

使用水下冲击波实现镁合金板材的高速成型

熊本高等専門学校 机械智能系统工学科 井山裕文

○概要

冲击波是超过传播介质的音速移动、伴有压缩与膨胀的压力波。峰值压力在几十MPa（几百个大气压）到几十GPa（几十万大气压）之间，动作时间在几微秒到几毫秒之间。首先，我们将介绍使用该冲击波使难以成形的镁合金板和铝合金板成型的相关研究。镁合金是在常温下难以成型的材料。我们将介绍在容易获得高应变率的冲击成型中，对其成形性进行的评估，以及其变形机理等研究内容。

○水中冲击波的产生原理

冲击波是指很大的压力波，以超过介质音速的速度传播时伴有瞬时高压的压力脉冲波。以水为传播介质的冲击波被称为“水中冲击波”。将电能积蓄在电源电路中，如图1所示将细铝丝缠绕在电极上，然后将电极浸入水中，瞬时放电。此时，细铝丝熔解汽化，产生水中冲击波。

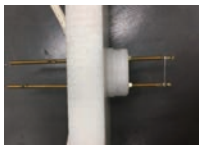


图1 缠绕细铝丝的电极

○试样与成型装置

本研究使用图2的镁合金AZ31作为研究对象。AZ31板为厚度1.0mm、直径140mm的圆板。成型装置由压力容器、板棒与AZ31板构成。压力容器内部注满水，通过O型圈、板棒及螺栓固定试样。电极安装在压力容器上方，使电极放电，产生水中冲击波。压力容器使用双曲线型（图3）与抛物线型（图4）2种形状。

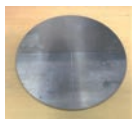


图2 镁合金 AZ31

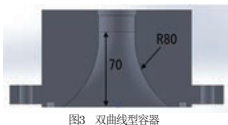


图3 双曲线型压力容器



图4 抛物线型压力容器

○试验方法

图5是安装了AZ31板的装置外观照片。图6是拍摄试验时安装了高速摄影机的装置外观照片。高速摄影机使用的是Nobytech公司的Kirana。

能以最高500万帧/秒连续拍摄180帧。

试验步骤如下所示。

- (1)将O型圈、板棒与试样安装在压力容器上。
- (2)再叠加板棒，使用螺栓与螺母固定。此时，确保紧固力均匀。
- (3)连接电源电路与电极，将细铝丝缠绕在电极上，然后安装在压力容器上。
- (4)将压力容器内部注满水，确保没有空气残留。
- (5)使电源电路中的电容器积蓄电能。
- (6)使用间隙开关使细铝丝通电，并使其放电。

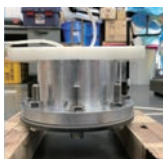


图5 压力容器外观照片

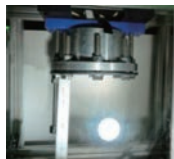


图6 拍摄试验时的装置外观照片

○试验条件

试验条件如表1所示。使用了双曲线型与抛物线型共2种压力容器进行成型。充电电压为2500V，充电能量为2.5kJ。

表1 试验条件			
压力容器形状	细铝丝直径(mm)	充电能量 [kJ]	充电电压 [V]
a 抛物线	0.5	2.5	2500
b 抛物线	0.7	2.5	2500
c 双曲线	0.5	2.5	2500
d 双曲线	0.7	2.5	2500

○试验结果

各试验条件下的最大成型量如表2所示。图7是使用双曲线型压力容器（试验条件a）成型后的照片。图8、图9是使用抛物线型与双曲线型压力容器时镁合金板的变形情况。从放电开始后500 μs、1000 μs、5000 μs的照片。可知使用抛物线型压力容器时，AZ31从四周向中央变形。从金属板表面飞出的是涂装粉末。涂装同样朝向中央剥离，由此可知抛物线型成型的特点。

表2 AZ31的最大成型量	
形状	最大成型量 [mm]
a	135
b	149
c	130
d	120



图7 试验条件a的成型照片

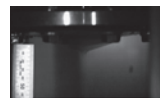


图8 抛物线型成型的情况

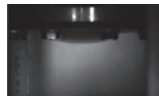
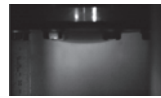
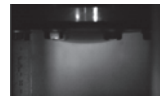


图9 双曲线型成型的情况

○总结

通过水中细线放电产生的水中冲击波进行AZ31镁合金板自由拉伸扩张成型（stretch expand forming）的试验结果总结如下。

1. 观看成型过程影像可知，在抛物线型压力容器，试样中心部分的成型量最大。
2. 使用抛物线型与双曲线型共2种压力容器进行成型，测量成型后的最大变形量。测量结果为使用双曲线型压力容器时的最大成型量较大。
3. 使用直径为0.5mm与0.7mm的2种细铝线进行试验。结果未发现细金属线直径与金属板最大成型量之间存在有规律的关系。因此，必须找到最适于试验条件的最佳细线直径。

