

Φ73 mm 摩擦焊接式全钛合金钻杆的研制与应用

张 然, 王显林, 王翠竹, 王青林, 李竹滨

(渤海能克钻杆有限公司, 河北 青县 062658)

摘要: 叙述了 Φ73 mm 摩擦焊接式全钛合金钻杆的研发过程, 详细介绍了其管体锻造制造技术以及产品使用效果。通过特殊的管体锻造技术以及螺纹车削技术, 开发出了性能稳定、使用寿命长的 Φ73 mm 摩擦焊接式全钛合金钻杆。该摩擦焊接式全钛合金钻杆在塔河油田 T4326CH2 超短半径水平井已成功应用, 最高造斜曲率达到 55°/30 m, 创下西北工区井眼曲率最大、侧钻进尺最少、侧钻时间最短 3 项纪录。

关键词: 钻杆; 钛合金; 摩擦焊接式; 锻造; 车削

DOI:10.19938/j.steelpipe.1001-2311.2024.3.36.41

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



R & D and Application of Φ73 mm Friction-welded All Titanium Alloy Drill Pipe

ZHANG Ran, WANG Xianlin, WANG Cuizhu, WANG Qinglin, LI Zhubin

(Bohai Nengke Drill Pipe Co., Ltd., Qingxian 062658, China)

Abstract: Elaborated here in the article is the R & D process of the Φ73 mm friction-welded all titanium alloy drill pipe. Also described in detail are the forging technology for the pipe body and the application effectiveness of the said drill pipe. Thanks to a certain special forging process for the pipe body and threading process, the Φ73 mm friction-welded all titanium alloy pipe featuring consistent performance and long service life is developed. The drill pipe has been successfully used in the T4326CH2 ultra short radius horizontal well of Tahe Oil Field, resulting in a highest build-up rate up to 55°/30 m, which has set three records, i.e., the first largest well borehole curvature, the least side drilling footage and the shortest side drilling time in the Northwest China Work Area.

Key words: drill pipe; titanium alloy; friction welding; forging; turning

随着油气勘探开发不断向深层深水、高温高压以及高腐蚀等非常规油气资源发展, 对高耐蚀、高性能的新材料油井管提出了迫切需求^[1-3]。油气田开发面临提高采收率和提质增效的双重压力, 井况复杂的井越来越多。大位移井井筒的倾斜角、环空和钻柱的尺寸、钻杆的偏心率等因素造成井眼轨迹复杂, 摩阻、扭矩分布规律的掌控以及旋转导向钻井稳斜控制的难度大; 高温、高压对钻具、井下工具、仪器要求苛刻; 短半径水平井造斜井段短, 造斜率高, 测点滞后, 井眼不规则, 易发生钻柱“自锁”; 老井开窗侧钻水平井钻井泵压高、摩阻大、

托压现象突出、钻压传递困难^[4]。因此, 国内外学者尝试研制钛合金钻杆替代普通钻杆。

目前国内已生产出 110 钢级的钛合金钻杆, 与常规普通钢 S135 钻杆相比^[5-6], 其优势有:

(1) 可以使大位移井与水平井位移延伸更远。同样壁厚与长度的钛合金钻杆在常规密度为 1.25 g/cm³ 的水平段钻井液中的浮重仅为钢质钻杆的 49%。这种情况下, 摩阻力也仅为普通钻杆的 50% 左右, 而管柱的摩阻扭矩问题是大位移井技术的核心问题之一, 它决定水平位移的最大延伸, 因此钛合金钻杆可以更有利于大位移井与丛式三维水平井。在国内目前工厂化钻井越来越多情况下, 钛合金钻杆使用范围更大。

