

ICS 27.020

CCS J 92

团 体 标 准

T/CSICE 059-2025

发动机铝合金缸体残余应力 残余应力测量与评价方法

Aluminum alloy cylinder block residual stress measurement and
evaluation

2025-12-26 发布

2025-12-26 实施

中国内燃机学会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 技术要求	2
4.1 缸体试样的质量	2
4.2 缸体残余应力测量部位	2
4.3 缸体残余应力的设定基准	2
5 试验方法	3
5.1 测量工具及辅件	3
5.2 测量方法	3
5.3 试验环境	3
5.4 测量流程	3
5.5 缸孔间残余应变测量	4
6 残余应变和应力的计算	8
7 测量结果报告	10
8 校验规则	10
附录 A（规范性） 安全防护措施	11
附录 B（资料性） 缸体残余应力测量结果报告	12

前 言

本文件按照GB/T 1.1—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》起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国内燃机学会标准管理部提出。

本文件由中国内燃机学会归口。

本文件起草单位：东风本田发动机有限公司、东风本田汽车有限公司、重庆赛力斯凤凰智创科技有限公司。

本文件主要起草人：张德仲、李金明、曾志彬、庄敏、郭腾、邵长松、邓诣桐、冯荣杰、张强、王锐、熊明友。

本文件于XXXX年首次发布。

发动机铝合金缸体残余应力测量与评价方法

1 范围

本文件规定了汽车用发动机铸造铝合金缸体的残余应力技术要求、试验方法、检验规则等各项技术要求。

本文件适用于装有铸铁缸套的汽车用发动机铸造铝合金缸体，通过采用全释放应变法对缸体的残余应力进行测量及评价。其他类似的内燃机金属缸体残余应力测量，可参考使用。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 13553 胶粘剂分类

GB/T 13992-2010 金属粘贴式电阻应变计

GB/T 31218 金属材料 残余应力测定 全释放应变法

GB 33372 胶粘剂挥发性有机化合物限量

JJG 623-2005 电阻应变仪

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

缸体 cylinder block

发动机的主要结构部件，用于容纳活塞、曲轴等部件，并为发动机运行提供必要的支撑和密封作用。

3.2

缸体残余应力 residual stress of cylinder block

在外部载荷和外加能量（如热能）完全移除后，仍然残留在缸体内部的内应力。这种应力是由于缸体在制造过程中（如铸造、热处理、机械加工等）引起的。其应力大小是影响发动机性能和寿命的重要因素。

注：基于缸孔间结构特性及测量准确性，缸孔间的变形通常使用应变值进行评价。缸套部和裙部的应力失效模式主要是疲劳裂纹扩展和塑性变形，通常使用应力值进行评价。

3.3

缸孔间残余应变 residual strain between cylinder bores

缸体在铸造完成但未实施热处理时，缸孔间部位铝合金材料产生的内部应变。通过对缸孔间残余应变的测量，可用于评估缸体的开裂风险，以确认铸造条件的妥当性。

3.4

缸套部残余应力 sleeve holding stress

缸体与缸套在铸造冷却凝固后,由于两者材料的热膨胀系数差异以及铸造工艺等因素,在缸体与缸套的接触面及附近区域产生的自相平衡的内应力。可用于评价加工完成品缸体缸孔周边的变形情况,评估缸套部残余应力是否满足设计要求。

3.5

裙部残余应力 skirt residual stress

龙门式结构的缸体经过热处理和机械加工后的加工完成品,其裙部通常用于支撑缸体并与其他部件(如曲轴箱、油底壳等)连接,裙部结构高度高、薄壁且结构复杂。在该区域产生自相平衡的内应力。通过对龙门式结构缸体裙部残余应力测试,可用于评估缸体裙部在使用过程的开裂风险。

4 技术要求

4.1 缸体试样的质量

发动机铝合金缸体材料力学性能、表面粗糙度、尺寸和公差等应符合企业缸体图纸要求。

4.2 缸体残余应力测量部位

缸体残余应力测量应至少包括以下三个部位的应力集中区域(见图1)。包括缸体的缸盖结合面顶部处缸孔间中心部位的残余应变、缸套部缸孔外周的残余应力以及缸体裙部的R角中部位置。其他部位存在异常或需要实施应力分析时,可根据实际情况增加测量点。



