了 8 次残余应力重复测试，结果如下：

表 11 TC4-2#钛合金板材残余应力测试结果

测试方向 测试次数	X	Y
1	-212	-93
2	-221	-92
3	-216	-91
4	-211	-94
5	-216	-94
6	-214	-92
7	-210	-96
8	-216	-92
平均值	-215	-93
标准偏差	3.5	1.6
RSD%	1.6%	1.7%

表 12 TC1-4#钛合金板材残余应力测试结果

测试方向 测试次数	X	Y
1	-139	-274
2	-133	-273
3	-142	-273
4	-137	-272
5	-137	-275
6	-141	-270
7	-139	-269
8	-140	-276
平均值	-139	-273
标准偏差	2.8	2.4
RSD%	2.0%	0.9%

表 13 TC1-5#钛合金板材残余应力测试结果

测试方向 测试次数	X	Y
1	-188	-272
2	-189	-275
3	-190	-270
4	-186	-274
5	-181	-269
6	-179	-277
7	-186	-277
8	-188	-274
平均值	-189	-274
标准偏差	3.8	2.8
RSD%	2.0%	1.0%

表 14 TA15-8#钛合金板材残余应力测试结果

测试次数	测试方向 (MPa)	
	X	Y
1	70	73
2	63	72
3	60	70
4	65	69
5	60	71
6	62	70
7	59	72
8	60	73
平均值	62	71
标准偏差	3.7	1.5
RSD%	5.9%	2.1%

表 15 TA15-9#钛合金板材残余应力测试结果

测试次数	测试方向 (MPa)	
	X	Y
1	356	333
2	360	333
3	355	331
4	351	332
5	353	335
6	353	332
7	358	334
8	355	334
平均值	355	336
标准偏差	2.9	2.6
RSD%	0.8%	0.8%

表 16 TA2-10#钛合金板材残余应力测试结果

测试次数	测试方向 (MPa)	
	X	Y
1	-82	-150
2	-78	-149
3	-67	-155
4	-75	-159
5	-69	-154
6	-66	-153
7	-79	-156
8	-87	-151
平均值	-75	-153
标准偏差	7.5	3.3
RSD%	10%	2%

表 17 TA2-11#钛合金板材残余应力测试结果

测试次数	测试方向 (MPa)	
	X	Y
1	-178	-260
2	-188	-261
3	-188	-259
4	-192	-262
5	-187	-261
6	-185	-255
7	-184	-256
8	-183	-258
平均值	-186	-259
标准偏差	4.2	2.5
RSD%	2.2%	1.0%

