

钛合金齿轮 LPES 法表面强化的
电场与流场

陈飞飞, 卢文壮, 陈 蒙, 田万杉
(南京航空航天大学 直升机传动技术国家重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 针对 TC4 钛合金齿轮复杂曲面液相等离子体电解渗透(LPES)表面强化放电困难的问题,基于仿真分析和实验验证的方法,建立了齿轮表面强化系统仿真模型,进行了强化系统电场和流场仿真,确定了齿轮复杂表面放电机理,研究了电极系统参数和入口流速对强化层形成的影响。结果表明:齿轮复杂表面放电困难的根本原因在于电场的分布不均。采用啮合形阳极时的电场和强化层均匀性较好。电极距离过小容易造成强化系统的短路,过大时会降低强化层的均匀性和厚度。合理的系统电解液流速对放电的稳定性和强化层的形成均具有重要的意义。相较于未处理时的基体,强化后的齿轮表面耐磨性有了明显提升。

关 键 词: TC4 钛合金; 齿轮; 液相等离子体电解渗透; 电场; 电极间隙流场; 强化层; 耐磨性

中图分类号: V232.8 文献标志码: A

Electric field and flow field of LPES surface strengthening
of titanium alloy gear

CHEN Feifei, LU Wenzhuang, CHEN Meng, TIAN Wanshan
(National Key Laboratory of Science and Technology on Helicopter Transmission,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: For the problem of forming stable arc discharge on the complex surface of the TC4 titanium alloy gears treated by liquid plasma electrolytic saturation (LPES), a simulation model of the gear surface strengthening system was established, the electric field and flow field were simulated based on simulation analysis and experimental verification methods. The discharge mechanism on the complex surface of the gear was determined. The effects of electrode system parameters and inlet velocity on the formation of the strengthening layer were studied. Results indicated that the fundamental reason for the difficulty of effective discharge on the gear surface was attributable to the uneven electric field. The uniformity of the electric field and the strengthening layer were better when the meshing anode was used. Too small electrode distance was likely to cause short circuit of strengthening system, and too large electrode distance could reduce uniformity and thickness of strengthening layer. Appropriate electrolyte flow rate is important for both the stability of the discharge and the thickness of the strengthening layer. Compared with the untreated substrate, the surface

收稿日期:2019-10-25

基金项目:南京航空航天大学直升机传动技术国家重点实验室自主项目基金(HTL-A-19K04)

作者简介:陈飞飞(1993—),男,硕士生,主要从事现代加工技术、金属表面强化等领域的研究。

通信作者:卢文壮(1972—),男,教授,博士,主要从事智能制造及制造自动化、超硬材料及工具、现代表面技术等领域的研究。
E-mail:meewzlu@nuaa.edu.cn

引用格式:陈飞飞,卢文壮,陈蒙,等.钛合金齿轮 LPES 法表面强化的电场与流场[J].航空动力学报,2020,35(5):928-937. CHEN Feifei,LU Wenzhuang,CHEN Meng,et al. Electric field and flow field of LPES surface strengthening of titanium alloy gear[J]. Journal of Aerospace Power,2020,35(5):928-937.

wear resistance of the strengthened titanium alloy gear has been significantly improved.

Key words: TC4 titanium alloy; gear; liquid plasma electrolytic saturation; electric field; electrode gap flow field; strengthening layer; wear resistance

随着新技术、新材料的不断发展,有着“第三金属”之称的钛合金被广泛的应用于工业、制造和科学研究中^[1]。相较于传统的合金材料,钛及钛合金具有许多的优良特性。钛合金比强度高、耐腐蚀性好、高低温下性能优异的特点使其大量应用到航空航天、航海、医疗、石油化工中^[2-4]。

齿轮作为调节速度、传递转矩和角运动的重要机械零部件广泛应用在航空航天、汽车、舰船上。齿轮在复杂且恶劣工作环境下更易发生因齿轮折断、磨损导致的齿轮失效^[5-6]。随着现代工业的不断发展,对于齿轮性能的要求也不断增加。制造材料的不同,齿轮表现出的性能也有着较大的差异。钛合金耐腐蚀性好、高温下性能稳定的优点更加适合在复杂且具有腐蚀性的环境下工作,是制造齿轮较为合适的材料。此外,钛合金齿轮作为一种轻量化结构件能够有效降低直升机传动系统的质量,从而进一步减少直升机的生产成本,提高其承载能力和使用寿命。但是,钛合金硬度低、耐磨性差的固有缺陷限制了其作为齿轮在航空领域中的应用,因此需要对钛合金齿轮进行强化处理^[7-8]。

液相等离子体电解渗透(liquid plasma electrolytic saturation, LPES)法^[9-10]作为等离子体应用领域的的一个重要组成部分,正不断地受到越来越多人的关注与重视。该技术常用于钢铁材料的处理,处理过程中表现出效率高、设备简单、工件整体受热轻微、处理工艺简单、环境污染小等突出优点,展现了广阔的应用前景^[11-12]。实验研究表明经 LPES 法处理后的工件表面形成具有一定厚度的强化层,强化层相较于未处理的工件基体具有较高的硬度、良好的耐磨性和耐腐蚀性,极大地提高了材料的应用范围和使用寿命^[13-14]。LPES 法表面处理技术的诸多优点决定了其可以作为钛合金改性有效且合理的方法之一。

本文针对 TC4 钛合金齿轮 LPES 法表面强化进行了基础研究。通过对强化系统的数值模拟及理论分析,探究齿轮复杂表面放电机理,研究不同系统参数对电场、流场以及强化层的影响。为形成一种钛合金齿轮表面强化技术,推动钛合金齿轮作为航空传动齿轮的应用提供了重要的理论依据。

