

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.02.015

灌注桩后注浆对桩周黄土力学特性和湿陷性的影响

张星¹, 崔强², 王金锁¹, 李俊¹, 刘广³, 张振华³

(1. 国网新疆电力有限公司建设分公司, 新疆 乌鲁木齐 830063; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 102401; 3. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:为了降低新疆地区黄土湿陷变形对该地区特高压输电线路塔基基础稳定性的影响,文章以新疆伊犁哈萨克自治州尼勒克县塔勒德地区的黄土为研究对象,采用灌注桩后注浆工艺对黄土地基进行改良,通过直剪试验、湿陷性测试、场发射扫描电子显微镜(field emission scanning electron microscope, FESEM)观测和X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)分析等方法,探究灌注桩后注浆对桩周黄土力学特性、湿陷性指标和微观结构特征的影响。结果表明:灌注桩后注浆后,桩周黄土内摩擦角由改良前的 23.66° 增大为 26.76° ,增幅为13.10%;黏聚力由改良前的20.88 kPa增加至31.30 kPa,增大49.90%;改良后较改良前黄土的湿陷系数平均下降0.026左右,湿陷系数下降明显,说明后注浆方法可以改善黄土的湿陷变形问题。

关键词:后注浆;湿陷性黄土;力学特性;直剪试验;微观结构

中图分类号:TU444 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)02-0240-06

Effects of post-grouting of cast-in-place piles on mechanical properties and collapsibility of loess around piles

ZHANG Xing¹, CUI Qiang², WANG Jinsuo¹, LI Jun¹, LIU Guang³, ZHANG Zhenhua³

(1. Construction Branch of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830063, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 102401, China; 3. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: To mitigate the impact of the collapsible deformation of loess on the stability of the tower foundation of the ultra-high voltage transmission lines in Xinjiang, the loess from Taleda area of Nilka County, Ili Kazak Autonomous Prefecture, Xinjiang was investigated using experimental method. The loess foundation was improved by the post-grouting process of cast-in-place piles. Effects of post-grouting of cast-in-place piles on the mechanical properties, collapsibility indexes and microstructure characteristics of loess around the piles were analyzed using the direct shear test, collapsibility test, field emission scanning electron microscope (FESEM) observation and X-ray diffraction (XRD). The results show that the post-grouting method of cast-in-place piles increases the internal friction angle from about 23.66° to 26.76° , with an increase of 13.10%. The cohesion force increases from about 20.88 kPa to 31.30 kPa, with an increase of 49.90%. After the post-grouting improvement, the coefficient of collapsibility of loess decreased by about 0.026 on average compared with original coefficient of collapsibility. The coefficient of collapsibility decreases obviously, which indicates that the post-grouting method can mitigate the collapsible deformation of loess.

Key words: post-grouting; collapsible loess; mechanical properties; direct shear test; microstructure

收稿日期:2022-09-19;修回日期:2023-02-13

基金项目:安徽省自然科学基金青年基金资助项目(1908085QE216);国家电网有限公司基建依托工程新技术资助项目(GCB11202100786)

作者简介:张星(1990—),男,河南南阳人,国网新疆电力有限公司建设分公司工程师;

崔强(1980—),男,甘肃秦安人,博士,中国电力科学研究院有限公司正高级工程师;

刘广(1989—),男,云南石屏人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者, E-mail: guang-liu@hfut.edu.cn;

张振华(1977—),男,福建建瓯人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

我国新疆地区有大量的风电等清洁能源,依靠特高压输电线路将新疆地区电能输送到能源紧缺的东部和中部地区,是实现资源有效调配的重要方式。2022年5月国务院在《关于促进新时代新能源高质量发展的实施方案》中提出,要加大力度规划建设以大型风光电基地为基础、以其周边清洁高效先进节能的煤电为支撑、以稳定安全可靠的特高压输变电线路为载体的新能源供给消纳体系^[1]。根据《新疆“十四五”电力发展规划》,“十四五”期间,新疆将进一步完善750 kV主网架,开工建设±800 kV哈密北—重庆特高压直流工程,推动实施哈密—敦煌第三回750 kV输变电工程,形成“内供七环网、外送六通道”的主网架格局,特高压电网将迎来新一轮的建设高峰期^[2]。