从表 11~表 17 的数据可以看出，各牌号的钛合金残余应力测试结果重复性较好，精密度较高。

3.13 验证单位实验数据

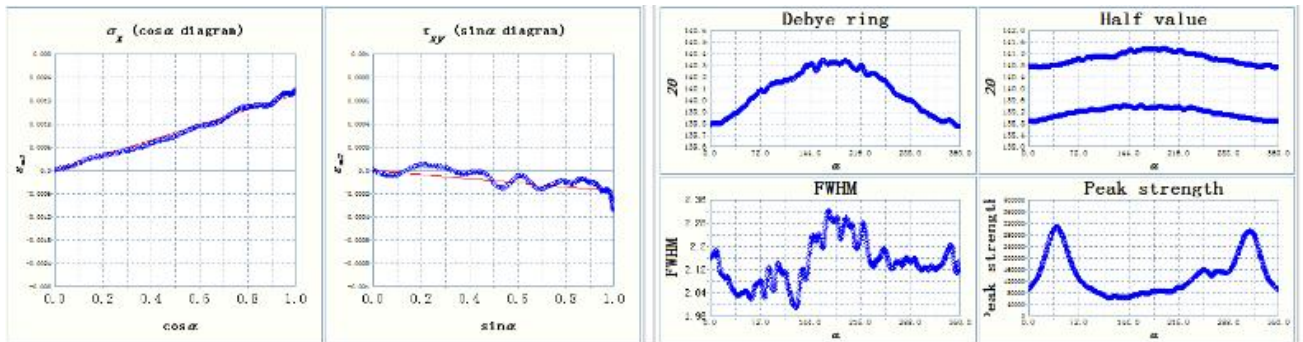
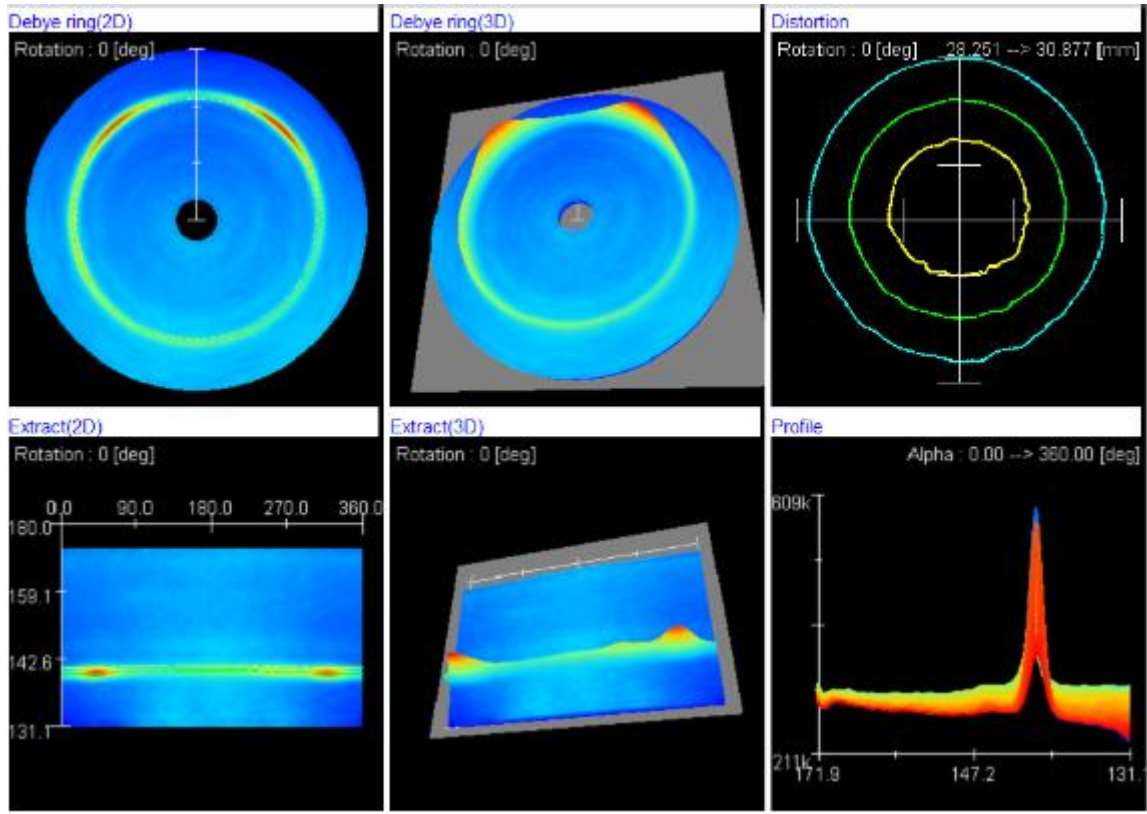


