



中华人民共和国国家标准

GB/T 21239—2022

代替 GB/T 21239—2007

纤维增强塑料层合板 冲击后压缩性能试验方法

Test method for compression after impact
properties of fiber reinforced plastic laminates

2022-10-12 发布

2023-02-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语、定义和符号	1
4 方法原理	1
5 试样	2
6 试验条件	4
7 试验设备	4
8 试验步骤	5
9 结果计算	6
10 试验报告	7
附录 A (资料性) 条件冲击能量确定方法	8
附录 B (资料性) 冲击试验支撑夹具	10
附录 C (资料性) 冲击后压缩试验夹具	11

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》的规定起草。

本文件代替 GB/T 21239—2007《纤维增强塑料层合板冲击后压缩性能试验方法》，与 GB/T 21239—2007 相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- a) 增加了“冲击后有效压缩模量”和“冲击后极限压缩应变”的内容和计算方法（见第 1 章、9.2 和 9.3）；
- b) 增加了“条件冲击能量”和“冲击能量截止值”两个定义（见第 3 章）；
- c) 增加了仲裁试样厚度（见 5.2）；
- d) 更改了层合板的其他铺层方式（见 5.3.3，2007 年版的 5.3.3）；
- e) 增加了层合板无损检测要求（见 5.4）；
- f) 增加了“条件冲击能量”的内容（见 6.2.2）；
- g) 增加了千分尺、卡尺和深度计三种测具的规定（见 7.2.2~7.2.4）；
- h) 增加了冲击损伤尺寸过大时的规定（见 8.5）；
- i) 增加了试样与压缩夹具装配的规定（见 8.7）；
- j) 增加了试样安装保证对中的要求（见 8.8）；
- k) 增加了施加初载，卸载及应变仪清零和平衡的规定（见 8.9）；
- l) 增加了固定侧向板和滑动板的规定（见 8.10）；
- m) 更改了检查四个应变计应变值的操作（见 8.11，2007 年版的 8.7）；
- n) 增加了“试验有效性判断方法”（见 8.13）。

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。

本文件由中国建筑材料联合会提出。

本文件由全国纤维增强塑料标准化技术委员会（SAC/TC 39）归口。

本文件起草单位：中国航发北京航空材料研究院、威海光威复合材料股份有限公司、航空工业第一飞机设计研究院、北京玻璃钢研究设计院有限公司。

本文件主要起草人：陈新文、王海鹏、李丰选、王翔、马丽婷、王莉、王雅娜、邓立伟、杨洋、王占东、张琴、田焱暉。

本文件于 2007 年首次发布，本次为第一次修订。

纤维增强塑料层合板 冲击后压缩性能试验方法

1 范围

本文件规定了纤维增强塑料层合板冲击后压缩性能试验的方法原理、试样、试验条件、试验设备、试验步骤、结果计算和试验报告。

本文件适用于具有均衡对称铺层的连续纤维增强塑料层合板的冲击后压缩强度、冲击后有效压缩模量和冲击后极限压缩应变的测定。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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 1446 纤维增强塑料性能试验方法总则

