



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101590501 B

(45) 授权公告日 2011.05.11

(21) 申请号 200910062979.4

(22) 申请日 2009.07.03

(73) 专利权人 武汉理工大学

地址 430070 湖北省武汉市洪山区珞狮路
122 号

(72) 发明人 黄尚宇 孟正华 胡建华 李友成
张开 李正

(74) 专利代理机构 湖北武汉永嘉专利代理有限
公司 42102

代理人 张安国

(51) Int. Cl.

B21D 26/14 (2006.01)

B21D 37/16 (2006.01)

(56) 对比文件

EP 1563924 A1, 2005.08.17,

CN 101380654 A, 2009.03.11,

CN 100400699 C, 2008.07.09,

CN 101406913 A, 2009.04.15,

CN 1216707 C, 2005.08.31,

GB 1177228, 1970.01.07,

刘鹏. 镁合金板材电磁成形实验研究.《武汉
理工大学硕士学位论文》. 2008, 第 19 - 25 页.

审查员 强丽慧

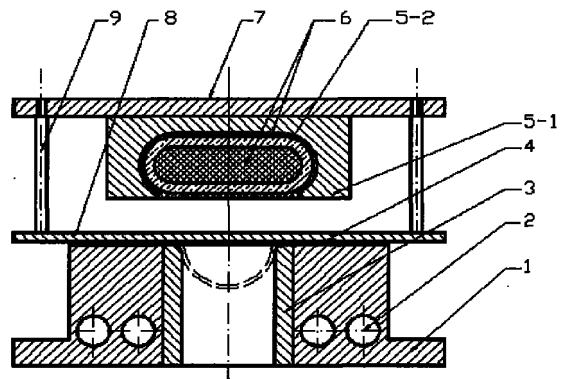
权利要求书 1 页 说明书 7 页 附图 3 页

(54) 发明名称

镁合金板材温热电磁成形方法

(57) 摘要

本发明提出了一种能够提高镁合金板材成形性能的塑性加工方法 - 温热电磁成形法。该方法将镁合金板材置于凹模上,通过凹模内的加热棒加热使镁合金板材升温至 100-300℃,电磁成形线圈在压力机的作用下压紧镁合金板材,再通过电磁成形设备对电磁成形线圈放电,使镁合金板材贴模成形。本方法通过储能电容对电磁成形线圈瞬间放电产生强脉冲磁场,使加热的坯料在冲击电磁力作用下高速成形,由于复合了温成形与电磁成形的优势,镁合金板材的成形性能得到有效提高,而且克服了单一温成形中的润滑及由此所带来的材料与环境污染、成形速度受限、模具强度、成形工艺条件较苛刻,参数可调整范围小等局限性。



1. 镁合金板材温热电磁成形方法,其特征在于,方法步骤如下:

1) 将镁合金板材放置在凹模(1)上,凹模(1)固定在压力机工作台面上,电磁成形线圈(5-2)固定在压力机上滑块上;

2) 对电磁成形设备的储能电容进行充电,当充电电压达到设定电压3-20KV后,断开充电回路;

3) 将凹模(1)内的加热棒(2)通电,通过凹模的传导使镁合金板材升温;

4) 通过压力机将垫板(7)及电磁成形线圈(5-2)压靠到待成形镁合金板材上,并保持电磁成形线圈外壳(5-1)与镁合金板材良好接触;

初始阶段,压力机上滑块保持不动,镁合金板材升温至预定温度后,压力机上滑块下行,电磁成形线圈外壳(5-1)压紧镁合金板材;或者初始阶段,压力机上滑块下行,通过压杆(9)将压板(8)压在镁合金板材上,以提高加热效率;镁合金板材升温至预定温度后,移开压板(8),压力机上滑块继续下行,电磁成形线圈外壳(5-1)压紧镁合金板材,所述的预定温度为100-300°C;

5) 闭合电磁成形放电回路,储能电容通过电缆对电磁成形线圈放电,镁合金板材在电磁力的作用下高速贴模成形,即可得到所需工件。

2. 按照权利要求1所述的镁合金板材温热电磁成形方法,其特征在于:所述的镁合金板材厚度为0.5-2.5mm。

3. 按照权利要求1所述的镁合金板材温热电磁成形方法,其特征在于:凹模(1)固定在双动压力机工作台面上,电磁成形线圈(5-2)固定在压力机内滑块上,压板(8)固定在压力机外滑块上;初始阶段,双动压力机外滑块下行,通过压板(8)压紧镁合金板材加热,提高加热效率;镁合金板材升温至预定温度后;双动压力机内滑块下行,电磁成形线圈外壳(5-1)压紧镁合金板材后放电成形。

