



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109706309 A

(43)申请公布日 2019.05.03

(21)申请号 201711012259.8

(22)申请日 2017.10.26

(71)申请人 中国科学院沈阳自动化研究所  
地址 110016 辽宁省沈阳市东陵区南塔街  
114号

(72)发明人 陆莹 乔红超 赵吉宾 孙博宇  
胡太友

(74)专利代理机构 沈阳科苑专利商标代理有限  
公司 21002

代理人 王倩

(51)Int.Cl.  
G21D 10/00(2006.01)

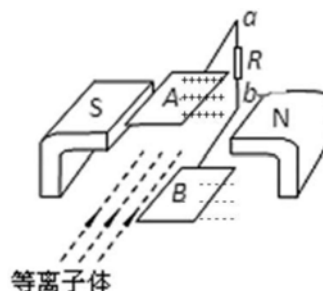
权利要求书1页 说明书5页 附图2页

(54)发明名称

一种基于激光冲击强化等离子体冲击波约束方法

(57)摘要

本发明公开了一种激光冲击强化等离子体冲击波约束方法。利用强磁场的约束使激光诱导产生的等离子体(正离子、负离子)分离,使正离子附着在牺牲层(铝箔或者黑胶带)表面,形成一种透明带电的等离子体约束层,主要作用是约束产生的等离子体冲击波,增强冲击波对靶材的作用效果。由于等离子体存在的时间尺度要远大于激光脉冲宽度,所以利用强磁场将激光诱导产生的等离子体正负离子分离形成一层约束层。本发明方法工艺简单,可控性强、效果显著,相比于传统的约束层(水或者玻璃),激光诱导产生的等离子体可以对复杂曲面、凹槽、榫槽、复杂内壁面的激光冲击强化进行约束,有效地抑制冲击波向外扩散,提高激光冲击强化效果。



1. 一种基于激光冲击强化等离子体冲击波约束方法,其特征在于,包括以下步骤:

(1) 采用高能激光诱导工件表面吸收层产生等离子体冲击波,当激光辐照工件表面时,使工件表面的吸收保护层气化电离,形成的等离子体作为冲击波能量载体;

(2) 利用永磁体形成强磁场约束激光诱导产生的等离子体分离,使正离子附着在牺牲层表面,形成一种带电的等离子体约束层;

(3) 利用强磁场将激光诱导产生的等离子体的正、负离子分离,形成一层带电的约束层;

(4) 利用机器人夹持永磁体,使磁场线方向与工件表面一致,等离子体中的正离子作为约束层吸附在牺牲层表面,电子则在磁场的作用下移动工件另一侧,实现对激光冲击强化的等离子体冲击波的约束。

2. 根据权利要求1所述的一种基于激光冲击强化等离子体冲击波约束方法,其特征在于所述高能激光的功率密度为 $10^9\text{W/s}$ 。

3. 根据权利要求1所述的一种基于激光冲击强化等离子体冲击波约束方法,其特征在于所述强磁场的磁感应强度大于 $0.5\text{T}$ 。

4. 根据权利要求1所述的一种基于激光冲击强化等离子体冲击波约束方法,其特征在于所述牺牲层为铝箔或者黑胶带。

5. 根据权利要求1所述的一种基于激光冲击强化等离子体冲击波约束方法,其特征在于永磁体为N极或者S极。

6. 根据权利要求1所述的一种基于激光冲击强化等离子体冲击波约束方法,其特征在于所述磁场线方向与工件表面保持一致具体为:磁场线方向与工件表面平行,且工件表面位于磁场内。

## 一种基于激光冲击强化等离子体冲击波约束方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种激光冲击强化等离子体冲击波约束方法,利用强磁场约束激光诱导产生的等离子体附着在牺牲层表面,形成一种带电的等离子体约束层。