GB/T 3961 纤维增强塑料术语

3 术语、定义和符号

3.1 术语和定义

GB/T 3961 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

固化后单层名义厚度 **nominal cured ply thickness**

通过计算得到的纤维增强塑料层合板的单层厚度。

3.1.2

条件冲击能量 **specified impact energy**

材料达到指定深度的凹坑所需的冲击能量。

3.1.3

冲击能量截止值 **impact energy threshold**

根据材料使用工况确定的最大冲击能量值。

3.2 符号

下列符号适用于本文件。

i, j, k ——纤维增强塑料层合板中某一单层重复连续铺贴的次数；

n ——纤维增强塑料层合板铺设对称面一侧铺贴单元的重复次数；

S ——对称层合板，纤维增强塑料铺贴单元重复铺贴 n 次后，再进行对称铺贴。

4 方法原理

试样沿厚度方向在试样中心受到一定能量的冲击后，对试样沿长度方向施加压缩载荷，直到试样

失效。

5 试样

5.1 试样形状及尺寸

试样形状及长、宽尺寸见图1。除非另有规定,试样长、宽尺寸公差为 ± 0.25 mm。

单位为毫米

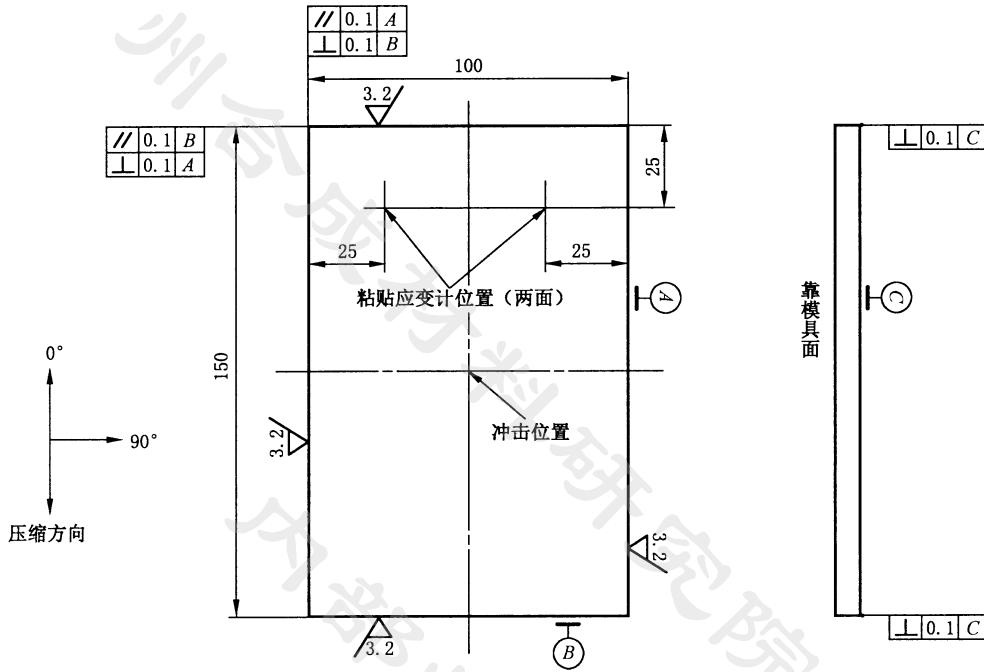


图1 冲击后压缩试样

5.2 试样厚度

试样厚度范围为4.0 mm~6.0 mm,仲裁试样厚度为5.0 mm。

5.3 层合板的铺层方式

5.3.1 单向预浸料层合板

铺层顺序为 $[45/0/-45/90]_n$,其中 n 为整数。如果预计的厚度值小于4.0 mm,则 n 值应变为 $n+1$ 。针对不同的固化后单层名义厚度推荐了层合板的铺层方式,见表1。层合板的 0° 纤维方向与试样长度方向一致。

表 1 对不同的固化后单层名义厚度推荐的单向预浸带层合板铺层方式

固化后单层名义厚度/mm		层数	铺层
最小值	最大值		
0.085	0.10	48	[45/0/-45/90] _{6S}
0.10	0.13	40	[45/0/-45/90] _{5S}
0.13	0.18	32	[45/0/-45/90] _{4S}
0.18	0.25	24	[45/0/-45/90] _{3S}
0.25	0.50	16	[45/0/-45/90] _{2S}
0.50	0.75	8	[45/0/-45/90] _S

5.3.2 织物预浸料层合板

铺层顺序为 $[(+45/-45)/(0/90)]_{nS}$,其中 n 为整数。如果预计的厚度小于4.0 mm,则 n 值应变为 $n+1$ 。记号 $(+45/-45)$ 和 $(0/90)$ 表示织物单层。缎纹织物增强的层合板应具有对称的经向表面。针对不同的固化后单层名义厚度推荐了层合板的铺层方式,见表2。层合板的 0° 纤维方向与试样长度方向一致。

表 2 对不同的固化后单层名义厚度推荐的织物预浸料层合板铺层方式

固化后单层名义厚度/mm		层数	铺层
最小值	最大值		
0.085	0.10	48	$[(+45/-45)/(0/90)]_{12S}$
0.10	0.13	40	$[(+45/-45)/(0/90)]_{10S}$
0.13	0.15	32	$[(+45/-45)/(0/90)]_{8S}$
0.15	0.18	28	$[(+45/-45)/(0/90)]_{7S}$
0.18	0.20	24	$[(+45/-45)/(0/90)]_{6S}$
0.20	0.25	20	$[(+45/-45)/(0/90)]_{5S}$
0.25	0.36	16	$[(+45/-45)/(0/90)]_{4S}$
0.36	0.50	12	$[(+45/-45)/(0/90)]_{3S}$
0.50	1.00	8	$[(+45/-45)/(0/90)]_{2S}$
1.00	1.50	4	$[(+45/-45)/(0/90)]_S$