新疆地区的黄土虽然在自然状态下有低压缩性、强度高和孔隙比小等特点^[3],但是新疆黄土一旦遇水,就会产生明显的湿陷变形现象,且失水后还会出现二次湿陷性。随着土体埋藏深度增加,黄土湿陷性逐渐降低,而在相同埋深情况下,在一定范围内,随着上覆压力的增加并在一定浸水条件下,黄土的湿陷性十分明显^[4-5]。干湿循环作用会使得黄土颗粒间的微裂隙逐渐扩张,干密度显著减小,这也是导致表面裂隙改变和力学性能衰减的本质原因^[6]。

为了评价黄土地基湿陷性变形,文献^[7]进行不同围压和应力比的黄土增湿至饱和浸水三轴试验,给出湿陷性黄土的湿陷变形计算表达式;文献^[8-12]研究发现,利用水泥粉煤灰碎石桩、素土挤密桩、土壤固化剂和振杆密实法技术处理湿陷性黄土地基,能较好地改善黄土的湿陷性。新疆地区的黄土湿陷变形严重影响新疆特高压输电线路的塔基基础稳定性,亟需开展黄土地基改良方法对其力学特性和湿陷性的影响机制研究。

为提升新疆黄土地基中特高压输电线路的塔基稳定性,本文采用灌注桩后注浆方法进行黄土地基改良,通过开展改良前后桩周黄土的直剪强度、湿陷性指标和微观性能测试,从宏微观角度揭示灌注桩后注浆对新疆黄土的改良效果和作用机制,以期为采用灌注桩后注浆方法改良新疆黄土的力学和变形特性提供参考。

1 试验准备

1.1 取样地点

本研究取样地点位于新疆伊犁哈萨克自治州尼勒克县塔勒德地区。为验证地基改良技术方案

对依托工程湿陷性黄土地基适用性,研究人员在该地区开展了黄土地基灌注桩后注浆的改良试验,并进行桩基上拔承载力的真型测试。本文主要研究灌注桩后注浆改良方式对桩周黄土力学和湿陷性的影响。

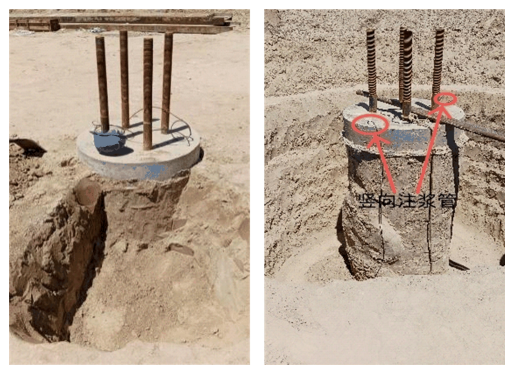
1.2 样品制备与测试

本次强度测试使用标准环刀样进行实验室测试,在20号塔位取环刀样12个,在29号塔位于改良前后各取环刀样12个。其中,20号塔位在黄土地基中直接开挖取样,记为取样点1,如图1所示。



图1 20号塔位取样点1取样现场图片

29号塔位为桩基灌浆和上拔试验场地,该场地规划设计10个试验桩,改良前土样取样位置为未注浆试验桩的桩周土体,记为取样点2;改良后土样取样位置为注浆试验桩的桩周土体,记为取样点3。29号塔位取样点取样现场图片如图2所示。



(a) 取样点2 (b) 取样点3

图2 29号塔位取样点取样现场图片

注浆采用多断面桩侧注浆方式,自地面起算,每隔2 m设置1层注浆断面。取样点3处的桩长为5.2 m,埋入长度为5.0 m,外露长度为0.2 m,桩径为1.0 m,共设置2个注浆断面。浆液通过竖向注浆管到达注浆断面,在每个注浆断面上有

