磁脉冲点焊焊枪的设计及仿真分析

陈昶^{1,2},朱佳佩²,柳泉潇潇²,崔俊佳²,蒋浩²,李光耀^{2,3*}

(1.湖南城市学院 机械与电气工程学院,湖南 益阳 413000; 2.湖南大学 整车先进设计制造技术 全国重点实验室,长沙 410082; 3.北京理工大学 深圳汽车研究院(电动车辆国家工程实验室深圳 研究院),广东 深圳 518118)

摘要:目的 根据现有平板线圈的不足,设计了一种用于自动化作业的磁脉冲点焊焊枪。方法 采用有限元 模拟方法对比分析了磁脉冲点焊焊枪线圈和现有平板线圈的性能差异,并对磁脉冲点焊焊枪线圈的结构进 行了优化。结果 当线圈工作部分高 10 mm、宽 4 mm 时,焊枪线圈和平板线圈的最大电流密度、最大磁感 应强度、最大洛伦兹力分别为 3.142×10¹⁰ A/m² 和 3.639×10¹⁰ A/m²、19.40 T 和 21.69 T、5.149×10¹¹ N 和 1.626×10¹² N。当线圈工作部分宽 4 mm 时,随着高度由 10 mm 降低至 4 mm,焊枪线圈的最大电流密度和 最大洛伦兹力分别提升了 27.56%和 57.64%。当驱动能力接近时,焊枪线圈所产生的位移仅为平板线圈的 13.09%。当焊枪线圈工作部分截面为 10 mm×10 mm 的方形时,飞板凸台在 20 µs 时的速度仅为 200 m/s;而 当截面为 ø5.6 mm 的圆形时,飞板凸台在 19.2 µs 时便产生 237 m/s 的速度。结论 在工作部分的高度和宽度 相同的情况下,焊枪线圈的性能要弱于现有平板线圈的性能。在宽度不变的条件下降低焊枪线圈工作部分 的高度可以增大飞板的电流密度、洛伦兹力和速度,并且在性能相近的情况下,焊枪线圈工作部分所受应 力要小于现有平板线圈所受应力。另外,将磁脉冲点焊焊枪线圈工作部分的截面由方形替换为相同面积的 圆形,可以获得更优的焊接条件。

关键词:磁脉冲点焊;焊枪;设计;线圈;仿真分析 DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2024.07.013 中图分类号: TH164 文献标志码: A 文章编号: 1674-6457(2024)07-0153-10

Design and Simulation Analysis of Magnetic Pulse Spot Welding Torch

CHEN Chang^{1,2}, ZHU Jiapei², LIU Quanxiaoxiao², CUI Junjia², JIANG Hao², LI Guangyao^{2,3*}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan City University, Hunan Yiyang 413000, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing Technology for Vehicle, Hunan University, Changsha 410082, China;

 Shenzhen Automotive Research Institute (Shenzhen Research Institute of National Engineering Laboratory for Electric Vehicles), Beijing Institute of Technology, Guangdong Shenzhen 518118, China)

Received: 2024-05-14

引文格式:陈昶,朱佳佩,柳泉潇潇,等.磁脉冲点焊焊枪的设计及仿真分析[J].精密成形工程,2024,16(7):153-162.

CHEN Chang, ZHU Jiapei, LIU Quanxiaoxiao, et al. Design and Simulation Analysis of Magnetic Pulse Spot Welding Torch[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16(7): 153-162.

收稿日期: 2024-05-14

基金项目:湖南省自然科学基金(2023JJ50340);湖南省教育厅科学研究项目(23C0319,22A0565);国家自然科学基金(52175315,52375331);深圳市科技计划(KQTD20200820113110016)

Fund: Natural Science Foundation of Hunan Province (2023JJ50340); Scientific Research Project of Hunan Provincial Department of Education (23C0319, 22A0565); National Natural Science Foundation of China (52175315, 52375331); Shenzhen Science and Technology Program (KQTD20200820113110016)

^{*}通信作者(Corresponding author)