镁合金板材温热电磁成形方法

技术领域

[0001] 本发明属于机械工程领域,具体为镁合金板材温热电磁成形方法。主要用于提高镁合金板材的成形性能,为镁合金板材塑性加工提供一种新的更为行之有效的方法。

背景技术

[0002] 近年来,汽车工业特别是中国汽车工业得到了迅猛发展。与此同时,汽车工业发展所带来的环境和能源问题也日益严峻,其中汽车 75% 的能耗直接与车重有关。因此全球汽车生产商竞相开发和利用新材料、新工艺以减轻汽车自重、降低燃油消耗、减少废气排放,汽车轻量化已成为现代结构设计的主流趋势,以高强钢、铝合金、镁合金及多种复合材料为代表的轻质、高强度难成形材料在汽车、航空、航天等先进制造领域的应用日益增加。美国能源部从 2001 年即将车用轻合金的成形工艺作为重点资助项目加以研究,并将车用轻质合金材料的开发与成形工艺作为 2006-2011 年“The FreedomCAR and Vehicle Technologies (FCVT) Program”的一个重要部分。我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020 年)》中也将轻质高强度金属材料的研究开发作为一项重要内容。此外,现代电子技术的发展对电子器件用结构材料及部件的性能提出了新的更高的要求,传统的塑料已难以满足电子器件轻、薄、小型化以及安全、环保的发展要求,从而使轻合金特别是铝、镁合金成为制造电子器件壳体的理想材料。

[0003] 镁及其合金是目前最轻的金属结构材料,其密度比铝轻 1/3,具有比强度和比刚度高、阻尼减震性好、导热性好、电磁屏蔽效果佳、易回收等特点。从 20 世纪 40 年代开始,镁合金已经开始应用于航空、航天等国防军工领域,进入 20 世纪 90 年代后,镁合金产品开始用于汽车、交通、电子以及其他民用产品领域。一大批重要电子产品在使用镁合金后,取得很好的效果。1998 年后,日本所有的笔记本电脑厂商均推出镁合金外壳的机型。我国联想、华硕等笔记本电脑 1999 年后也部分采用了镁合金外壳。近年来数码相机的机壳也部分采用镁合金制造,在提高相机刚度的同时,也减轻了相机质量,便于携带。

[0004] 镁合金为密排六方晶体结构,在常温下只有基面 {0001} 三个滑移系可以发生变形,因此冷态下塑性加工能力较差。目前镁合金产品主要采用压铸方法生产。虽然镁合金的铸造性能优良,可以铸造成各种形状复杂的零件,但也存在产品规格尺寸受限、力学性能差等局限,各种铸造缺陷如疏松、气孔、缩孔和夹杂难以避免,壁厚过薄容易造成产品报废,成品率较低。对于电子器件外壳和 3C 产品外壳件,有的重量只有几十克,铸造浇冒口金属比例很高,造成材料利用率较低。如能采用塑性加工技术替代现有的压铸工艺生产薄壁镁合金零件,将不仅可以提高产品性能和质量,而且可以显著提高材料利用率和生产效率。因此,如何挖掘和提高镁合金板材的成形性能、开发行之有效的成形新工艺备受国内外工业界和学术界的关注,并成为近年来竞相研究的热点之一。

[0005] 欧洲、日本、美国近年来分别开展了镁合金薄板成形技术的研究。德国学者 Doege 等与大众汽车公司应用热冲压成形技术成形了汽车车门等薄板零件,与钢门相比,采用内镁外铝的混合车门可减重 50%,与铝门相比可减重 20%;日本学者 Ogawa 等对镁合金温成

形的塑性性能和成形极限进行了研究, Yoshihara 等采用局部加热 - 局部冷却工艺使镁合金热冲压成形极限拉深比达到 5.1; 中科院金属研究所张士宏等对镁合金板材温热条件下的深拉深进行了研究, 他们发现, 对于镁合金板材, 120-170℃ 之间, 塑性变形能力很好, 尤其在 170℃ 左右板材的变形能力很高, 筒形件极限拉深比可达到 2.6。总体来说, 镁合金板材温成形技术目前仍处于实验室基础研究阶段, 润滑及由此所带来的材料与环境污染、成形速度受限、模具强度、成形工艺条件较苛刻 (参数可调整范围小) 等都是该技术步入工业应用所亟待解决的关键问题。