○数值模拟

使用Altair公司的Hyper Works，运用CAE进行了爆炸成型的数值模拟计算。主要分析方法为ALE（Arbitrary Lagrange-Euler）法，该方法结合了Lagrange法与Euler法的有限元法。分析对象为水、炸药、金属板、容器、金属模具。分析时使用ALE法分析炸药部分与水部分，使用Lagrange法分析金属板与压力容器部分。炸药是名为SEP的高性能塑性炸药，其Chapman-Jouget常数如表3所示。运用公式(1)所示的JWL（Jones-Wilkins-Lee）状态方程式计算爆炸压力。SEP的JWL参数如表4所示。

$$P = A \left[1 - \frac{\omega}{VR_1} \right] \exp(-R_1 V) + B \left[1 - \frac{\omega}{VR_2} \right] \exp(-R_2 V) + \frac{\omega \rho_0}{V} \quad (1)$$

表3 炸药SEP的Chapman-Jouget常数

Explosive	P_{Cj} (GPa)	V_{Cj} (m/s)	ρ_0 (kg/m ³)
SEP	15.9	6790	1310

表4 炸药SEP的JWL参数

A (GPa)	B (GPa)	R_1	R_2	ω
365	2.31	4.3	1.1	0.28

运用公式(2)所示的Mie-Gruneisen状态方程式计算水压。 ρ_0 为初始密度， c 为音速， Γ_0 为Gruneisen参数， s 为取决于物质的常数。水的参数如表5所示。

$$P = \frac{\rho_0 C_0 a^2}{(1-s)^2} \left[1 - \frac{f_0 \eta}{2} \right] + \Gamma_0 \rho_0 e \quad (2)$$

表5 水的Mie-Gruneisen参数

Water	ρ_0 (kg/m ³)	C_0 (m/s)	s	Γ_0
Water	1000	1490	1.79	1.65

以镁合金AZ31为金属板、铝合金A2024-T351为压力容器、工具钢为金属模具进行分析。运用公式(3)所示的Johnson-Cook本构方程作为这些材料模型的本构方程。各金属材料的参数如表6所示。

$$\sigma_y = (\sigma_0 + \sigma_b e^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}) \quad (3)$$

表6 各金属材料的Johnson-Cook参数

	σ_0 (MPa)	σ_b (MPa)	n	C
A2024	265	426	0.3	0.02
AZ31	163.4	321.3	0.3	0.02
Tool_steel	1539	497	0.2	0.01

○计算模型

分析时使用的压力容器形状如图10、图11所示。图10为抛物线型、图11为双曲线型压力容器，分别对0.5g、1g、1.5g、2g共4种炸药量，以及1.0mm、2.0mm共2种AZ31板的厚度进行分析。

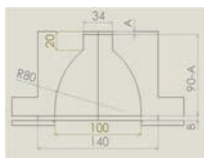


图10 抛物线型压力容器

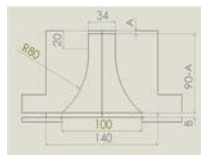


图11 双曲线型压力容器

使用抛物线型与双曲线型压力容器时的AZ31板变形过程如图14、图15所示。

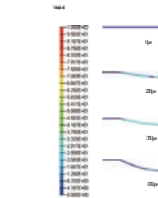
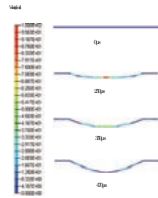


图14 抛物线型压力容器

图15 双曲线型压力容器

使用抛物线型压力容器时的变形结束时间早于双曲线型压力容器。使用抛物线型压力容器时，镁合金板从四周向中央变形。主要是由于冲击波的压力集中在压力容器壁面上。在双曲线型压力容器则是从中央向四周变形。

与镁合金板的水中细线放电试验测量数据之间的比较结果如图16所示。试验条件为使用抛物线型压力容器时的充电电压为2500V，充电能量为2.5kJ，细铝线直径为0.7mm。将该试验数据与成型量最为接近的板厚1.0mm、炸药量1.0g的模拟结果进行了比较。

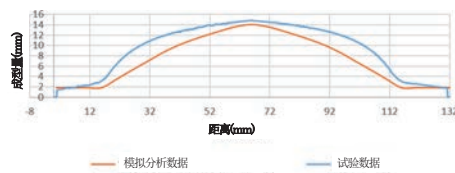


图16 模拟分析与试验数据比较

模拟与试验数据的比较结果显示，从中央到四周之间的膨胀程度，试验数据大于模拟数据。这是由于试验中AZ31成型时，出现了从四周朝向中央的凹陷，但模拟时没有凹陷，因此变形量不大。今后必须重新评估模拟的边界条件。

○总结

对利用水中冲击波进行镁合金板成型的过程进行数值模拟，并与试验数据进行比较。结果总结如下。

1. 使用双曲线型压力容器时的中央部分压力高于抛物线型压力容器，但抛物线型的变形量较大。
2. 使用抛物线型压力容器时，变形所需的时间短于双曲线型压力容器。
3. 镁合金板在抛物线型压力容器从四周向中央变形，在双曲线型压力容器则是从中央向四周变形。

