

高强度大直径内螺纹超声滚压强化技术

李瑞锋, 张德远, 程明龙

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 为改善高强度内螺纹的表面质量, 提升螺纹的疲劳寿命和可靠性能, 将超声滚压强化技术应用于高强度大直径内螺纹。采用光学显微镜、显微硬度仪、应力测试仪和疲劳试验机等仪器对滚压前后的螺纹试件表面的显微形貌、粗糙度、硬度、残余应力和疲劳寿命等进行分析。结果表明: 超声滚压后螺纹表面残留的加工痕迹可基本消除, 牙底表面粗糙度较未滚压降低约 50%, 较普通滚压降低约 30%; 超声滚压后表面硬度较未滚压提升 17%, 而较普通滚压提升约 14%; 超声滚压后表面残余压应力较未滚压提升 60%, 而较普通滚压提升约 50%。超声滚压后工件疲劳寿命可达到未强化工件疲劳寿命的 5 倍以上。综上所述, 超声滚压强化对于高强度大直径内螺纹表面质量具有良好的提升效果。

关键词: 超声; 滚压; 内螺纹; 表面质量; 疲劳

中图分类号: TG663

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2014)02-0063-06

High-strength Steel Large-diameter Internal Thread Strengthening by Ultrasonic Burnishing Technology

LI Rui-feng, ZHANG De-yuan, CHENG Ming-long

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191)

Abstract: In order to improve the surface quality of high-strength steel internal thread, enhance the fatigue life and reliability of the thread, the ultrasonic burnishing technology is used to strengthen high-strength steel large-diameter internal thread. The microscopic surface topography, roughness, hardness, residual stress and fatigue life of the thread are detected and compared before and after ultrasonic burnishing by using optical microscope, surface topography measurement instrument, micro hardness tester, stress tester and fatigue machine. The results show that the residual defects on the thread surface can basically be eliminated after ultrasonic burnishing. The surface roughness using ultrasonic burnishing is reduced by 50%, traditional burnishing reduces by 30%. Ultrasonic burnishing enhanced surface hardness by 17%, traditional burnishing improved by 14%. Ultrasonic burnishing enhanced residual stress by 60%, traditional burnishing improved by 50%. The fatigue life of the large diameter internal thread after ultrasonic burnishing improves about 5 times than that of before. In summary, the ultrasonic burnishing technology has a good effect to improve surface quality of high-strength steel large-diameter internal thread.

Key words: ultrasonic; burnishing; internal threads; surface quality; fatigue life

0 引 言

螺纹连接是一种重要的连接方式, 在机械工业中具有非常广泛的应用, 而关键承力部位上的

螺纹一般都承受很大的载荷, 螺纹在高频复杂载荷下容易在螺纹牙根部位产生裂纹扩展而导致疲劳失效, 因此提高螺纹部件的疲劳寿命显得十

收稿日期: 2014-01-23; 修回日期: 2014-03-07

作者简介: 李瑞锋(1990—), 男(汉), 陕西榆林人, 硕士生; 研究方向: 超声加工与高强度表面强化技术

网络出版日期: 2014-03-10 14:47; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20140310.1447.003.html>

引文格式: 李瑞锋, 张德远, 程明龙. 高强度大直径内螺纹超声滚压强化技术 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(2): 63-68.

分重要。目前,工程中使用滚、挤压工艺对内、外螺纹表面进行强化。关于内螺纹强化的机理和工艺,国内外诸多学者进行了研究^[1-5],近年来南京航空航天大学的缪宏等人对于内螺纹冷挤压成形强化技术进行了相关机理和试验方面的研究,取得了一定的研究成果^[6-10]。

内螺纹冷挤压成形强化技术采用挤压丝锥实现内螺纹的成形和强化,提高了材料的屈服强度,在表面强化层中形成较高的宏观残余应力,能够显著地改善材料的疲劳性能^[11]。但是挤压工件会产生较大的变形抗力,因此对挤压丝锥的制作要求较高,且挤压丝锥的使用寿命较低,挤压丝锥较容易磨损甚至是折断等^[12]。冷挤压成型工艺一般针对内径在 20 mm 以下的内螺纹,对于直径较大的内螺纹,冷挤压成型方法由于丝锥制作成本高、变形抗力太大等原因不容易实现,工程上一般采用表面滚压强化方法,即用与螺纹牙型相符合的滚轮对螺纹沟槽表面进行滚压加工。