由耐高压复合软管加工而成的环形单向注浆阀, 环形注浆阀上开设 6 个注浆孔。后注浆时间在混凝土初凝后, 即成桩 2 d 后开始注浆。浆液的水灰比控制在 0.7~0.9 之间, 注浆压力与深度有关, 在本取样断面处注浆压力为 0.1 MPa, 注浆流量不超过 75 L/min, 每个断面注浆量估算约为 0.7 t。

环刀取样过程中均匀用力, 环刀取样后采用保鲜膜和胶带密封, 并采用记号笔进行编号, 密封好的环刀样装入保鲜袋, 进一步防止水分丢失。密封制备好的环刀样采用防震气泡膜包裹装箱, 运输过程轻拿轻放, 尽量避免对黄土原状结构的扰动。

为弄清新疆黄土样物理性质, 开展一系列实验室物理力学试验。采用铝盒烘干法对新疆黄土含水率进行测试, 烘干时间不少于 8 h, 使用液塑限联合测定仪, 测得 3 个取样点试样的液限、塑限和塑性指数。3 个取样点试样的含水率、密度、塑限、液限和塑性指数见表 1 所列。

表 1 3 个取样点试样含水率、密度和液塑限

参数	取样点 1	取样点 2	取样点 3
含水率/%	10.15	9.06	8.81
密度/(kg/m ³)	1 562	1 593	1 608
塑限/%	19.70	20.88	20.01
液限/%	29.40	30.59	31.23
塑性指数	9.70	9.71	11.22

2 后注浆对力学特性和湿陷性的影响

2.1 试验方法

本文采用直剪试验研究新疆黄土的力学和强度特性。根据文献[13], 结合土样实际情况, 新疆湿陷性黄土直剪试验的方法和步骤如下:

1) 每组直剪试验准备 4 个环刀土样, 将准保良好的原状环刀土样拆封, 进行环刀编号, 制备标准的环刀土样。

2) 将剪切盒安装好, 插入销钉, 使上下剪切盒紧密贴合, 环刀刀口向上放在上剪切盒, 用透水石缓慢按压环刀土样, 将土样挤进剪切盒中, 放上加压盖。

3) 将剪切盒的触头对准压力环方向, 将剪切盒正确放在剪切仪上, 手摇摇杆, 当变形百分表有读数时, 停止摇动, 使环刀、剪切盒紧密接触, 将压力杆放在压力盖上, 先给予 100 kPa 的垂直压力。拔出销钉, 接通电源, 打开开关。

4) 摇杆每转动 2 圈, 记录变形百分表读数。土样剪切破坏时的读数乘以测力环系数即为该土样在对应垂直压力下的抗剪强度。需要注意的是, 本次试验土样为湿陷性黄土, 剪切破坏对应的读数在变形百分表的表现不明显, 需仔细关注试验过程中指针不再转动或倒退的现象, 同时根据记录数据的增长值和增长趋势, 识别出土样剪切破坏时对应的变形百分表读数。

5) 再分别给予 200、300、400 kPa 的垂直压力, 重复步骤 1)~步骤 4), 得到每级垂直压力下的抗剪强度。

湿陷性指标测试采用双线法, 该方法操作简单, 需要的试样量少。试验时一个试样在天然湿度下分级加压, 直至湿陷变形稳定为止; 另一个试样在天然湿度下施加第 1 级压力后浸水。浸水时向容器中注入纯水, 水面宜高出试样顶面; 浸水时注入的纯水淹没土样, 水面高度相同, 确保不同试样的浸水状态完全一致。在第 1 级压力下湿陷稳定后, 再分级加压, 直至试样在各级压力下浸水变形稳定为止, 压力等级在 150 kPa 以内时, 每级增量为 25~50 kPa; 压力超过 150 kPa 时, 每级增量为 50~100 kPa。由于取土深度较浅, 最后一级压力采用 200 kPa。记录每级压力下的读数, 并计算每级压力下的湿陷系数^[13], 计算公式为:

$$\delta = \frac{h_p - h_p'}{h_0} \quad (1)$$

其中: δ 为湿陷系数; h_p 为在某级压力下, 试样变形稳定后的高度; h_p' 为在某级压力下, 试样浸水湿陷变形稳定后的高度; h_0 为试样初始高度。

2.2 抗剪强度

3 个取样点黄土试样 4 种压力下的直剪试验结果见表 2 所列。

表 2 3 个取样点黄土试样 4 种压力下抗剪强度 单位: kPa

垂直压力/kPa	100	200	300	400
取样点 1	64.343	113.035	151.293	191.290
取样点 2	59.126	111.296	156.510	196.507
取样点 3	78.255	137.381	182.595	231.287

由表 2 可知: 取样点 1 与取样点 2 的黄土抗剪强度相近, 这 2 个取样点的土均为改良前黄土, 均为未施加改良措施的土样; 改良后桩周黄土在各级荷载下的抗剪强度明显增大, 在 100 kPa 垂直压力下增幅大约为 20 kPa, 整体呈垂直压力越大、增幅越大的趋势。

根据表 2 试验数据, 进行试验数据拟合, 根据

拟合直线方程可得到黄土的内摩擦角和黏聚力,见表 3 所列。

表 3 3 个取样点黄土的黏聚力和内摩擦角

参数	取样点 1	取样点 2	取样点 3
内摩擦角/(°)	22.74	24.58	26.76
黏聚力/kPa	25.22	16.53	31.30

从表 3 可以看出:改良前土样(取样点 1 和取样点 2)的内摩擦角平均为 23.66°,黏聚力平均为 20.88 kPa;与改良前土样相比,改良后黄土(取样点 3)内摩擦角变大为 26.76°,增幅为 13.10%,而黏聚力增大为 31.30 kPa,增幅为 49.90%。由此可见,桩周后注浆的挤压作用一定程度上改变了新疆黄土的结构,改良后黄土的抗剪强度、内摩擦角和黏聚力均有不同程度的提升。

2.3 湿陷性指标

根据 2.1 节所述黄土湿陷性指标测试方法,用双线法进行黄土湿陷性指标测试,试验过程中做好记录,进行黄土试样在不同压力下天然状态与浸水状态变形比较,在最后一级压力黄土湿陷变形稳定后,浸水状态试样比天然状态试样变形明显。

每组黄土湿陷性指标测试需采用 2 个试样,一个试样为天然状态,另一个试样为浸水状态。每个取样点进行 2 组湿陷性指标测试,分别记为试验 1 和试验 2,测出在每级压力下试样天然状态与浸水状态下的试样高度。取样点 1 试验 1 在不同压力下天然与浸水状态变形对比如图 3 所示。



图 3 取样点 1 试验 1 在不同压力下天然与浸水状态变形对比

取样点 1 试验 2 在不同压力下天然与浸水状态变形对比如图 4 所示。

同样地,分别进行取样点 2 和取样点 3 的 2 组湿陷性指标测试。由式(1)计算得到不同垂

直压力下黄土的湿陷系数,见表 4 所列。

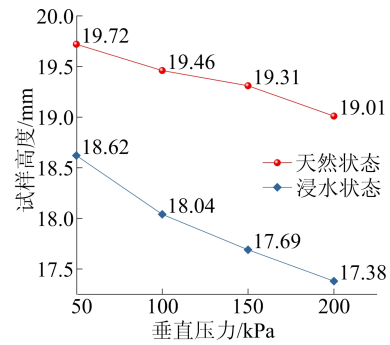


图 4 取样点 1 试验 2 在不同压力下天然与浸水状态变形对比

表 4 3 个取样点黄土 4 种压力下 2 组试验的湿陷系数

垂直压力/kPa		50	100	150	200
取样点 1	试验 1	0.046	0.056	0.070	0.065
	试验 2	0.055	0.071	0.081	0.082
取样点 2	试验 1	0.039	0.057	0.068	0.075
	试验 2	0.046	0.065	0.076	0.083
取样点 3	试验 1	0.015	0.032	0.042	0.049
	试验 2	0.019	0.041	0.046	0.053