图1 缸体残余应力部位

4.3 缸体残余应力的设定基准

缸体残余应力的设定基准可参考表1进行设定,也可根据主机厂内部管理要求或图纸设定。

表1 文件中各要素的类别、构成及表述形式

类型	评价基准	备注
缸孔间残余应变	≤产品上限值	依据材料性能、缸体结构分析及试验验证分析综合考虑设定
缸套部残余应力	基准值± 15 MPa	
裙部残余应力	≤产品上限值	

5 试验方法

5.1 测量工具及辅件

缸体残余应力测量所用工具及辅件参见表2。

表2 残余应力测量用工具及辅件

序号	工具及辅件	备注
1	应变片	选用适用于铝合金材质的常温单向箔式应变片，电阻值为120Ω，灵敏系数为1.8~3.6（公差为±1%），应变片栅长选择1mm~6mm范围。导线长度应控制在3m以内。其他精度要求应至少满足GB/T 13992-2010 5.1条中技术指标C级以上规定。
2	数字应变采集仪	选用应变采集仪精度等级应满足JJG 623-2005 3.1.1条规定的精确度级别1.0级以上要求。
3	砂纸或砂轮	选用牌号范围为120#~180#
4	胶粘剂	选用GB/T 13553分类的氰基丙烯酸酯材料，满足GB 33372要求（安全和防护措施见附录A）
5	保护胶	选用AB胶（安全和防护措施见附录A）
6	直尺	量程范围在30cm以上
7	铅笔	—
8	油性笔	—
9	吸油纸 / 脱脂棉	—
10	工业酒精 / 脱脂清洗剂	—
11	塑料薄膜	—

5.2 测量方法

依据GB/T 31218的原理，在含有残余应力的缸体试样中实施全释放应变法切割缸体，其整体性经分割后原缸体试样的残余应变和应力发生变化，导致分割后的样块尺寸也发生相应变化，这种尺寸的变化量可由长度敏感的电阻应变片测量得出。由于缸体释放应变与应力关系始终满足虎克定律，通过相应公式可最终求出缸体各部位的残余应力大小。

5.3 试验环境

环境温度：（20±5）℃

相对湿度：70%以下

5.4 测量流程

缸体缸孔间残余应变、缸套部残余应力及缸体裙部残余应力的测量流程参照图2流程实施。

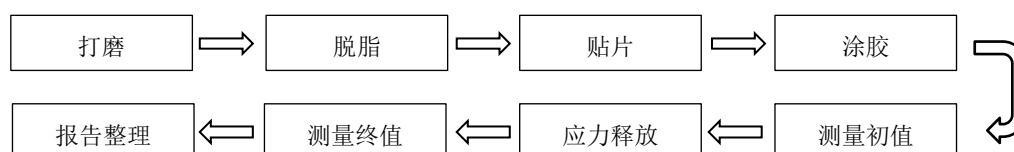


图2 缸体残余应力测量流程

5.5 缸孔间残余应变测量

5.5.1 缸体试样的要求

用于实施缸孔间残余应变测量的缸体试样要求见表3。

表 3 缸体试样要求

制造条件	缸体模具温度状态	热处理	机械加工
缸体试样状态	选取铸造初始合格品	不实施热处理	不实施机械加工

5.5.2 缸体的缸盖结合面处理要求

若被测缸体的缸盖结合面处的缸套端面被铝合金材料覆盖，粘贴应变片前应通过机械加工方法对缸体的缸盖结合面进行一定厚度的去除，使缸套端面露出表面（见图3），以便确定应变片的粘贴位置。具体去除厚度，根据生产厂缸体毛坯图纸确定。