传统的滚压工艺总体上对于普通材料螺纹的强度有一定提升。然而对于高强钢材料的内螺纹,为了使高强钢表面发生塑性变形,需加载较大的滚压力,滚压过程中刀具和工件贴合很紧,冷却液无法流入工作区,导致冷却、润滑效果较差,滚压刀具和工件容易出现磨损等问题,导致最终对于螺纹的表面质量改善效果较差。为了改善传统滚压工艺对于螺纹的强化效果,文中

将超声滚压技术应用于内螺纹强化。刀具的超声振动能够使刀具相对工件移动的摩擦阻力减小,促进材料表面的塑性变形,细化金属表面组织,从而减小工件表面粗糙度,提高工件表面显微硬度和残余压应力,最终提高工件的接触面积承载能力,以及耐磨性、耐腐蚀性、耐疲劳强度和配合稳定性等性能^[13]。超声加工技术与表面强化技术结合所具有的特点和优点已受到越来越多的关注,国内学者也从揭示机理和工艺试验等各方面研究了超声表面强化技术对于表面质量的改善效果^[14-19]。

文中研究了将超声滚压技术应用于高强钢大直径内螺纹的强化效果。超声滚压时滚压刀具在工件表面上做超声振动,减小了滚压刀具和工件的相互磨损,改善了滚压过程中的冷却、润滑条件,促进了工件表面的塑性变形,从而大幅度提升被加工零件的表面质量和疲劳寿命。

1 材料与方法

1.1 材 料

试验材料为工业中常见的高强钢 30CrMnSiNi2A,热处理工艺为淬火加回火,常温下其拉伸性能为: $\sigma_s=1\,141\text{ MPa}$, $\delta_5=14.6\%$, $\sigma_b=1\,653\text{ MPa}$, $\psi=47.4\%$ 。其名义化学成分如表 1 所示。

表 1 30CrMnSiNi2A 的化学成分(质量分数/%)
Table 1 Chemical composition of 30CrMnSiNi2A ($\omega/\%$)

Element	Mn	Si	C	Cr	Mo	S	V	Ni	Fe
Content	1.08	1.08	0.32	1.11	0.16	0.002	0.09	1.63	Bal.

内螺纹试件规格为 MJ54 mm×1.5 mm,尺寸为:外径 63 mm,长度 100 mm,螺纹长度为 25 mm,螺纹段壁厚 2 mm,如图 1 所示。

1.2 试验方法

图 2 为大直径内螺纹超声滚压技术原理图。换能器在超声电源的作用下产生双弯椭圆振动,椭圆轨迹位于 XZ 平面内。滚压轮安装在换能器变幅杆上,在换能器的驱动下作超声振动。超声振动的滚压轮可作用于螺纹件表面进行滚压加工。此外超声滚压系统还包括换能器的夹持固定系统,测力传感等功能系统,超声波电源发生系