1 数值模拟

1.1 仿真模型的建立

钛合金齿轮 LPES 法表面强化实验重点需要解决电场、流场均匀性的问题,只有电场和流场合理的条件下才能够形成稳定的弧光放电,因此需要对强化实验系统进行数值模拟。液相等离子体放电是一个非常复杂的过程,涉及到热处理、电化学处理、等离子体处理等多种表面处理方式。想要较为真实地模拟出其中的物理、化学反应过程是非常困难的,因此在不偏离实际情况下对模型进行了一定的简化:

- 1) 假设电解液溶质分布均匀,反应过程中不发生浓差极化和电解质浓度差所引起的对流;
 - 2) 电解槽中始终充满着电解液;
 - 3) 电解液和电极材料的属性只是关于温度的函数;
 - 4) 电解槽中流体为湍流不可压缩流^[15]。
- 由此可建立如图 1 所示的整体仿真模型。

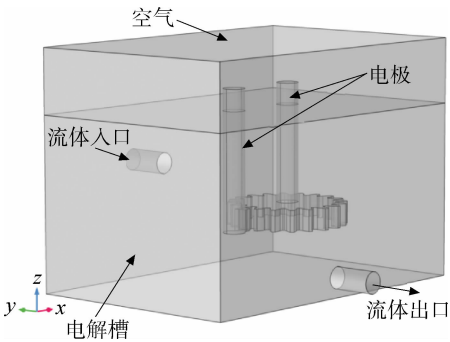


图 1 钛合金齿轮 LPES 法表面强化系统仿真模型
Fig.1 Simulation model of surface strengthening system for titanium alloy gears by LPES

1.2 参数设置

实验所用溶液为体积分数 90% 的甲酰胺和少量电解质构成。阴极为 TC4 钛合金齿轮,导热系数为 $7.955 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$,电解液密度为 $1.13 \text{ g}/\text{cm}^3$,黏度为 $2.7 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ^[16]。经多次测量取平均值可得室温 26°C 下溶液的初始电导率为 $0.35 \text{ S}/\text{m}$,不同温度下的电导率根据经验公式可表示为 $\sigma=0.35 \times [1+0.02(T-26)] \text{ S}/\text{m}$,式中 T 为

温度。模型整体采用自由剖分四面体网格,网格大小采用默认值,并对顶点和边界处进行细化处理。

2 仿真结果分析

2.1 电极形状对电场的影响

由于齿轮表面形状复杂,结构简单的阳极难以保证极间电场的均匀性,因此,选择合适的阳极对阴极表面放电和强化层的均匀性至关重要。为了研究不同形状阳极对于电场的影响,分别选择梯形、圆柱形、啮合齿面作为石墨阳极,模拟电压为 300 V、电极距离为 5 mm 下不同电极形状的电场分布,如图 2 所示。

从图 2 中可以明显看出,使用圆柱形阳极时靠近齿轮尖端部分区域电场强度 E 明显高于齿面其它部位,尖端放电现象比较严重。相较而言,啮合形和梯形阳极下的电场分布较为均匀。从电场强度大小来看,圆柱形电极电场强度最高,为 2.61×10^5 V/m,啮合形电极电场强度最小,为

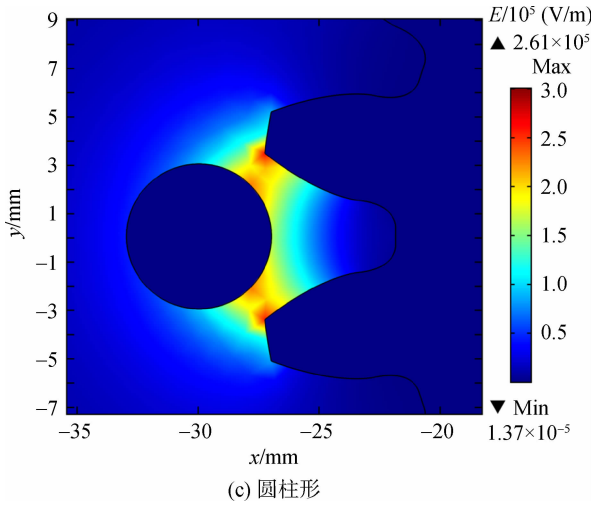
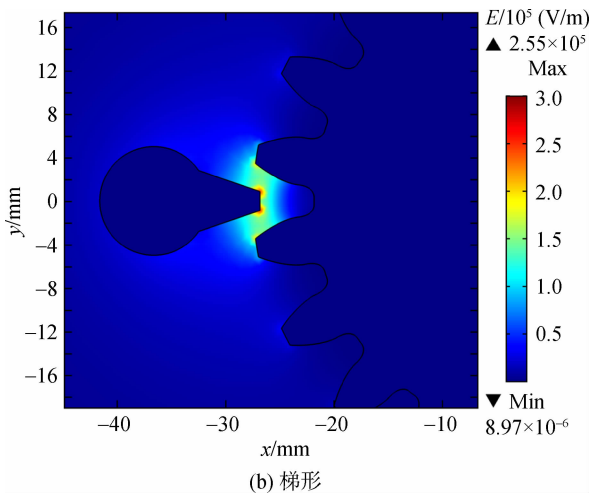
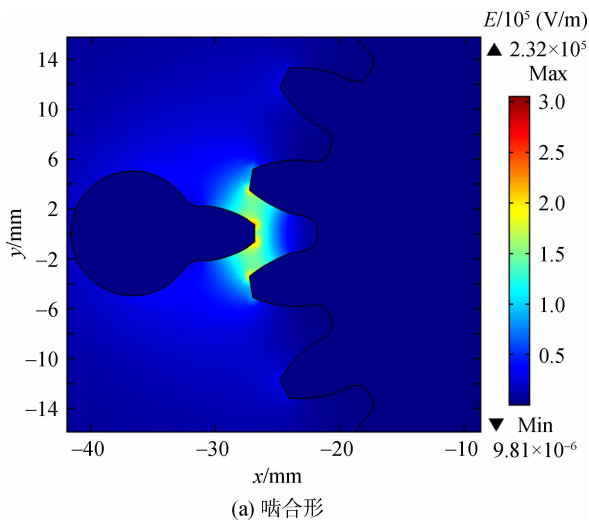