(2) 减少地面设备负荷。钛合金钻杆由于质量

张 然(1989-), 男, 工程师, 主要从事钻杆研发和制造工作。

轻, 导致扭矩减少近 50%, 有效减少了地面顶驱(转盘)负荷, 使这种损坏发生几率大大降低, 而负荷减少还会带来柴油消耗的减少^[7-11]。

针对以上情况, 2020 年渤海能克钻杆有限公司(简称渤海能克)研发了 $\Phi 73$ mm 摩擦焊接式全钛合金钻杆, 现主要介绍 $\Phi 73$ mm 摩擦焊接式全钛合金钻杆的研制与应用情况。

1 研发过程

1.1 钻杆结构设计

1.1.1 管体结构设计

在拉伸、扭转、弯曲复合载荷作用下, 钻杆加厚过渡区整体结构分布极不均匀, 应力主要集中在内过渡带消失位置, 在钻杆实际使用过程中, 钻具在此处容易产生早期的疲劳裂纹, 疲劳裂纹不断扩展, 最终导致管体刺漏甚至断裂。影响应力集中最重要的两个因素就是管体内过渡带长度 M_{in} 以及内过渡带圆弧角 R 的大小, 但是管体内过渡带长度以及内过渡带圆弧角 R 受到现有锻造技术的限制是不可能无限增大的, 所以需要选取最经济可行的方案来尽可能降低其过渡带位置的应力集中^[12-14]。

用有限元法分析内过渡带长度 M_{in} 和内过渡带圆弧角 R 的不同组合对应力集中系数 K_t 的影响。在相同载荷工况下, 以钻杆没有突变的应力为基准, 将钻杆尺寸在过渡区处的最大应力除以钻杆尺寸无突变处的应力, 所得的值即为应力集中系数 K_t , 应力集中系数越大, 说明此处应力越大, 越容易发生破坏。

有限元软件用美国 ANSYS 通用分析软件, 由于钻杆接头及钻杆本体是属于轴对称的回转体, 因此建立有限元模型时采用轴对称的方法建模, 其分析模型、网格及力学模型如图 1 所示, 在分析中编写 APDL(ANSYS Parametric Design Language, ANSYS 参数化设计语言)程序, 程序中可以随时方便地改变 M_{in} 和 R 的大小, 模拟出相应的应力集中系数 K_t 的大小。为了更准确地模拟分析过渡圆弧区的应力分布, 在有限元网格划分时, 将该区域的网格划分密一些, 以便提高计算精度。划分网格后共 13 600 个单元; 设材料弹性模量为 206 GPa, 泊松比为 0.30; 对加厚端的端面施加固定约束, 对管体端面施加 500 kN 拉力、10 kN·m 扭矩, 分别分析内过渡带长度 M_{in} 和内过渡带圆弧角 R 对应力集中现象的影响。

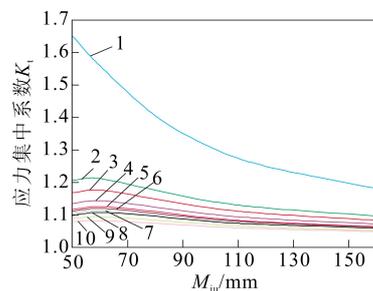


(a) 1/2 网格模型 (b) 轴对称网格模型 (c) 局部放大网格模型

图 1 $\Phi 73$ mm 钻杆过渡带位置有限元网格模型及力学模型

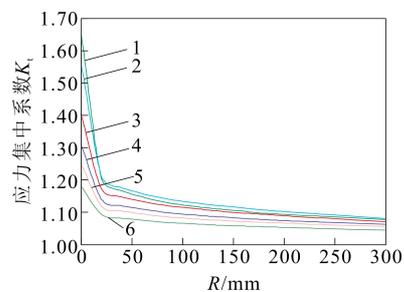
1.1.2 加厚过渡带有限元结果分析

通过对 M_{in} 和 R 尺寸的不同组合计算, M_{in} 在 50~160 mm 变化, R 在 0~300 mm 变化, 将结果通过回归处理, 可分别得到 R 一定时应力集中系数 K_t 随 M_{in} 的变化关系和 M_{in} 一定时应力集中系数 K_t 随 R 的变化关系, 具体如图 2~3 所示。



