



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105855324 B

(45)授权公告日 2017.06.23

(21)申请号 201610201322.1

(22)申请日 2016.04.01

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 105855324 A

(43)申请公布日 2016.08.17

(73)专利权人 湖南大学
地址 410082 湖南省长沙市岳麓区麓山南路麓山门

(72)发明人 李光耀 崔俊佳 孙光永 邓桦坤

(74)专利代理机构 北京律谱知识产权代理事务所(普通合伙) 11457

代理人 黄云铎

(51)Int.Cl.
B21C 51/00(2006.01)

(56)对比文件

US 2013/0152706 A1,2013.06.20,

CN 103852382 A,2014.06.11,

CN 102944474 A,2013.02.27,

CN 102749253 A,2012.10.24,

CN 104931332 A,2015.09.23,

CN 102305745 A,2012.01.04,

审查员 王冬雪

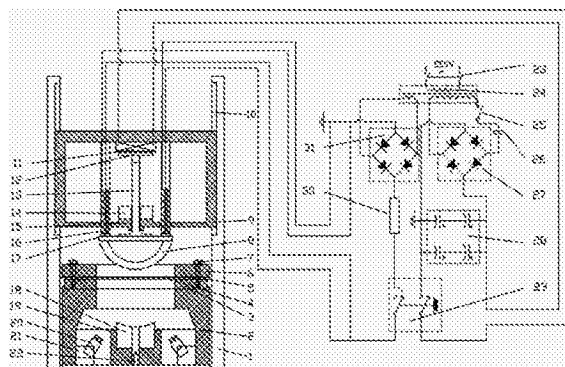
权利要求书1页 说明书8页 附图7页

(54)发明名称

一种金属板材高速成型极限测试方法

(57)摘要

本发明涉及一种金属板材高速成型极限测试方法,具体包括以下步骤:步骤1、开始实验前,确认电容充电开关(25)处于断开状态,冲头发射开关(29)处于发射档位;步骤2、制作试验板料(4);步骤3、升起升降支架(9),升起压边圈(6);步骤4、降下升降支架(9),使冲头(8)贴近试验板料(4);步骤5、调整两台高速照相机(20)角度,使成像中心都对准于试验板料(4)被激光光斑照射的一个网格点;步骤6、调整电容器组(28)的耐压值和电容值。本发明所述的高速成型极限测试方法可以使用高速摄像机拍摄印刷了网格的板料的变形过程,可计算应变速率和断裂应变。



1. 一种金属板材高速成型极限测试方法,其特征在于包括以下步骤:

步骤1、开始实验前,确认电容充电开关(25)处于断开状态,冲头发射开关(29)处于发射档位,待电容器组(28)放电完成;开启激光测距仪(22),再将冲头(8)上两块衔铁(17)对准电磁铁吸头(16)且冲头(8)圆头顶端对准激光光斑后,使衔铁(17)撞击电磁铁(16)头部的撞块,冲头发射开关(29)弹到电磁吸合档位,闭合电路总开关(23);

步骤2、制作试验板料(4);

步骤3、升起升降支架(9),升起压边圈(6),将试验板料(4)放置于凹模(3)上;

步骤4、降下升降支架(9),使冲头(8)贴近试验板料(4);

步骤5、调整两台高速照相机(20)角度,使成像中心都对准于试验板料(4)被激光光斑照射的一个网格点,记录两台相机与竖直线所夹的锐角 θ_1 和 θ_2 ;

步骤6、调整电容器组(28)的耐压值和电容值,调整变压器电压值与电容器组(28)耐压值对应;

步骤7、完成充电后,断开电容器充电开关(25);

步骤8、打开高速照相机(20),确认激光测距仪(22)打开,进行高速照相机(20)初始对焦、图像长度的对标,测算两个高速照相机的初始相机长度 d_1 和 d_2 ,即高速照相机焦点到初始对焦点的距离;

步骤9、对高速照相机(20),激光测距仪(22)二者时间进行对标,按下冲头发射开关(29);冲头(8)被发射,板料(4)被高速胀形,胀形过程将被高速照相机(20)记录下来,直到冲头(8)达到最大行程,剩余动能被可调缓冲橡胶块(14)和缓冲器(18)吸收;关闭高速照相机(20),试验后断开总电源,确认电容充电开关处于断开状态;依据照相机拍摄的照片找到破裂点,确认破裂时应变速率,求得破裂应变。

一种金属板材高速成型极限测试方法

技术领域

[0001] 本发明涉及金属板材高速成形加工领域,特别涉及一种金属板材高速成形极限测试方法。

背景技术

[0002] 高速高能成形包括多种工艺方法,主要包括爆炸成形、电磁成形、电液成形,也就是利用电气、化学、机械贮存的高能量在瞬间放出而进行加工。电磁成形和爆炸成形都能达到15~300米/秒的加工速度,能极大的提高加工效率。同时,很多金属材料的高应变速率下,其成形极限较室温低速过程有很大的提高。爆炸成形、电磁成形、电液成形国外早在上个世纪中叶就开始了研究,现在已经进入实用阶段。

[0003] 常温低速成形过程中,板材的成形性评价有多种办法,其中成形极限图(FLD)是判断和评定板材成形性能的最为简便和直观的方法,是解决板材冲压成形问题的一个非常有效的工具。FLD是由板材在不同应变路径下的局部失稳极限真实应变 ϵ_1 和 ϵ_2 构成的条带形区域,全面反映了板材在单向拉应力、双向拉应力、平面应变及中间状态作用下的成形极限。在板材成形中,板平面内的两主应变的任意组合,只要落在成形极限图中的成形极限曲线上,板材变形时就会产生破裂,反之则是安全。