[0006] 高速率成形由于材料动力响应的惯性、模具高速冲击带来的惯性减薄以及高速率下材料本构关系的改变, 可使很多金属材料的成形性能得到改善, 某些难成形的金属材料在高成形速率条件下也变得容易成形, 如果工艺参数及边界条件选择适当, 可以使材料得到远超出传统准静态成形所能达到的变形程度。电磁成形是一种高能率成形方法, 除能提高金属材料成形性能外, 还具有加工能量易于准确控制、成形速度快、成形精度高、无需传压介质、成形模具简单及设备通用性强等特点, 是一种绿色制造工艺。近年来, 国内外学者竞相开展了轻合金材料的电磁成形研究。1998 年, 俄亥俄州立大学针对通用汽车 Chevy Cavalier 的 6111T4 铝合金车门内板进行了成形实验研究, 研究发现, 采用与钢质车门内板相同的成形模具, 用常规工艺成形铝合金车门内板时会产生起皱和破裂现象, 即使对工艺参数进行调整也不能避免, 而在后续试验中, 通过更改模具, 增大尖角和弯曲处的圆角半径, 并采用电磁成形技术进行二次加工, 得到的铝合金车门内板满足设计要求, 还获得了较好的平皱效果。

[0007] 目前板材电磁成形多采用平面螺旋线圈和板条式线圈, 存在磁压力分布不均, 线圈效率低等缺陷, 这相当程度上限制了平板毛坯电磁成形工艺的应用范围。鉴于此, 俄亥俄州立大学的 G. S. Daehn 教授在分析了管件电磁成形磁压力分布特点及成形效率后, 将管件电磁成形的耦合原理引入平板毛坯电磁成形, 提出一种平板毛坯均匀压力线圈放电成形新工艺。放电线圈的外面有一个凹形导体通道, 它和板料组成了一个封闭的回路。当电容放电时, 内部线圈中流过脉冲电流, 并在板料和凹形通道组成的回路中诱发方向相反的感应电流 (里面的线圈和外面的回路是绝缘良好)。由于强脉冲电磁力的作用, 金属板料高速贴模成形。因为感应电流的回路完全环绕线圈, 所以磁场能量损失小, 效率高, 此外, 由于线圈同时受到板料和凹形通道的反作用力, 所以对线圈的作用力相当于集中在心轴上, 这对提高线圈的使用寿命也是有利的。相比于传统平面螺旋线圈及板条线圈, 均匀压力线圈的磁压力分布较为均匀, 成形效率较高。

[0008] 综上所述, 镁合金板材在汽车、电子等领域具有广阔的应用前景, 如何发掘和提高镁合金板材的成形性能一直是制造业及学术界致力解决的关键问题。电磁成形作为一种高能率成形方法, 对提高金属板材的成形性能有其独特优势; 采用均匀压力线圈能有效改善变形区域内磁压力的大小及分布, 提高其成形效率, 有利于平板毛坯电磁成形工艺的推广及工业应用; 而提高成形温度可有效提高镁合金板材的塑性变形能力。因此, 本发明将电磁成形与温成形结合起来, 充分利用它们的复合优势, 采用均匀压力线圈在温热条件下对镁合金板材进行放电成形, 利用电磁成形无接触加工的特点回避单一温成形中的润滑及模具强度等问题, 提出一种行之有效的镁合金板材成形新工艺, 具有重要的理论意义和广阔应用前景。

发明内容

[0009] 本发明目的是提供一种能够有效提高镁合金板材成形性能的塑性加工方法。一种利用电磁成形与温成形复合优势的镁合金板材温热电磁成形方法。

[0010] 镁合金板材温热电磁成形方法步骤如下：

[0011] (1) 将镁合金板材放置在凹模 1 上；

[0012] (2) 对电磁成形设备的储能电容进行充电,当充电电压达到设定成形电压 3-20KV 后,断开充电回路；

[0013] (3) 将凹模 1 内的加热棒 2 通电,通过凹模的传导使镁合金板材升温 ;或者通过压杆 9 将压板 8 压在镁合金板材上,以提高加热速度,镁合金板材升温至预定温度后,移开压板 8；

[0014] (4) 通过压力机将垫板 7 及电磁成形线圈 5-2 压靠到待成形镁合金板材上,并保持成电磁形线圈外壳 5-1 与镁合金板材良好接触；

[0015] (5) 闭合电磁成形放电回路,储能电容通过电缆对电磁成形线圈放电,镁合金板材在电磁力的作用下高速贴模成形,即可得到所需工件。

[0016] 其中,所述的镁合金板材厚度为 0.5-2.5mm。

[0017] 所述的镁合金板材升温温度为 100-300℃。

[0018] 本发明所述的镁合金板材温热电磁成形方法,其特征在于:成形凹模 1 固定在压力机工作台上,电磁成形线圈固定在压力机上滑块上;初始阶段,压力机上滑块保持不动,镁合金板材在加热棒 2 的作用下加热;镁合金板材升温至预定温度后,压力机滑块下行,电磁成形线圈外壳 5-1 压紧镁合金板材后放电成形。