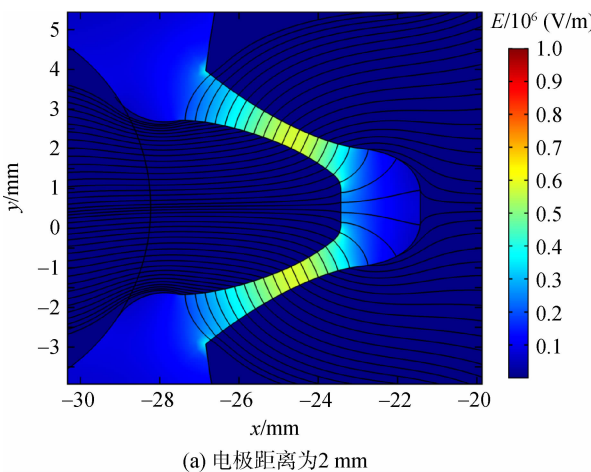
图 2 不同形状阳极下的电场分布
Fig. 2 Electric field distribution under different shape anodes

2.32×10^5 V/m。选取分度圆处齿面的电流密度分析可知,梯形下的齿面电流密度为 5.71 A/cm²,比啮合形电流密度 (4.63 A/cm²) 高出 1.08 A/cm²。因此,为了避免电流密度过大造成齿轮表面烧伤或裂纹,选用啮合形作为阳极。

2.2 电极距离对电场的影响

电极距离对钛合金齿轮 LPES 法表面处理过程中强化层的形成有着很大的影响,电极距离过大,需要的放电电压高,电极距离过小,阳极周围气体蒸发会对工件表面气膜的稳定性产生影响。不同的电极距离会导致电场分布的均匀性以及电场强度的大小出现较大的区别。图 3 分别为电极距离 2、5、10、15 mm 下的电场分布云图。

从图 3 中可以看出电极距离为 2 mm 时齿轮齿面处电场均匀性最好,几乎没有出现尖端放电现象。当电极距离为 5 mm 时开始出现尖端放电现象,从分度圆处到齿顶电场强度分布较为均匀,



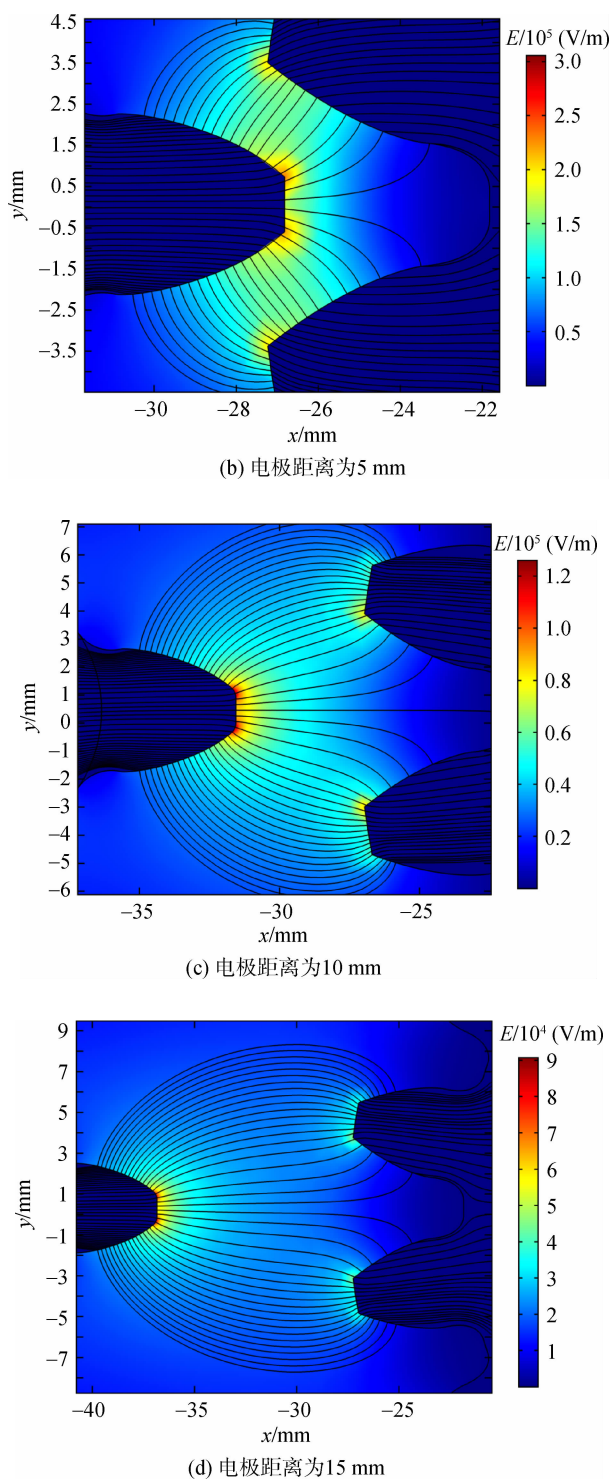


图 3 不同电极距离下的电场分布图

Fig. 3 Electric field distribution at different electrode distances

靠近齿根处电场强度相对较弱。随着电极距离的继续增大,阴极表面电场强度下降明显,电极距离 15 mm 时的工件表面场强较 2 mm 时电极距离下降了有 1 个数量级,这意味着想要达到气膜的击穿电压需要更高的电源电压。