[0004] 然而,高速成形过程中涉及应变速率因素,而不同应变速率下材料的塑性变形规律有很大差别,且不同材料的塑性随应变速率变化情况也大不相同。通常来说,板料在超高应变速率下通常塑性较好,但在中速应变速率下塑性较差。而且,板料成形时板料不同位置处的应变速率存在很大差别,这将显著影响板料失效点的预测。因此,高速高能成形的成形极限不能单纯的建立主应变和次应变的关系,而应考虑应变速率效应,常规的成形极限测试方法也不再适用。

[0005] 目前,测量材料的高应变速率下的应变值通常采用霍普金森拉杆或压杆来获得材料的高速拉伸或压缩应力应变曲线;中应变速率则可使用高速拉伸机来进行实验。除普通的高速拉伸机外,还有如专利CN102944474A中所述的一套利用电磁力驱动的超高速率单向拉伸试验装置及方法。但无论采用霍普金森杆抑或高速拉伸机,都只能获得单向拉伸或单向压缩的应变状态,是远远不够的。

[0006] 此外,在高速成形极限实验当中,实验数据的采集也是一个难题。传统的成形极限测试的方法采用在板料上印刷网格,将板料冲压至产生破裂的瞬间立即停止实验,此时对板料破裂处的网格长度进行测量,达到应变测量的目的。然而,高速成形极限实验,无法控制实验在板料产生破裂时终止。专利CN102305745A中提及了一种利用DIC在线图像测量技术的板料成形性能测试装置,装置可以实时测量板料产生的应变,无需控制实验终止,无需对板料进行人工测量。但该专利存在如下缺陷:1、由于DIC技术在测量曲面上的应变时,数据十分不准确,因此装置采用的平底冲头,平底冲头相较圆形冲头,存在圆角处极易破裂、需要使用要求更高的润滑措施等诸多缺陷。2、冲头向上冲压板料的时候,板料到相机快门的距离会产生远近的变化,这会造成图像的放大效应,造成测量误差。3、装置只能测量成形

极限的右半部分,左半部分需要依靠单向拉伸试验以及经验公式。4、平头冲头质量过大,向上移动,无法实现高速实验。

[0007] 因此,目前尚没有一种能直接测量高应变速率下,板料成形极限的装置和方法,现存的高应变速率板料失效预测方法存在很大局限性,迫切需要一种新的成形极限图,及其测试装置和测试方法来有效评价金属板材在高速成形过程中的成形性能,为实际爆炸成形、电磁成形、电液成形等生产过程提供指导依据。

发明内容

[0008] 本发明所要解决的问题是提供一种金属板材高速成形极限实验装置,能够获得不同应变速率下,不同应变路径下的板料成形极限,提供一种可准确、方便评价金属板材高速成形过程中的起皱、破裂问题的方法。

[0009] 本发明的技术方案是提供一种金属板材高速成型极限测试方法,具体包括以下步骤:

[0010] 步骤1、开始实验前,确认电容充电开关处于断开状态,冲头发射开关处于发射档位,待电容器组放电完成;开启激光测距仪,再将冲头上两块衔铁对准电磁铁吸头且冲头圆头顶端对准激光光斑后,使衔铁撞击电磁铁头部的撞块,冲头发射开关弹到电磁吸合档位,闭合电路总开关;

[0011] 步骤2、制作试验板料;

[0012] 步骤3、升起升降支架,升起压边圈,将试验板料放置与凹模上;

[0013] 步骤4、降下升降支架,使冲头贴近试验板料;

[0014] 步骤5、调整两台高速照相机角度,使成像中心都对准于试验板料被激光光斑照射的一个网格点,记录两台相机与竖直线所夹的锐角 θ_1, θ_2 ;

[0015] 步骤6、调整电容器组的耐压值和电容值,调整变压器电压值与电容器组耐压值对应;

[0016] 步骤7、完成充电后,确保断开电容器充电开关;

[0017] 步骤8、打开高速照相机,确认激光测距仪打开,进行高速照相机初始对焦、图像长度的对标,测算两个高速照相机的初始相机长度 d_1, d_2 ,即高速照相机焦点到初始对焦点的距离;

[0018] 步骤9、高速照相机,确认激光测距仪二者进行时间对标,按下发射开关;冲头被发射,板料被高速胀形,胀形过程将被高速照相机记录下来,直到冲头达到最大行程,剩余动能被可调缓冲橡胶块和缓冲器吸收;关闭高速照相机,试验后断开总电源,确认电容充电开关处于断开状态;依据照相机拍摄的照片找到破裂点,确认破裂时应变速率,求得破裂应变。

[0019] 本发明的有益效果在于:

[0020] 1) 采用电磁发射方式发射轻质高强度冲头,设备简单,维护方便,可将冲头在极短时间内加速并以极高速度发射,可使板料获得可在一定范围内调整的高应变速率,同时由于采用冲头向下发射方式,达到重力势能补充动能消耗,采用了电磁铁,可在实验发射前固定冲头。

[0021] 2) 采用常用的符合国标的圆形冲头,避免平底冲头产生的各种缺陷,可在该实验

装置上,通过调整板料形状,测量成形极限图上任意线性应变路径的成形极限点。

[0022] 3)限制了冲头行程,行程可通过调整可调缓冲橡胶块改变,下方还设置了冲头缓冲装置以进一步缓冲冲头,并且由于高速照相机安置于缓冲装置支座与凹模座之间,可有效保护相机不会被冲头损坏,还可以采用平面镜系统,改变高速照相机位置,进一步保护相机。

[0023] 4)实验速度可通过调节电容器组电压和电容量控制。

[0024] 5)采用两台高速照相机和一台激光测距仪记录印刷了网格的板料的三维变形过程,解决了高速成形极限实验过程中各点应变和瞬间应变速率测量的难题,解决了高速实验无法控制破裂终止实验的难题,可通过记录的图像准确的找到初始破裂点。具有通过一次试验就可以完成寻找破裂的优势