ABSTRACT: The work aims to design a magnetic pulse spot welding torch used for automatic operation based on the shortcomings of the existing flat coil. The performance differences between the magnetic pulse spot welding torch coil and the existing flat coil were compared and analyzed by finite element simulation. The structure of magnetic pulse spot welding torch coil was optimized. When the working part of the coil was 10 mm high and 4 mm wide, the maximum current density, maximum magnetic induction and maximum Lorentz force of the welding torch coil and the flat coil were 3.142×10^{10} A/m² and 3.639×10^{10} A/m^2 , 19.40 T and 21.69 T, 5.149×10¹¹ N and 1.626×10¹² N, respectively. When the working part of the coil was 4 mm wide, the maximum current density and the maximum Lorentz force of the welding torch coil could be increased by 27.56% and 57.64% respectively by decreasing the height from 10 mm to 4 mm. When the driving capacity was close, the displacement generated by the welding torch coil was only 13.09% of that of the flat coil. When the cross section of the working part of the welding torch coil was a square with a size of 10 mm×10 mm, the velocity of the bump of the flyer plate was just 200 m/s at 20 μ s; When the cross section was a circle with a diameter of 5.6 mm, the bump of the flyer plate reached the velocity of 237 m/s at 19.2 µs. The performance of the welding torch coil is weaker than that of the existing flat coil when the height and width of the working part of the two coils are the same. The current density, Lorentz force and speed of the flyer plate can be increased by reducing the height of the working part of the welding torch coil at constant width. Moreover, the stress on the working part of the welding torch coil is less than that on the existing flat coil in the case of similar performance. In addition, better welding conditions can be obtained by replacing the cross section of the working part of the magnetic pulse spot welding torch coil with a circle with the same area from a square.

KEY WORDS: magnetic pulse spot welding; welding torch; design; coil; simulation analysis

在汽车制造中使用轻金属部分或全部替代传统 钢材是减少排放、提升续航里程的一个有效手段^[1-4]。 铝合金作为典型的轻金属,具有比强度高、耐腐蚀性 好和回收潜力大等优点,广泛应用于覆盖件、发动机 和变速箱等汽车零部件的制造中^[5-8]。铝合金的使用 为汽车轻量化技术的发展提供了更多的选择,但也带 来了一个亟待解决的问题——铝合金与同种/异种材 料之间的连接。

焊接是汽车制造业中的一项重要工艺,由于铝合 金具备氧化能力和导热性较强、线膨胀系数较高的特 点,因此难以使用传统的熔焊方法进行连接^[9-12]。磁 脉冲焊接(MPW)作为一种安全、高效、环保的固 相焊接方法,已被证明能够高质量地应用于铝合金的 焊接中^[13]。谢吉林等^[14]采用磁脉冲焊接的方法连接 了 1060 铝合金板和 AZ31 镁合金板,研究了不同工 艺参数下焊接接头的微观组织和力学性能。Wang 等^[15] 获得了1060 铝合金板与 T2 铜板之间的磁脉冲焊接接 头,通过光滑粒子流体动力学(SPH)分析了焊接界面 的形貌。许冰等^[16]实现了 5052 铝合金板与 HC420LA 高强钢的磁脉冲焊接,并揭示了焊接接头的盐雾腐蚀 机理。

磁脉冲点焊(MPSW)是磁脉冲焊接的一种形式, 相较于常规的磁脉冲焊接,它无须额外的绝缘辅助垫 片即可实现加工,具有工艺可控性高和易于实现柔性 化制造等优势。磁脉冲点焊的基本原理如图1所示。 首先在铝合金飞板上预成形一个凸台以获得所需要 的焊接间隙,在飞板与基板装配好后,将凸台一侧置 于平板线圈的工作部分。平板线圈通过线缆与磁脉冲 发生器相连,磁脉冲发生器主要由电容器组构成,相 较于电磁成形,磁脉冲焊接所用电容器组需要具备更



图 1 磁脉冲点焊工艺示意图 Fig.1 Schematic of magnetic pulse spot welding process

高的能量控制精度与重复性。由磁脉冲发生器释放出的瞬时电流流经平板线圈工作部分后,会致使飞板上的凸台形成与瞬时电流方向相反的感应电流,从而产生背离平板线圈方向的洛伦兹力。在巨大洛伦兹力的作用下,飞板铝合金高速撞击基板金属,二者产生冶金结合进而实现焊接。