图 4 为不同电极距离下分度圆处齿轮表面电

流密度值。电极距离为 2 mm 时电流密度达到了 19.13 A/cm^2 ,远高于表面放电所需的电流密度,等离子放电将在工件表面产生非常大的放电能量,导致工件表面烧伤和裂纹的出现,甚至于造成电极短路。当电极距离为 5 mm 时,电流密度下降幅度较大,较 2 mm 电极距离时下降了 14.5 A/cm^2 。随后继续增大电极距离,电流密度下降幅度减小。电极距离 15 mm 时的电流密度只有 0.97 A/cm^2 ,较小的电流密度要求更高的工作电压,否则无法产生稳定的弧光放电。

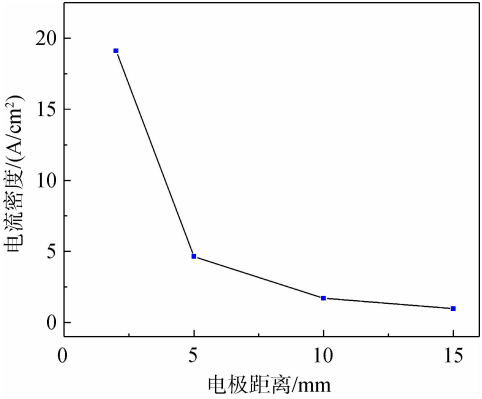


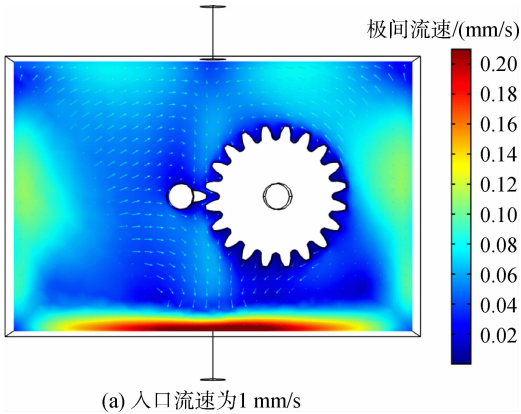
图 4 不同电极距离下的电流密度

Fig. 4 Current density at different electrode distances

2.3 入口流速对流场的影响

电极间流场的均匀性和流速大小进一步影响着工件表面放电的稳定性。电极间电解液流动过快造成液面波动,破坏阴极表面已有的完整气封层,甚至于发生断弧现象。流速过小使得电解液无法有效的排除,溶液得不到有效的交换和降温,从而降低强化层的表面质量和厚度。图 5 为不同入口流速下电极之间流场的分布图。

从图 3 中可以看出随着入口流速的增大,系统流场分布整体趋势几乎没有改变,主要影响了各处流速的大小。当入口流速为 1 mm/s ,极间



(a) 入口流速为 1 mm/s

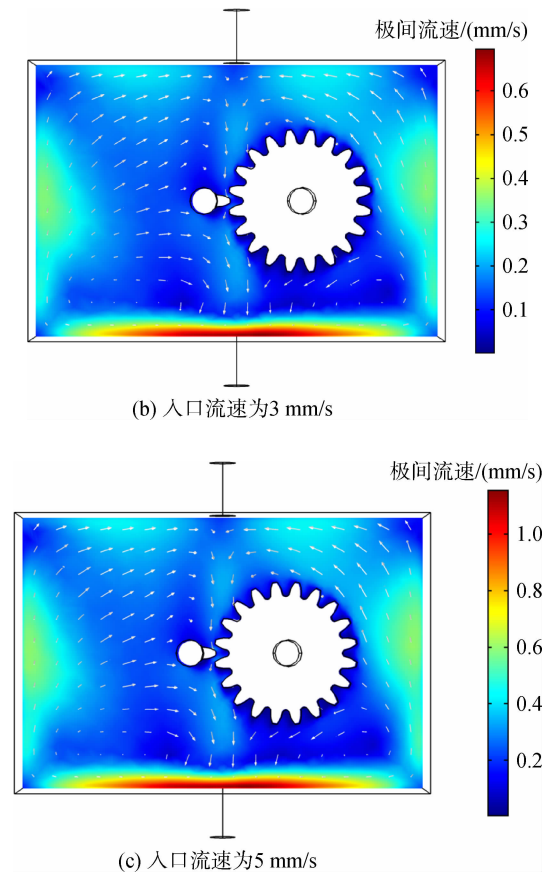


图 5 不同入口流速下极间流场分布图
Fig. 5 Flow field distribution of electrode at different inlet velocities

电解液流速仅约 0.03 mm/s,不利于电解液的交换和降温。随着入口流速升高到 5 mm/s,存在明显的流线穿过电极间隙,极间流速也增加到 0.3 mm/s,是 1 mm/s 时的 10 倍。实际上,极间流速过大会导致放电的不稳定和 discontinuous,因此,具体的结果需要通过实验做进一步研究。

3 实验结果分析

3.1 放电机理研究

LPES 法表面强化放电过程初期电流随电压呈线性关系,此时强化系统满足欧姆定律,工件表面由于焦耳热产生少量的气泡。随着电压的升高,工件表面气泡不断增加,气泡膜的厚度和均匀性也不断提高,这使得电解液和工件被一层致密的气泡膜隔离开来。由于气膜导电性差,电解液和工件表面形成了巨大的电势差,电势差达到临界值后气膜被击穿,产生等离子体放电^[17-18]。因此,为了使阴极表面能够产生稳定的弧光放电,致密且均匀气膜的产生有着决定性作用。对于平板、圆柱面等电场均匀的工件,其表面气膜分布也