[0025] 6)本发明所述的模具可以进行更换,可在不同的拉延筋高度下进行试验。

附图说明

[0026] 图1为本发明的一种高速成形极限实验装置的示意图和电路原理图;

[0027] 图2为凹模座2的截面图和俯视图;

[0028] 图3为凹模3的截面图和俯视图;

[0029] 图4为压边圈6的截面图和俯视图;

[0030] 图5为升降支架9的截面图和A-A剖面图;

[0031] 图6为橡胶缓冲块支座19的截面图和俯视图;

[0032] 图7为相机轴线平面计算原理图。

[0033] 图中:1-导轨支架,2-凹模座,3-凹模,4-试验板料,5-垫圈,6-压边圈,7-紧固螺钉,8-复合材料冲头,9-升降支架,10-电动导轨,11-平板线圈,12-驱动块,13-连接棒,14-可调缓冲橡胶垫,15-限位槽,16-电磁铁,17-衔铁,18-冲头橡胶缓冲块,19-橡胶缓冲块支座,20-高速照相机,21-高速照相机支座,22-激光测距仪,23-电路总开关,24-变压器,25-电容充电开关,26-保护电容,27-高压整流桥,28-电容器组,29-冲头发射开关,30-保护电阻,31-整流桥。

具体实施方式

[0034] 下面结合附图1-7和实施例对本发明作详细说明。

[0035] 如图1所示,本发明提供了一种金属板材高速成型极限实验装置,包括:导轨支架1,凹模座2,凹模3,垫圈5,压边圈6,紧固螺钉7,复合材料冲头8,升降支架9,电动导轨10,平板线圈11,驱动块12,连接棒13,可调缓冲橡胶垫14,限位槽15,电磁铁16,衔铁17,冲头橡胶缓冲块18,橡胶缓冲块支座19,高速照相机20,高速照相机支座21,激光测距仪22和控制电路。

[0036] 其中,电动导轨10布置在方形导轨支架1上端,用电动机带动升降支架9上下移动和固定,升降支架9结构如图5所示,为一对面对称的正方体。升降支架9上用绝缘胶和电木粘接有平板线圈11,平板线圈11由电容器组28供电,产生强大的脉冲电磁力,可推动紧邻其布置,活动的铜质驱动块12向下高速移动,从而带动与其采用螺纹连接的连接棒13,连接棒13与复合材料冲头8采用螺栓固定。冲头8上粘接衔铁17,实验前被吸附在电磁铁16上,电磁

铁16的支撑柱用螺栓固定于升降支架9上端,穿过支架9下端的开孔与衔铁17相对。

[0037] 升降支架9下端中部设计有增厚型开孔限位槽15,连接棒13穿过其中。限位槽上端放置一块可更换的环形缓冲橡胶块14。

[0038] 凹模座2独立于导轨支架1,放置于导轨支架1之间,其下方可垫有一块橡胶垫,凹模座如图2所示,其上端是一个环形凹槽,环形凹模3放置于凹模座2上端的凹槽中。环形凹模3外圈环形布置有螺纹孔,内圈有一圈拉延筋,如图3所示。

[0039] 压边圈6的外圈有环形布置有与凹模3上螺纹孔相对的钻孔,内圈布置有与凹模3上对应的拉延筋,如图4所示。

[0040] 压边圈6用周向布置的螺钉7将板料5压在板料上。凹模座下方安装有实验数据的采集系统,是两台呈对称布置,相机轴线始终可以相交于一点的高速照相机20,和一台垂直布置,用于实时测量冲头8与两台相机焦点所成直线的垂直距离的激光测距仪22。

[0041] 高速照相机20安装在相机支座21上,激光测距仪安装在橡胶缓冲块支座19中央的圆孔中,如图6所示,橡胶缓冲块支座19固定在冲头8正下方,其中央圆孔正对冲头9中央其上圆形凹槽放置有同样中央开孔的冲头橡胶缓冲块18。

[0042] 金属板材高速成型极限实验装置采用的冲头8向下冲压板材4的模式,使得重力势能为冲头8补充一部分迫使板材4变形所消耗的能量。所用冲头8为国标推荐的直径为100mm的半圆形冲头,为减轻冲头8质量,冲头8采用高强度复合材料制成,内部中空,分为半圆头和盖板两部分,两部分的连接采用胶接。采用轻质材料的目的是使一定的平板线圈11放电能量下,冲头8能获得更大的速度。装置提供两种不同质量的冲头8,使得在同样的放电能量下,冲头能获得两种不同等级的速度。

[0043] 连接棒13穿过升降支架9上的限位槽15中,使得冲头8只能上下移动。驱动块12与限位槽15上可调缓冲橡胶块14的距离为冲头8的行程,这个距离略大于冲头8到下方冲头橡胶缓冲块18的距离,保证板料在破裂前相机都能清晰的拍摄到板料的照片,冲头8的动能主要由可调缓冲橡胶块14吸收,过大的残余动能将由冲头橡胶缓冲块18,同时其将起到保护作用。

[0044] 橡胶块14环向设计开口,使得其不必拆卸驱动块12,连接棒13,冲头8的连接,并取出连接棒13就可以更换橡胶块。

[0045] 金属板材高速成型极限实验装置的实验的数据采集系统包括两台呈对称布置的高速照相机20,高速照相机20轴线始终可以相交于一点;还包括一台垂直布置的,用于实时测量冲头8与两台相机焦点所成直线的垂直距离的激光测距仪22。

[0046] 高速照相机20安装在相机支座21上,激光测距仪安装在橡胶缓冲块支座19中央的圆孔中,橡胶缓冲块支座19固定在冲头8正下方,其中央圆孔正对冲头9中央其上圆形凹槽放置有同样中央开孔的冲头橡胶缓冲块18。