在基础研究阶段,大多数研究中的磁脉冲点焊驱 动力都来源于置于工作台之上的平板线圈,这种线圈 存在不易移动的弊端,限制了磁脉冲点焊加工的自动 化作业程度,因此有必要对灵活性更高的磁脉冲点焊 焊枪进行设计,以促进磁脉冲点焊工艺在汽车制造领 域的工业化应用。

1 磁脉冲点焊焊枪模型

磁脉冲点焊焊枪应当尽可能轻便小巧以适应各种空间条件下的焊接。另外,焊枪需要能够使飞板获得较高的感应电流密度和磁感应强度,从而达到提高洛伦兹力进而获得优质焊接接头的目的。平板线圈向磁脉冲点焊焊枪线圈的变形转换如图 2 所示。可以看到,平板线圈和点焊焊枪线圈均由 A 部分(电流进入部分)、B 部分(线圈工作部分)和C 部分(电流离开部分)构成。对于点焊焊枪线圈,B 部分被独立设计在一个与 A 部分和 C 部分垂直的区域,以减少与待焊工件的额外感应。由于与其他 2 个部分相比,B 部分的截面积产生了突变,瞬间增大的电流密度及其引起的时变强磁场,最终导致该区域的飞板高速向基板运动进而实现焊接。定义 B 部分的高为 H, 宽为 W。



图 2 平板线圈向磁脉冲点焊焊枪线圈变形转换 Fig.2 Transformation from flat coil to magnetic pulse spot welding torch coil

磁脉冲点焊焊枪三维装配模型如图 3 所示。线缆 插排经由同轴铜线缆连通磁脉冲发生器以获得脉冲 电流,点焊焊枪线圈通过螺栓与线缆插排相接。线圈 自间隙及与线缆插排之间的间隙均填充有环氧树脂, 起到绝缘和固定的作用,以减小放电过程中线圈各部 分之间的相互作用和变形,延长使用寿命。

自动化磁脉冲点焊设备三维模型如图 4 所示。只 需将装配好的待焊工件置于工作台之上,由机械手带 动焊枪至相应位置进行脉冲放电,便可完成自动化焊 接。若进一步使用上下料机械手或将工作台换为输送



图 3 磁脉冲点焊焊枪三维装配模型 Fig.3 3D assembly model of magnetic pulse spot welding torch



图 4 自动化磁脉冲点焊设备三维模型 Fig.4 3D model of automatic magnetic pulse spot welding equipment

线,则可实现磁脉冲点焊的流水化作业。

2 有限元仿真分析

有限元法是一种以计算机为手段,通过离散化处 理将研究对象变换成一个与原始结构近似的数学模 型,再经过一系列规范化的步骤求解各参数的数值计 算方法^[17]。有限元法可以起到降低开发成本和缩短开 发周期的作用^[18-19]。LS-DYNA 是 LSTC 公司开发的 一款在碰撞、冲击、金属成形等瞬间非线性问题上具 有优势的有限元软件。而磁脉冲焊接是一个在微秒级 的时间内完成的碰撞过程,非常适合使用 LS-DYNA 来进行分析。本文通过 LS-DYNA 对磁脉冲点焊焊枪 线圈和平板线圈的工作过程进行了有限元仿真,分析 了磁脉冲点焊接头的形成过程,对比了 2 种线圈之间 的性能差异。

2.1 有限元仿真模型

在高速变形的情况下,材料的应变、应力和应变 率等参数都会发生变化,Johnson-Cook(J-C)模型可 以准确描述材料在动态响应过程中的本构关系^[20]。简 化的 J-C 模型可以由式(1)表示。

$$\delta = \left(A + B\varepsilon^n\right) \left(1 + C\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \tag{1}$$

式中: δ、ε、 έ 和 έ₀ 分别为等效屈服应力、等效 塑性应变、有效塑性应变率和参考塑性应变率; A、 B、C 和 n 分别为参考应变率下的屈服应力、应变硬 化指数、无量纲应变速率敏感系数和无量纲应变硬化 系数。本文有限元仿真中所参与点焊的对象为 AA5052 铝合金同种材料板件, AA5052 铝合金 J-C 模型参数中 A 值为 80.9 MPa, B 值为 407.5 MPa, C 值为 0.610 5, n 值为 0.001 8^[21]。