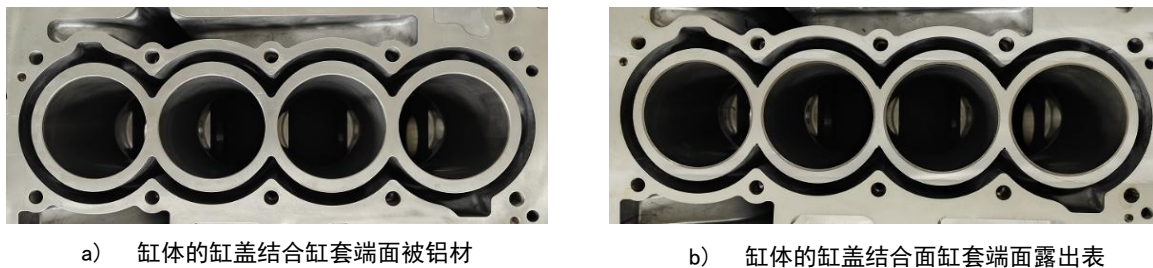


图 3 缸盖结合面的缸套部状态

5.5.3 应变片粘贴方法

按照图4在缸体的缸盖结合面处缸孔间的薄壁中心部位各粘贴1片应变片测量缸孔间的应变，应变片粘贴数量根据缸体的气缸数设定。

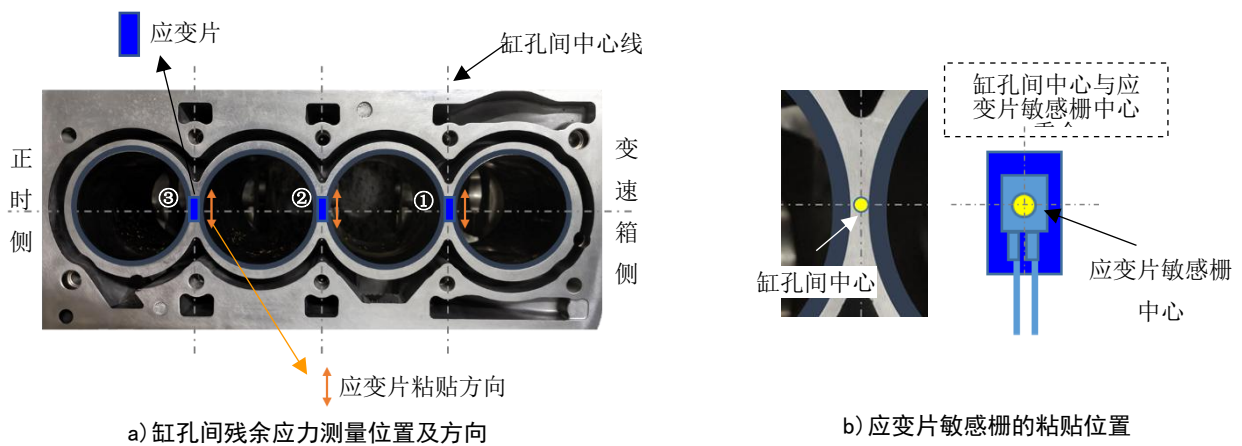


图 4 缸孔间应变测量应变片的粘贴方法

应变片的粘贴步骤如下。

步骤1: 实施试样表面处理——用砂纸或电动砂轮对试样粘贴表面进行打磨, 打磨区域大于应变片粘贴区域, 打磨方向与粘贴方向成 45° 交叉纹, 在粘贴位置做记号标记。打磨后不应出现试样表面凹陷的情况, 表面粗糙度 R_a 约为 $1.6\ \mu\text{m}$ ~ $2.5\ \mu\text{m}$ 。

步骤2: 清洁试样表面——用脱脂棉粘上酒精将试样粘贴位置的污迹擦拭至完全清除。

步骤3: 涂胶粘剂——在应变片的粘贴面滴1滴胶粘剂, 并涂覆均匀。

步骤4: 粘贴应变片——将应变片放置缸体测量粘贴位置, 拇指通过塑料薄膜用 $0.1\ \text{MPa}$ ~ $0.2\ \text{MPa}$ 压力快速按压应变片 30s ~ 60s 固定, 过程确保应变片与试样表面完全贴合, 且不能与缸套材料端面接触。