[0047] 金属板材高速成型极限实验装置的控制电路包括电路总开关23,变压器24,电容充电开关25,保护电容26,高压整流桥27,电容器组28,冲头发射开关29,保护电阻30,整流桥31。

[0048] 控制电路部分采用市电供电,电路总开关23控制电路的启闭,通过变压器24和高压整流桥27为高压电容器组充电,电容器组28的电压和电容容量可通过改变串并联电容数量调节,以改变放电能量,调节冲头8速度。

[0049] 电容器充电开关25控制电容器组28的通断;保护电容26可以通过一定限度内的交流电,并阻断由于过高的电容器组电压导致的反向击穿直流电,用于保护电容器组28充电电路的安全。

[0050] 冲头发射开关29同时控制电容器组28的放电和电磁铁16的断电,按下冲头发射开关29时,电容器组28对平板线圈12放电,同时电磁铁16断电,将冲头8发射出去。电磁铁16头部设计有撞块,当衔铁撞击撞块的时候,会自动弹起冲头发射开关29,电容器组28通路断开,电磁铁16通电,吸住冲头8,从而方便冲头8的实验前固定。

[0051] 实验的数据采集系统也可以使用平面镜系统将相机安装在别处,但其等效光路应满足前述要求。对冲头8运动范围的限制、橡胶缓冲块支座19和凹模座2的设计可起到对昂贵的高速照相机20多重保护作用,使其不会被失控的冲头8撞坏。

[0052] 此外,本发明还提供了利用上述实验设备进行测试的方法,具体包括以下步骤:

[0053] 步骤1、开始实验前,确认电容充电开关25处于断开状态,冲头发射开关29处于发射档位,待电容器组28放电完成,以保障电路安全,平板线圈不会烧毁,电容器组调整前电容处于不带电状态。开启激光测距仪22,再将冲头8上两块衔铁17对准电磁铁吸头16且冲头8圆头顶端对准激光光斑后,使衔铁17撞击电磁铁16头部的撞块,冲头发射开关29弹到电磁吸合档位,闭合电路总开关23。

[0054] 步骤2、制作试验板料4。

[0055] 试验板料4上印刷正方形网格。网格越小,实验越精确。

[0056] 步骤3、升起升降支架9,升起压边圈6,将试验用板料4放置与凹模3上;

[0057] 放置时要尽量使试验板料(4)上网格线平行或垂直于两台高速照相机(20)的相机轴线所在平面,方便后续图片的数据处理,闭合压边圈6,压紧板料4。此步可根据各个的实验需要,更换不同的压边圈拉延筋高度。

[0058] 步骤4、降下升降支架9,使冲头8贴近板料4;

[0059] 但需留出一段距离,其目的是为了为了使冲头8有充足的加速距离完成瞬间加速,完成加速后,冲头依靠惯性高速冲击板料4,板料4将在极短的时间内被涨破,同时由于重力的补偿作用,可以认为板料在被涨破的过程中,应变速率变化不大。

[0060] 步骤5、调整两台高速照相机20角度,使成像中心都对准于板料4被激光光斑照射的一个网格点,这可使得两个所拍摄的图像都不会由于板料表面拱起而被挡住一部分。记录两台相机与竖直线所夹的锐角 θ_1, θ_2 。这两个夹角将用于后续的图像处理。

[0061] 步骤6、调整电容器组28的耐压值和电容值,调整变压器电压值与电容器组28耐压值对应。闭合电容器充电开关25,完成电容器组28的充电。

[0062] 步骤7、完成充电后,确保断开电容器充电开关25。

[0063] 否则若直接按下冲头发射开关29,平板线圈11可能烧毁。可设置一个熔断保险。

[0064] 步骤8、打开高速照相机20,确认激光测距仪22打开,进行照相机20初始对焦、图像长度的对标,测算初始高速照相机长度 d_1, d_2 (高速照相机焦点到初始对焦点的距离)。

[0065] 步骤9、对高速照相机20,激光测距仪22二者时间进行对标,再按下冲头发射开关29。进行时间对标的目的,是使高速照相机记录的应变数据,和激光测距仪记录的冲头行程,在时间上统一,以避免应变速率的计算产生误差。冲头8被发射,印刷了网格的板料4被高速胀形,胀形过程将被高速照相机20记录下来,直到冲头8达到最大行程,剩余动能被可

调缓冲橡胶块14和缓冲器18吸收。关闭高速照相机20, 试验后断开总电源, 确认电容充电开关处于断开状态。依据高速照相机拍摄的照片找到破裂点, 确认破裂时应变速率, 求得破裂应变。

[0066] 基于本发明的实验装置, 本发明还提供了一种通过两个高速照相机以及激光测距仪确定所拍摄空间中线段长度和坐标的方法, 步骤如下:

[0067] 步骤1. 建立实物空间坐标系, 在两个高速照相机轴线相交的平面上, 约定空间中激光测距仪焦点为原点, 水平方向为x轴, 竖直方向为z轴, 垂直x-z平面方向为y轴, 如图7所示。

[0068] 步骤2. 建立图像坐标系, 约定所拍摄图像中激光测距仪焦点, 也即空间中激光测距仪焦点在成像平面上的投影为原点, 两个高速照相机成像平面与空间中两个高速照相机轴线相交的平面的交线上分别建立 a_1, a_2 轴, 垂直交线方向建立 b_1, b_2 轴, 如图7所示。