图 6 德拜环法残余应力测试结果输出

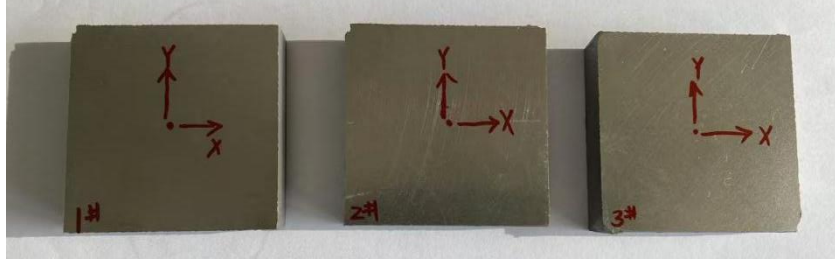


图 7 TC4 钛合金板材样品

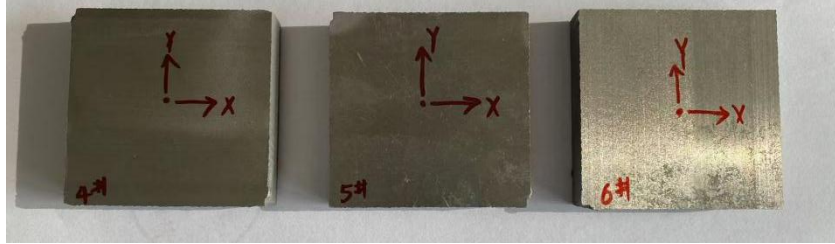


图 8 TC1 钛合金板材样品

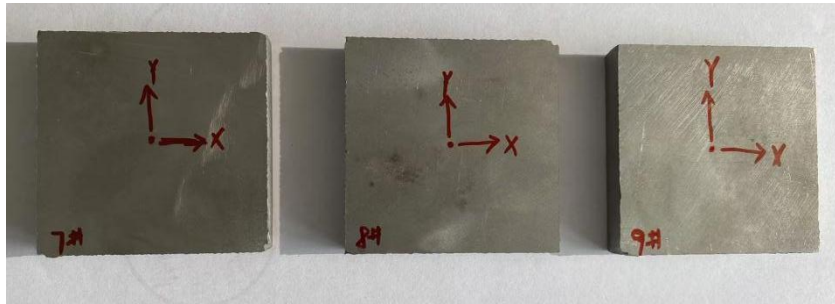


图 9 TA15 钛合金板材样品

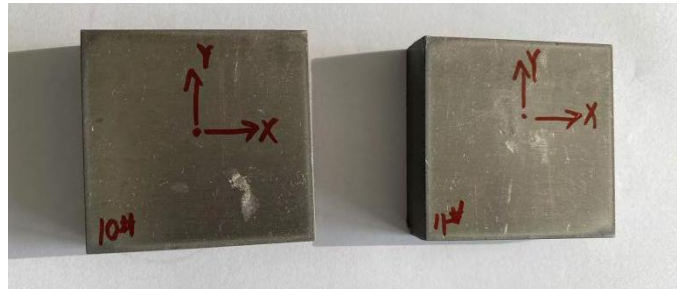


图 10 TA2 钛合金板材样品

验证样品为不同牌号钛合金板材，由宝钛提供，测试要求为每个样品同一位置 X 和 Y 两个方向重复测试 3 次，目前已有国标检验、北科大和长三角先进材料研究院三家单位的验证数据，结果如下：

国合（青岛）

表 18 TC4-2#样品验证试验（残余应力单位：MPa）

测试次数	测试方向	
	X	Y
1	-225	-112
2	-235	-109
3	-232	-112
平均值	-231	-111
标准偏差	5.1	1.7
RSD%	2.2%	1.6%

表 19 TC1-4#样品验证试验（残余应力单位：MPa）

测试次数	测试方向	
	X	Y
1	-151	-275
2	-151	-271
3	-155	-271
平均值	-152	-272
标准偏差	2.3	2.3
RSD%	1.5%	0.8%