取样点 2 和取样点 3 共进行 4 组试验。由表 4 可知:在轴向荷载 50 kPa 下,黄土的湿陷系数由改良前的平均 0.042 减小至改良后的 0.017;在轴向荷载 100、150、200 kPa 下,与改良前相比,改良后湿陷系数均有所下降,由改良前的 0.061、0.072、0.079 分别减小至改良后的 0.037、0.044、0.051;在每级荷载下,黄土的湿陷系数平均下降 0.026 左右,降幅约 41.34%,黄土湿陷性系数下降较明显,达到了较好改良效果。不同垂直压力下黄土改良前后平均湿陷系数对比如图 5 所示。

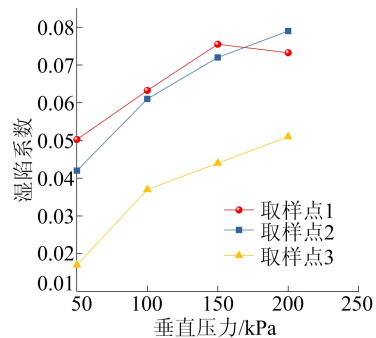


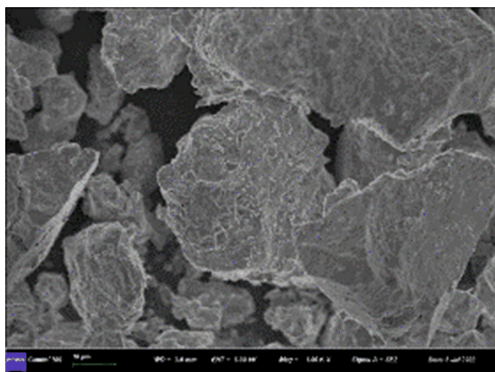
图 5 3 个取样点黄土湿陷系数对比

从图 5 可以看出,取样点 1 与取样点 2(改良前)湿陷性较高,采用桩周后注浆进行黄土的湿陷性改善,取样点 3(改良后)黄土遇水时湿陷变形显著减小,平均降低 41.34%。

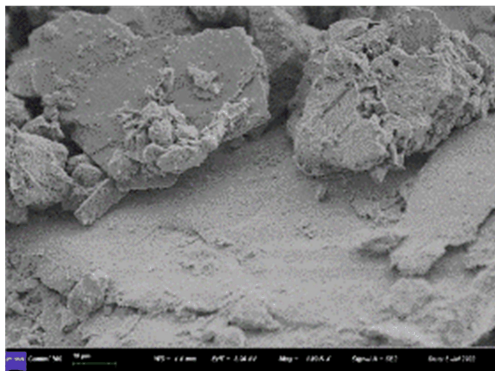
3 注浆前后的微观结构测试分析

3.1 FESEM 测试分析

采用合肥工业大学分析测试中心的热场发射扫描电子显微镜(field emission scanning electron microscope, FESEM)对新疆黄土的微观结构进行观测,改良前、后黄土的 FESEM 图像如图 6 所示。



(a) 改良前



(b) 改良后

图 6 改良前、后黄土 FESEM 图像

对比改良前、后 FESEM 图像可以发现:改良后颗粒间隙变小,孔隙率也较小,颗粒之间胶结良好;在注浆后土体表面可见少量凝块状胶结,分布均匀。在现场试验中,采用的注浆压力较大,但是开挖桩周土体发现,浆液很少进入土体,大部分附着在桩周上形成混凝土凸起。这种桩周凸起一定程度上增大了桩周侧摩阻力,对桩体抗拔承载力的提升具有重要作用。同时,注浆过程中浆液注入对周围土体具有较强的挤压作用,注浆压力通过挤压桩周土体,降低了孔隙率,提高了黄土的抗剪强度。

3.2 XRD 测试分析

依据文献[14],在黄土 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)测试分析前,先取 100 g 左右土