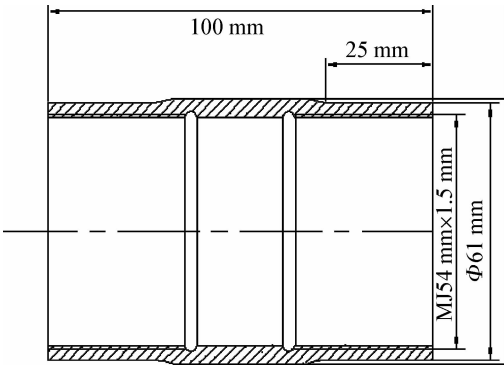


图 1 内螺纹工件的尺寸

Fig. 1 Size of the internal thread workpiece

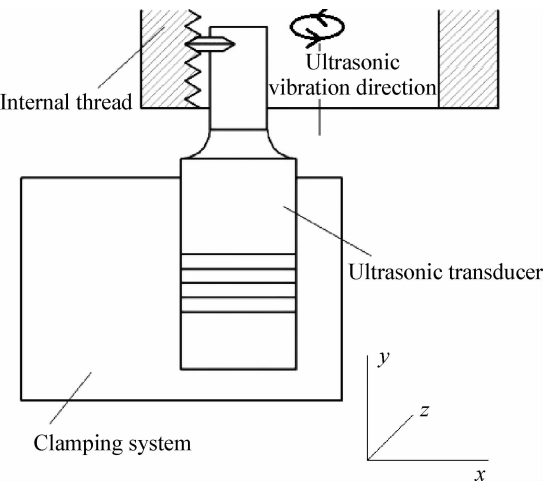


图 2 内螺纹超声滚压强化示意图

Fig.2 Sketch map of the internal threads strengthening by ultrasonic burnishing

统以及与机床的连接系统等。

在国产 CA6140 机床上进行 MJ54 mm×1.5 mm 高强度内螺纹超声滚压试验。滚压轮材料为硬质合金,轮圆弧与螺纹牙底形状相同。机床转速为 14 r/min,换能器超声振动频率 22 kHz,滚压系统通过内部的弹簧提供静挤压力,试验加载静挤压力为 1 800 N,加载后超声振动频率会发生小幅度的漂移,滚压轮仍可在工件表面作超声振动。激光测微仪测得换能器双边超声振幅 8 μm。内螺纹滚压试验示意图如图 3 所示,系统通过底座的通孔连接在机床刀架板上,试验时通过丝杠传动按照固定螺距在轴向自动进给。

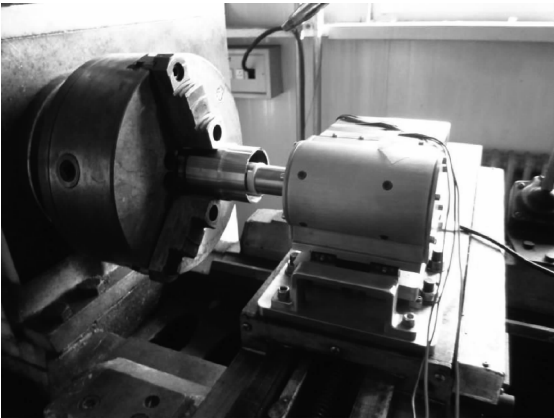


图 3 内螺纹超声滚压试验示意图

Fig.3 Experimental schematic on the internal threads strengthening by ultrasonic burnishing

用线切割沿试件轴向将内螺纹分割,采用光学显微镜对螺纹牙底的表面显微形貌进行观察。

采用磨削方法将滚压后螺纹牙型部分磨掉,用电化学抛光的方法对磨削后牙底表层进行腐蚀,去掉附加应力层,测试牙底残余应力。使用仪器为日本理学 MSF-2M X 射线应力分析仪,Cr 靶,管流 9.0 mA,管压 30 kV。选择 ϕ 为 10°、20°和 30°,测算残余应力值。

用线切割沿试件直径方向将螺纹试件分割,将断口抛光,使用 HVT-1000 显微硬度计按图 4 所示沿两个方向每隔 50 μm 测量一点,测量螺纹牙底硬度,并获得滚压前后螺纹牙底硬度分布。

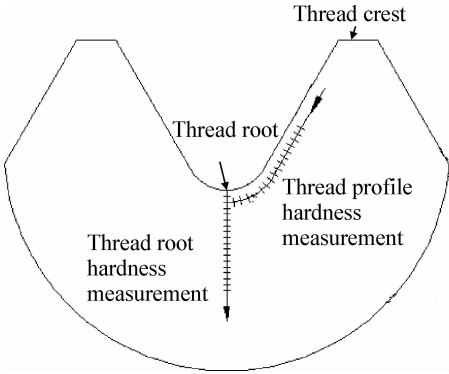


图 4 硬度分布测量

Fig.4 Measurement of hardness distribution

采用 INSTRON8803-250kN 疲劳试验机进行疲劳试验。采用最大应力 450 MPa,应力比为 0.06,加载频率为 5 Hz。选取超声滚压前后的螺纹试件各 3 个进行疲劳寿命对比。