[0069] 步骤3. 空间中任意一条直线, 其长度为 l_R , 将其往两个高速照相机轴线相交的平面上投影, 投影长度为 l , 如图7所示, 可知

$$[0070] \quad l_R^2 = l^2 + l_y^2 \quad (1)$$

[0071] 其中 l_y 是空间直线在y轴上的投影长度。

[0072] 因此, 我们只需要分别知道 l 和 l_y 的长度即可知道 l_R 的长度。

[0073] 步骤4. 求 l_y , 由小孔成像原理易知y轴上的投影长度与图像上b轴的长度正相关, 即 $l_y = k_{b1}l_{b1} = k_{b2}l_{b2}$, 因此

$$[0074] \quad l_R^2 = l^2 + (k_b l_b)^2 \quad (2)$$

[0075] 其中, k_b 是基于对应高速照相机的焦点到空间直线在y轴上投影的中点的高速照相机长度 d 决定的图像对标系数, 我们首先将采用先前测算的初始高速照相机长度 d_1, d_2 。

[0076] 步骤5. 求 l , 由图7可知, 单个相机图像上所显示的 l 长度, 并不能直接反应空间中 l 的真实长度, 但通过两个相机中 l 所反应的不同长度的关系, 以及相机快门到投影直线 l 的中点的距离(相机长度)可以求出 l 的长度, 具体方法如下:

[0077] 两个高速照相机轴线与竖直线的夹角 θ_1, θ_2 已知, 测量图像坐标系中, 空间直线分别在 a_1, a_2 轴上的长度 l_1, l_2 , 它们在两个高速照相机轴线相交的平面中的关系如图7所示, 可以证明,

$$[0078] \quad l^2 = \left[\frac{k_{a1}l_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \right]^2 + \left[\frac{k_{a2}l_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \right]^2 - \frac{2k_{a1}k_{a2}l_1l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)}{[\sin(\theta_1 + \theta_2)]^2} \quad (3)$$

[0079] 其中, k_{a1} 和 k_{a2} 分别是基于对应相机的相机长度 d_{a1}, d_{a2} 决定的图像对标系数(空间直线投影直线的中点并不一定体现为图像上直线的中点, 这需要根据高速照相机轴线与直线相对倾斜角和高速照相机长度测算, 高速照相机长度越大, 相对倾斜角越接近直角, 越接近中点), 我们首先将采用先前测算的初始高速照相机长度 d_1, d_2 。

[0080] 联立公式(2), (3), 可得待求空间长度

$$[0081] \quad l_R^2 = (k_b l_b)^2 + \left[\frac{k_{a1}l_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \right]^2 + \left[\frac{k_{a2}l_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \right]^2 - \frac{2k_{a1}k_{a2}l_1l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)}{[\sin(\theta_1 + \theta_2)]^2} \quad (4)$$

[0082] 同时可以确定直线端点的空间坐标, 可以求取如图7所示中, 空间直线在高速照相机轴线平面中投影线 l 与水平线的夹角 θ_1 , 可以证明

$$[0083] \quad \cos \theta_1 = \left[l^2 + \left(\frac{k_{a2} l_2}{\cos \theta_2} \right)^2 - \left(\sqrt{l^2 - k_{a2}^2 l_2^2} - k_{a2} l_2 \tan \theta_2 \right)^2 \right] / \left(\frac{2k_{a2} l_2}{\cos \theta_2} \right) \quad (5)$$

[0084] 或

$$[0085] \quad \cos \theta_1 = \left[l^2 + \left(\frac{k_{a1} l_1}{\cos \theta_1} \right)^2 - \left(k_{a1} l_1 \tan \theta_1 - \sqrt{l^2 - k_{a1}^2 l_1^2} \right)^2 \right] / \left(\frac{2k_{a1} l_1}{\cos \theta_1} \right) \quad (6)$$

[0086] 这样可分别初步求得空间直线的x,z轴坐标值 $l \cos \theta_1$, $l \sin \theta_1$, 而y轴坐标值就是 $k_b l_b$, 这个坐标值是基于以空间直线一个端点为原点的空间坐标系, 我们还要求得其在步骤1中建立坐标系中的坐标值, 这就需要按照步骤3~5的方法求得端到激光聚焦点之间的距离。

[0087] 但目前求得的坐标值并不准确, 因为此时采用的相机长度并不正确, 只是一个估计值, 因此, 需要修正相机长度。本发明采用优化的方法获得真实的相机长度。

[0088] 根据目前的高速照相机长度和轴线夹角 θ_1, θ_2 , 由小孔成像原理, 可以测算出拍摄的图像中, 空间投影直线1的实际线段中点(并非图像上线段中点)。图像上中点到两端的距离比满足下面的关系式:

$$[0089] \quad \frac{s_1}{s_2} = \frac{d_a - 0.5l \cos(\theta_{1,2} \pm \theta_1)}{d_a + 0.5l \cos(\theta_{1,2} \pm \theta_1)} \quad (7)$$

[0090] 其中, s_1 和 s_2 分别是图像上实际直线的中点到图像中线段端点的短边和长边长度。如图7所示。

[0091] 对于空间y轴上的线段 l_y , 其中点在图像上也表示为中点, 从而进一步修正线段中点空间坐标值。

[0092] 步骤6. 通过步骤5最后求得的坐标, 通过激光测距仪测得的该时刻空间坐标原点到两高速照相机焦点连线的距离, 冲头直径100mm, 两个高速照相机轴线与竖直线的夹角 θ_1, θ_2 , 由空间几何关系求得相应的高速照相机长度 $d_{a1}, d_{a2}, d_{b1}, d_{b2}$, (求得的高速照相机长度为空间线段中点到高速照相机焦点平面的距离) 修正图像对标系数 $k_{a1}, k_{a2}, k_{b1}, k_{b2}$, 其关系是