1— R 为 0 2— R 为 20 mm 3— R 为 40 mm 4— R 为 80 mm
5— R 为 120 mm 6— R 为 140 mm 7— R 为 160 mm
8— R 为 180 mm 9— R 为 240 mm 10— R 为 300 mm

图 2 R 一定时应力集中系数 K_t 随 M_{in} 的变化关系



1— M_{in} 为 50 mm 2— M_{in} 为 60 mm 3— M_{in} 为 80 mm
4— M_{in} 为 100 mm 5— M_{in} 为 120 mm 6— M_{in} 为 160 mm

图 3 M_{in} 一定时应力集中系数 K_t 随 R 的变化关系

从图 2 中可以看出：当 R 从 0 变化到 300 mm，随着 M_{in} 的增加，应力集中系数基本上有规律地降低； R 越大， M_{in} 越长，应力集中系数越小；当 R 在 20~300 mm， M_{in} 大于 110 mm，应力集中系数的变化非常小，考虑到管体的实际锻造情况，内过渡带长度不可能无限延长，同时为了进一步保证管体质量，因此设计 $M_{in} \geq 120$ mm。

从图 3 中可以看出：当 R 在 0~100 mm， M_{in} 为 100 mm、120 mm 和 160 mm 的应力集中系数曲线有突变，从这方面讲， R 必须大于 100 mm；当 $R \geq 300$ mm，趋于某一最小应力集中系数。

最终，通过上述分析确定了 $\Phi 73$ mm 摩擦焊接式全钛合金钻杆的管端尺寸，具体如图 4 所示。

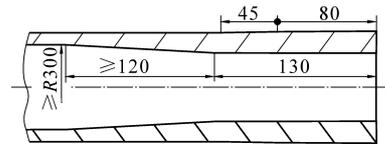


图 4 $\Phi 73$ mm 钻杆管端尺寸示意

1.2 钻具生产工艺研究

1.2.1 管体锻造工艺研究

根据管体结构研究结果，为了使钻具更好地满足深层侧钻的钻井环境，渤海能克决定采用非标准的内加厚方式进行加厚，并根据现场生产的实际需求设计了管体锻造后的尺寸及钻杆材料的化学成分，具体见表 1~2。

表 1 $\Phi 73$ mm 钛合金钻杆管体锻造成型工艺尺寸

加厚形式	加厚端		内过渡带圆 弧角 R	长度			
	外径	内径		外加厚	外锥面	内直段	内过渡带
内加厚	80±1	33±1	≥300	≥80	45±5	130±20	≥120

表 2 $\Phi 73$ mm 钛合金钻杆材料的化学成分(质量分数)

C	Al	Si	Cr	V	Fe	Cu	Mn	Zr	Mo	Nb	Sn	Ti
0.015	5.20~6.50	0.05~0.10	0.80~1.50	0.003~0.008	0.01~0.05	0.01~0.05	0.01~0.05	0.40~0.60	2.50~3.00	<0.01	0.001~0.006	余量

锻造设备采用日本神户制钢公司的机械式管端加厚机组 KTU-S630/3000。管端加热时，管端加热位置向未加热位置热传导形成温度差，该温度差使得管端在加厚的过程中出现流动性差异，这种差异使得管端在变形的过程中自然形成内过渡带，且该内过渡带不能通过人工打磨或车削的方式形成。但相比于钢制管体，钛的导热系数为 15.24 W/(m·K)，纯钢的导热系数为 50~60 W/(m·K)，钛合金金属热传导速度较慢，通过传统的加热方式无法形成平滑的热传导，因此在锻造后会出现内过渡带过陡的现象，内过渡带长度过短不能满足产品设计要求。