2 结果分析与讨论

2.1 超声滚压对表面形貌的影响

图 5 为螺纹牙底的显微形貌。图 5(a)为未经滚压强化的螺纹表面,车削痕迹较重,缺陷较多。图 5(b)为普通滚压后螺纹牙底表面形貌,虽然车削留下的竖直方向的连续刀痕相对于车削表面在一定程度上减弱,但是车削留下的刀痕并没有完全被挤压平整,表面还存在一定的缺陷。图 5(c)为超声滚压后的牙底表面形貌,螺纹表面的车削刀痕基本消除。

采用 3D-白光干涉表面形貌仪对滚压前后螺纹牙底形貌进行测量,得到螺纹牙底整体形貌,图 6 为螺纹牙底形貌,图 6(a)是螺纹牙底未经滚压强化前的形貌,牙底具有明显的车削加工痕迹;图 6(b)为普通滚压后的螺纹牙底形貌,主要的残留加工痕迹被消除,但并不完全,表面还存在

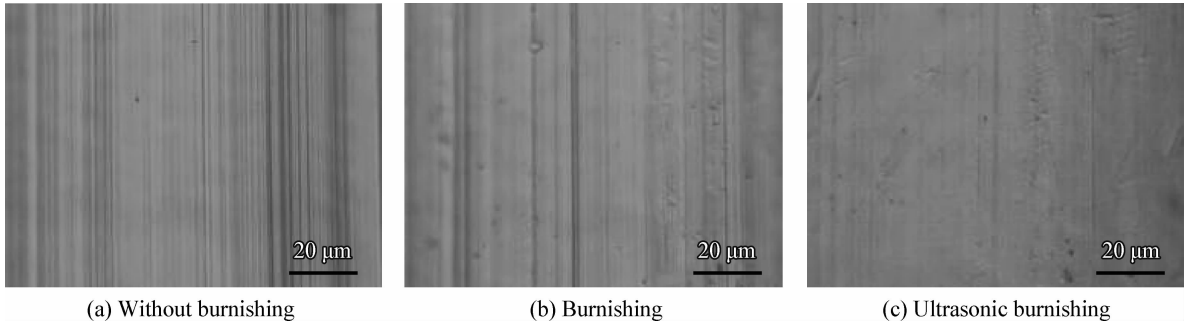


图 5 螺纹表面的显微形貌
Fig. 5 Surface morphologies of the thread

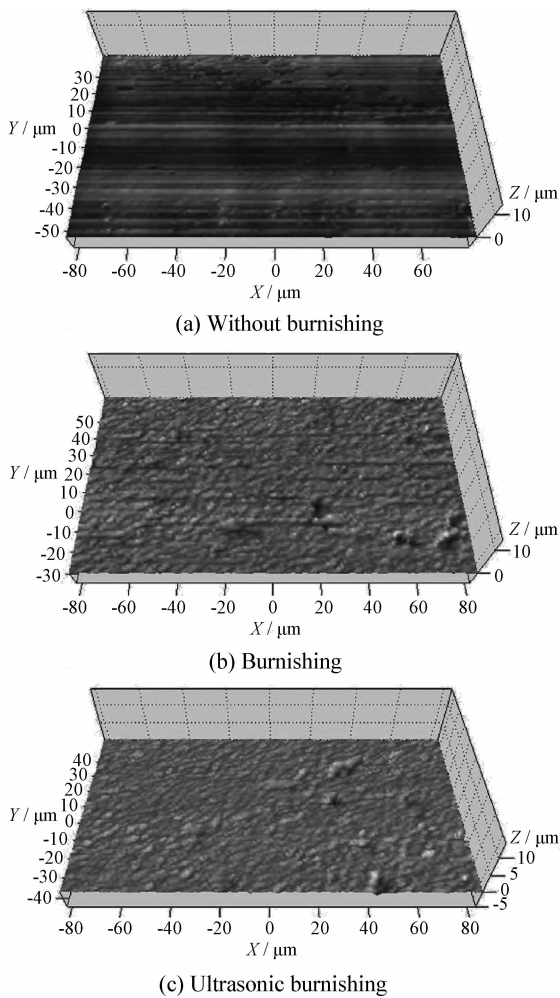


图 6 螺纹牙底的形貌
Fig. 6 Morphologies of the thread root

一定的缺陷。图 6(c)为超声滚压后的牙底表面，此时加工痕迹基本消除，表面效果较好。

在形貌上选取合适的区域测量其表面粗糙度，结果见表 2。由表 2 可知：普通滚压可降低表面粗糙度约 30%，超声滚压可降低表面粗糙度约 51%。超声滚压获得表面粗糙度在普通滚压的

表 2 不同处理条件下螺纹的粗糙度对比 (Sa/nm)
Table 2 Roughness comparison of the thread under different treatment (Sa/nm)

Without burnishing	Burnishing	Ultrasonic burnishing
313	215	152

基础上又降低 50%，即超声滚压对于螺纹牙底表面粗糙度具有较大的改善效果。