### 背景技术

[0002] 激光与材料之间的相互作用是一个非常复杂的过程,包括激光对物体的热作用,物质对激光的吸收、反射以及激光在物质中的传播等,激光与物质的相互作用机制非常复杂,主要包括韧致吸收、光电离、多光子吸收、空穴吸收以及杂质吸收等多种类型,影响这些作用的因素主要包括波长、功率密度、能量密度、脉冲宽度等激光参数、材料性质、状态参量等,高功率激光束作用在固体靶材表面时,靶表面吸收大量激光能量引发的物理现象可归结为热效应和力学效应,当功率密度在 $10^3\sim 10^4\text{W}/\text{cm}^2$ 时,激光在材料表面主要是热效应,功率密度大于 $10^6\text{W}/\text{cm}^2$ ,脉冲持续时间大于 $100\mu\text{s}$ 时,激光与材料的相互作用基本上是气化构成,当功率密度大于 $10^9\text{W}/\text{cm}^2$ 时,就会出现等离子体,激光冲击强化过程属于最后一种,当高功率密度的激光辐照材料表面时,直接使吸收保护层气化电离,形成高温、高压的等离子体,等离子体是由带点的正离子、负离子(其中包括正离子、负离子、电子、自由基和各种活性基团组成)宏观成电中性,形成的等离子体是冲击波能量载体。等离子体的存在要满足一定的空间和时间矢量条件的,才能达到等离子体自持稳态的时空矢量场。

[0003] 等离子体中粒子的运动与电磁场(外场及粒子产生的自洽场)的运动紧密耦合,不可分割。

[0004] 目前常用的激光冲击强化约束层主要是K9光学玻璃和水,起到限制冲击波向外传播,增加金属表面冲击波压力的作用。但是使用这两种材料作为约束层存在诸多缺陷:玻璃作为约束层可能对人员和设备产生威胁,冲击波的作用会导致玻璃破碎甚至飞溅,容易打坏其他设备甚至对人造成伤害,而且约束层无法迅速更换,大大降低了强化效率,而且只能用来加工平面,不能对榫槽、焊缝等复杂曲面进行加工,无法满足大规模工业化生产的需要。以水作为约束层,由于水为液态流体,其厚度很难调控,强化效果会有较大波动,同时如果需要加工复杂曲面或者内部结构,水流会存在死角,无法达到指定位置。

### 发明内容

[0005] 本发明提供了一种新的激光冲击强化冲击波约束方法,即利用强磁场约束激光诱导产生的等离子体附着在牺牲层表面,形成一种带电的等离子体约束层,由于等离子体存在的时间尺度要远大于激光脉冲宽度,所以利用强磁场将激光诱导的等离子体正负离子分离,形成一层约束层的方法是可行的。

[0006] 本发明的技术方案为:一种基于激光冲击强化等离子体冲击波约束方法,包括以下步骤:

[0007] (1) 采用高能激光诱导工件表面吸收层产生等离子体冲击波,当激光辐照工件表面时,使工件表面的吸收保护层气化电离,形成的等离子体作为冲击波能量载体;

[0008] (2) 利用永磁体形成强磁场约束激光诱导产生的等离子体分离,使正离子附着在牺牲层表面,形成一种带电的等离子体约束层;

[0009] (3) 利用强磁场将激光诱导产生的等离子体的正、负离子分离,形成一层带电的约束层;

[0010] (4) 利用机器人夹持永磁体,使磁场线方向与工件表面一致,等离子体中的正离子作为约束层吸附在牺牲层表面,电子则在磁场的作用下移动工件另一侧,实现对激光冲击强化的等离子体冲击波的约束。

[0011] 所述高能激光的功率密度为 $10^9\text{W/s}$ 。

[0012] 所述强磁场的磁感应强度大于 $0.5\text{T}$ 。

[0013] 所述牺牲层为铝箔或者黑胶带。

[0014] 永磁体为N极或者S极。

[0015] 所述磁场线方向与工件表面保持一致具体为:磁场线方向与工件表面平行,且工件表面位于磁场内。

[0016] 本发明有益效果如下:

[0017] 1、以等离子体正离子作为约束层进行激光冲击强化,可有效约束等离子体冲击波向金属内部传播。

[0018] 2、以等离子体正离子作为约束层进行激光冲击强化,相比于未施加约束层的强化(残余应力约为 $-100\text{MPa}$ ),可获得较深的残余应力层(残余应力约为 $-450\text{MPa}$ )。

[0019] 3、以等离子体正离子作为约束层进行激光冲击强化,与水作为约束层的强化效果基本相当(水约束强化形成的残余应力约为 $-500\text{MPa}$ )。

[0020] 4、采用磁感应强度大于 $0.5\text{T}$ 的环装或者板装永磁体,磁感线方向平行于试样表面,使得等离子体中的正离子作为约束层吸附在牺牲层表面,电子则在磁场的作用下移动工件另一侧,实现对激光冲击强化的等离子体冲击波的约束。