5.3.3 其他铺层方式

层合板应有多个纤维方向(对于单向预浸料层合板纤维方向至少为3个,对织物预浸料层合板至少2个铺层方向),具有均衡对称的铺层,单向预浸料层合板铺层方式一般为 $[45_i/0_i/-45_j/90_k]_{nS}$,织物预浸料层合板铺层方式一般为 $[(+45/-45)_i/(0/90)_j]_{nS}$,使得纤维在4个主方向上每个方向的分布不少于5%。当考察结构的损伤容限性能时,应采用与结构铺层方式相同的典型铺层层合板进行试验。

5.4 试样制备

层合板制备按照 GB/T 1446 的规定,若需要可用无损检测方法对层合板的内部质量进行检测。

5.5 试样数量

每组有效试样应不少于 5 个。

6 试验条件

6.1 试验环境

室温试验应在标准实验室条件[温度:(23±2)℃,相对湿度:(50±10)%]下进行。

6.2 冲击能量

6.2.1 推荐冲击能量

推荐冲击能量按照公式(1)进行计算。

$$E_r = C_E \cdot h \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

E_r —— 推荐冲击能量,单位为焦耳(J);

C_E —— 单位厚度的冲击能量,取 6.7 J/mm;

h —— 试样厚度,单位为毫米(mm)。

6.2.2 条件冲击能量

可通过升降法确定条件冲击能量(见附录 A)。

6.3 压缩加载速度

压缩加载速度为(1.25±0.5)mm/min。

7 试验设备

7.1 落锤冲击试验装置

7.1.1 落锤总质量为(5.5±0.25)kg,应带有直径为(16±0.1)mm、洛氏硬度为 60 HRC~62 HRC 的半球形光滑冲击头。如果试验使用了不同的冲击头,则应记录其形状、尺寸和质量。

7.1.2 落锤冲击头应有导向装置,冲击点的重复性偏差应不大于 3 mm。

7.1.3 试验装置应有防止二次冲击的装置。如果没有防二次冲击的装置,可以在冲击头离开试样表面反弹后,用一片刚性材料(木头、金属等)插到冲击头和试样之间,以防止二次冲击。

7.1.4 落锤高度可调,高度标尺分度值为 0.5 mm。

7.2 材料试验机和测具

7.2.1 试验机和测试仪表应符合 GB/T 1446 的规定。

7.2.2 千分尺:两个接触面均为光滑平面的千分尺用以测量两个表面均光滑的试样的厚度;一个接触面为光滑平面,另一个接触面为直径 4 mm~7 mm 半球形的千分尺,用以测量一个表面光滑另一个表面粗糙的试样的厚度,千分尺半球形接触面与试样粗糙平面接触。千分尺的分度值应符合 GB/T 1446 的规定。

7.2.3 卡尺:用以测量试样长度和宽度,分度值应符合 GB/T 1446 的规定。

7.2.4 深度计:用于测量冲击凹坑的深度,深度计的探头为半球形,半径不大于 8 mm,测量误差不大于 0.01 mm。

7.3 冲击试验支撑夹具

冲击试验支撑夹具上下表面的平行度应能够保证试样在受冲击位置水平放置。导向销应保证试样中心受到冲击。铰接夹及其橡皮头在试样受到冲击过程中能够压紧试样。冲击试验支撑夹具见附录 B。

7.4 冲击后压缩试验夹具

冲击后压缩试验夹具应有足够的刚度和尺寸精度,以保证试样均匀受压,并且不会发生弯曲。冲击后压缩试验夹具见附录 C。

8 试验步骤

8.1 按照 GB/T 1446 的规定检查试样外观。

8.2 按照 GB/T 1446 的规定对试样进行状态调节,非标准实验室条件的试样状态调节应在报告中注明。

8.3 用千分尺测量试样中心点(冲击点)四周四点的厚度,取平均值;用卡尺测量试样宽度,取平均值。

8.4 按照第 6 章的规定计算对试样中心施加的冲击能量,将试样放在冲击试验支撑夹具上,使冲击头对准试样中心,试样的 4 个角压头处垫上硬橡胶并固紧。冲击高度按照公式(2)进行计算,冲击高度应至少为 300 mm,若计算的冲击高度不足 300 mm,应更换质量为 (2.0 ± 0.25) kg 而其他条件不变的冲击头。按照计算的冲击高度对试样进行冲击试验。

$$H = \frac{E}{m \cdot g} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

H —— 冲击高度,单位为米(m);