[0019] 本发明所述的镁合金板材温热电磁成形方法,其特征在于:初始阶段,压力机上滑块下行,通过压杆 9 将压板 8 压在高镁合金板材上,以提高加热效率;镁合金板材升温至预定温度后,移开压板 8;压力机滑块继续下行,电磁成形线圈外壳 5-1 压紧镁合金板材后放电成形。

[0020] 本发明所述的镁合金板材温热电磁成形方法,其特征在于:成形凹模 1 固定在双动压力机工作台上,电磁成形线圈 5-2 固定在压力机内滑块上,压板 8 固定在压力机外滑块上;初始阶段,双动压力机外滑块下行,通过压板压紧镁合金板材加热,提高加热效率;镁合金板材升温至预定温度后;双动压力机内滑块下行,电磁成形线圈外壳压紧镁合金板材后放电成形。

附图说明

[0021] 图 1 温热电磁成形工装图

[0022] 图 2a 为标号 5-2 的均匀压力电磁成形线圈结构主视图

[0023] 图 2b 为标号 5-2 的均匀压力电磁成形线圈结构左视图

[0024] 图 3 为标号 5-1 的均匀压力电磁成形线圈外壳结构图

[0025] 图 4 不同温度条件下 AZ31 镁合金板材温热电磁成形极限图

[0026] 图 5 温胀形工装图

[0027] 图 6 不同温度条件下 AZ31 镁合金板材球头胀形的成形极限图

[0028] 图 7 不同温度条件下温热电磁成形与温成形的成形极限对比

[0029] 图中标号表示的零件名称 1- 凹模 ;2- 加热棒 ;3- 凹模镶块 ;4- 板料 ;5-1- 电磁成形线圈外壳 ;5-2- 电磁成形线圈 ;6- 耐热绝缘树脂 ;7- 垫板 ;8- 压板 ;9- 压杆 ;10- 半球头凸模 ;11- 压边圈。

[0030] 具体实施方法

[0031] 实施例 1 用 AZ31 镁合金板材作温热电磁胀形实验

[0032] 一、实验过程

[0033] 1. 材料准备 :

[0034] 实验所用材料为营口银河镁铝合金有限公司提供的 AZ31 镁合金交叉轧制板材, 其化学成分如表 1 所示。将实验材料进行均匀化退火处理, 退火温度为 300℃, 保温 1h 后随炉冷却。

[0035] 表 1 实验用 AZ31 镁合金板材化学成分

[0036]	主要成分 (%)			杂质 (%)			Mg	
	Al	Mn	Zn	Fe	Si	Be		Cu
	3.19	0.334	0.81	0.005	0.02	0.01	0.005	余量

[0037] 2. 成形过程

[0038] 电磁胀形试验在如图 1 所示工装结构上进行。采用图 2a、图 2b、图 3 所示电磁成形线圈进行实验。采用 0.5-2.5mm 厚、70mm×100mm 的长方形试样。

[0039] 为分析所述镁合金板材室温电磁胀形的成形极限, 试验前先对试样进行表面脱脂, 浸洗的处理, 在试样表面印制直径为 2.5mm 的圆网格。采用液压机对电磁成形线圈外壳 5-1 提供大于 40MP_a 的钳制力, 保证电磁成形线圈外壳与板料紧密接触, 同时提供板料的压边力。

[0040] 实验中调整电磁成形机储能电容和放电电压参数, 利用加热棒对镁合金板材进行加热, 通过热电偶及测温计监测镁合金板材温度, 在不同放电能量及成形温度下对镁合金板材放电成形。

[0041] 3. 成形性能测试

[0042] 放电成形后通过光学测量显微镜 (测量精度 0.001mm) 或应变测量系统测量计算板材局部颈缩处的网格应变值或破裂处邻近网格的应变值, 建立成形极限图。

[0043] 二、极限应变测试结果

[0044] 表 2、表 3、表 4、表 5、表 6、表 7 分别为室温、100℃、150℃、170℃、200℃、230℃下, AZ31 镁合金板材温热电磁成形的极限应变值。图 4 为室温至 230℃温热电磁成形的成形极限图。由图 4 可知, AZ31 镁合金板材在温热电磁成形条件下, 成形性能随温度提升有所提高, 在 230℃左右, 可获得较大的极限应变, 具有良好的成形性能。