较为致密均匀^[19]。通过电场的仿真分析可知,对于齿轮等复杂型面来说,电场在强化齿面和非强化表面均有分布,电极距离的不同造成了不同区域处电场强度差别较大,同时也导致了工件表面气膜分布的不均匀,影响等离子体放电。根据仿真和理论分析结果,建立如图 6 所示的平板及齿轮表面工件-气膜-电解液三相体系。

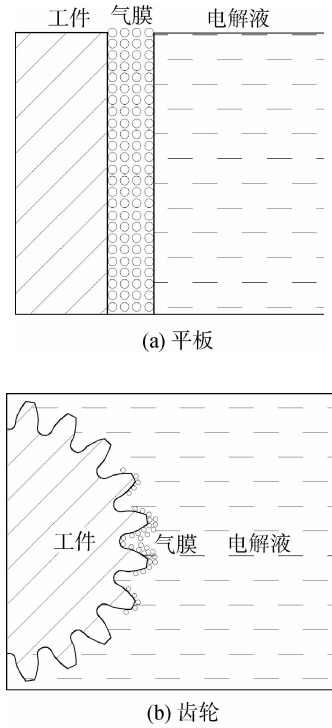


图 6 平板、齿轮表面三相体系分布
Fig. 6 Distribution of three-phase system on flat plate and gear surface

从图 6 中可以看出,平板表面的气膜分布均匀且具有一定厚度,从而使电解液和工件表面之间形成稳定且大小相同的电势差。而对于齿轮来说,由于其轮齿不同部位到阳极的距离不同,使得各位置处电场强度不同,进一步影响到气膜分布的均匀性,距离较远处的轮齿表面无法完整地被气膜覆盖,造成电解液与齿轮表面直接接触。此时,根据实验中观察到的电流-电压曲线可以发现,电流随着电压的增大不断升高,最终超过电源额定电流(10 A),不符合正常 LPES 法表面强化过程中的电流-电压曲线特点。

为了解决因电场强度大小不同导致的气膜覆盖不完整的情况,实验设计了绝缘装置,对非强化表面进行绝缘处理,从而使气膜的分布相对均匀稳定。绝缘套设计如图 7 所示。

图 7 中,为了防止绝缘外套在一定温度下发

生融化,选用聚四氟乙烯材料进行制作,与阳极相对的非强化齿轮表面由于电场强度大、温度高,需要使用耐高温且不导电的陶瓷片进行绝缘防护。最后,利用耐高温绝缘胶水将设计好的装置与钛合金齿轮接触部分密封,以防电场穿过空隙对放电均匀性造成影响。

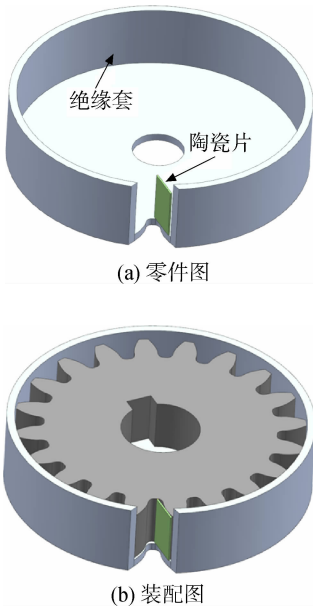


图 7 绝缘套设计图

Fig. 7 Design drawing of insulation sleeve

实验发现,添加绝缘装置后,钛合金齿轮表面强化过程中的电流随电压先增大后减小,满足一般 LPES 法表面强化处理的电流-电压特性。齿轮表面能够形成稳定的弧光放电现象,如图 8 所示。

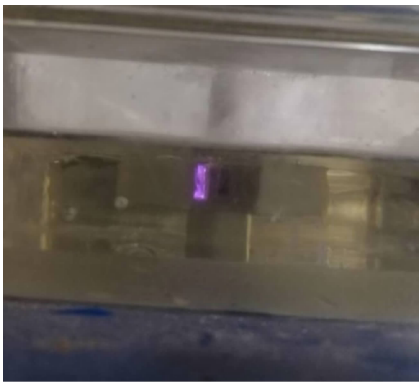


图 8 钛合金齿轮强化表面弧光放电

Fig. 8 Arc discharge on the strengthening surface of titanium alloy gear

3.2 电极形状对强化层的影响

由电场仿真分析可知,电极形状主要影响工

件表面电场强度和电场均匀性。通过测量和计算得到不同电极形状下的稳定电流密度分别为: 0.95 A/cm^2 (啮合形电极), 1.11 A/cm^2 (梯形电极), 3.25 A/cm^2 (圆柱型电极),这与仿真得到的变化规律相同。圆柱形电极电流密度大的原因在于齿轮尖端和其周围部分区域放电强度高,尖端放电现象严重。电极形状在电场均匀性上产生的效果直接影响工件表面强化层的均匀性和厚度。300 V 电压下处理 10 min 时获得的不同电极形状下齿轮表面强化层截面放大 5 000 倍的形貌如图 9 所示。