E —— 冲击能量(推荐冲击能量或条件冲击能量),单位为焦耳(J);

m —— 落锤质量,单位为千克(kg);

g —— 重力加速度, 9.81 m/s^2 。

8.5 测量并记录试样的冲击表面和背面损伤状况,包括冲击坑尺寸和背面的裂纹形状、尺寸。若需要可用无损检测方法测量和记录分层面积。宽度方向损伤尺寸不应超过试样宽度无支撑部分的一半(本方法为 37.5 mm),若损伤尺寸超过 37.5 mm,应选择 180 mm×300 mm 试样进行冲击,然后再加工成 130 mm×250 mm 的试样进行压缩试验。冲击试验支撑夹具无支撑部分的尺寸如图 B.1 所示。

8.6 按照图 1 所示在试样正反面对应位置粘贴轴向应变计。

8.7 将试样安装在压缩试验夹具(如图 C.1 所示)中,使角板(如图 C.2 和图 C.5 所示)和试样的间隙在 0.8 mm~1.5 mm 之间。以 7 N·m 扭矩拧紧螺栓以固定角板和底板(如图 C.2 和图 C.4 所示),其他夹具组件靠紧试样,用手拧紧螺栓固定,并用塞尺检查侧向板和滑动板(如图 C.6 和图 C.7 所示)与试样的间隙小于 0.05 mm。

8.8 将安装好试样的夹具放置于试验机的压盘之间,保证试样对中。

8.9 施加 450 N 的初载,确保夹具与压盘接触且对中后,卸载至 150 N,将应变仪清零和平衡。

8.10 以 7 N·m 扭矩拧紧螺栓以固定侧向板和滑动板。

8.11 施加压缩载荷至预估破坏载荷的 10%,再卸载至 150 N。检查记录 4 个应变计的应变值,按照公式(3)计算试样的弯曲百分比。

$$B_y = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中：

B_y —— 弯曲百分比；

ϵ_1 —— 受冲击面上两个应变计的指示应变的平均值，单位为毫米/毫米(mm/mm)；

ϵ_2 —— 背面两个应变计的指示应变的平均值，单位为毫米/毫米(mm/mm)。

弯曲百分比的正负号表明了试样弯曲的方向。试样两表面应变计读数快速偏离或弯曲百分比迅速增大预示了层合板开始失稳，如果出现其中任何一种情况，或者弯曲百分比超过 10%，应检查夹具、试样和压盘是否存在间隙、紧固件松动或压盘不对中等问题，并予以消除。

8.12 按照规定的速度对试样加载至载荷最大值，并且载荷掉落至距最大值 30%时，停止试验，以防止真实的破坏模式被大范围的畸变所掩盖，同时也防止损坏支撑夹具。记录试验过程中的时间、载荷、应变(位移)和每件试样的失效模式等。

8.13 试验有效性判断方法如下：

- a) 破坏发生在明显缺陷处的试验结果无效；
- b) 因试样端面压溃而导致失效的试验结果无效，若试样端面有压溃现象，但中途停止，最终破坏发生在试样工作段内，则试验结果有效；
- c) 试样发生失稳或者弯曲百分比超过 10%则试验结果无效：若在有效压缩模量取值应变范围的中点处(本方法为 2 000 微应变)的弯曲百分比超过 10%则有效压缩模量结果无效，若在最大载荷处的弯曲百分比超过 10%则冲击后压缩强度和冲击后极限压缩应变无效；
- d) 试样的分层扩展受到试样边缘支撑夹具的约束时会产生冗余载荷，该种情况下试验结果无效；
- e) 试样发生穿过损伤区的破坏，则试验结果有效；
- f) 试样破坏区域不在损伤区，但在工作段内，试验结果为有效。

9 结果计算

9.1 冲击后压缩强度按照公式(4)计算。

$$\sigma_{CAI} = \frac{P_m}{b \cdot h} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

σ_{CAI} —— 冲击后压缩强度，单位为兆帕(MPa)；

P_m —— 最大压缩载荷，单位为牛顿(N)；

b —— 试样宽度，单位为毫米(mm)；

h —— 试样厚度，单位为毫米(mm)。

9.2 冲击后有效压缩模量按照公式(5)计算。

$$E_{CAI} = \frac{P_{3\,000} - P_{1\,000}}{(\epsilon_{3\,000} - \epsilon_{1\,000}) \cdot b \cdot h} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