[0021] 5、本发明方法工艺简单,可控性强、效果显著,相比于传统的约束层(水或者玻璃),激光诱导产生的等离子可以对复杂曲面、凹槽、榫槽、复杂内壁面的激光冲击强化进行约束,有效地抑制冲击波向外扩散,提高激光冲击强化效果。

## 附图说明

[0022] 图1是本发明激光冲击强化示意图。

[0023] 图2是本发明等离子体爆炸离子运动示意图。

[0024] 图3在磁场作用下等离子体偏转示意图。

[0025] 图4是本发明实施例的零件示意图。

[0026] 图5榫槽尺寸结构示意图。

## 具体实施方式

[0027] 下面结合附图对本发明进行详细说明。

[0028] 如图1所示,本发明公开了一种激光冲击强化等离子体冲击波约束方法。利用强磁场的约束使激光诱导产生的等离子体(正离子、负离子)分离,使正离子附着在牺牲层(铝箔或者黑胶带)表面,形成一种透明带电的等离子体约束层,主要作用是约束产生的等离子体

冲击波,增强冲击波对靶材的作用效果。由于等离子体存在的时间尺度要远大于激光脉冲宽度,所以利用强磁场将激光诱导产生的等离子正负离子分离形成一层约束层。

[0029] 当功率密度大于 $10^9\text{W}/\text{cm}^2$ 时,就会出现等离子体,激光冲击强化过程属于最后一种,当高功率密度的激光辐照材料表面时,直接使吸收保护层气化电离,形成高温、高压的等离子体,等离子体是由带点的正离子、负离子(其中包括正离子、负离子、电子、自由基和各种活性基团组成)宏观成电中性,形成的等离子体是冲击波能量载体。等离子体的存在要满足一定的空间和时间矢量条件的,才能达到等离子自持稳态的时空矢量场。

[0030] 如图2、图3所示,当高功率密度激光照射到靶材表面,表面牺牲层吸收激光能量,表面温度升高,当温度超过牺牲层气化温度时,牺牲层表面发生气化现象,并伴随物质喷射。之后,牺牲层表面和喷射物质继续吸收激光能量,导致喷射物质进一步电离,最后形成等离子体,等离子体的形成过程与激光本身因素和牺牲层表面特征有关,通过建立模型和解析,确定等离子体的作用时间在数百纳秒附近。等离子体作为物质的一种聚集状态,其空间尺度远大于德拜长度,存在时间尺度远大于等离子体响应时间,为该方法的实现提供的时间与空间的可能性。在此情况下,等离子体的机体相互作用起主要作用,在较大尺度上正负电荷大致相等,满足所谓的准中性条件,因此等离子存在判据为:

$$[0031] \quad \text{等离子体的空间尺度 } l, l \gg \lambda_D, \lambda_D = \left( \frac{kT_e \epsilon_0}{e^2 n_e} \right)^{1/2}$$

$$[0032] \quad \text{等离子体的时间尺度 } \tau, \tau \gg \tau_p, \tau_p = \left( \frac{\lambda_D}{kT_e / m_e} \right)^{1/2}$$

$$[0033] \quad \text{等离子体参数 } \Lambda, \Lambda \gg 1, \Lambda \approx 4 \pi n_0 \lambda_D^3 \propto \left( T^3 / n_0 \right)^{1/2}$$

[0034] 其中, $\lambda_D$ 表示德拜长度, $\tau_p$ 表示电子走完一个振幅所需的时间(等离子体电中性成立的最小时间尺度), $k$ 表示玻尔兹曼常数, $T$ 表示离子的热动力学温度, $e$ 表示电子电荷。 $\epsilon_0$ 表示真空介电常数。

[0035]  $\Lambda$ 表示德拜球内存在的带电粒子数, $n_e$ 表示电子密度, $m_e$ 表示电子质量, $n_0$ 表示中性物质密度。

[0036] (1) 激光冲击强化预处理:在零件激光冲击强化处理后,需对工件表面进行清洗:去除零件表面涂覆的吸收层,将经冲击强化处理后的零件放入装有温度为 $22 \pm 2^\circ\text{C}$ 、酒精浓度为75-95%的超声清洗机中,超声频率为38-47kHz,清洗15-20min,然后利用去离子水冲洗1-2min后,用干燥的氮气吹干。