[0045] 表 2 室温电磁成形极限应变值 (%)

ϵ_2	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_1
12.92	15.15	7.9	11.28	4.69	10.34
12.4	13.94	6.88	10.98	4.67	10.84
12.28	12.76	6.77	9.74	4.5	9.86
11.75	12.53	6.42	10.93	3.99	10.03
9.67	11.69	6.18	10.44	3.91	10.45
9.24	11.34	5.98	10.93	3.51	10.27
8.96	10.69	5.98	9.62	2.81	10.33
8.69	11.28	5.63	10.27	2.73	9.86
8.41	9.86	5.34	9.95	2.34	9.33
8.02	10.39	5.23	10.54	5.08	9.74

[0046] 表 3100℃温热电磁成形极限应变值(%)

ϵ_2	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_1
15.07	16.9	7.18	11.2	1.11	10.71
5.9	12.09	6.66	10.87	14.7	14.14
4.17	11.89	2.23	10.34	11.82	13.07
6.9	12.09	2.13	11.5	7.82	12.45
14.2	14.91	1.1	10.7	8.18	12.58
4.03	11.37	14.14	14.71	9.55	12.92
2.74	11.3	7.18	11.21	8.3	12.2
12.45	13.69	6.67	10.87	3.18	10.79
7.04	11.89	3.18	10.79	2.14	11.2

[0047] 表 3100℃温热电磁成形极限应变值(%)

ϵ_2	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_1
16.05	17.98	8.41	12.78	6.45	11.76
14.84	15.19	8.11	13.17	4.56	11.7
14.81	15.13	8.04	12.45	3.99	12.45
14.1	14.52	7.73	12.32	3.57	11.13
13.72	13.88	7.39	12.78	3.35	11.7
13.3	13.69	7.18	11.2	3.17	10.8
13.1	14.39	7.18	11.2	3.17	10.8
11.27	13.39	6.66	10.87	2.92	11.6
1.1	10.7	6.66	10.87	2.23	10.34

[0048] 表 4150℃温热电磁成形极限应变值(%)

[0049] 表 4150℃温热电磁成形极限应变值(%)

[0050] 表 4150℃温热电磁成形极限应变值(%)

[0051] 表 5170℃温热电磁成形极限应变值(%)

[0052]	ϵ_2	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_1
	20.04	18.05	14.14	15.98	10.24	13.49
	19.61	17.27	13.91	15.92	9.67	14.91
	18.85	17.4	13.56	15.26	9.61	14.12
	17.52	15.76	12.65	15.19	9.14	14.52
	17.33	16.93	12.29	14.52	9.1	13.68
	16.61	16.36	11.86	15.07	7.95	14.57
	15.8	16.99	11.4	15.64	7.18	13.73
	15.32	16.05	11.37	14.46	6.62	13.62
	4.32	13.39	10.67	14.59	6.11	13.9

[0053] 表 6200℃温热电磁成形极限应变值(%)

[0054]	ϵ_2	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_1
	20.91	21.48	15.13	17.77	8.85	15.25
	21.18	21.27	13.49	17.77	8.46	15.98
	21.03	21.06	13.46	17.95	7.39	15.36
	20.4	20.49	12.61	17.61	6.66	10.87
	18.57	19.12	12.42	16.86	6.63	10.86
	17.98	18.79	11.7	17.05	5.34	14.46
	17.3	18.39	9.36	16.14	5.05	14.74
	17.21	19.46	9.33	15.48	3.13	13.79
	16.24	18.66	9.06	15.76	2.91	13.45

[0055] 表 7230℃温热电磁成形极限应变值(%)

[0056]	ϵ_2	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_1
	12.02	19.85	16.08	21.27	26.35	27.62
	11.17	20.73	15.35	21.36	26.41	27.31
	10.07	21.72	15.29	22.67	26.55	27.09
	8.96	19.95	14.17	22.14	25.58	26.12
	7.25	20.64	13.98	23.84	23.46	25.44
	6.14	20.73	13.78	20.91	23.46	24.45
	10.13	20.73	13.14	22.43	20.91	23.4
	10.11	20.89	12.55	20.91	20.19	24.28
	9.35	22.42	12.09	22.06	18.94	23.93
7.85	21.61	7.26	19.49	15.04	23.57	

[0057] 三、对比分析

[0058] 试样为 0.5-2.5mm 厚、100mm×110mm 的长方形 AZ31 镁合金板材,采用同样的凹模 1 及凹模镶块 3,在图 5 所示的工装上用半球头凸模 10 对试样进行温胀形。首先将 AZ31 镁