E_{CAI} —— 冲击后有效压缩模量，单位为兆帕(MPa)；

$P_{3\,000}$ —— 对应 $\epsilon_{3\,000}$ 的载荷值，单位为牛顿(N)；

$P_{1\,000}$ —— 对应 $\epsilon_{1\,000}$ 的载荷值，单位为牛顿(N)；

$\epsilon_{3\,000}$ —— 接近 3 000 微应变记录的应变值，单位为毫米/毫米(mm/mm)；

$\epsilon_{1\,000}$ —— 接近 1 000 微应变记录的应变值，单位为毫米/毫米(mm/mm)。

注：应变仪按照一定的采样频率采集并记录应变数据，但不一定正好采集到 3 000 微应变和 1 000 微应变的数据，因此上文采用“接近”的说法，当 1 000 微应变~3 000 微应变之间应力-应变线性不是最优时，可更改应变范围。

9.3 冲击后极限压缩应变按照公式(6)计算。

$$\epsilon_{CAI} = \frac{\overline{\epsilon_1} + \overline{\epsilon_2}}{2} \dots\dots\dots(6)$$

式中：

ϵ_{CAI} ——冲击后极限压缩应变为冲击后压缩强度对应的应变值,单位为毫米/毫米(mm/mm);

$\overline{\epsilon_1}$ ——冲击后压缩强度的试样受冲击面上两个应变计的平均值,单位为毫米/毫米(mm/mm);

$\overline{\epsilon_2}$ ——冲击后压缩强度的试样背面上两个应变计的平均值,单位为毫米/毫米(mm/mm)。

9.4 按照 GB/T 1446 的规定计算平均值、标准差和离散系数。

10 试验报告

试验报告应包括下列部分或全部内容：

- a) 试验项目名称和本文件编号；
- b) 材料牌号、规格、铺层方式和纤维体积含量；
- c) 材料来源；
- d) 试样编号、尺寸和数量；
- e) 试验温度和相对湿度；
- f) 试验设备；
- g) 冲击头尺寸和质量、冲击能量；
- h) 试验结果单个值、平均值和标准差；
- i) 试验人员和日期；
- j) 其他。

附录 A

(资料性)

条件冲击能量确定方法

A.1 条件冲击能量确定原理

条件冲击能量可通过升降法确定：用预估的能产生指定凹坑深度的能量冲击第一根试样，用深度计测量凹坑深度，在凹坑范围内移动深度计探针，记录最大深度值作为凹坑深度；若凹坑深度小于指定深度，则增加一级冲击能量进行第二根试样冲击试验；若第一根试样凹坑深度大于指定深度，则降低一级冲击能量进行第二根试样冲击试验；依次类推，第三根及以后试样冲击能量升或降的选择均由上一根试样试验结果确定。各级冲击能量之间的级差应相等，推荐为预期条件冲击能量的 5%。最终应至少出现 5 组冲击能量结果（紧邻的冲击能量间超过指定凹坑深度的能量和达不到指定凹坑深度的能量为一组，一组的两次冲击试验不一定紧邻）。

条件冲击能量按照公式(A.1)~公式(A.3)进行计算。

$$E_s = \frac{1}{N} \sum (n_i \cdot E_{mi}) \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

$$N = \sum (n_i) \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

$$E_{mi} = \frac{1}{2} (E_i + E_{i+1}) \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

式中：

- E_s —— 条件冲击能量，单位为焦耳(J)；
- N —— 冲击能量组数量；
- n_i —— 第 i 个冲击能量组数量；
- E_{mi} —— 第 i 个冲击能量组的平均能量值，单位为焦耳(J)；
- E_i 、 E_{i+1} —— 冲击能量组对应的两个相邻的冲击能量，单位为焦耳(J)。

若超过冲击能量截止值获得的凹坑深度仍小于指定深度，则将冲击能量截止值作为条件冲击能量。

A.2 示例

航空行业将 1 mm 凹坑对应的冲击后压缩性能作为考察复合材料损伤容限性能的重要指标，下面举例说明 1 mm 凹坑对应的条件冲击能量的确定方法。假定某复合材料 1 mm 凹坑对应冲击能量为 33 J，从 33 J 开始冲击试验，采用升降法摸索对复合材料产生 1 mm 凹坑的条件冲击能量，根据 A.1 规定按照 33 J 的 5% 即 1.65 J 作为能量级差开展升降法试验，确定条件冲击能量的试验结果见表 A.1。