表 20 TC1-5#样品验证试验（残余应力单位：MPa）

测试次数	测试方向	
	X	Y
1	-190	-287
2	-195	-288
3	-194	-287
平均值	-193	-287

标准偏差	2.6	0.6
RSD%	1.4%	0.2%

表 21 TC1-6#样品验证试验（残余应力单位：MPa）

测试次数	测试方向	
	X	Y
1	-347	-296
2	-347	-296
3	-349	-298
平均值	-348	-297
标准偏差	1.2	1.2
RSD%	0.3%	0.3%

表 22 TA15-8#样品验证试验（残余应力单位：MPa）

测试次数	测试方向	
	X	Y
1	32	51
2	33	48
3	34	51
平均值	33	50
标准偏差	1.0	1.8
RSD%	3.0%	3.5%

表 23 TA15-9#样品验证试验（残余应力单位：MPa）

测试次数	测试方向	
	X	Y
1	344	305
2	345	311
3	348	311

平均值	346	309
标准偏差	2.1	3.5
RSD%	0.6%	1.1%

表 24 TA2-10#样品验证试验（残余应力单位：MPa）

测试次数	测试方向	
	X	Y
1	-97	-160
2	-104	-160
3	-99	-163
平均值	-100	-161
标准偏差	3.6	1.7
RSD%	3.6%	1.1%

表 25 TA2-11#样品验证试验（残余应力单位：MPa）

测试次数	测试方向	
	X	Y
1	-227	-261
2	-220	-262
3	-223	-261
平均值	-223	-261
标准偏差	3.5	0.58
RSD%	1.6%	0.2%

北京科技大学

表 26 TC4-2#样品验证试验（残余应力单位：MPa）

测试次数	测试方向	
	X	Y

1	-242	-116
2	-238	-127
3	-241	-117
平均值	-240	-120
标准偏差	2.1	6.1
RSD%	0.9%	5.1%

表 27 TC1-4#样品验证试验（残余应力单位：MPa）

测试次数	测试方向	
	X	Y
1	-160	-275
2	-158	-276
3	-160	-278
平均值	-159	-276
标准偏差	1.2	1.5
RSD%	0.7%	0.6%

表 28 TC1-5#样品验证试验（残余应力单位：MPa）

测试次数	测试方向	
	X	Y
1	-192	-274
2	-182	-268
3	-190	-267
平均值	-188	-270
标准偏差	5.3	3.8
RSD%	2.8%	1.4%

表 29 TC1-6#样品验证试验（残余应力单位：MPa）

测试次数	测试方向	
	X	Y
1	-348	-284
2	-349	-290
3	-348	-286
平均值	-348	-287
标准偏差	0.6	3.1
RSD%	0.2%	0.1%

表 30 TA15-8#样品验证试验（残余应力单位：MPa）

测试次数	测试方向	
	X	Y
1	46	39
2	48	46
3	52	42
平均值	49	42
标准偏差	3.1	3.5
RSD%	6.2%	8.4%

表 31 TA15-9#样品验证试验（残余应力单位：MPa）

测试次数	测试方向	
	X	Y
1	344	329
2	349	325
3	351	329
平均值	348	328
标准偏差	3.6	2.3
RSD%	1.0%	0.7%

表 32 TA2-10#样品验证试验（残余应力单位：MPa）

测试次数	测试方向	
	X	Y
1	-97	-153
2	-98	-156
3	-105	-157
平均值	-100	-155
标准偏差	4.4	2.1
RSD%	4.4%	1.3%

表 33 TA2-11#样品验证试验（残余应力单位：MPa）

测试次数	测试方向	
	X	Y
1	-196	-261
2	-198	-253
3	-193	-258
平均值	-196	-257
标准偏差	2.5	4.0
RSD%	1.3%	1.6%

长江三角洲

表 34 TC4-2#样品验证试验（残余应力单位：MPa）

测试次数	测试方向	
	X	Y
1	-236	-142
2	-238	-131
3	-236	-140

平均值	-237	-138
标准偏差	1.2	5.9
RSD%	0.5%	0.5%

表 35 TC1-4#样品验证试验（残余应力单位：MPa）

测试次数	测试方向	
	X	Y
1	-170	-281
2	-167	-285
3	-170	-284
平均值	-169	-283
标准偏差	1.7	2.1
RSD%	1.1%	0.8%