为了提高管体锻造生产效率，管端加热通常会采取三工位中频炉加热(最大功率分别为：Ⅰ，350 kW；Ⅱ，350 kW；Ⅲ，300 kW)的方式进行，因此为了形成理想的内过渡带，需要改变传统等长加热的加热方式，采取错位加热的方式，也就是将第三工位的中频线圈进行错位，这样在加热时可以产生与钢管加热类似的温度差，从而起到延长内过渡带长度的作用。

首先根据理论计算可知，管体的缩减量=最终

管端变形部位长度 L_1 的体积/锻造前管体横截面积- L_1 。

计算得到管体理论缩减量为 195 mm，但在实际轧管过程中，钢管厂为防止管体壁厚低于要求下限，通常管体的实际平均壁厚会略大于标准平均壁厚，这会导致在锻造的过程中，管体的缩减量会比理论值略小，内加厚直段长度以及内加厚过渡带长度是在管体锻造变形过程中自然成形，如果管体的缩减量过大，就会导致过多的金属向后堆积，形成过长的内直段，从而影响内过渡带的长度，因此根据实际锻造经验，需要将管体理论缩减量减少 10 mm 为经验补偿值，最终确定缩减量为 185 mm。

根据缩减量尺寸开始计算管端的实际预热尺寸，也就是管体的理论加热长度为：理论预热长度= L_1 +缩减量=230+185=415 mm。

考虑到内过渡带长度需要保证 80~160 mm，因此需要将理论错位长度取中间值 120 mm 后，再延长 20 mm 以弥补内过渡带在大规模生产时的偏差，三工位加热炉错位长度取 140 mm。管端加热长度加上错位长度 20 mm 后为 435 mm，之后根据

435 mm 的中值进行上下偏移以 10 mm 为区间进行试验设计以决定最终的管端预热范围(表 3)。

表 3 Φ73 mm 钛合金钻杆锻造试验结果 mm

管体加热长度	内过渡带长度	内直段长度	状态
415	95	135	内过渡带长度不足
425	105	135	成型良好
435	115	135	成型良好
445	115	145	内直段出现凹坑
455	110	160	内直段出现凹坑

根据试验可知,当加热长度小于 425 mm,管端出现加热长度不足,高温段长度过短,导致可流动的金属不足以填满设计的内直段长度,出现了内过渡带过短问题;当加热长度达到 425 mm,内直段和内过渡带满足设计范围,且饱满无凹坑;当预热长度超过 435 mm,加热长度过长,高温段长度过长,导致可流动的金属向内过渡带大量流动,从而影响了内过渡带的形成,而内直段由于金属过度流向内过渡带,剩余的金属不足以填满变长的内直段,从而出现了凹坑现象,因此最终确定了预热长度应为 425~435 mm。

最终通过工艺的进一步调整,得到了比较理想的管端锻造效果,管端外表面平整无凹坑,内表面通过手电照射无阴影,管端切片内过渡带平缓,长度大于 140 mm, R 值大于 300 mm 满足设计要求(图 5)。



图 5 Φ73 mm 钛合金钻杆管端锻造成型效果示意

表 4 Φ73 mm 钛合金钻杆螺纹加工刀具和工件的物理性能参数

类别	材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(t·mm ⁻³)	比热容/[MJ·(t·°C) ⁻¹]	传热系数/[W·(m·°C) ⁻¹]
刀具	硬质合金	640	0.220	14.5×10 ⁻⁹	0.220×10 ⁻⁹	75.4
工件	TC4	113	0.342	4.43×10 ⁻⁹	0.546×10 ⁻⁹	7.0

通过研究钛合金螺纹加工切削速度、进给量和切削深度对切削力、切削温度以及钛合金材料最大表面残余应力的影响,结合钛合金材料切削特性,优化切削参数,有效保证螺纹加工重复精度和表面质量,最终制定的车削参数^[18-21]见表 5。其中,由于 BHDx 螺纹为每寸 3 牙,螺距为 8.47 mm,这也