普通滚压时，由于静挤压力的作用，使得螺纹牙底表面产生一定的塑性变形，部分加工缺陷被消除，表面有所改善。而在超声滚压时，超声振动刀具所具有的超频冲击特性能够促进工件表面的塑性变形，对于表面微观层面沟壑的光整效果更好，能够较完全消除螺纹加工所产生的表面缺陷，得到更好的表面形貌和表面质量。另外，普通滚压时刀具与工件之间存在较大的相互作用力和摩擦力，会影响强化后的工件表面质量。超声滚压时刀具与工件不是一直保持接触状态，而是在工件表面高频跳动，二者发生间歇性分离，在运动方向上的摩擦阻力减小，冷却润滑液也可充分的进入强化区域，减少刀具对于工件表面的磨损。所以，相比普通滚压，超声滚压对于表面形貌的改善是增进表面塑性变形和减小刀具与工件相互磨损共同作用的结果。

2.2 超声滚压对表面残余应力的影响

对同一批次的两个螺纹试样分别进行普通滚压和超声滚压，测得残余应力结果如表 3 所示。由表可知，普通滚压强化后螺纹表面的残余应力为 -496 MPa，比未强化工件表面有较大提高。在引入超声振动后，工件表面的形变进一步加剧，其内部的残余应力也相应变大，达到 -529 MPa，在普通滚压基础上提升了 20%，较

表 3 不同处理条件下螺纹的残余应力(MPa)

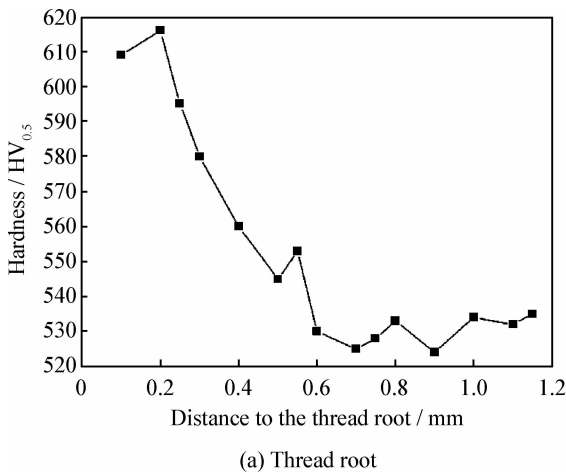
Table 3 Residual stress of the thread under different treatment(MPa)

Without burnishing	Burnishing	Ultrasonic burnishing
—332	—496	—529

未滚压之前提升 60%。相比于普通滚压,超声滚压具有进一步提升工件表面残余压应力的作用。这是由于超声滚压时刀具对于工件表面进行高频冲击,使得表面塑性变形更加彻底,并且刀具的反复冲击既增进塑性变形又抑制了工件变形后的回弹,深化了残余应力层,提高了表面残余压应力。从能量的角度来说,高频振动的滚压轮对于工件表面做功,超声波能量从滚压轮传递到工件表面,以残余应力层的形式储存下来。