表 36 TC1-5#样品验证试验（残余应力单位：MPa）

测试次数	测试方向	
	X	Y
1	-186	-295
2	-191	-292
3	-194	-296
平均值	-190	-294
标准偏差	4.0	2.1
RSD%	2.2%	0.8%

表 37 TC1-6#样品验证试验（残余应力单位：MPa）

测试次数	测试方向	
	X	Y
1	-320	-289
2	-326	-288

3	-329	-285
平均值	-325	-287
标准偏差	4.6	2.1
RSD%	1.4%	0.7%

表 38 TA15-8#样品验证试验（残余应力单位：MPa）

测试次数	测试方向	
	X	Y
1	26	54
2	23	53
3	26	52
平均值	25	53
标准偏差	1.7	1.0
RSD%	3.5%	2.4%

表 39 TA15-9#样品验证试验（残余应力单位：MPa）

测试次数	测试方向	
	X	Y
1	340	300
2	337	298
3	342	301
平均值	340	300
标准偏差	2.5	1.5
RSD%	0.7%	0.5%

表 40 TA2-10#样品验证试验（残余应力单位：MPa）

测试次数	测试方向	
	X	Y
1	-116	-153

2	-110	-146
3	-108	-146
平均值	-111	-148
标准偏差	4.2	4.0%
RSD%	4.2%	2.6%

表 41 TA2-11#样品验证试验（残余应力单位：MPa）

测试次数	测试方向	
	X	Y
1	-222	-269
2	-230	-269
3	-218	-270
平均值	-223	-269
标准偏差	6.1	0.58
RSD%	3.1%	0.2%

3.14 精密度计算

表 42 TC4-2#样品平均值统计

实验室		X 方向	Y 方向
国标（北京）	平均值	-215	-93
	标准偏差	3.5	1.6
	RSD%	1.6%	1.7%
长江先进材料	平均值	-237	-138
	标准偏差	1.2	5.9
	RSD%	0.5%	0.5%
国合（青岛）	平均值	-231	-111
	标准偏差	5.1	1.7
	RSD%	2.2%	1.6%
北京科技大学	平均值	-240	-120
	标准偏差	2.1	6.1
	RSD%	0.9%	5.1%

表 43 TC1-4#样品平均值统计

实验室		X 方向	Y 方向
国标（北京）	平均值	-139	-273
	标准偏差	2.8	2.4
	RSD%	2.0%	0.9%
长江先进材料	平均值	-169	-283
	标准偏差	1.7	2.1
	RSD%	1.1%	0.8%
国合（青岛）	平均值	-152	-272
	标准偏差	2.3	2.3
	RSD%	1.5%	0.8%
北京科技大学	平均值	-159	-276
	标准偏差	1.2	1.5
	RSD%	0.7%	0.6%

表 44 TC1-5#样品平均值统计

实验室		X 方向	Y 方向
国标（北京）	平均值	-189	-274
	标准偏差	3.8	2.8
	RSD%	2.0%	1.0%
长江先进材料	平均值	-190	-294
	标准偏差	4.0	2.1
	RSD%	2.2%	0.8%
国合（青岛）	平均值	-193	-287
	标准偏差	2.6	0.6
	RSD%	1.4%	0.2%
北京科技大学	平均值	-188	-270
	标准偏差	5.3	3.8
	RSD%	2.8%	1.4%

表 45 TC1-6#样品平均值统计

实验室		X 方向	Y 方向
国标（北京）	平均值		
	标准偏差		
	RSD%		
长江先进材料	平均值	-325	-287
	标准偏差	4.6	2.1
	RSD%	1.4%	0.7%
国合（青岛）	平均值	-348	-297
	标准偏差	1.2	1.2
	RSD%	0.3%	0.3%
北京科技大学	平均值	-348	-287
	标准偏差	0.6	3.1