合金板材放在凹模上；将压边圈 11 放在板材上，对压边圈加压，将板材压紧；对加热棒通电加热；通过凹模热传导使镁合金板材升温至指定温度；使半球头凸模 10 下行，对板材进行胀形，直至出现颈缩或破裂。

[0059] 测量不同温度条件下试样的极限应变值，通过比较其成形极限图来对比分析不同成形方法对成形性能的影响。

[0060] 表 8 为室温、100℃、150℃、230℃ 条件下，AZ31 镁合金板材球头胀形的极限应变值。图 6 为不同温度条件下 AZ31 镁合金板材常规温胀形的成形极限图。

[0061] 表 8 不同温度条件下板材常规胀形的极限应变值 (%)

室温		100℃		150℃		230℃	
ϵ_2	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_1
0.56	1.36	1.27	3.13	2.38	6.12	3.96	10.39
0.69	1.57	2.68	3.99	3.30	6.26	5.11	10.73
0.83	1.15	3.38	4.60	4.54	6.61	8.89	11.36
2.48	2.30	3.24	4.27	4.92	7.18	8.75	12.07
0.95	1.56	2.43	4.38	5.47	6.42	9.17	11.00
1.13	2.02	1.71	3.82	5.56	6.95	9.31	11.32
1.18	1.22	3.52	3.89	5.69	7.61	9.51	12.36
[0062] 1.07	1.44	2.81	3.59	5.92	6.67	9.98	11.90
1.15	1.65	3.89	4.09	6.08	7.37	9.94	13.42
1.23	1.72	3.99	3.83	6.46	6.82	10.39	12.24
1.30	1.59	4.31	3.99	6.61	7.57	10.71	12.11
1.41	1.67	4.44	5.05	6.77	7.96	10.85	12.37
1.54	1.73	3.91	4.60	7.04	7.06	12.61	13.86
1.59	1.90	4.04	4.21	7.25	7.76	13.59	15.00
1.77	1.98	4.72	4.73	7.79	8.07	14.78	15.04
3.03	4.05	4.83	5.06	8.36	8.70	15.60	15.76
2.75	3.38	5.50	6.07	9.32	9.38	15.90	16.35

[0063] 图 7 是温热电成形与常规温胀形成形极限的综合对比，由图可知，相比于单一温成形，相同温度条件下，温热电成形均可获得更大的极限应变，有利于提高材料的成形性能；100-150℃ 下温热电成形极限已经达到单一温成形在 230℃ 左右的成形极限，这说明在相同变形量条件下，温热电成形可以降低成形温度，提高成形效率和模具使用寿命。

[0064] 四. 结论

[0065] 镁合金板材温热电成形的成形性能高于单一电磁成形或单一温成形，说明温热电成形可有效提高镁合金板材的成形性能，增加成形效率。并且温热电成形过程中无需润滑，有效回避了单一温成形的润滑及由此带来的环境污染问题。