样在室温下风干,然后用玛瑙研钵将风干后的样品碾碎成粒径小于 0.075 mm 的粉末,在碾碎过程中可通过过筛的方法分离达到粒径要求的粉晶颗粒。将碾磨好的粉末样品充分混合均匀后,进行 XRD 测试。

本研究采用固定靶 X'Pert PRO MPD X 射线衍射仪(荷兰 PANalytical 公司)进行测试分析,结果表明,改良前后的新疆黄土矿物组分未明显改变。这说明注浆后浆液未大量进入土体,更多的是附着在桩周形成混凝土凸起。采用分析软件 MDI Jade 6.5 对黄土的 XRD 图谱进行分析,结果如图 7 所示。

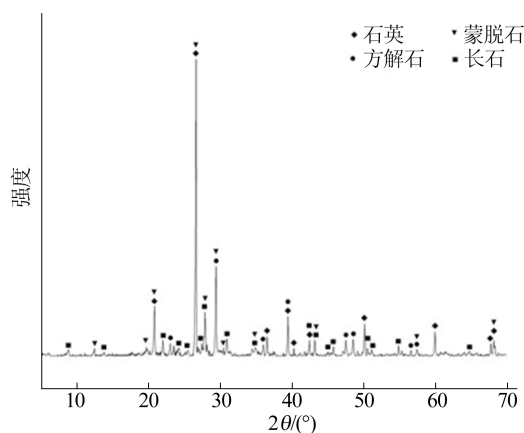


图 7 黄土的 XRD 分析结果

4 结 论

本文针对灌注桩后注浆对桩周黄土力学特性和湿陷性的影响开展试验研究。研究表明,改良前新疆尼勒克县塔勒德地区黄土内摩擦角平均为 23.66° ,改良后内摩擦角增大为 26.76° ,增幅为 13.10%,而改良前黄土黏聚力平均为 20.88 kPa,改良后增大为 31.30 kPa,增幅约为 49.90%。

采用改良前后土样(取样点 2、取样点 3)进行 4 组湿陷性指标测试,发现在 50、100、150、200 kPa 4 级轴向荷载下,改良后黄土的湿陷性变形均有显著减小,每级荷载下,黄土的湿陷系数平均下降 0.026 左右,降幅约 41.34%。黄土的微观测试也表明,黄土微观结构会因随注浆而改变,改良后土骨架间的孔隙变小;改良前大多为絮状结构,改良后发现少量块状胶结,这可能与后注浆过程中浆液对桩周黄土挤压作用有关。

本文试验结果表明,采用灌注桩后注浆技术在新疆地区对黄土地基进行改良、提高输电线路塔基稳定性是可行的。

[参 考 文 献]

- [1] 国家发改委.《关于促进新时代新能源高质量发展的实施方案》政策解读[J]. 稀土信息,2022(6):15-18.
- [2] 褚忠凯,张俊,朱彤.内供四环网、外送四通道 把新疆能源优势化为经济优势[N]. 科技日报,2023-01-10(6).
- [3] 裴存建,陈岩斌,惠建奇.新疆湿陷性土的特性和湿陷性地基土的处理[J]. 西部探矿工程,2002(5):47-48.
- [4] 张瑜,张兴明,周志军.黄土湿陷性及其影响因素分析[J]. 公路,2020,65(8):69-75.
- [5] 崔靖俞,张吾渝,解邦龙,等.西宁地区不同深度原状黄土湿陷性及微观机理研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(增刊 2):249-252.
- [6] 尹今朝,胡同.湿陷性黄土力学性质与裂隙发展干湿循环效应[J]. 人民黄河,2022,44(2):143-146,152.
- [7] 许萍,苗贺朝,邵生俊,等.不同三轴应力条件下湿陷性黄土增湿变形特性研究[J]. 应用力学学报,2021,38(5):1966-1973.
- [8] 邵鹏远,高轩,饶振兴.湿陷性黄土地区水泥粉煤灰碎石桩复合地基的应用研究[J]. 能源与环保,2022,44(6):208-211,218.
- [9] 田威,李腾,贾能,等.固化剂在黄土路基工程中的研究进展[J]. 公路,2021,66(11):45-52.
- [10] 刘松玉,杜广印,毛忠良,等.振杆密实法处理湿陷性黄土地基试验研究[J]. 岩土工程学报,2020,42(8):1377-1383.
- [11] 安达.北方深厚湿陷性黄土场地地基处理[J]. 粘接,2022,49(5):154-158.
- [12] 王雪艳.碎石桩加固深厚湿陷性黄土地基的试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(4):1164-1170.
- [13] 水利部水利水电规划设计总院,南京水利科学研究院.土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019:122-127.
- [14] 石油地质勘探专业标准化技术委员会.沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法:SY/T 5163—2010[S].北京:石油工业出版社,2010:6-10.