表 A.1 某复合材料确定条件冲击能量(1 mm 凹坑)试验结果

试样编号	冲击能量/J	凹坑深度/mm	凹坑深度状态
1	33.00	0.98	○
2	34.65	1.20	×
3	33.00	0.80	○

表 A.1 某复合材料确定条件冲击能量(1 mm 凹坑)试验结果(续)

试样编号	冲击能量/J	凹坑深度/mm	凹坑深度状态
4	34.65	0.90	○
5	36.30	1.13	×
6	34.65	1.20	×
7	33.00	0.70	○
8	34.65	0.85	○
9	36.30	1.13	×
10	34.65	1.08	×

注：“○”表示凹坑深度不足 1 mm，“×”表示凹坑深度超出 1 mm。

将表 A.1 能量值以凹坑深度状态符号在以能量为纵坐标的图上绘出,并使各符号在横坐标方向等间距展开,如图 A.1 所示为表 A.1 试验结果的升降图。

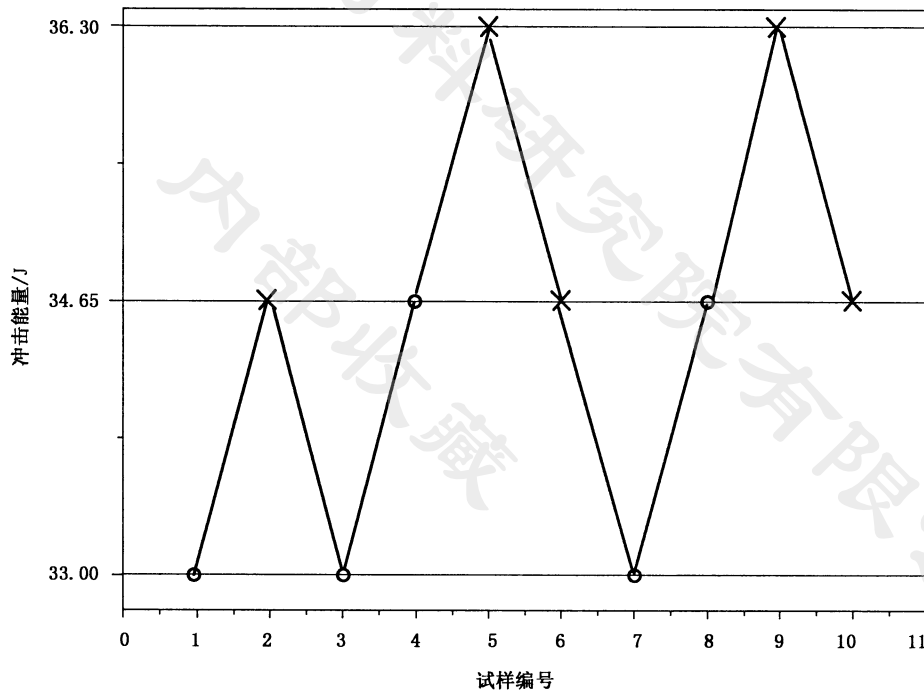


图 A.1 升降法确定冲击能量组和条件冲击能量

由图 A.1 可见有两种冲击能量组,分别如下:

$$\text{冲击能量组 1 平均能量} = (33.0 \text{ J} + 34.65 \text{ J}) / 2 = 33.825 \text{ J}$$

$$\text{冲击能量组 2 平均能量} = (34.65 \text{ J} + 36.3 \text{ J}) / 2 = 35.475 \text{ J}$$

冲击能量组 1 出现 3 次,冲击能量组 2 出现 2 次,总共有 5 个冲击能量组,经过加权平均获得统计上最终的条件冲击能量:

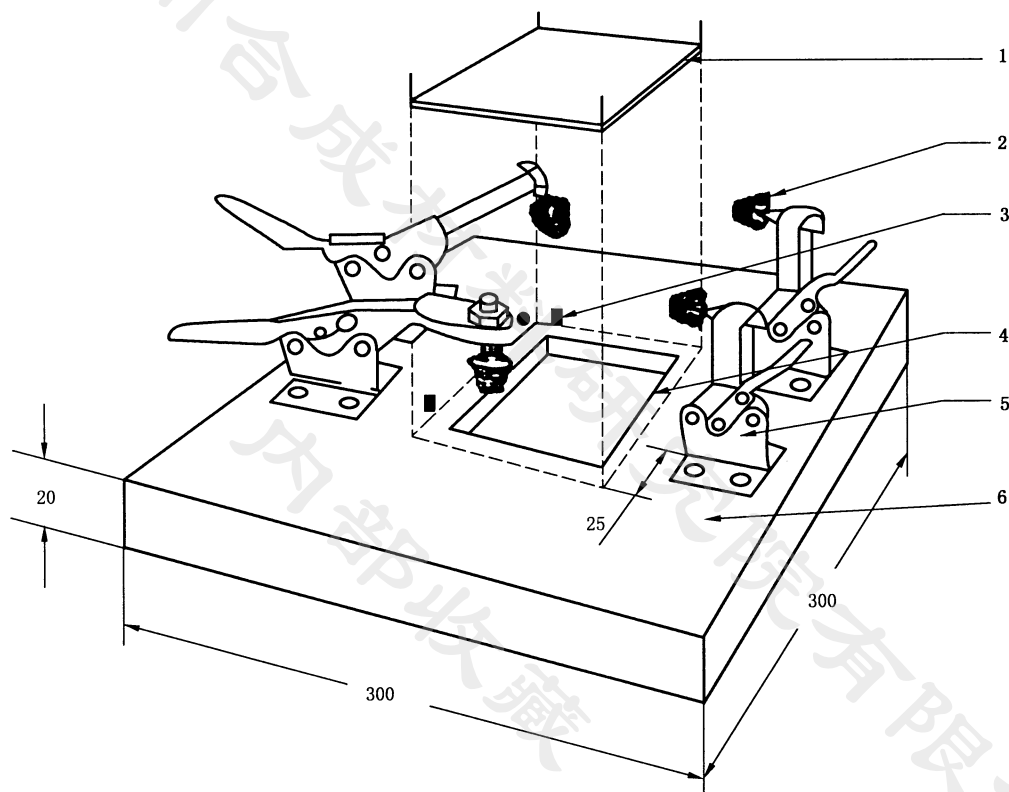
$$\text{条件冲击能量} = (33.825 \text{ J} \times 3 + 35.475 \text{ J} \times 2) / 5 = 34.48 \text{ J}$$

以上结果说明,由直径 16 mm、质量为 5.5 kg 的锤头冲击某复合材料以产生 1 mm 深度凹坑,需要的冲击能量为 34.48 J。

附录 B
(资料性)
冲击试验支撑夹具

冲击试验支撑夹具见图 B.1。无支撑区域的标准尺寸为： $a=125\text{ mm}$ ， $b=75\text{ mm}$ 。若冲击损伤尺寸超过 37.5 mm ，应选择 $180\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 的试样进行冲击，无支撑区域尺寸为： $a=b=130\text{ mm}$ ，然后再加工成 $130\text{ mm}\times 250\text{ mm}$ 的试样进行压缩试验。

单位为毫米



标引序号说明：

- 1——试样；
- 2——橡皮头；
- 3——导向销；
- 4——无支撑区域(长度 a ×宽度 b ，深度大于 6 mm)；
- 5——铰接夹；
- 6——底座(铝或钢)。

图 B.1 冲击试验支撑夹具

附录 C
(资料性)
冲击后压缩试验夹具

冲击后压缩试验夹具简图如图 C.1 所示。底座组合件(含角板)如图 C.2 所示,顶部组合件如图 C.3 所示。组合图分解后包括:底板(如图 C.4 所示)、角板(如图 C.5 所示)、侧向板和底座滑动板(如图 C.6 所示)、顶板和顶部滑动板(如图 C.7 所示)。