从图 9 中可以看出啮合形阳极下的工件表面强化层平整度较好。随着电极形状从梯形变为圆

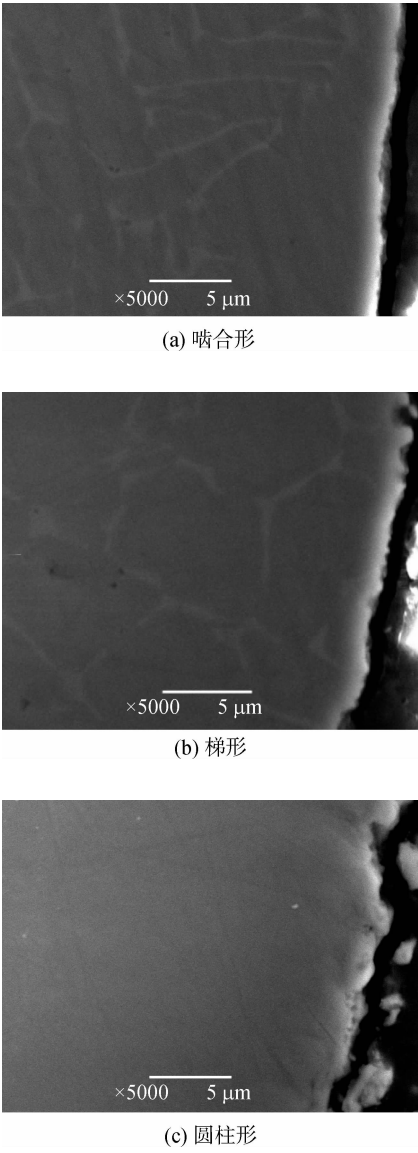


图 9 不同电极形状下强化层截面组织

Fig. 9 Cross-sectional structure of strengthening layer under different electrode shapes

柱形,其强化层截面厚度分布的均匀性逐渐降低。从齿轮表面强化层厚度来看,啮合形与梯形电极下的强化层厚度虽然相近,但啮合形阳极下的强化层均匀性更优。对于圆柱形电极来说,虽然强化层整体的均匀性较差,但其部分区域厚度更高。这是因为圆柱形电极下齿轮尖端部分区域电场强度高,放电产生的能量大,使得强化层的形成速度更快、厚度更好。然而,正是由于放电强度较大,导致强化层部分区域出现脱落的现象。

结合仿真结果和上述分析,最终确定以啮合形电极作为强化系统中的阳极。

3.3 不同电极距离下的强化效果

图 10 展示了不同电极距离下 LPES 法钛合金齿轮表面强化效果。实验采用啮合形电极作为阳极,并在 300 V 电压下对工件处理 10 min。

实验发现当电极间距离不足 2 mm 时,放电系统容易发生短路,从而在钛合金齿轮表面留下直径约为 2 mm 的放电坑。由仿真结果可知,电极距离为 2 mm 时强化表面电场强度和电流密度远高于 LPES 法表面强化所需要的放电条件,同时电极距离过小使得电解液中的反应物无法得到有效的排出,因此更容易造成阴极短路打火。从截面元素分布中可以看出强化层主要以碳元素为主,氮元素含量较少,碳质量分数随着扩散深度的增加快速降低。5 mm 电极距离时的表面碳质量分数达到了 7.96%,较 10 mm 电极距离时增加了 1.16%,同时该电极距离下的碳元素扩散深度较 10 mm 电极距离时也有明显增加,因此 5 mm 电极距离的强化层厚度也较高。电极距离大于 15 mm,工件表面能够实现稳定放电的电压高于电源所允许的最高电压(320 V),因此电极距离大于 15 mm 的验证性实验有待后续进行。

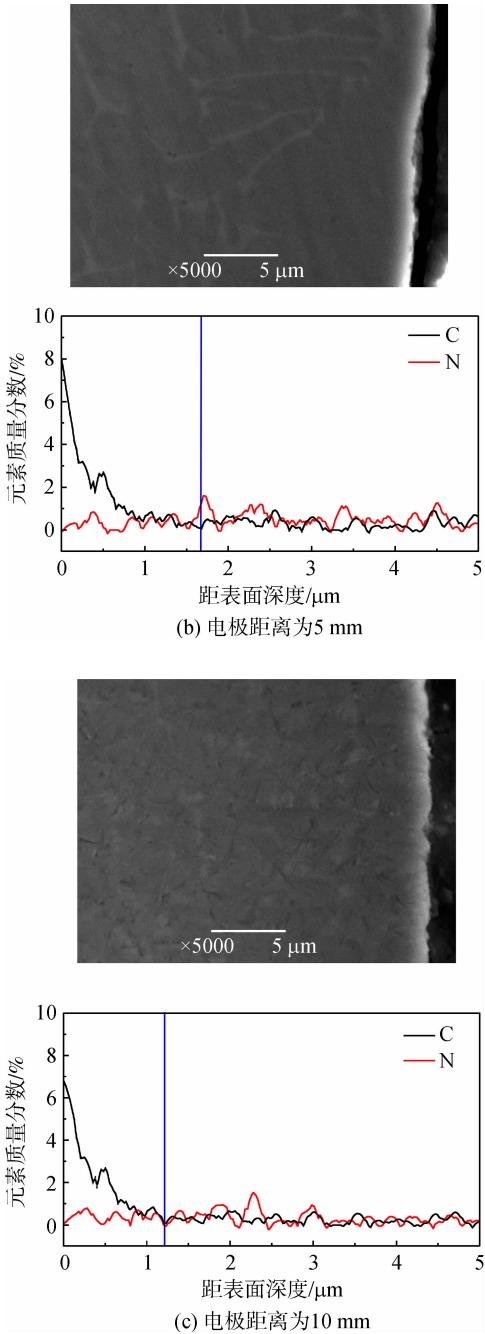


图 10 不同电极距离下的强化效果
Fig. 10 Strengthening effect at different electrode distances

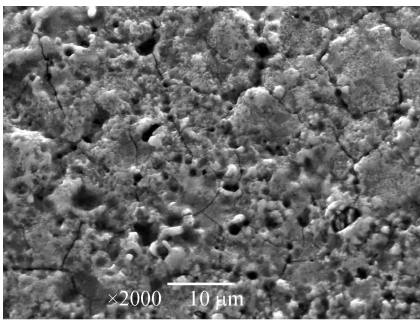
3.4 入口流速对强化效果的影响

实验采用蠕动泵调节入口流速,分别设置转速为 30、50、70 r/min,经测量和计算得到入口流速分别为 2.32、3.32、5.14 cm/s。不同入口流速下强化层表面形貌如图 11 所示。