$$[0093] \quad \frac{k'}{k} = \frac{d'}{d} \quad (8)$$

[0094] 其中 k', d' 和 k, d 分别表示修正的图像对标系数, 高速照相机长度和上一步采用的图像对标系数, 高速照相机长度。

[0095] 步骤7. 采用修正的数据, 不断重复步骤3~6, 直到所求得两次坐标之差小于一个约定的误差限 δ 。

[0096] 步骤8. 由于板料上网格是在冲头8的圆面上, 冲头半径R, 板料厚度t已知, 弦长转弧长, 变形后网格线实际长度 s_R 有

$$[0097] \quad s_R = 2(R+t) \arcsin \left[\frac{l_R}{2(R+t)} \right] \quad (9)$$

[0098] 这里忽略了板料变形后, 板料厚度t的变化。 s_R 即为所求, 可用于计算应变, 而连续两张图片计算所得应变, 可用于计算应变速率。

[0099] 为了提高计算效率, 减小计算强度, 根据试验需要, 以上计算方法可通过如下几种

方式减小计算量：

[0100] 1. 通过实验记录的图片，确定板料的初始破裂位置，只对处于初始破裂位置的网格进行如上跟踪分析。

[0101] 2. 采用平面镜系统，改变照相机的位置，使照相机焦点到拍摄点的距离尽量长，这样板料变形过程中引起的照相机长度变化相对较小，计算收敛将更快。同时，采用平面镜系统还可以更好的保护照相机。

[0102] 3. 计算变形过程中的应变速率和应变时，若照相机长度较长，可不对图像对标系数进行修正，或者隔一定距离修正一次。

[0103] 以上所述的具体实施方式，对本发明进行了进一步的详细说明，以上所述仅为本发明的一种具体实施方式而已，并不用于限制本发明。例如压紧压边圈的方式可以使用液压泵驱动的液压缸。实验使用的照相机可以不用布置在底部，底部可用两个平面镜代替，两台高速照相机布置在平面镜的光路上。还包括使用现有DIC设备和平底冲头。尤其是本发明提供的一种通过两个照相机以及激光测距仪确定所拍摄空间中线段长度和坐标的方法，不局限于本专利中描述的采用印刷网格的方式，其还包括了在板料喷涂散斑，采用类似于DIC的图像处理技术，通过图像转换矩阵的方式，实现数据在线处理。