步骤5: 去除多余胶粘剂——取下塑料薄膜, 去除应变片周围多余的胶粘剂。

步骤6: 涂保护胶——按AB胶的说明书比例混合, 用镊子提取适量的保护胶涂覆在应变片表面, AB胶厚度为 $0.5\ \text{mm}$ ~ $1\ \text{mm}$, 应变片外周AB胶不能与缸套端面接触, 保护胶固化时间应在12小时以上。

步骤7: 静置结束后使用数字应变采集仪进行接线, 测量应变初值并记录数据。

5.5.4 全释放加工方法

实施缸孔间残余应变的全释放加工, 通过镗孔的加工方法去除缸体试样中的缸套铸铁材料(见图5)。加工工艺工况为转速 $250\ \text{r}/\text{min}$ ~ $350\ \text{r}/\text{min}$, 进给量 $20\ \text{mm}/\text{min}$ ~ $30\ \text{mm}/\text{min}$ 。加工过程不应接触到应变片及其引线。完成加工后应做好缸体试样表面飞溅材料的清理。去除缸套材料后再次测量缸体试样的应变片应变值并记录数据。

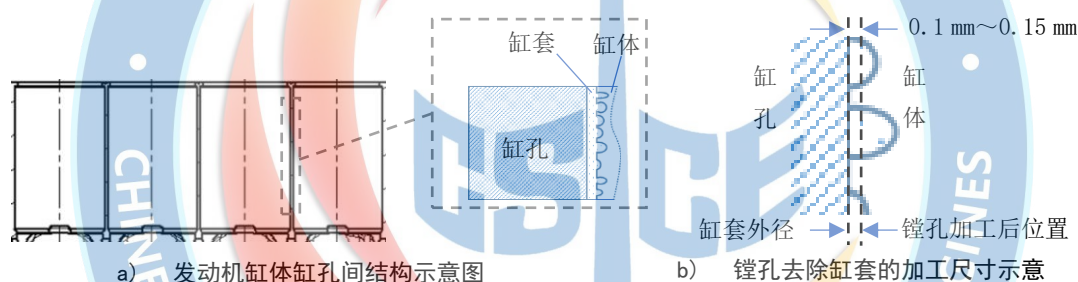


图5 全释放加工去除缸套

5.6 缸套部残余应力测量

5.6.1 缸体试样的要求

用于实施缸套部残余应力测量的缸体试样要求见表4。

表4 缸体试样要求

制造条件	热处理	机械加工
缸体试样状态	实施热处理后(免热处理铝合金材除外)	实施机械加工后