有限元仿真模型中飞板和基板的尺寸均为 105 mm×35 mm×1 mm,板件搭接区域长为 35 mm, 飞板上的预成形点焊凸台直径为 18 mm,高为 1.6 mm,板件装配尺寸如图 5 所示。线圈材料为导电 性良好且强度较高的铬错铜合金,2 种线圈工作部分 的 H 和 W 均为 10 mm 和 4 mm,有限元仿真模型中 各部件的材料参数如表 1 所示。有限元仿真在能量为 36 kJ 的衰减振荡放电条件下进行。



图 5 有限元仿真模型中板件装配尺寸 Fig.5 Assembly dimensions of workpieces in finite element simulation model

2.2 有限元仿真结果

2.2.1 磁脉冲点焊接头的形成过程

2种线圈的结构虽有差异,但工作的基本原理是 相同的,即线圈工作区域由于瞬时的高密度脉冲电流 通过而使飞板上预成形凸台高速撞击基板进而实现 焊接。因此,根据磁脉冲点焊焊枪线圈的仿真结果, 对接头的形成过程进行分析。

在板件搭接区域中心选取 2 个截面来观察飞板 的变形情况,如图 6 所示。总体来说,飞板在 1.5 μs 时开始变形,在 6.6 μs 时变形加剧,当时间达到 15 μs 时,飞板凸台开始与基板产生接触,直到 20 μs 时焊 接过程结束。具体而言,对于截面 1,它平行于电流 流动方向,因此飞板所受洛伦兹力较为均匀,在整个 过程中飞板与基板几乎是较大面积的平行碰撞。对于 截面 2,它垂直于电流流动方向,飞板变形始于正对 线圈工作部分的区域,该区域以近乎平行的点撞击方 式与基板接触,并随着时间的推移,撞击点逐步向两 侧扩散。可以看到,当焊接结束后,飞板与基板并非 完全贴合,在2个截面均存在间隙,以截面2更为明 显。另外, Mousavi等^[22]和 Geng等^[23]研究表明,磁 脉冲焊接的焊缝只有在一定的碰撞角度和碰撞速度 下才能够形成,因此,飞板凸台和基板的碰撞中心并 没有焊缝的存在^[24]。

2.2.2 飞板电流密度

2 种不同线圈下飞板在 t=10 μs 时刻(电流密度 最大时刻)的电流密度如图 7 所示。可以看到,电流 在线圈工作部分所对应的区域最为密集,并在该区域 两侧大体呈现为 2 个对称的回路之势。磁脉冲点焊焊 枪线圈所产生的飞板电流密度总体小于平板线圈的, 二者最大电流密度分别为 3.142×10¹⁰ A/m² 和 3.639× 10¹⁰ A/m²。

2.2.3 飞板磁感应强度

2种不同线圈下飞板在 14 µs 时刻(磁感应强度 最大时刻)的磁感应强度对比如图 8 所示。磁感应强 度的分布与电流密度的分布基本一致,主要集中在飞 板凸台中心的纵向跑道形区域。根据左手定则,磁感 应强度的方向为水平向左。磁脉冲点焊焊枪线圈所产 生的飞板最大磁感应强度为 19.40 T,平板线圈所产 生的飞板最大磁感应强度为 21.69 T。

2.2.4 飞板洛伦兹力

2 种不同线圈下飞板在 10 μs 时刻(洛伦兹力最 大时刻)的洛伦兹力对比如图 9 所示。洛伦兹力是由 电流和磁场共同作用而产生的,磁脉冲点焊焊枪线圈 所产生的飞板最大洛伦兹力为 5.149×10¹¹ N,小于平 板线圈的 1.626×10¹² N。