[0037] (2) 加工表面覆盖吸收层:在洁净间中,在零件表面覆盖一层厚度为100-200 $\mu\text{m}$ 的黑胶或者铝箔带作为吸收层;

[0038] (3) 施加电场:在试样加工前,利用五轴机器人夹持永磁体(N极或者S极),磁场线方向与试样表面保持一致,等离子体中的正离子作为约束层吸附在牺牲层表面,电子则在磁场的作用下移动另一侧。

[0039] 若激光非垂直入射到试样表面,则等离子体中的正离子作为约束层吸附在牺牲层表面,电子则在磁场的作用下移动另一侧。

[0040] 本发明在零件强化表面覆盖吸收层之前,零件表面需要预先处理:将零件放入装

有水温为 $22\pm 2^{\circ}\text{C}$ 去离子水的超声清洗机中,超声频率为38–47kHz,清洗15–20min;再用0.4–0.8MPa的干燥氮气吹干,然后放入 $70^{\circ}\text{C}$ 的干燥箱中干燥20min。

[0041] 一种基于激光冲击强化等离子体冲击波约束方法,包括以下步骤:

[0042] (1) 高能激光(功率密度达到 $10^9\text{W/s}$ )诱导工件表面吸收层产生等离子体冲击波,当高功率密度的激光辐照材料表面时,直接使吸收保护层气化电离,形成高温、高压的等离子体,等离子体是由带点的正离子、负离子(其中包括正离子、负离子、电子、自由基和各种活性基团组成)宏观成电中性,形成的等离子体是冲击波能量载体。

[0043] (2) 利用强磁永磁体形成强磁场(磁感应强度大于0.5T)约束激光诱导产生的等离子体(正离子、负离子)分离,使正离子附着在牺牲层(铝箔或者黑胶带)表面,形成一种带电的等离子体约束层。

[0044] (3) 从时间先后上,由于激光诱导产生的等离子体后产生冲击波,但是其时间间隔极小,可以忽略不计。

[0045] (4) 等离子体存在的时间尺度(10ms–50ms)要远大于激光脉冲宽度(10ns–50ns),利用强磁场将激光诱导产生的等离子正负离子分离,形成一层带电的约束层,激光冲击强化时间尺度可以达到等离子自持稳态的时空矢量场。

[0046] 利用五轴机器人夹持永磁体,磁场线方向与试样表面保持一致,等离子体中的正离子作为约束层吸附在牺牲层表面,电子则在磁场的作用下移动另一侧。永磁体的性状可根据实际情况选择环形或者片状,永磁体的N极与S极的位置和距离取决于试样与激光的相对位置关系。例如,永磁体为片状时,分别做为N极和S极永磁体相对设置,固定于机器人,使磁场线与试样表面平行,且试样表面位于磁场线中;永磁体为环形(或者圆管状)时,分别做为N极和S极的环形(或者圆管状)永磁体并列设置,固定于机器人,二者侧表面间留有距离,轴线平行,半径大小相同;使磁场线与试样表面平行,且试样表面位于磁场线中。

[0047] 实施例1

[0048] 试件材料:长度为55mm、厚度为3mm的FGH4169高温镍合金标准拉压疲劳试样,表面抛光;

[0049] 在零件强化表面覆盖吸收层之前,将零件放入装有水温为 $25^{\circ}\text{C}$ 去离子水的超声清洗机中,超声频率为30kHz,清洗20min;再干燥氮气吹干,然后放入 $70^{\circ}\text{C}$ 的干燥箱中烘干30min。

[0050] 在钛合金零件的表面覆盖一层 $120\mu\text{m}$ 后的黑胶带,将永磁体靠近强化卡具,永磁体的距离与试验件的距离小于200mm,调整激光参数(脉宽为12ns、波长为1064nm、激光能量为5J、重复频率为2Hz、光束直径为2mm),开启激光束进行冲击强化处理,其中搭接率为30%,冲击1遍。

[0051] 在零件激光冲击强化处理后,去除零件表面涂覆的吸收层,将经冲击强化处理后的零件放入装有温度为 $25^{\circ}\text{C}$ 、酒精浓度为75%的超声清洗机中,超声频率为50kHz,清洗30min,然后利用去离子水冲洗2min后,用干燥的氮气吹干。