5.6.2 应变片粘贴方法

缸套部残余应力测量位置及方向(见图6), 缸孔外周和缸孔间各粘贴1片应变片, 应变片粘贴方法与5.5.3条相同。应变片粘贴数量根据缸体的气缸数设定。

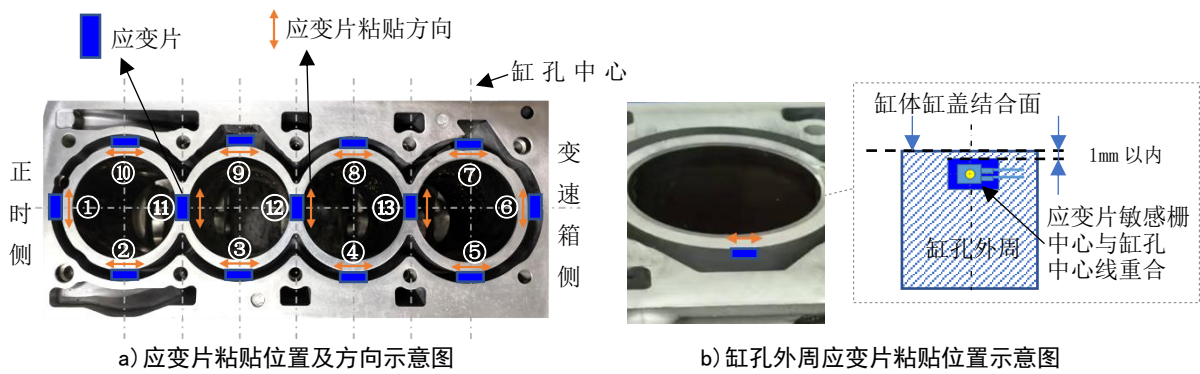


图6 缸套部残余应力测量应变片的测量位置及方

5.6.3 全释放加工方法

按照5.5.4条方法实施缸套部残余应力全释放加工,做好应变片和引线的防护及缸体试样表面清理。去除缸套材料后再次测量缸体试样的应变片应变值并记录数据。

5.7 裙部残余应力测量

5.7.1 缸体试样的要求

用于实施裙部残余应力测量的缸体试样要求见表5。

表5 缸体试样要求

制造条件	热处理	机械加工
缸体试样状态	实施热处理后(免热处理铝合金材除外)	实施机械加工后

5.7.2 应变片粘贴方法

裙部残余应力测量位置及方向(见图7),每个裙部R角中部位位置粘贴3片应变片。应变片粘贴方法同5.5.3条。应变片粘贴数量根据缸体的气缸数和裙部结构设定。

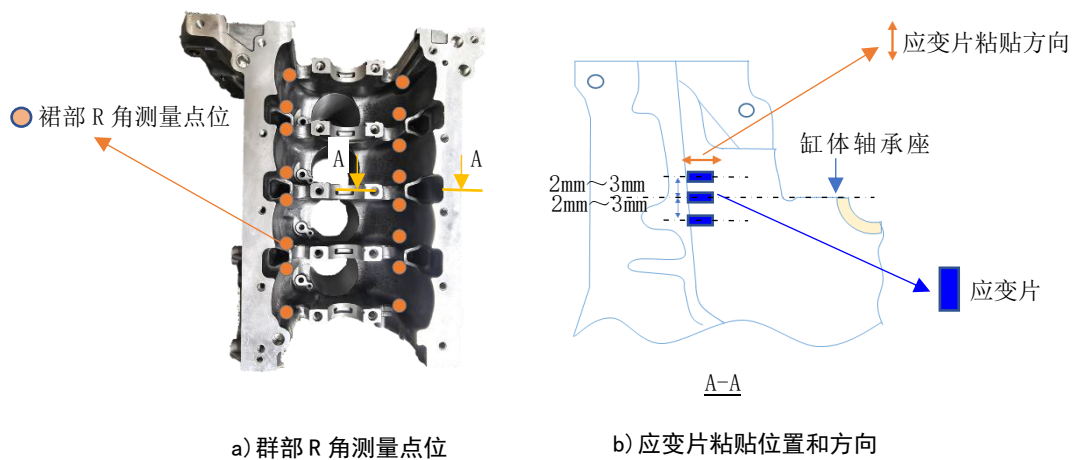


图7 裙部残余应力测量应变片的测量位

5.7.3 全释放加工方法

裙部残余应力的全释放加工，可通过锯床按相应步骤及要求实施，并做好应变片和引线的防护及缸体试样表面清理。锯床锯片厚度不大于2 mm，加工完成后再次测量样块的应变片应变值并记录数据。裙部残余应力全释放加工步骤如下：