(责任编辑 张淑艳)

(上接第 175 页)

随节曲线的波动态势,但可以有效控制峰值滚切力,合理的进刀工艺策略是提高滚切平稳性的有效途径。

[参 考 文 献]

- [1] MUNDO D, GATTI G, DOONER D B. Optimized five-bar linkages with non-circular gears for exact path generation [J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(4): 751-760.
- [2] ZHENG F Y, HUA L, HAN X H. The mathematical model and mechanical properties of variable center distance gears based on screw theory[J]. Mechanism and Machine Theory, 2016, 101: 116-139.
- [3] 宋洪舟,郑继贵,侍威,等.基于螺旋非圆齿轮变速装置设计研究[J]. 机械工程学报,2017,53(23):101-107.
- [4] 刘大伟,罗林明,王国会,等.连铸结晶器非正弦发生器的集成设计[J]. 中国机械工程,2017(21):92-97.
- [5] LITVIN F L, GONZALEZ P I, HAYASAK K, et al. Generation of planar and helical elliptical gears by application of rack-cutter, hob, and shaper[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2007, 196(41/42/43/44): 4321-4336.
- [6] 谭伟明,胡赤兵,洗伟杰,等.非圆齿轮滚切最简数学模型及其图形仿真[J]. 机械工程学报,2001,37(5):26-29.
- [7] 胡赤兵,丁和艳,严克明,等.非圆斜齿轮滚切加工 CNC 联动控制方案[J]. 中国机械工程,2004,15(24):15-18.
- [8] HAN J, WU L, YUAN B, et al. A novel gear machining CNC design and experimental research[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(5/6/7/8): 1711-1722.
- [9] WU L L, HAN J, ZHU Y G, et al. Non-circular gear continuous generating machining interpolation method and experimental research [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2017, 39(5): 5171-5180.
- [10] XIA L, LIU Y, LI D, et al. A linkage model and applications of hobbing non-circular helical gears with axial shift of hob [J]. Mechanism and Machine Theory, 2013, 70: 32-44.
- [11] 侯东海,刘忠明,吴序堂.用工具斜齿条法加工斜齿非圆齿轮的啮合理论模型[J]. 机械工程学报,2003,39(8):49-54.
- [12] BOUZAKIS K D, LILI E, MICHAILIDIS N, et al. Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes: a critical synthesis of analysis methods[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2008, 57(2): 676-696.
- [13] 张荣闯,黎柏春,张景强.圆柱齿轮滚齿切削力的预测[J]. 东北大学学报(自然科学版),2019,40(7):980-985.
- [14] HAN J, LI D Z, TIAN X Q, et al. Linkage model and interpolation analysis of helical non-circular gear hobbing[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2020, 42(11): 582.
- [15] 曹华军,李先广,陈鹏.绿色高速干切滚齿工艺理论与关键技术[M]. 重庆:重庆大学出版社,2016:42-44.
- [16] 张一同.凸轮轴仿形加工的恒速磨削[J]. 制造技术与机床,2000(3):18-19.
- [17] 贾振元,傅南红,王振国,等.凸轮轴变转速数控磨削方法的数学解析[J]. 大连理工大学学报,2000,40(3):320-322.

(责任编辑 胡亚敏)