2.3 超声滚压对硬度的影响

图 7(a)为牙底的硬度分布,距离螺纹牙底表



面越近的点,其硬度值越高,距离表面越远的点则硬度越接近基体的硬度。可以看出硬化层主要分布在牙底表面,表面塑性变形充分,强化效果好,其硬度值也相应越高。图 7(b)为牙侧硬度分布,从牙顶的牙到牙底,牙侧显微硬度值整体是一个上升的趋势,反映出接近螺纹牙底的表面塑性变形相对较大,硬度值也相应较大。

对普通滚压和超声滚压后螺纹牙底断面近表面部分进行硬度检测,载荷 0.5 kg,结果见表 4。未强化工件材料的显微硬度为 525 HV_{0.5},普通滚压强化后的螺纹牙底表面显微硬度值可以达到 600 HV_{0.5},相对于未强化材料提高 14.3%;超声振动强化后的螺纹牙底表面硬度为 613 HV_{0.5},相对于未强化材料提高 16.7%。在表面硬度的提升上超声滚压也好于普通滚压。超声振动滚压在增进表面塑性变形的同时,塑性变形加剧会使得表面组织更加致密,刀具的振动冲击能够细化表层的组织结构,从而获得更高的表面硬度。

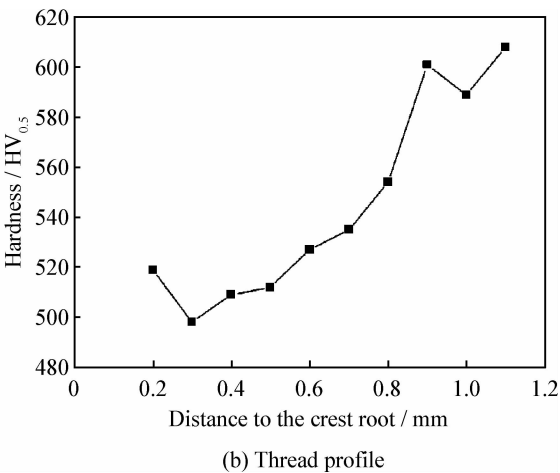


图 7 牙底和牙侧硬度分布

Fig. 7 Hardness distributions of thread root and profile

表 4 不同处理条件下螺纹的表面硬度(HV_{0.5})

Table 4 Hardness of the thread under different treatment(HV_{0.5})

Without burnishing	Burnishing	Ultrasonic burnishing
525	600	613

2.4 超声滚压对疲劳寿命的影响

表 5 为同一批次的 6 个高强度内螺纹试样分未强化和超声滚压强化两组进行疲劳对比试验得到的疲劳循环次数数据。

运用公式(1)对数据进行计算,其中 N 为工件的疲劳寿命, n 为使用相同工艺处理的螺纹疲劳试件的数目, $\bar{x}$ 为疲劳寿命对数平均值。

$$x = \frac{1}{n} \sum \lg N \tag{1}$$

得到 x_1 (未强化) = 4.59, x_2 (超声滚压强化) = 5.31,强化倍数为 $10^{x_2-x_1} = 5.24$ 。即强化后内螺纹疲劳寿命提升 5 倍以上,很大程度上提升了内螺纹使用的可靠性。因为超声滚压强化对螺纹试件的表面形貌、残余应力等都有显著提

升,改善了内螺纹表面质量,因此螺纹的疲劳寿命和可靠性也有很大提升。

表 5 内螺纹工件超声滚压前后的疲劳寿命
Table 5 Fatigue life of the internal thread before and after ultrasonic burnishing

Groups	No.	Fatigue life N /10 ⁴
Without burinshing	1	3.1
	2	2.7
	3	7.0
Ultrasound burnishing	4	12.9
	5	40.0
	6	16.0