步骤一：分别按顺序对正各切割线，从缸体油底壳安装面垂直切入，切入深度根据产品尺寸设定，不少于轴承座面最低处以下10 mm（见图8）。

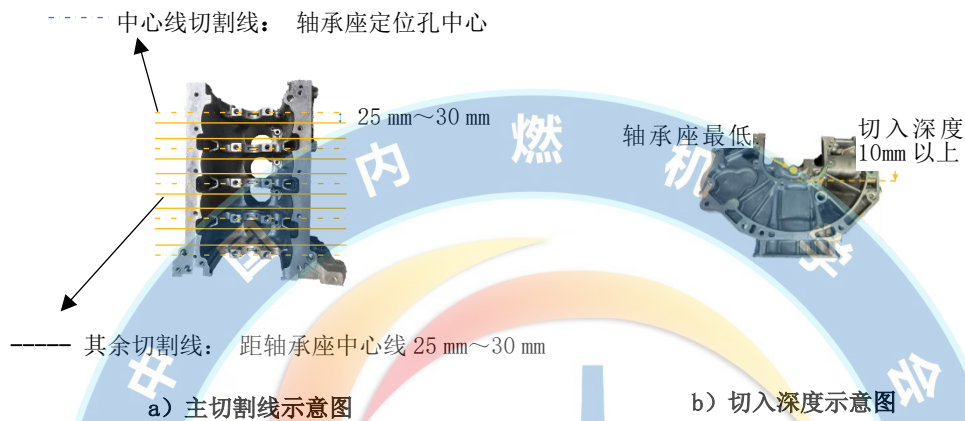


图 8 步骤一全释放示意图

步骤二：按图9中2条切割线从缸体油底壳安装面垂直切入，切入深度根据产品尺寸设定，不少于轴承座面最低处以下10 mm。



图 9 步骤二全释放示意图

步骤三：按图 10 示意方法，从变速箱结合面垂直切入，一直切割至正时面。

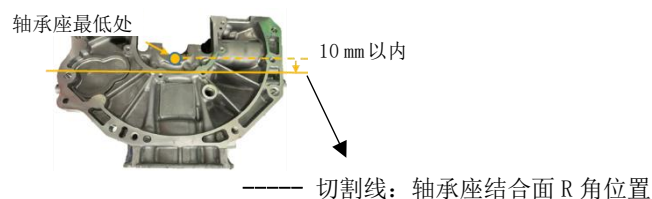


图 10 步骤三全释放示意图

5.8 注意事项及异常情况处理

应变片粘贴过程应做好应变片检查及防护，及时查看应变片的敏感栅、基底、覆盖层、引出线是否异常，粘贴后有无松脱。如应变片外观出现异常、发生粘贴松脱或读数波动大等情况时，需去除并重新布置。

全释放加工过程中如发生加工到应变片情况或测量过程发生数据异常现象，应剔除该组数据。根据实施情况，去除应变片重新布置或重新准备样件测量该部位的残余应力。

5.9 测量质量控制要求

残余应力测量评价需要至少包括3组同批次的缸体试验。每个试样在读取初值平衡值时应进行2次以上读数，2次的间隔时间不少于30 min，如2次初值读数相差大于 $50 \mu \epsilon$ ，应间隔相同时间再次读数，如仍然大于 $50 \mu \epsilon$ 则重新贴片。

数字应变采集仪应每年实施校准检验，校验结果应满足设备说明书的精度等级。

应变片应具有相应的精度校准证书，精度应在GB/T 13992-2010 中第5.1款中技术指标C级以上并在产品说明书规定的条件下贮存。

胶粘剂和保护胶的管理应按照产品说明书的条件进行贮存。使用前应确认是否在保质期内。

6 残余应变和应力的计算

根据GB/T 31218 的要求，依据虎克定律，残余应变和应力的计算方法如下。

6.1 残余应变结果计算

$$\Delta \epsilon = \epsilon_1 - \epsilon_2 \dots \dots \dots (1)$$

式中：

$\Delta \epsilon$ ——测量部位释放的应变；

ϵ_1 ——应变片初始读数（初值）；

ϵ_2 ——缸体全释放加工后应变片读数（终值）。

6.2 残余应力结果计算

$$\sigma = \Delta \epsilon \times E \dots \dots \dots (2)$$

式中：

σ ——测量部位的残余应力，单位为兆帕(MPa)；

E ——缸体铝合金材料的弹性模量，单位为吉帕(GPa)。

6.3 数据处理

缸体残余应变和应力的测量数据处理过程应按照以下方式进行处理。

6.3.1 缸孔间残余应变数据处理

缸孔间残余应变数据处理，如表6所示。

表6 缸体试样要求

测量部位		初值 (ε_1) $\mu\varepsilon$	释放后 (ε_2) $\mu\varepsilon$	残余应变 $\Delta\varepsilon$ $\mu\varepsilon$
缸孔间	1			
	2			
	3			
注：分别评价缸孔间3个测量部位结果是否满足设计值范围要求。				