1.2.2 螺纹车削工艺研究

为了保证接头的钻井安全性,渤海能克决定选用抗疲劳性能更高的 BHDx26 超高抗扭螺纹技术,BHDx26 螺纹结构如图 6 所示,并定制超高抗扭螺纹专用车刀,BHDx 外螺纹车削刀片如图 7 所示。

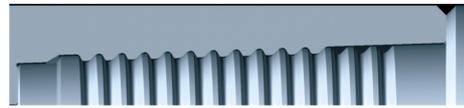


图 6 BHDx26 螺纹结构示意图

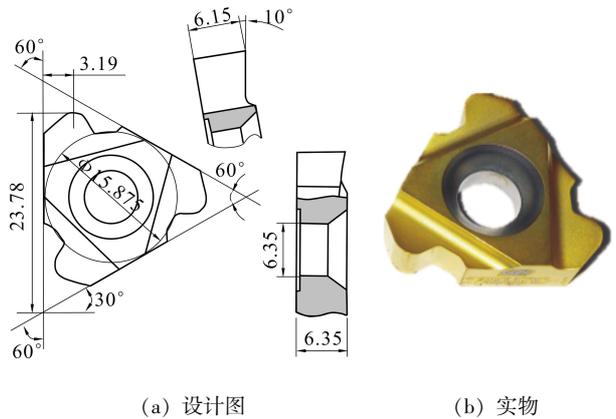


图 7 BHDx 外螺纹车削刀片示意

研究表明,弹性模量低、导热系数小等特点恰恰是造成钛合金难加工的本质原因。这是因为切削过程中,钛合金的低弹性模量引起刀具接触间的高摩擦,并产生高热量,这些热量不能及时传递给工件或被切屑带走,便集聚在切削区域,形成 1 000 °C 的切削温度,该温度最终加剧刀具刃口快速磨损、崩裂并生成积屑瘤,而高抗扭螺纹由于牙前角和螺距的增大,加工精度要求更高,进一步提高了螺纹的车削难度^[15-17]。刀具和工件的物理性能参数见表 4。

就决定了车削的进给量为 8.47 mm/r;为了有效降低车削过程中的升温速度,以及提高刀片的寿命,以 37CrMnMoA 钢材 450 r/min 切削速度为基础,经过多次试验降为 210 r/min;而车削刀数及每次车削深度则是根据每次刀片的切削面积进行调整。

针对钛合金螺纹车削时切屑较多、需要中途停

表 5 BHDx26 螺纹锻成型工艺尺寸

进给量/ (mm·r ⁻¹)	切削速度/ (r·min ⁻¹)	切削刀数		每刀切削深度/mm								
		粗车	精车	粗车			精车					
8.47	210	10	2	1.22, 0.92, 0.703, 0.56, 0.48, 0.44, 0.40, 0.36, 0.36, 0.33	0.18, 0.15							

车去除切屑，车削效率低、人员劳动强度大、安全性低等问题，在粗车工序刀杆前端设计了一个可拆卸小钩(图 8)，车削过程切屑缠绕在小钩上，车削结束后切屑自动带出，有效解决了切屑堆积的问题。对螺纹进行 16 次上卸扣试验，发现螺纹完好、无磨损、无黏结。



图 8 粗车工序刀杆前端可拆卸小钩

2 现场应用

2020 年 7 月 10 日，Φ73 mm 摩擦焊接式全钛合金钻杆在我国塔河油田 TH12462X 井顺利下井三开定向造斜侧钻，7 月 16 日起钻，施工进尺从 6 638 m 开始、到 6 753 m 为止，累计进尺 115 m (预测定向钻井底井斜角为 77°，定向段造斜率为 20.58°/30 m)，纯钻进时间 52 h，创摩擦焊接式全钛合金钻杆下井应用新纪录。