[0052] 实施例2

[0053] 试件材料:FGH4169高温镍合金盘榫结构件,尺寸形貌如图5所示,加工装置结构示意图如图4;

[0054] 在零件强化表面覆盖吸收层之前,将盘榫结构件榫槽内部用95%的酒精冲洗;再

干燥氮气吹干。

[0055] 在榫槽内壁的表面覆盖一层120 $\mu$ m后的黑胶带(确保中间无气泡存留),将装有永磁体的柔性导光臂伸入榫槽中,调整永磁体的距离与试验件的距离小于200mm,调取激光工艺参数(脉宽为12ns、波长为1064nm、激光能量为7J、重复频率为1Hz、光束直径为2mm),开启激光束进行冲击强化处理,其中搭接率为30%,冲击1遍。

[0056] 在零件激光冲击强化处理后,去除零件表面涂覆的吸收层,将盘榫结构件榫槽内部用95%的酒精冲洗;再干燥氮气吹干。

[0057] 上述实施例1试样冲击效果如表1所示。

[0058] 表1试件激光冲击后寿命与完好试件未经激光冲击强化的残余应力对比

[0059]

序号	残余应力(MPa)	显微硬度(HV)
未冲击镍合金试件	52	375
水作为约束层冲击试验件	-500	456
实施例1	-450	443
实施例2	-435	未测

[0060] 从表1的试验数据中可知,以等离子体正离子作为约束层进行激光冲击强化,相比于未施加约束层的强化(残余应力约为-100MPa),可获得较深的残余应力层(残余应力约为-450MPa);以等离子体正离子作为约束层进行激光冲击强化,与水作为约束层的强化效果基本相当(水约束强化形成的残余应力约为-500MPa)。