除图中有标注外,试验夹具加工应按照规定:长度尺寸公差为±0.5 mm,角度公差为±0.5°;所有尖角倒圆;角板为可选件,但推荐使用。

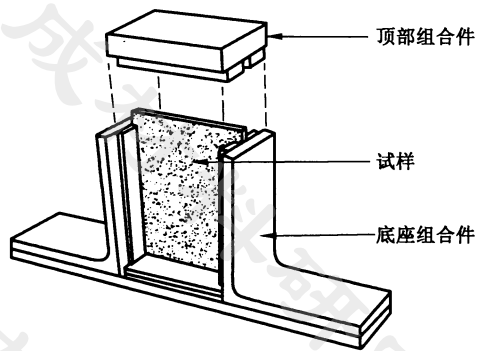


图 C.1 装有试样的冲击后压缩试验夹具简图

单位为毫米

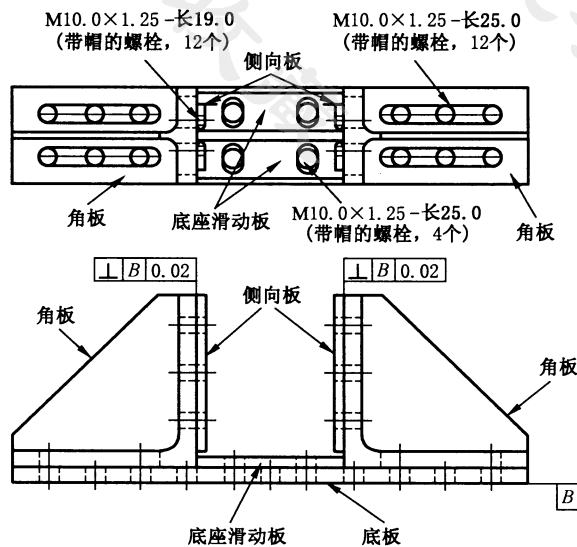


图 C.2 底座组合件(含角板)

单位为毫米

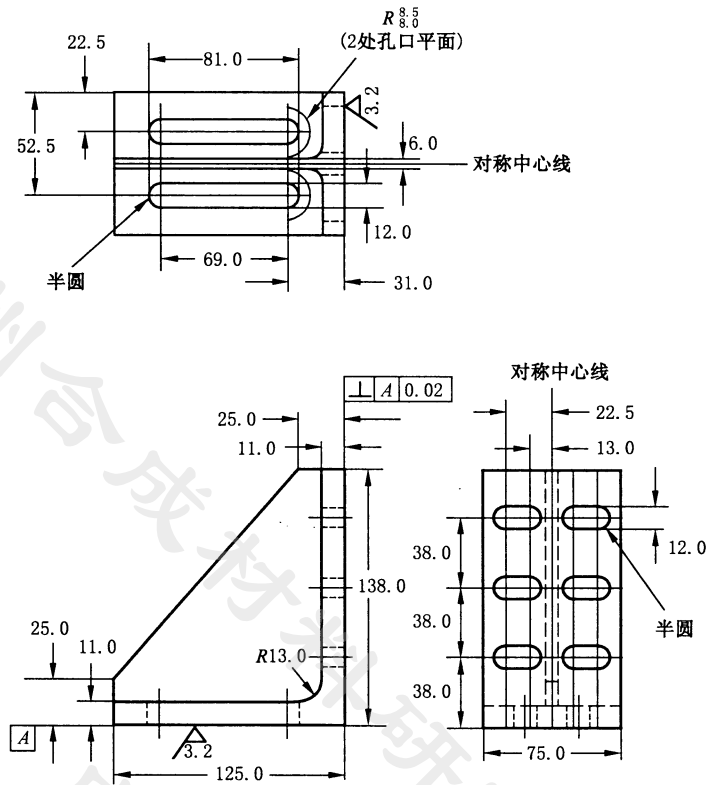


图 C.5 试验夹具角板

单位为毫米

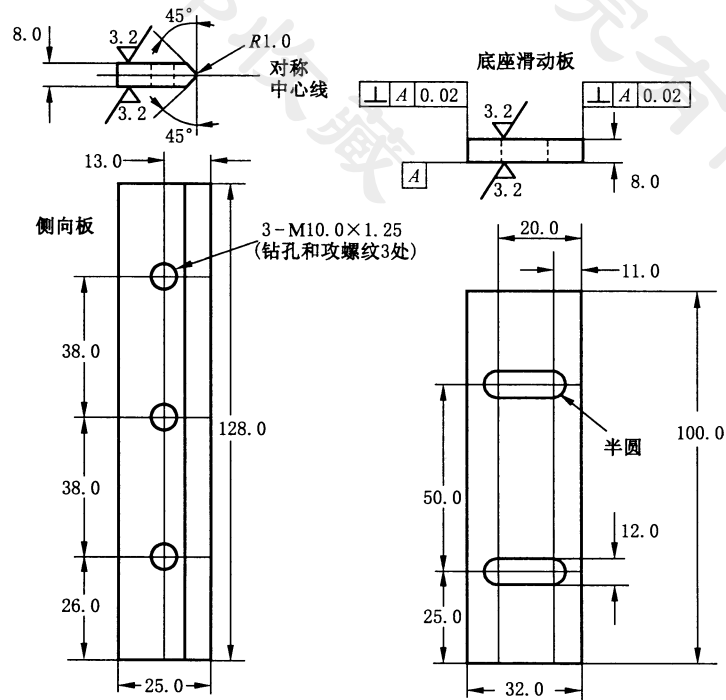


图 C.6 试验夹具侧向板和底座滑动板