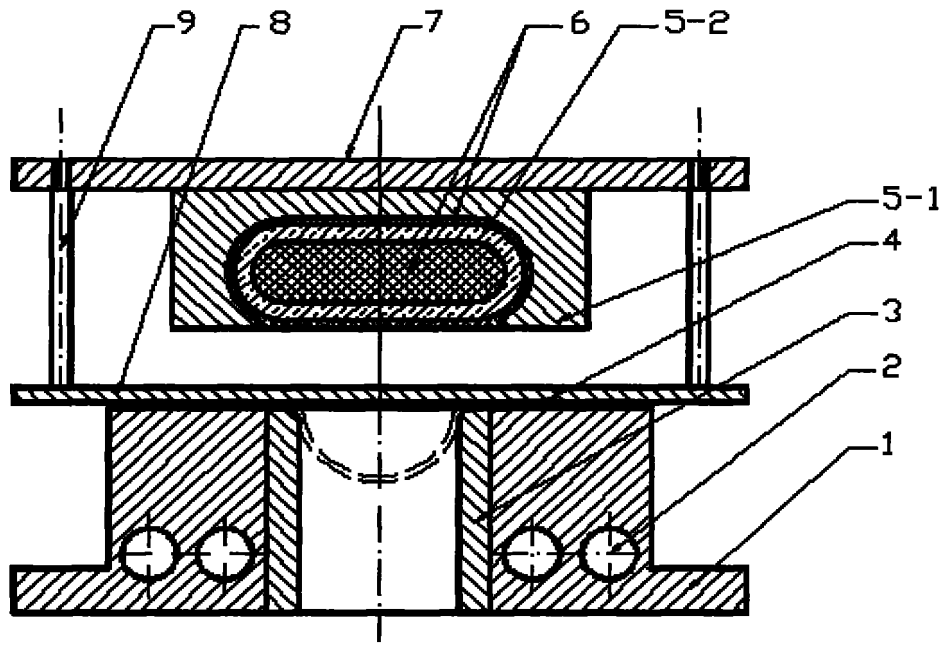


图 1

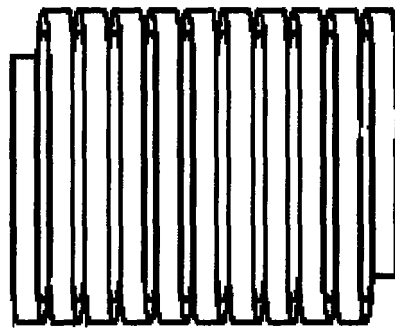


图 2a



图 2b

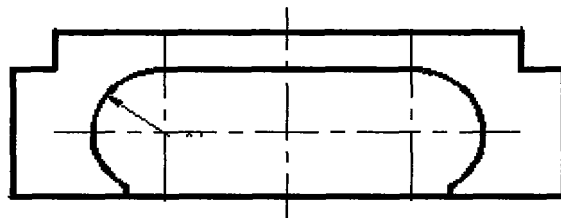


图 3