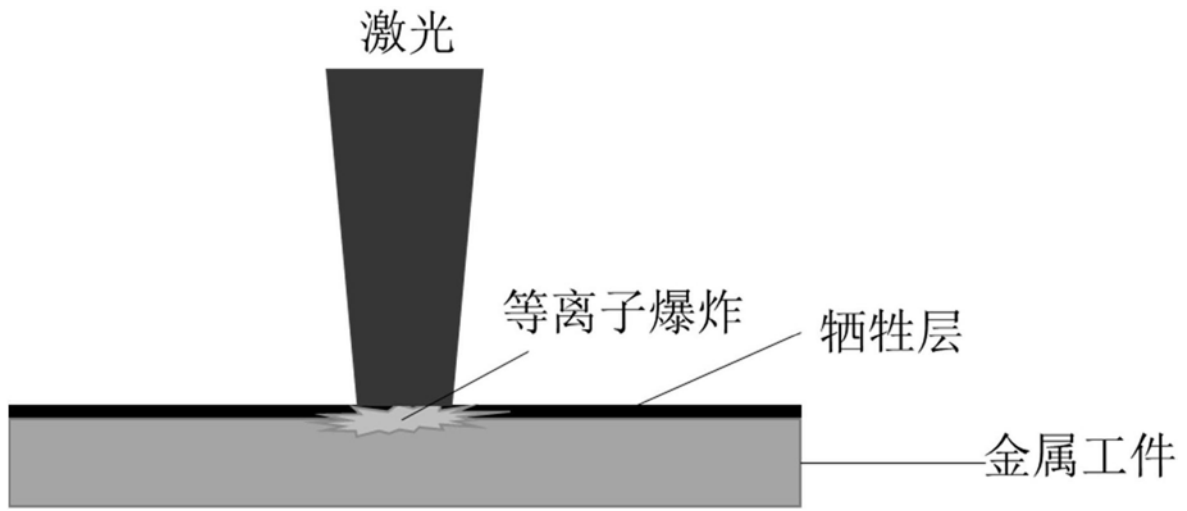


图1

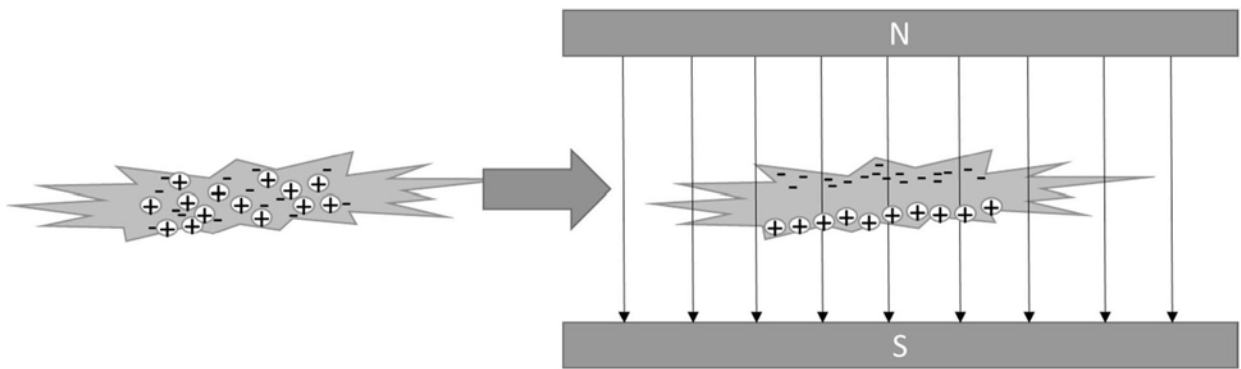


图2

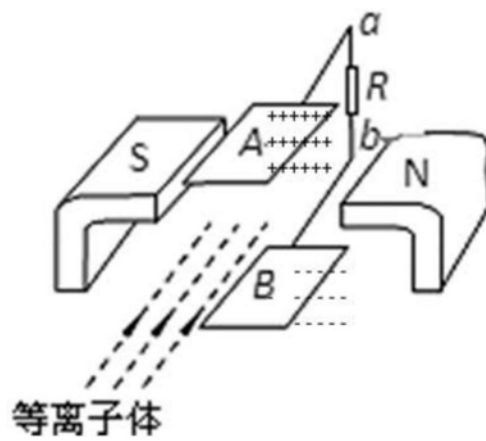


图3



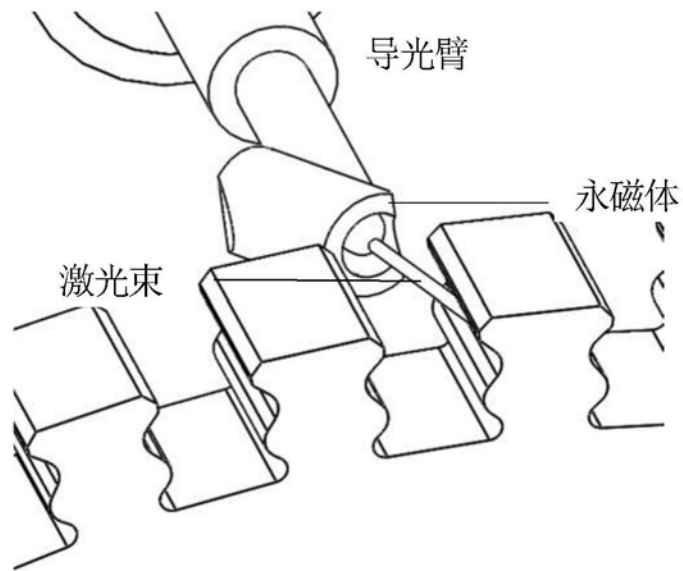


图4

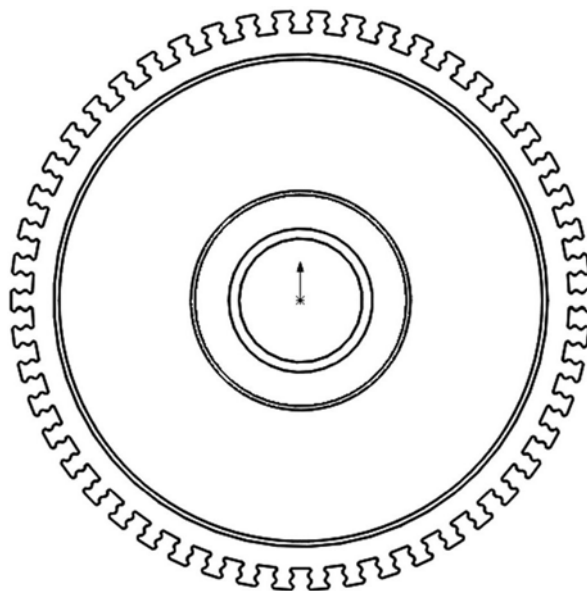


图5