○应用构想

冲击波成型技术的特点在于几乎没有回弹，因此模具具有优异的复制性，成型形状也可以达到很高精度。除金属之外，在模具的选择上，还可以使用砂、纸、石膏、木材等材料，因此可以用于单件或小批量生产。这些技术可以用于汽车零件及航空航天相关零件的制作。此外，如果使用含有书法字符或美术元素的纸或塑料模具，还可以用于艺术品制作。

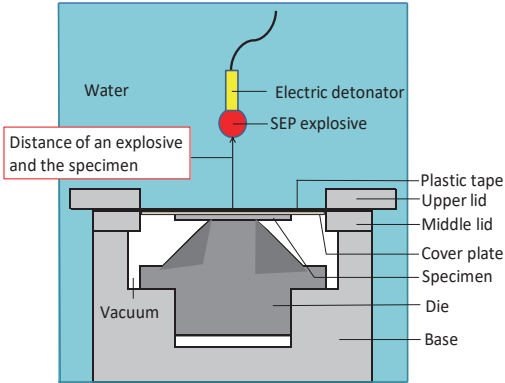
使用爆炸成型法进行镁合金凸模成型

1. 目的

在飞机与铁路等运输业，节能非常重要。实现节能的可能性之一，是使用比强度很高的镁合金。但是，在常温下对镁合金进行塑性加工并非易事。因此，本研究使用爆炸成型法进行镁合金凸模成型，并调查了该成型方法的可行性。

2. 爆炸成型法

爆炸成型法通过炸药在水中爆炸来制造水下冲击波。使用的炸药是高性能塑性炸药SEP。水下冲击波使铝制盖板变形，接着使试验对象镁合金AZ31变形，将其推向凸模。为防止AZ31板破裂，此次试验中安装了盖板。



Schematic diagram of experimental apparatus

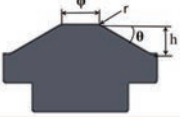
优点

该成型法利用水下冲击波产生的高压将AZ31板的中央部分推向凸模，因此拉伸强度较低，不会导致AZ31断裂。

缺点

- 变形速度越快，则拉伸越大，导致AZ31板的中央部分出现断裂。
- AZ31板的外周部分被拉向内侧，因此造成皱褶。

3. 试验条件

Material	AZ31
Material diameter [mm]	50
Material thickness [mm]	0.3
Die size [mm]	
	$\phi = 20, r = 5, h = 15, \theta = 15^\circ \sim 30^\circ$
SEP explosive [g]	$m = 3 \sim 6$
Lubriant	Molybdenum
Distance of an explosive and the specimen [mm]	$d = 40 \sim 80$
Cover plate	Aluminium
Cover plate diameter [mm]	84
Cover plate thickness [mm]	1

试验时的凸模倾角 θ 变更为 $15 \sim 30^\circ$ ，炸药SEP的药量 m 变更为 $3 \sim 6g$ 。炸药与盖板之间的距离 d 为 $40 \sim 80mm$ 。

克服2个缺点

4. 试验结果



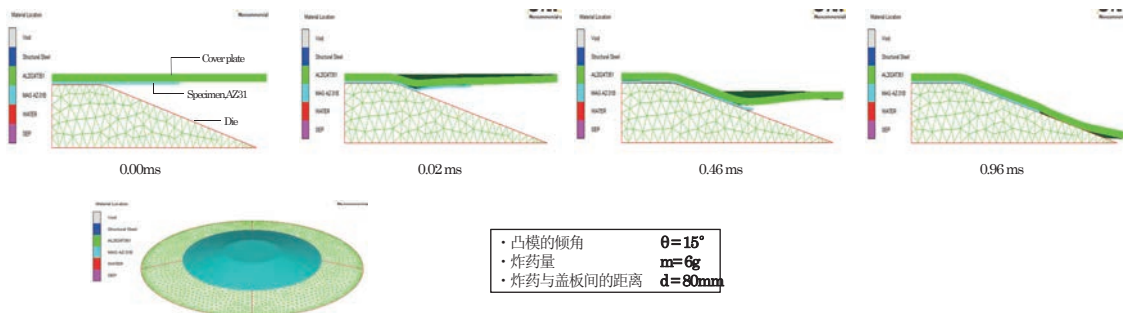
(a) $\theta = 15^\circ, m = 6g, d = 80mm$



(b) $\theta = 30^\circ, m = 3g, d = 40mm$

(a)是理想的成型形状。但如(b)所示，在某些试验条件下，会产生AZ3板的外周部分出现皱褶、靠近模具倾角的部分出现破裂等问题。该问题是因炸药位置过近，造成曲线部分拉伸增大而导致断裂。

5. 数值模拟



试验进行了数值模拟。使用的CAE软件为ANSYS AUTODYN。模拟结果显示成型良好，盖板与AZ31板从约0.02ms时开始变形。理想的情况是能够在没有盖板的条件下成型。

6. 总结

试验尝试利用爆炸成型法进行镁合金板凸模成型。试验中使用了铝制盖板作为镁合金板的成型辅助板。在某些条件下，实现了很好的成型效果。并进行了数值模拟以明确这些变形的过程。可知盖板与AZ31板从约0.02ms时开始变形。