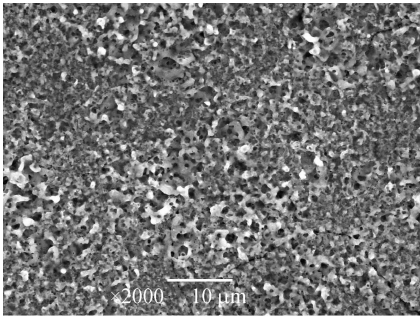
从图 11 中可以看出入口流速为 2.32 cm/s 时,强化层表面存在较多的微裂纹,放电孔洞较大,表面熔融物发生堆叠,表面粗糙度较差。当入口流速为 3.32 cm/s 时,表面较为平整,放电孔数



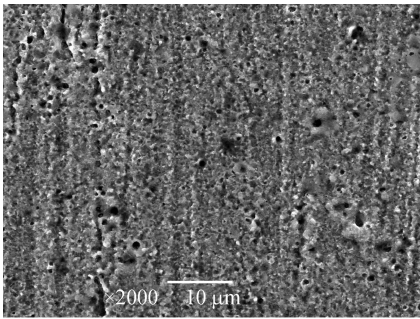
(a) 电极距离为 2 mm



(a) 入口流速为2.32 cm/s



(b) 入口流速为3.32 cm/s



(c) 入口流速为5.14 cm/s

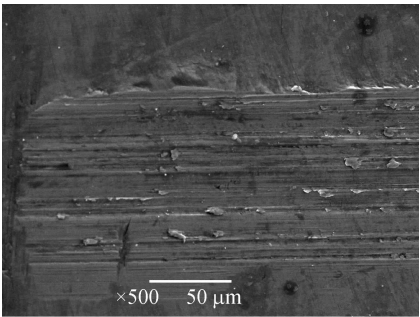
图 11 不同入口流速下强化层表面形貌
Fig. 11 Surface morphology of strengthening layer at different flow rates

量增加且孔径更为细化,熔融物主要分布在孔洞的周围。随着入口流速的进一步增加可以发现工件表面强化层变薄,部分区域几乎呈现出基体状态,放电孔洞和表面熔融物均较少。实际上,实验中发现随着入口流速的不断增大,极间流场表现出非常不稳定状态,造成了放电不均匀甚至于出现弧光消失现象,这一结果也符合流场仿真分析的结果。

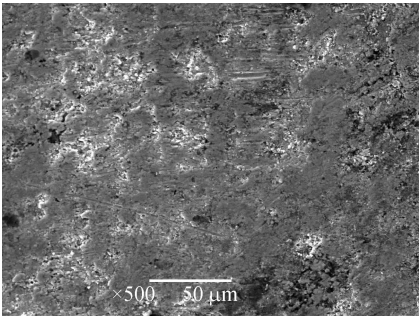
根据仿真分析和实验结果最终得到较为合理的电极系统及电解液流动参数,其中阳极为啮合形,电极距离为 5 mm,入口流速为 3.32 cm/s。

实际上,钛合金齿轮耐磨性差,啮合齿面在传动过程容易产生疲劳磨损,并在复杂的应力环境下导致齿面剥落、点蚀、胶合等一系列齿轮表面失

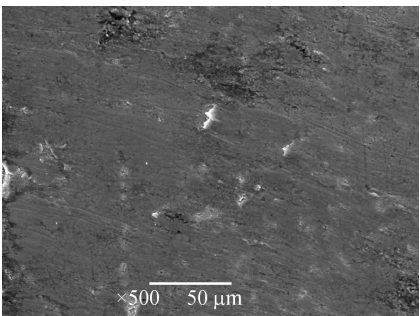
效形式。因此,为了进一步验证所获电场、流场系统参数的合理性,需要对该参数下制备的钛合金齿轮耐磨性进行评价,结果如图 12 所示。



(a) 未处理



(b) 电压为300 V,处理时间为10 min



(c) 电压为320 V,处理时间为20 min

图 12 不同条件下强化层表面磨损形貌
Fig. 12 Surface wear morphology of strengthening layer under different conditions

在开式无润滑条件下对强化后的钛合金齿轮进行摩擦磨损实验,啮合齿轮为未处理的钛合金齿轮,转速为 200 r/min,加载扭矩为 3.5 N·m,带负载运转为 3 200 转。

由图 12(a) 可知,未处理的钛合金齿轮表面在摩擦磨损实验后出现数量较多且宽度较大的沟槽,磨损区域产生严重的塑性变形。钛合金齿轮由于基体硬度相对较低,在负载作用下产生黏着磨损使材料发生迁移,脱落的材料在啮合区域对齿轮表面进行磨粒磨损,造成明显的划痕。由图

12(b)可知,强化处理后的齿轮表面划痕减少,磨损形式主要为黏着磨损,表面存在较多区域出现材料的片状剥落现象。部分区域较为平整,相较于未处理的基体来说具有一定的抗磨损能力。由图 12(c)可知,随着电压和处理时间的增加,磨损后的表面平整度进一步提高。表面只有少量沿齿根到齿顶的细小划痕,极少量区域出现轻微的疲劳点蚀,齿轮抗磨损能力有了明显提升。