6.3.2 缸套部残余应力数据处理

缸套部残余应力数据处理，如表7所示。

表7 缸套部残余应力记录表

测量部位	初值 ε_1 $\mu\varepsilon$	释放后 ε_2 $\mu\varepsilon$	残余应变 $\Delta\varepsilon$ $\mu\varepsilon$	残余应力 σ MPa	残余应力平均值 ($\bar{\sigma}_{\text{间}}$ 或 $\bar{\sigma}_{\text{外}}$) MPa	缸套部残余应力 ($\bar{\sigma}_{\text{间}} - \bar{\sigma}_{\text{外}}$) MPa
缸套外周 $\sigma_{\text{外}}$	1					
	2					
	3					
	4					
	5					
缸套外周 $\sigma_{\text{外}}$	6					
	7					
	8					
	9					
	10					
缸孔间 $\sigma_{\text{间}}$	11					
	12					
	13					
注：评价缸套部残余应力 ($\bar{\sigma}_{\text{间}} - \bar{\sigma}_{\text{外}}$) 是否满足设计值范围要求。						

6.3.3 裙部残余应力数据处理

裙部残余应力数据处理，如表8所示。

表 8 裙部残余应力记录表

测量部位	初值 ε_1 $\mu\varepsilon$	释放后 ε_2 $\mu\varepsilon$	残余应变 $\Delta\varepsilon$ $\mu\varepsilon$	残余应力 σ MPa	各部位 σ_{max} MPa
1-①					
1-②					
1-③					
.....					
.....					
.....					
16-①					
16-②					
16-③					
注： σ_{max} 为各个裙部R角中部位位置的最大应力值，分别评价各部位 σ_{max} 是否满足设计值范围要求。					

7 测量结果报告

缸体残余应力测量所需项目完成后，按照附录B出具检查结果报告。按4.3条要求进行合格评定。所有项目均合格，结论为合格；出现1项及以上不合格，结论为不合格。

8 校验规则

涉及以下条件之一时，应实施检测或试验验证：

- a) 新产品导入生产时；
- b) 铝合金材料或缸套材料发生变更时；
- c) 铸造设备或热处理设备新导入时；
- d) 热处理条件发生变更时；
- e) 缸体生产地发生变更时；
- f) 产品出现开裂等异常情况发生时；
- g) 需结构设计或工艺设计摸底时。

附录 A
(规范性)
安全和防护措施

- A.1 本试验中使用的胶粘剂及保护胶具有一定的危险性，试验室应制定有关的安全操作规程，采取有效的安全措施，避免造成人体伤害和设备的损坏。
- A.2 试验操作人员要经过专门培训。要掌握有关工具的使用方法，具备及时发现和处理试验过程中突发事件的能力。
- A.3 试验过程中应全程佩戴劳保用品，避免胶粘剂及保护胶直接与皮肤接触。



附录 B

(资料性)

缸体残余应力测量结果报告

本附录提供了缸体残余应力的测量结果报告，其中表B.1用于登记试验基本信息，表B.2则系统记录各部位残余应变及应力测量结果，并与设计指标进行对比与评价。

表 B.1 试验基本信息

试验单位:	委托单位:	试验日期:
试验设备:	试验编号:	样品编号:
应变片规格:	铝材弹性模量 (GPa):	签字盖章:

表 B.2 试验结果

试验项目	缸孔间残余应变			评价结果 (OK/NG)
序号	设计值	公差范围	试验样件测量结果(ε)	
1				
2				
3				
试验项目	缸套部残余应力 MPa			评价结果 (OK/NG)
序号	设计值	公差范围	试验样件测量结果 ($\bar{\sigma}_{\text{间}} - \bar{\sigma}_{\text{外}}$)	
1				
试验项目	裙部残余应力 MPa			评价结果 (OK/NG)
序号	设计值	公差范围	试验样件测量结果	
1				
2				
3				
4				
5				
6				
.....				
结论:				