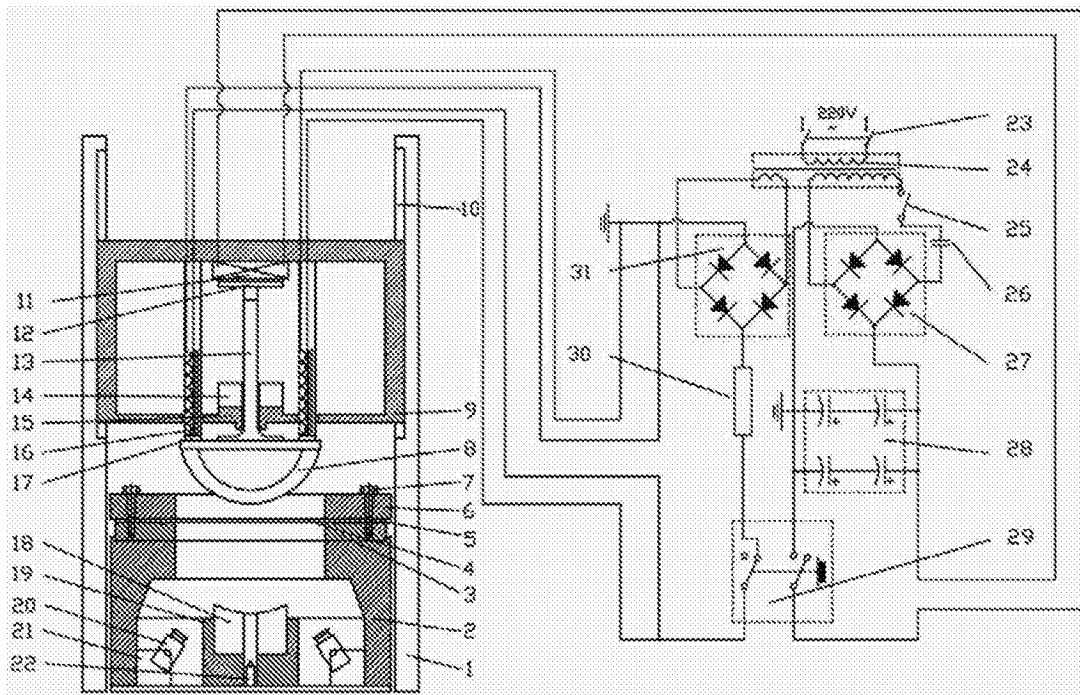


图1

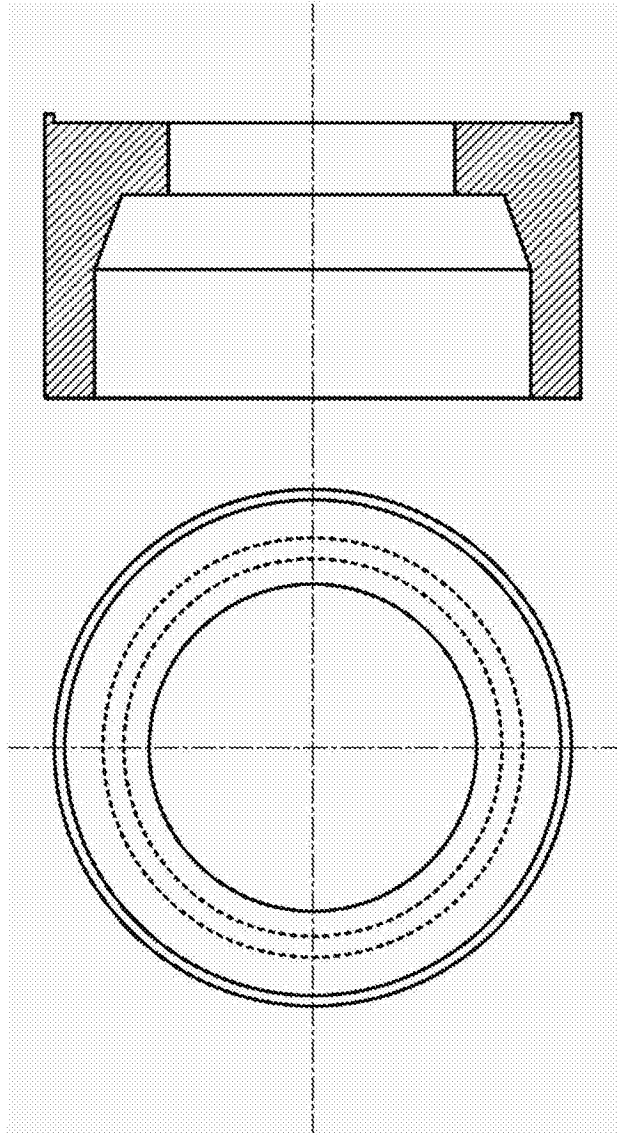


图2

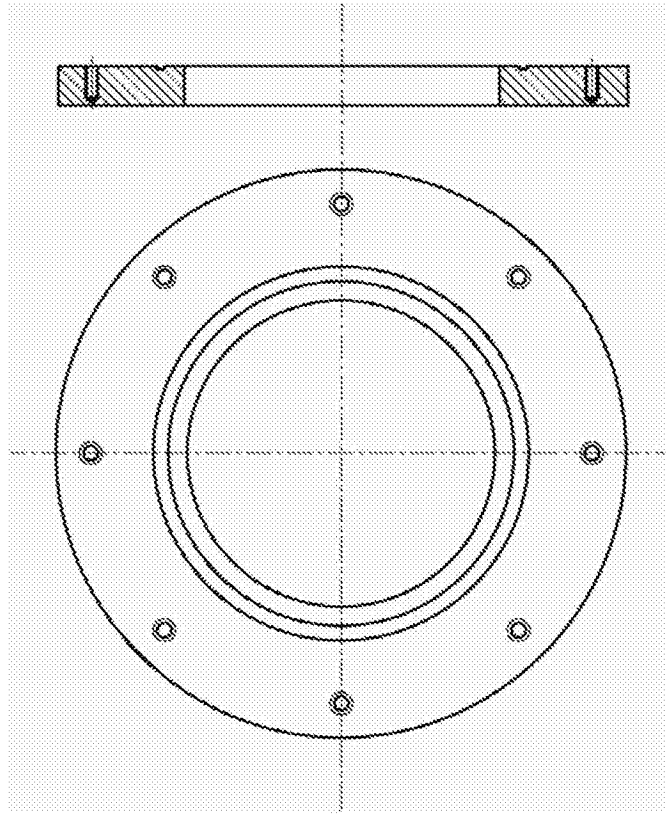


图3

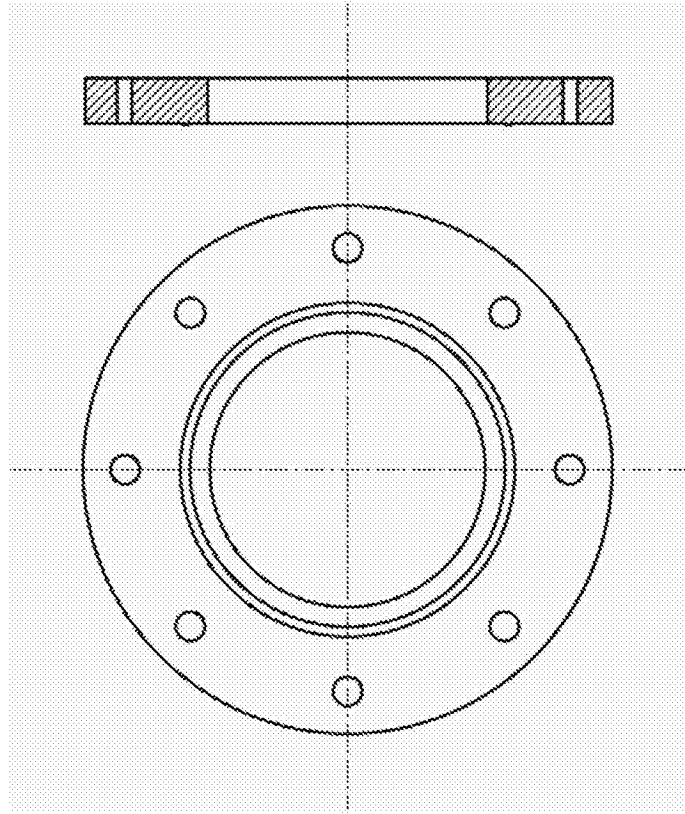