2021 年 10 月，Φ73 mm 摩擦焊接式全钛合金钻杆在我国塔河油田 T4326CH2 超短半径水平井成功应用，最高造斜曲率达到 55°/30 m，创下西北工区井眼曲率最大、侧钻进尺最少、侧钻时间最短 3 项纪录。

3 结 语

Φ73 mm 摩擦焊接式全钛合金钻杆相对一些常规钻井工具，同规格钻杆质量减轻 43%，摩阻力也仅为普通钻杆的 50% 左右，有效地减少了地面顶驱(转盘)负荷，在塔河油田 T4326CH2 超短半径水平井已成功应用，最高造斜曲率达到 55°/30 m，创下西北工区井眼曲率最大、侧钻进尺最少、侧钻时间最短 3 项纪录，具有良好的社会效益。

参考文献

[1] 董恩涛, 余伟, 史佳新, 等. 钛合金无缝管在油气井中的应用现状及工艺研发[J]. 钢管, 2021, 50(1): 13-

17.

DONG Entao, YU Wei, SHI Jiixin, et al. Present situation concerning application of Ti alloy seamless pipe to oil/gas wells and relevant process R & D [J]. Steel Pipe, 2021, 50(1): 13-17.

[2] 张忠铎. 我国油井管产业的发展及思考[J]. 钢管, 2022, 51(5): 1-7; 2022, 51(6): 6-14.

ZHANG Zhonghua. Development of domestic OCTG industry and relevant consideration[J]. Steel Pipe, 2022, 51(5): 1-7; 2022, 51(6): 6-14.

[3] 杨彪, 王平, 龚云柏, 等. 油气行业用钛合金油井管生产与研究应用进展[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(9): 12-21.

YANG Biao, WANG Ping, GONG Yunbai, et al. Progress in manufacturing and application research of titanium alloy oil country tubular goods for petroleum and natural gas industry[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42(9): 12-21.

[4] 刘强, 谢俊峰, 赵密锋, 等. 超深井钻采工况下钛合金钻杆模拟工况摩擦磨损行为对比研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(1): 195-205.

LIU Qiang, XIE Junfeng, ZHAO Mifeng, et al. Comparative study on tribology behavior of titanium alloy drill pipe under simulated working conditions in ultra-deep well drilling conditions[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52(1): 195-205.

[5] 周国帅, 周家祥, 周晓锋, 等. 低温 PSL-3 S135 钻杆用无缝钢管的开发[J]. 钢管, 2016, 45(6): 20-24.

ZHOU Guoshuai, ZHOU Jiexiang, ZHOU Xiaofeng, et al. Development of PSL-3 S135 seamless steel drill pipe for low temperature service[J]. Steel Pipe, 2016, 45(6): 20-24.

[6] 刘玉荣, 米永峰, 马越, 等. S135 钻杆管体热处理工艺研究[J]. 钢管, 2017, 46(1): 15-18.

LIU Yurong, MI Yongfeng, MA Yue, et al. Study on heat treatment process for S135 drill pipe body[J]. Steel Pipe, 2017, 46(1): 15-18.

[7] Specification for drill-pipe: API Spec 5DP—2020[S]. 2020.

[8] 张德强. 高速车削钛合金 Ti6Al4V 力热特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2012.

ZHANG Deqiang. Research on cutting force and thermal characteristics in high-speed turning Ti6Al4V[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2012.