2.2.5 飞板速度

2 种不同线圈下飞板凸台中心的时间-速度曲线 如图 10 所示。飞板向基板运动的速度来源于洛伦兹 力对其的驱动,故而平板线圈作用下的飞板加速度和 最大速度均高于磁脉冲点焊焊枪线圈的。前者所产生 的飞板速度在 12.0 μs 时刻即达到了 481 m/s,而后者 在 14.7 μs 时仅达到 380 m/s。

Tab.1 Material parameters of each part in finite element simulation model					
Part	Material	Poisson's ratio	Density/(kg \cdot m ⁻³)	Young's modu- lus/GPa	Electrical conductivity/ $(S \cdot m^{-1})$
Flyer plate/Parent plate	AA5052 alumi- num alloy	0.33	2 680	70.3	1.80×10^{7}
Coil	Chrome zirconium copper alloy	0.33	8 900	97.0	5.71×10 ⁷

表 1 有限元仿真模型中各部件的材料参数 ab.1 Material parameters of each part in finite element simulation model



图 6 磁脉冲点焊接头形成过程

Fig.6 Forming process of magnetic pulse spot welding joint



图 7 10 µs 时飞板电流密度对比 Fig.7 Comparison of current density of flyer plates when *t*=10 µs



图 8 14 µs 时飞板磁感应强度对比 Fig.8 Comparison of magnetic induction intensity of flyer plates when *t*=14 µs



图 9 10 µs 时飞板洛伦兹力对比 Fig.9 Comparison of Lorentz force of flyer plates when *t*=10 µs



图 10 《秋四百中心速度》) C Fig.10 Comparison of velocity at center of bumps of flyer plates

综上,在工作部分 H 和 W 相同的条件下,磁脉 冲点焊焊枪线圈所产生的飞板最大电流密度、最大磁 感应强度、最大洛伦兹力和最大运动速度分别低了 13.66%、10.56%、68.33%和 21.00%,而这些参数对 焊缝的形成起到重要作用,因此需要对磁脉冲点焊焊 枪线圈做进一步优化以提升焊接接头质量。

3 磁脉冲点焊焊枪线圈结构参数优化

根据 Hahn 等^[25]的研究,飞板在线圈作用下的洛 伦兹力 *p* 可由式(2)表示。

$$p = \frac{\mu_0 I^2 \left(1 - e^{-2s/\delta_{\rm F}}\right)}{2 \left[W \left(1 + e^{-s/\delta_{\rm F}}\right) + 2\delta_{\rm F} H \left(1 - e^{-s/\delta_{\rm F}}\right) / s\right]^2}$$
(2)

式中: μ_0 为真空磁导率;I为流经线圈的电流;s为飞板的厚度; δ_F 为飞板的趋肤深度。由此可知,降低W和H均可以提升飞板所获得的洛伦兹力。

3.1 磁脉冲点焊焊枪线圈工作部分高度优化

相较于初始设计下磁脉冲点焊焊枪线圈工作部

分的高度 H(10 mm),其宽度 W(4 mm)已经处于 较小值,另外,减小 W将改变洛伦兹力的作用区域。 因此,在保持 W=4 mm 不变的情况下,分别选取 H=8 mm 和 H=4 mm 的磁脉冲点焊焊枪线圈,对其焊 接过程进行有限元仿真,将结果与初始设计的点焊焊 枪的仿真结果进行对比分析。

不同 H 值下飞板在 10 μs 时(电流密度和洛伦兹 力最大时刻)的电流密度和洛伦兹力对比如图 11 所 示。可以看到,电流密度和洛伦兹力均随 H 值的减 小而增加。当 H 值降低 20%时,最大电流密度和最 大洛伦兹力分别提升 7.86%和 11.89%;当 H 值降低 60%时,最大电流密度和最大洛伦兹力分别提升 27.56%和 57.64%,这表明电流密度和洛伦兹力的增 长速度也随 H 值的降低而提升。

不同 H 值、10 µs 时(电流密度和洛伦兹力最大时刻)飞板垂直于线圈工作部分中心截面的位移对比如图 12 所示。随着 H 值的降低,飞板的整体位移不断增加,且增加幅度由两侧向中间逐渐提高,这是由于越靠近线圈工作部分正对区域,飞板受洛伦兹力的影响越大。