图4

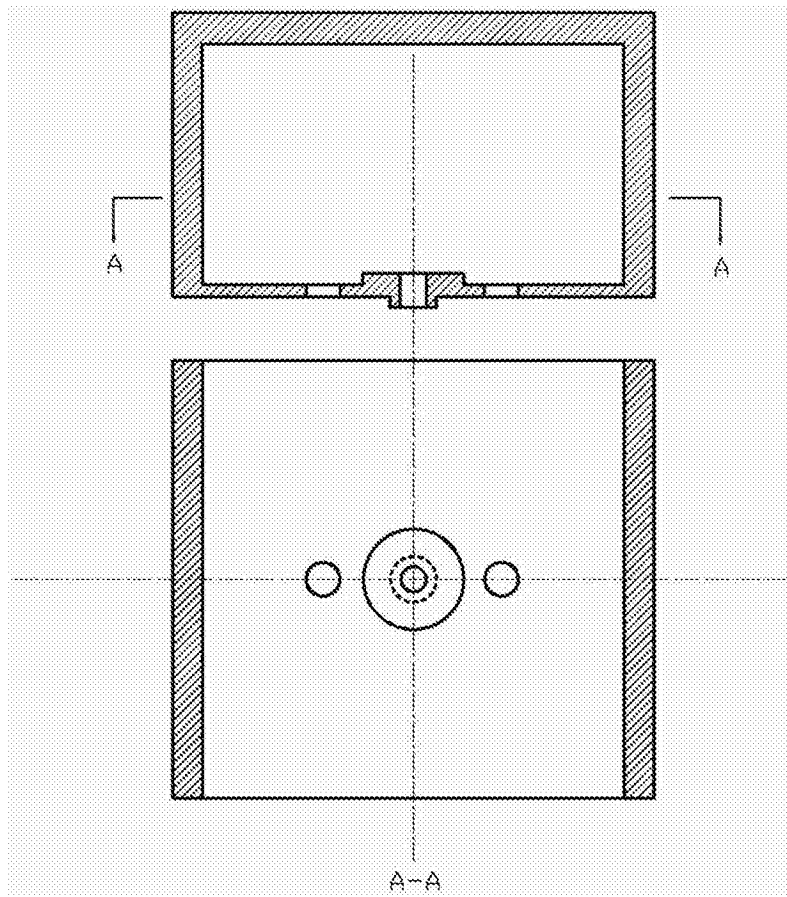


图5

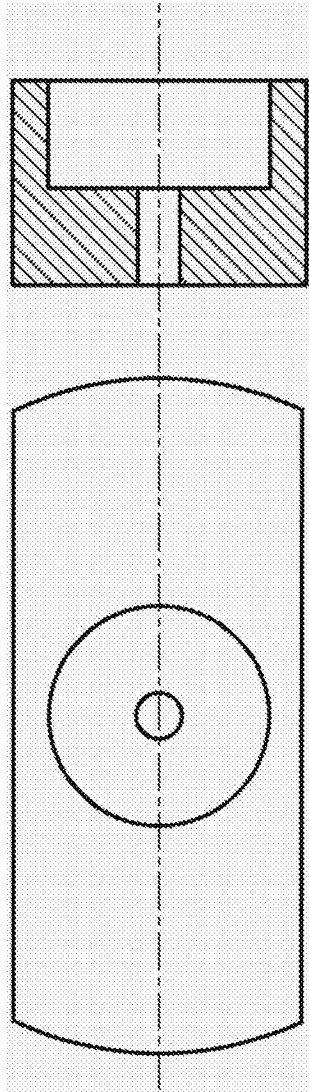


图6

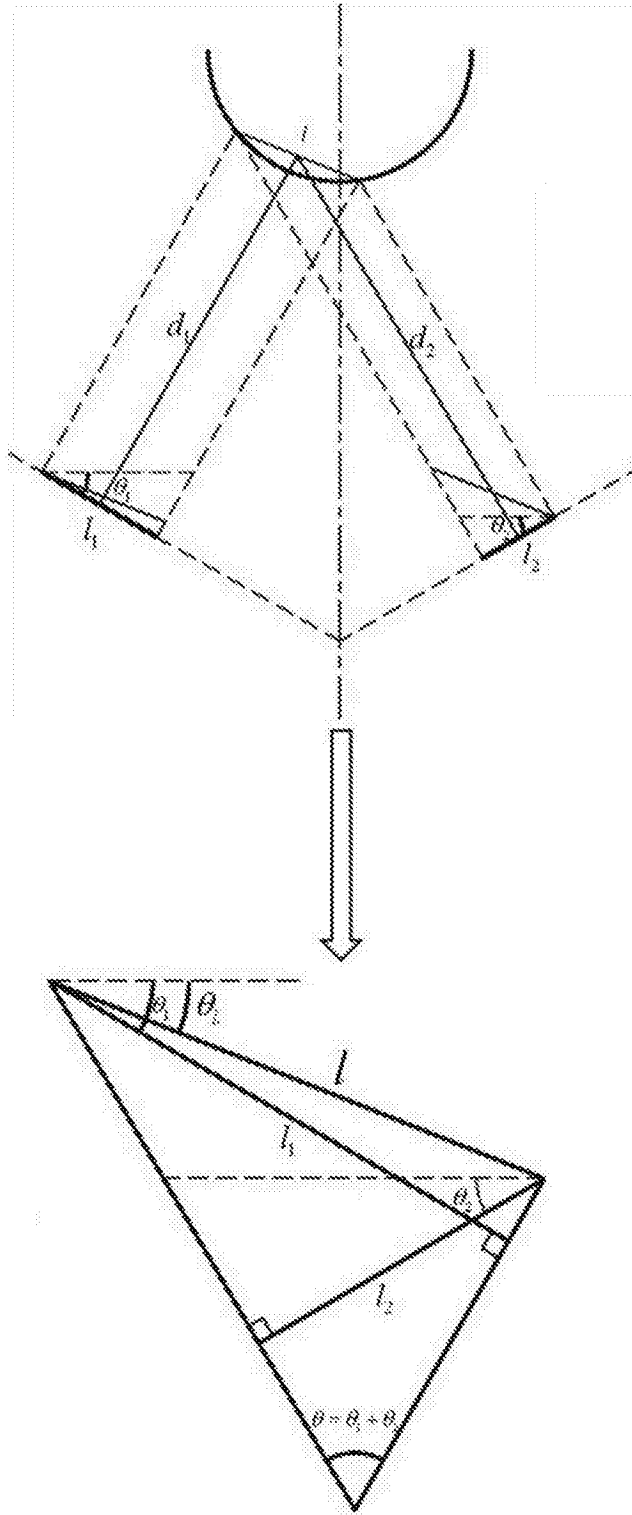


图7