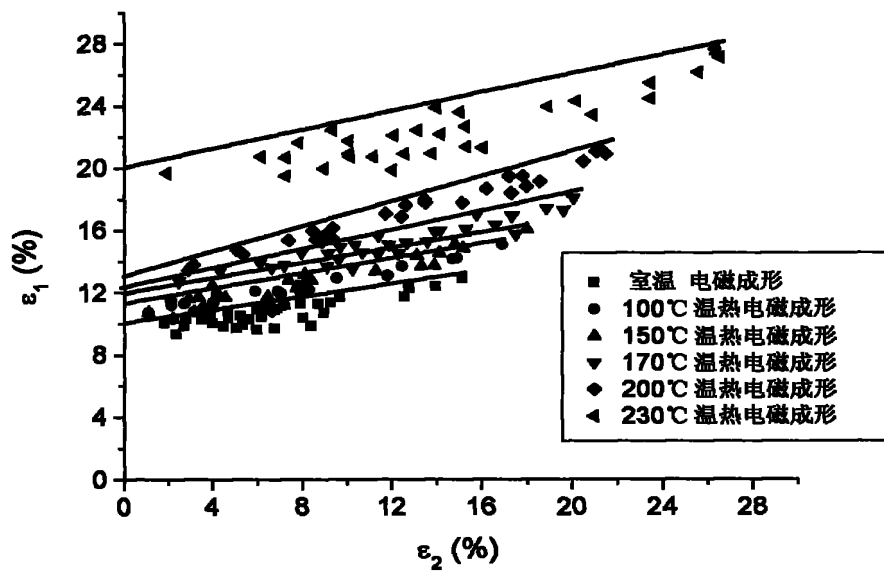


图 4

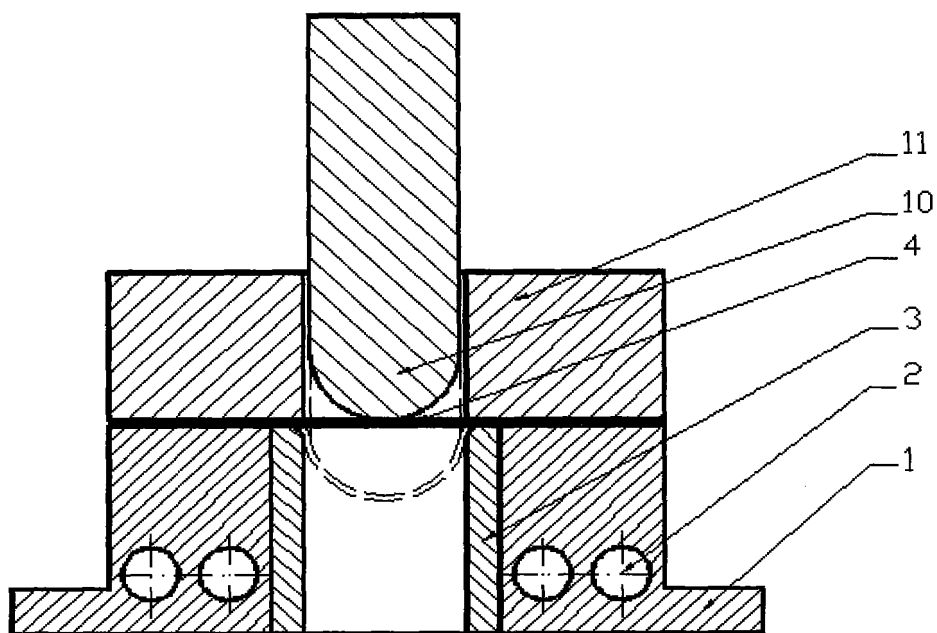


图 5

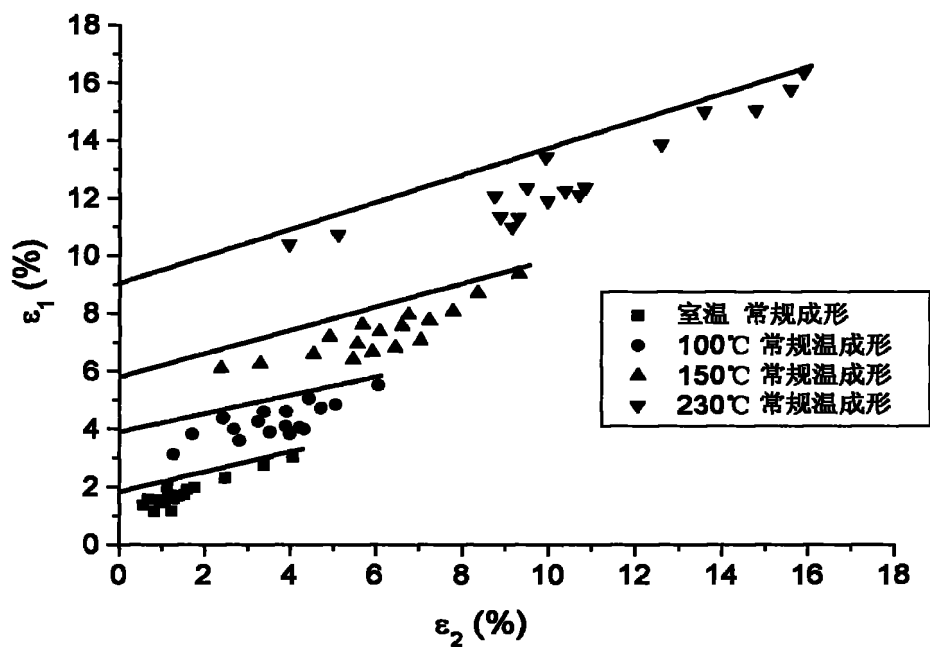


图 6

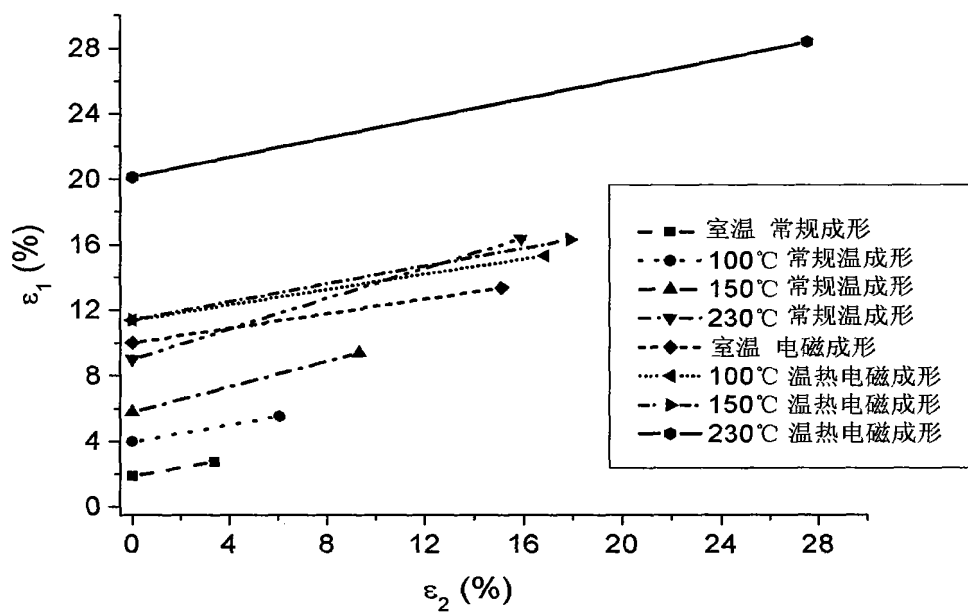


图 7