不同 H 值下飞板凸台中心的速度如图 13 所示。 飞板凸台中心不同时刻的速度和加速度均随 H 值的 减小而增大。在飞板凸台高度和直径等焊接结构参 数相同的情况下,碰撞速度是影响接头质量的关键因 素^[26]。当 H=4 mm 时,最大速度达到 490 m/s(12.6 μs), 基本等同于平板线圈的 481 m/s(12.0 μs),可认为此 时磁脉冲点焊焊枪线圈的性能与平板线圈的接近,进 一步减小 H 值将降低线圈的承载能力从而降低其使用 寿命,因此认为线圈工作部分较优的高度 H 为 4 mm。

3.2 不同线圈的应力及位移

在磁脉冲点焊过程中,除线圈在洛伦兹力的驱动 下撞击飞板之外,线圈工作部分同样会受到洛伦兹力 的作用而产生应力和位移,线圈所受洛伦兹力影响越 小,越有利于延长其使用寿命。



图 11 10 μs 时不同 H 值下飞板电流密度和洛伦兹力 Fig.11 Current density and Lorentz force of flyer plates at different H when *t*=10 μs





H=4 mm的磁脉冲点焊焊枪线圈工作部分和平板 线圈工作部分之间的应力与位移对比如图 14 所示。 可以看到,应力主要集中在飞板凸台对应区域,前者 的最大应力为 9.508×10⁷ Pa,是后者(1.212×10⁸ Pa) 的 78.45%。在位移方面,磁脉冲电焊线圈所产生的 最大值为 9.887×10⁻⁶ m,更是仅为平板线圈(7.552× 10⁻⁵ m)的 13.09%。由此可见,磁脉冲点焊焊枪线圈





在工作时的结构较平板线圈的更稳定。

3.3 磁脉冲点焊焊枪线圈工作部分截面优化

现有的线圈工作部分截面为方形,由于其形状特点,在棱角处会产生尖端放电现象,从而产生磁场的畸变。对比工作部分截面尺寸为 10 mm×10 mm 的方形线圈,将线圈工作部分截面设计为等面积的半径为

5.6 mm 的圆形,对两者的焊接过程进行模拟,20 μs (磁感应强度最大时刻)时的磁感应强度对比结果如 图 15 所示。可知,对于方形截面线圈,4 个棱角处 的磁感应强度高于其他区域的,而对于圆形截面线 圈,沿周向的磁感应强度相对比较均匀。并且,圆形 截面线圈所产生的飞板最大磁感应强度(16.09 T)要 大于方形截面线圈所产生的(15.33 T)。在飞板变形 方面,圆形截面线圈作用下的飞板变形更为集中,飞 板与基板发生平行碰撞的部分更少,焊点中心中未形 成焊缝的区域面积将更小。

2 种不同线圈下飞板凸台中心的速度如图 16 所示。飞板凸台在圆形截面线圈的作用下在 19.2 μs 时就以 237 m/s 的速度撞击基板,而在方形线圈的作用下,飞板凸台在 20 μs 时的速度仅为 200 m/s,此时飞板仍未与基板接触,并且由于加速度较小,直到飞板与基板发生碰撞时,速度也将小于 237 m/s。



图 15 20 µs 时不同线圈截面下飞板磁感应强度

Fig.15 Magnetic induction intensity of flyer plates generated by coils with different sectional shapes when $t=20 \ \mu s$



图 16 不同线圈截面下飞板凸台中心速度 Fig.16 Velocity at center of bumps of flyer plates driven by coils with different sectional shapes

4 结论

在平板线圈的基础上,设计了一种适用于自动化 作业的磁脉冲点焊焊枪,通过有限元仿真,对比了焊 枪线圈与平板线圈之间的性能,并对其结构参数进行 了改进,为磁脉冲点焊的自动化应用提供了参考指 导。主要结论如下:

 1)点焊结束后,飞板与基板并非完全贴合,并 且飞板凸台中心与基板近乎平行碰撞。在工作部分高 度 H(10 mm)和宽度 W(4 mm)相同的条件下,磁 脉冲点焊焊枪线圈使飞板产生的电流密度、磁感应强 度、洛伦兹力和速度均不及平板线圈的。