	RSD%	0.2%	0.1%
--	------	------	------

表 46 TA15-8#样品平均值统计

实验室		X 方向	Y 方向
国标（北京）	平均值	62	71
	标准偏差	3.7	1.5
	RSD%	5.9%	2.1%
长江先进材料	平均值	25	53
	标准偏差	1.7	1.0
	RSD%	3.5%	2.4%
国合（青岛）	平均值	33	50
	标准偏差	1.0	1.8
	RSD%	3.0%	3.5%
北京科技大学	平均值	49	42
	标准偏差	3.1	3.5
	RSD%	6.2%	8.4%

表 47 TA15-9#样品平均值统计

实验室		X 方向	Y 方向
国标（北京）	平均值	355	336
	标准偏差	2.9	2.6
	RSD%	0.8%	0.8%
长江先进材料	平均值	340	300
	标准偏差	2.5	1.5
	RSD%	0.7%	0.5%
国合（青岛）	平均值	346	309
	标准偏差	2.1	3.5
	RSD%	0.6%	1.1%
北京科技大学	平均值	348	328
	标准偏差	3.6	2.3
	RSD%	1.0%	0.7%

表 48 TA2-10#样品平均值统计

实验室		X 方向	Y 方向
国标（北京）	平均值	-75	-153
	标准偏差	7.5	3.3
	RSD%	10%	2%
长江先进材料	平均值	-111	-148
	标准偏差	4.2	4.0%
	RSD%	4.2%	2.6%
国合（青岛）	平均值	-100	-161
	标准偏差	3.6	1.7

	RSD%	3.6%	1.1%
北京科技大学	平均值	-100	-155
	标准偏差	4.4	2.1
	RSD%	4.4%	1.3%

表 49 TA2-11#样品平均值统计

实验室		X 方向	Y 方向
国标（北京）	平均值	-186	-259
	标准偏差	4.2	2.5
	RSD%	2.2%	1.0%
长江先进材料	平均值	-223	-269
	标准偏差	6.1	0.58
	RSD%	3.1%	0.2%
国合（青岛）	平均值	-223	-261
	标准偏差	3.5	0.58
	RSD%	1.6%	0.2%
北京科技大学	平均值	-196	-257
	标准偏差	2.5	4.0
	RSD%	1.3%	1.6%

四、标准水平

3.1 采用国际标准及国外先进标准的程度

经查，国外无相同类型的标准。

3.2 与国际标准及国外同类标准水平的对比

经查，国外无相同类型的标准，无法对比。

3.3 与现有标准及制定中的标准协调配套情况

本标准与现有的标准及制定中的标准协调配套，无重复交叉现象。

3.4 涉及国内外专利及处置情况

经查，本标准没有涉及国内外专利。

五、与有关的现行法律、法规和强制性国家标准的关系

本标准与有关的现行法律、法规和强制性国家标准具有一致性，无冲突之处。

六、重大分歧意见的处理经过和依据

无。

七、标准作为强制性或推荐性国家（或行业）标准的建议

本标准建议作为推荐性行业标准。

八、贯彻标准的要求和措施建议

无。

九、废止现行有关标准的建议

无。

十、其他应予以说明的事项

无。

十一、预期效果

本标准的制定旨在为钛合金生产、应用单位提供一种可靠的钛合金残余应力测试方法，本标准建立的通用检测手段，可以解决目前各种测试方法并存，不同检测机构数据之间无通用性的问题，可指导材料结构的设计、开发及生产工艺的改进，为开展数值模拟研究提供数据支持，为我国钛合金的发展奠定技术支持与标准化保证。

《钛合金残余应力测试方法 X 射线德拜环法》标准编制组

2025 年 2 月