3 结 论

- (1) 高强钢内螺纹超声滚压后能够获得优于普通滚压的表面质量,其表面粗糙度较普通滚压降低 50%,强化效果较普通滚压提升了 60%,对于表面形貌和表面粗糙度都有明显的改善。
- (2) 超声滚压获得了优于普通滚压的表面组织、表面硬度和表面残余应力。超声滚压后形成的表面硬度较未滚压提升了 17%。超声滚压后形成的残余压应力较未滚压之前提升了 60%,强化效果较普通滚压提升了 20%。
- (3) 超声滚压对于内螺纹疲劳寿命的提升效果非常明显,超声滚压后 30CrMnSiNi2A 高强钢内螺纹的疲劳寿命较未滚压之前提升了 5 倍以上,大大提高了螺纹的使用寿命和可靠性。

参考文献

[1] Domblesky J P, Feng F. A parametric study of process parameters in external thread rolling [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 121(2): 341-349.

[2] 杨名大, 徐九华. 钛合金内螺纹表面的冷挤压强化技术 [J]. 机械科学与技术, 1997, 26(2): 39-41.

[3] 马平, 王珉. 高强度钢大直径内螺纹的冷挤压加工 [J]. 机

械制造, 1998, 36(9): 20-21.

[4] 黄小龙, 黎向锋, 左敦稳, 等. 内螺纹冷挤压成形过程数值模拟 [J]. 塑性工程学报, 2012, 19(2): 11-16.

[5] 徐九华, 王珉. 内螺纹冷挤压强化对高强度钢疲劳性能的影响 [J]. 材料导报, 1999, 13(6): 55-57.

[6] 缪宏, 左敦稳, 王珉, 等. Q460 高强度钢冷挤压内螺纹表层的组织结构及耐腐蚀性能 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2011, 43(4): 209-214.

[7] 缪宏, 左敦稳, 张瑞宏, 等. Q460 高强度钢内螺纹冷挤压试验研究 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(13): 160-166.

[8] 缪宏, 左敦稳, 汪洪峰, 等. 冲击载荷对飞机起落架螺纹连接的影响 [J]. 振动与冲击, 2010, 29(2): 208-210.

[9] 缪宏, 左敦稳, 张敏, 等. 飞机起落架高强度钢内螺纹冷挤压成形金属流动规律研究 [J]. 中国机械工程, 2010 (14): 1714-8.

[10] 缪宏, 左敦稳, 张瑞宏, 等. 基于高强度钢的冷挤压内螺纹抗疲劳机理研究 [J]. 功能材料, 2011, 42(9): 1547-9.

[11] 徐九华, 王珉. 高强度钢内螺纹冷挤压强化研究 [J]. 材料工程, 2000(4): 41-44.

[12] 梁瑜轩, 黎向锋, 左敦稳, 等. 内螺纹低频振动冷挤压试验研究 [J]. 航空学报, 2013, 34(2): 442-450.

[13] 郑建新, 罗傲梅, 刘传绍. 超声表面强化技术的研究进展 [J]. 制造技术与机床, 2012(10): 32-36.

[14] 王婷, 王东坡, 刘刚, 等. 40Cr 超声表面滚压加工纳米化 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 177-182.

[15] 陆英, 王宇平. 超声波振动挤压加工表面粗糙度试验研究 [J]. 现代制造工程, 2003(8): 46-49.

[16] 吕维迪. 椭圆超声振动球挤压技术对比研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2010.

[17] 刘宇. 金属表面超声滚压加工理论及表层力学性能研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.

[18] 王哲, 李新和, 刘舜尧, 等. 超声振动对材料流变行为的影响机制 [J]. 塑性工程学报, 2012, 19(2): 38-42.

[19] Liu Y, Wang L J, Wang D P. Study on ultrasonic surface rolling process using FEM analysis [J]. Advanced Materials Research, 2011, 189-193: 2112-5.

作者地址: 北京市海淀区学院路 37 号 100191
北京航空航天大学机械工程及自动化学院
Tel: (010) 8233 9604
E-mail: lirufeng41@126.com

(责任编辑: 黄艳斐)