2) 在 W 不变的情况下,随着 H 的减小,磁脉冲 点焊焊枪线圈的性能表现逐步提升,且提升幅度也随 H 的减小而不断增大。工作部分截面尺寸为 4 mm× 4 mm 的磁脉冲点焊焊枪线圈与 4 mm×10 mm 的平板 线圈的性能相近。

3)对于上述 2 种性能相近的线圈,磁脉冲点焊 焊枪线圈在工作时所受的应力和发生的位移较小,可 认为其具备更好的结构稳定性。

4)相较于原始的方形截面,工作部分截面为相 同面积圆形的磁脉冲电焊焊枪线圈可减小飞板凸台 中心与基板平行碰撞的面积,同时获得更高的速度。

参考文献:

- [1] 林锐. 轻金属材料在汽车轻量化中的应用[J]. 汽车测 试报告, 2022(7): 127-129.
 LIN R. Application of Light Metal Materials in Automobile Lightweight[J]. Car Test Report, 2022(7): 127-129.
- [2] 宋娟. 汽车制造中的铝合金焊接技术研究[J]. 内燃机 与配件, 2022(5): 94-96.
 SONG J. Research on Aluminum Alloy Welding Technology in Automobile Manufacturing[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2022(5): 94-96.
- [3] 赵传军,李炜. 纯电动汽车铝合金轻量化连接技术[J]. 汽车实用技术, 2020(3): 18-20.
 ZHAO C J, LI W. Pure Electric Vehicle Aluminum Alloy Lightweight Connection Technology[J]. Automobile Applied Technology, 2020(3): 18-20.
- [4] 杨庆,王哲,欧弘飞,等.新能源汽车轻量化领域铝 合金焊接技术研究综述[J].内燃机与配件,2023(10): 104-106.

YANG Q, WANG Z, OU H F, et al. Review of Aluminum Alloy Welding Technology in Lightweight Field of New Energy Vehicles[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2023(10): 104-106.

- [5] 张海涛,李峻,王东涛,等. 铝合金疲劳性能的研究 进展[J]. 轻合金加工技术, 2023, 51(2): 15-22.
 ZHANG H T, LI J, WANG D T, et al. Research Progress on Fatigue Properties of Aluminum Alloys[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2023, 51(2): 15-22.
- [6] 熊奇.大尺寸铝合金板件电磁成形设计与实现[D]. 武汉:华中科技大学,2016.
 XIONG Q. Design and Implementation of Electromagnetic Forming of Large-Size Aluminum Alloy Sheet[D].
 Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [7] 洪腾蛟,董福龙,丁凤娟,等. 铝合金在汽车轻量化 领域的应用研究[J]. 热加工工艺, 2020, 49(4): 1-6.
 HONG T J, DONG F L, DING F J, et al. Application of Aluminum Alloy in Automotive Lightweight[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(4): 1-6.
- [8] 余万铨, 胡志力, 华林, 等. 铝合金汽车发动机罩外板 冲压成形规律研究[J]. 锻造与冲压, 2018(22): 26-29.
 YU W Q, HU Z L, HUA L, et al. Study on Stamping Forming Law of Aluminum Alloy Automobile Hood Outer Panel[J]. Forging & Metalforming, 2018(22): 26-29.

26-29.

- [9] 张振, 尹明英. 焊接技术在汽车制造业中的应用分析
 [J]. 科技创新与应用, 2016(28): 131.
 ZHANG Z, YIN M Y. Application Analysis of Welding Technology in Automobile Manufacturing Industry[J].
 Technology Innovation and Application, 2016(28): 131.
- [10] 解旭, 翟鑫钰. 铝合金焊接方法综述[J]. 有色金属加 工, 2022, 51(4): 4-11.
 XIE X, ZHAI X Y. Review of Aluminum Alloy Welding Methods[J]. Nonferrous Metals Processing, 2022, 51(4): 4-11.
- [11] ORHAN A, ASMA Y. Effect of Rotation Speed on the Quality of Friction Welded AA6061/AA7075 Joints[J]. Materials Testing, 2014, 56(5): 381-385.
- [12] SHIM J Y, KANG B Y, KIM I S. Characteristics of 5052 Aluminum Alloy Sheets Joint Using Electromagnetic Force[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(7): 3437-3444.
- [13] 苏子龙,徐永庚,高雷,等. 电磁脉冲焊接技术研究 现状及发展趋势[J]. 焊接技术, 2020, 49(7): 1-7.
 SU Z L, XU Y G, GAO L, et al. Research Status and Development Trend of Electromagnetic Pulse Welding Technology[J]. Welding Technology, 2020, 49(7): 1-7.
- [14] 谢吉林, 彭程, 谢菀新, 等. 铝/镁异种合金磁脉冲焊 接接头组织与性能研究[J]. 材料导报, 2023, 37(5): 171-175.
 XIE J L, PENG C, XIE W X, et al. Study on Microstructure and Mechanical Properties of Al/Mg Dissimi-