- [9] 鲁柱. 不锈钢冷切削加工技术的应用研究[J]. 现代制造技术与装备, 2019(12): 122-123.
LU Zhu. Research on cold cutting technology application of stainless steel[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2019(12): 122-123.
- [10] 吴崇周. 钛合金在飞行器中的作用[J]. 宇航材料工艺, 2016, 46(5): 8-12.
WU Chongzhou. Effects of titanium alloy on flying equipments[J]. Aerospace Materials & Technology, 2016, 46(5): 8-12.
- [11] 李登万, 陈洪涛, 冯锦春, 等. 基于均匀设计法的精密车削参数优化[J]. 机械工程学报, 2015, 51(3): 206-212.
LI Dengwan, CHEN Hongtao, FENG Jinchun, et al. Precision cutting parameters optimization based on uniform design method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(3): 206-212.
- [12] 张慧萍, 张庆宇, 张校雷, 等. 高速铣削超高强度钢的切削力及表面粗糙度研究[J]. 工具技术, 2017, 51(8): 12-15.
ZHANG Huiping, ZHANG Qingyu, ZHANG Xiaolei, et al. Study on cutting force and surface roughness in high speed milling of 300M ultra-high-strength steel[J]. Tool Engineering, 2017, 52(8): 12-15.
- [13] 李友生, 邓建新, 张辉, 等. 高速车削钛合金的硬质合金刀具磨损机理研究[J]. 摩擦学学报, 2008, 28(5): 443-447.
LI Yousheng, DENG Jianxin, ZHANG Hui, et al. Wear mechanism of cemented carbide tool in high speed machining titanium alloy(Ti-6Al-4V)[J]. Tribology, 2008, 28(5): 443-447.
- [14] 郭瑞萍, 孙葆森, 高彬彬. 兵器装备用钛合金的低成本制造技术[J]. 兵器材料科学与工程, 2008(5): 83-86.
GUO Ruiping, SUN Baosen, GAO Binbin. Low cost manufacturing technology of titanium alloy used in ordnance equipment[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2008(5): 83-86.
- [15] 张钊, 任丽宏, 史云龙, 等. 钛合金精密车削切屑成形模拟与试验分析[J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(5): 94-98.
ZHANG Zhao, REN Lihong, SHI Yunlong, et al. Simulation and experimental analysis of chip forming in titanium alloy precision turning[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2019, 42(5): 94-98.
- [16] 朱雨恩, 万珍平, 魏兴钊. 钛合金切削时锯齿形切屑形成的材料组织变化研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(5): 838-843.
ZHU Yuen, WAN Zhenping, WEI Xingzhao. Material structure changes of saw-toothed chips in the formation process of cutting titanium alloy TC4[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(5): 838-843.
- [17] 高敬, 姚丽. 国内外钛合金研究发展动态[J]. 世界有色金属, 2001(2): 4-7.
GAO Jin, YAO Li. Research and development trends of titanium alloys at home and abroad[J]. World Nonferrous Metals, 2001(2): 4-7.
- [18] 刘慧磊. 钛合金 Ti-6Al-4V 切削仿真温度分析[J]. 科技创新导报, 2020, 17(5): 96-98.
LIU Huilei. Simulation temperature analysis of titanium alloy Ti-6Al-4V cutting[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2020, 17(5): 96-98.
- [19] 何志祥, 胡亚辉, 尹成君. 基于 Deform-3D 的钛合金车削温度的有限元研究[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(4): 124-127.
HE Zhixiang, HU Yahui, YIN Chengjun. Finite element analysis on cutting temperature of titanium alloy turning based on Deform-3D[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(4): 124-127.
- [20] 何光春. 切削速度对钛合金(TC4)干车削行为的试验研究[J]. 机床与液压, 2017, 45(4): 63-65, 105.
HE Guangchun. Experimental study of cutting speed on the behavior of dry turning for titanium alloy(TC4)[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2017, 45(4): 63-65, 105.
- [21] 傅勇, 宗明辉, 刘应芾. TA15、TB6 钛合金切削加工用量和刀具的选择[J]. 航空制造技术, 2006(7): 59-61.
FU Yong, ZONG Minghui, LIU Yingxiang. TA15, TB6 titanium alloy cutting processing amount and tool selection[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006(7): 59-61.

(收稿日期: 2023-10-25; 修定日期: 2024-01-18)