4 结 论

1) 通过有限元分析和实验相结合的方法对齿轮复杂表面放电机理进行了研究,其关键在于解决电场不均匀的问题,通过采用绝缘非强化表面的方法有效地解决了这一问题。

2) 采用啮合形阳极时电场较为均匀,获得的强化层在厚度分布上最为均匀。电极距离小于等于 2 mm,系统容易因为短路而在齿轮表面留下放电烧蚀坑;电极距离为 5 mm 时的强化层表面碳质量分数以及强化层厚度均优于 10 mm。系统入口流速为 2.32 cm/s 时,极间电解液得不到有效交换,强化层表面粗糙且出现微裂纹;5.14 cm/s 流速下的强化层较薄,表面部分区域呈现基体形貌。3.32 cm/s 流速下的表面较为平整且具有较多孔径细小的放电通道。

3) 相较于未处理的钛合金齿轮来说,强化后的齿轮表面耐磨性有了明显提升,这也验证了仿真和实验获得的电极系统和流场参数的合理性。

参考文献:

[1] 刘奇先,刘杨,高凯. 钛合金的研究进展与应用[J]. 航天制造技术,2011(4):45-55.
LIU Qixian, LIU Yang, GAO Kai. Research progress and application of titanium alloys[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2011(4):45-55. (in Chinese)

[2] BOYER R R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry[J]. Materials Science and Engineering A, 1996, 213(1/2):103-114.

[3] PANG J, LU W Z, LIU W, et al. Diffusion of carbon and nitrogen in TC4 titanium alloy plasma electrolytic saturation[J]. Chemical Physics, 2018, 505:12-18.

[4] 罗秋生,李世峰,裴会平. 航空发动机钛火预防技术研究的进展[J]. 航空动力学报, 2012, 27(12):2763-2768.
LUO Qiusheng, LI Shifeng, PEI Huiping. Progress in titanium fire resistant technology for aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(12):2763-2768. (in Chinese)

[5] 陈纪民. 不同材质的齿轮发展现状[J]. 热加工工艺, 2013, 42(12):36-40.

CHEN Jimin. Research status of gear made with different material[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(12):36-40. (in Chinese)

[6] WEI Y, LI H, GAO H. Gear failure forms and processing technology improvement[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 340:17-20.

[7] CHEN F F, YU S X, LU W Z, et al. Effect of rare earth elements on plasma electrolytic carbonitriding of Ti-6Al-4V alloy[J]. Materials Science and Technology, 2019, 35(18):2275-2283.

[8] DONG H, BLOYCE A, MORTON P H, et al. Surface engineering to improve tribological performance of Ti-6Al-4V[J]. Surface Engineering, 1997, 13(5):402-406.

[9] BELKIN P N, BORISOV A M, KUSMANOV S A. Plasma electrolytic saturation of titanium and its alloys with light elements[J]. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2016, 10(3):516-535.

[10] 李杰,沈德久,王玉林,等. 液相等离子体电解渗透技术[J]. 金属热处理, 2005, 30(9):63-67.
LI Jie, SHEN Dejiu, WANG Yulin, et al. Plasma electrolytic saturation technique in solution[J]. Heat Treatment of Metals, 2005, 30(9):63-67. (in Chinese)

[11] SKAKOV M, KURBANBEKOV S, SCHEFFLER M, et al. Modification of stainless steels surface layers by nitriding and carbonitriding[J]. Advanced Materials Research, 2013, 712/713/714/715(1):12-16.

[12] 田占军,李杰,沈德久,等. 液相等离子体电解渗碳、渗氮及其碳氮共渗技术[J]. 电镀与涂饰, 2006, 25(2):53-56.
TIAN Zhanjun, LI Jie, SHEN Dejiu, et al. Liquid phase plasma electrolytic carburizing, nitriding, carbonitriding technique[J]. Electroplating and Finishing, 2006, 25(2):53-56. (in Chinese)

[13] LI X M, HAN Y. Mechanical properties of Ti(C_{0.7}N_{0.3}) film produced by plasma electrolytic carbonitriding of Ti6Al4V alloy [J]. Applied Surface Science, 2008, 254(20):6350-6357.

[14] DONG Y X, CHEN Y S, CHEN Q, et al. Characterization and blood compatibility of TiC_xN_{1-x} hard coating prepared by plasma electrolytic carbonitriding[J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 201(21):8789-8795.

[15] 武立胜,吕新生,张晔,等. 基于 Fluent 连杆模具电解加工过程的三维流场分析[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(9):1443-1445.
WU Lisheng, LÜ Xinsheng, ZHANG Ye, et al. Fluent based numerical simulation of three-dimensional flow field of electrochemical machining for a connecting rod mold [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(9):1443-1445. (in Chinese)

[16] 崔庆忠,邵文英,王风云. 不同温度下水-甲酰胺体系的密度与粘度[J]. 华东工学院学报, 1992, 65(5):88-91.
CUI Qingzhong, SHAO Wenying, WANG Fengyun. Densities and viscosities of H₂O-HCONH₂ mixtures at different temperatures[J]. Journal of East China Institute of Tech-

nology,1992,65(5):88-91. (in Chinese)

[17] YEROKHIN A L,NIE X,LEYLAND A, et al. Plasma electrolysis for surface engineering[J]. Surface and Coatings Technology,1999,122(2/3):73-93.

[18] SHADRIN S Y,ZHIROV A V,BELKIN P N. Formation regularities of gaseous vapour plasma envelope in electrolyzer[J]. Surface Engineering and Applied Electrochemistry,2016,52(1):110-116.

[19] 乔宝蓉,黄洁雯,樊新民,等. 等离子体电解处理中工件表面温度计算与测量[J]. 材料热处理学报,2015,36(7):241-244.

QIAO Baorong, HUANG Jiewen, FAN Xinmin. Surface temperature calculation and measurement of workpiece in plasma electrolysis saturation[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(7): 241-244. (in Chinese)

(编辑:陈越)