lar Metal Sheet Joints by Magnetic Pulse Welding[J]. Materials Reports, 2023, 37(5): 171-175.

- [15] WANG C G, LIU Q, LI G Y, et al. Study on Mechanical Properties and Microstructural Feature of Magnetic Pulse Welding Joint between Cu and Al Sheets[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113(5): 1739-1751.
- [16] 许冰, 欧航, 柳泉潇潇, 等. 5052 铝合金-HC420LA 高 强钢磁脉冲焊接 接头盐雾腐蚀性能[J]. 中国机械工 程, 2019, 30(12): 1506-1511.
 XU B, OU H, LIU Q X X, et al. Property of Electromagnetic Welded Joints of 5052 Aluminum Alloy and HC420LA High Strength Steel in Salt Fog Corrosion[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(12): 1506-1511.
- [17] 刘润一, 刘东. 镀膜机真空室的有限元分析[J]. 装备 制造技术, 2016(12): 24-27.
 LIU R Y, LIU D. The Finite Element Analysis of the Vacuum Chamber of the Coating Machine[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2016(12): 24-27.
- [18] 陆璐, 王照旭, 崔红霞, 等. 塑性有限元在金属体积成形过程中应用的进展[J]. 材料导报, 2016, 30(1): 106-110.
 LUL, WANG Z X, CUI H X, et al. Progress of Application of Finite Element Method in Metals Massive Forming

of Finite Element Method in Metals Massive Forming Process[J]. Materials Reports, 2016, 30(1): 106-110. [19] 谢媛媛, 王华, 徐振华, 等. 基于数值模拟的管材平面

[19] 谢媛媛, 王华, 侨振华, 等. 基于数值模拟的官材平面 弯曲成形几何加工精度规律[J]. 精密成形工程, 2023, 15(3): 173-180.

XIE Y Y, WANG H, XU Z H, et al. Geometric Machining Precision Law of Tube Plane Bending Forming Based on Numerical Simulation[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(3): 173-180.

- [20] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(1): 31-48.
- [21] DENG H K, MAO Y F, LI G Y, et al. A Study of Electromagnetic Free Forming in AA5052 Using Digital Image Correlation Method and FE Analysis[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 37: 595-605.
- [22] MOUSAVI A A A, AL-HASSANI S T S. Numerical and Experimental Studies of the Mechanism of the Wavy Interface Formations in Explosive/Impact Welding[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2005, 53(11): 2501-2528.

- [23] GENG H H, XIA Z H, ZHANG X, et al. Microstructures and Mechanical Properties of the Welded AA5182/ HC340LA Joint by Magnetic Pulse Welding[J]. Materials Characterization, 2018, 138: 229-237.
- [24] YAO Y H, JING L J, WANG S L, et al. Mechanical Properties and Joining Mechanisms of Al-Fe Magnetic Pulse Welding by Spot Form for Automotive Application[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 76: 504-517.
- [25] HAHN M, WEDDELING C, LUEG-ALTHOFF J, et al. Analytical Approach for Magnetic Pulse Welding of Sheet Connections[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 230: 131-142.
- [26] 耿辉辉. Al-Fe 磁脉冲焊接及其接头失效机制研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
 GENG H H. Study on Al-Fe Magnetic Pulse Welding and Its Joint Failure Mechanism[D]. Changsha: Hunan University, 2019.