

## 工件底孔直径对 Q460 高强度钢冷挤压内螺纹的影响

缪宏<sup>1,2</sup> 左敦稳<sup>2</sup> 张瑞宏<sup>1</sup> 王珉<sup>2</sup> 汪洪峰<sup>2</sup>

(1. 扬州大学机械工程学院, 扬州, 225000; 2. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016)

**摘要:** 试验研究了工件底孔直径对 Q460 高强度钢冷挤压内螺纹的影响, 包括分析工件不同底孔直径下内螺纹牙形、表面残余应力、硬度及端面表面形貌的变化。结果表明, 冷挤压加工后内螺纹端面堆积体呈两边高、中间低的凹陷形, 随着工件底孔直径的减小, 端面堆积的高度不断增加, 堆积程度也就变得愈加严重, 螺纹牙顶、牙侧与牙根处表层硬度与表面残余压应力均升高。工件底孔直径的选择, 在正确保证螺纹质量和丝锥寿命的前提下应尽可能取最大值, 但是, 一般情况下没有必要过分要求最高的牙高率, 否则将给内螺纹挤压成形带来许多困难。Q460 高强度钢冷挤压内螺纹的工件底孔直径最佳取值范围为  $\varnothing 21.20 \sim \varnothing 21.30$  mm, 牙高率超过 80%, 完全符合螺纹质量要求。

**关键词:** 内螺纹; 底孔直径; 残余应力; 硬度

中图分类号: TG376.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-2615(2012)02-0228-05

## Effect of Hole Diameter of Work on Q460 High-Strength-Steel Internal Thread Formed by Cold Extrusion

Miao Hong<sup>1,2</sup>, Zuo Dunwen<sup>2</sup>, Zhang Ruihong<sup>1</sup>, Wang Min<sup>2</sup>, Wang Hongfeng<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, 225000, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** The effect of hole-diameter of the work on Q460 high-strength-steel internal thread formed by cold extrusion is studied. And the changes of thread form, surface residual stress, hardness and surface topography of head face caused by different hole-diameter are investigated. The results show that the accumulation body of the head face of the internal thread formed by cold extrusion is higher on both sides, in the middle of the depressed shape form low. With the decreased hole-diameter of the work, the stack height of the head face is increasing, and the accumulated level is also becoming serious. The hardness and the residual pressure stress at crest, flank and root of the thread are increased. For ensuring the quality of the thread and the tap life, the hole-diameter of the work should select maximum value as far as possible. But it is unnecessary to pursue the highest thread high rate, otherwise extrusion forming of internal thread is attended with much difficulty. The best range of hole-diameter of Q460 high-strength-steel work is between  $\varnothing 21.20$  mm and  $\varnothing 21.30$  mm, the thread high rate exceeds 80%, and it completely meets the requirement of the quality of the thread.

**Key words:** internal thread; hole-diameter; residual stress; hardness

高强度钢是飞机、高速列车等的重要承力部件, 在安全的行驶过程中担负着极其重要的使命。

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)(SQ2008AA10XK1468859)资助项目。

收稿日期: 2011-04-22; 修订日期: 2012-01-11

通讯作者: 左敦稳, 男, 教授, 博士生导师, 1962年生, E-mail: mhnuua@gmail.com。

随着高强度钢在近、现代飞机、高速列车、现代农业机械等设计中的作用日益突出,设计人员面临着新的挑战,需要设计出最为安全的机构。它们的许多零件采用螺栓连接,安装螺栓在行驶过程中会承受强大的交变剪切载荷,因此螺纹连接的可靠性对机构的使用寿命起着至关重要的作用。

采用内螺纹冷挤压成形工艺净成形是当今飞机、高速列车等抗疲劳加工的一个发展趋势。其优势在于能够在内螺纹表面和次表面中保存冷作硬化状态,这不仅可以提高材料的强度和硬度,而且可以提高内螺纹的疲劳寿命。传统的内螺纹冷挤压加工仅适合于强度低、塑性好的有色金属以及低碳钢的加工。而飞机、高速列车等采用高强度钢系列进行加工,它不仅具有较高强度,而且具有良好的横向塑性和断裂韧性,塑性成形抗力大,传统的冷挤压技术无法适应这类材料的加工。据冷挤压成形机理,在\*\*高强度钢内螺纹冷挤压加工过程中,塑性变形量的大小主要由工件的底孔尺寸确定,底孔尺寸的选择不仅直接影响到内螺纹挤压表面的质量,而且关系到挤压过程是否能顺利进行,合理选择底孔尺寸能避免工件的报废和延长丝锥使用寿命。国内对300M高强度钢的内螺纹冷挤压开展了试验研究<sup>[1-4]</sup>,但对于冷挤压内螺纹的底孔直径缺乏深入研究,制约了冷挤压内螺纹的产业化发展。

本文以Q460高强度钢为例,采用冷挤压法加工内螺纹,通过分析内螺纹挤压过程、牙形状况、残余应力与硬度的变化来阐述工件底孔直径在\*\*高强度钢内螺纹冷挤压加工中的作用,为进一步研究应用提供指导依据。

## 1 工件底孔直径

由塑性成形理论可知,在冷塑性加工高强度钢材料的情况下,金属的密度和体积是不变的,所以挤压螺纹的底孔尺寸为<sup>[1]</sup>

$$d_0 = d - 0.0677\eta P(14 - 5\eta) + 0.0045 \quad (1)$$

式中: $d$ 为内螺纹大径; $d_0$ 为工件底孔直径; $P$ 为螺距; $\eta$ 为螺纹牙高率, $\eta$ 为

$$(h_a/h_t) \times 100\% \quad (2)$$

式中: $h_t$ 为标准牙高; $h_a$ 为实际牙高。

## 2 实验材料与方法

实验材料采用首钢新钢有限责任公司特钢部生产的Q460高强度钢,直径为 $\varnothing 35$  mm,其化学成

分见表1。取3个拉伸试样按GB/T228—2002<sup>[5]</sup>进行室温拉伸实验,得到室温力学性能为:抗拉强度( $\sigma_b$ )为570 MPa,屈服强度( $\sigma_{0.12}$ )为410 MPa,伸长率( $\delta_5$ )为27%,断面收缩率( $\psi$ )为45%。

表1 Q460高强度钢的化学成分 %

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
质量分数	0.14	0.35	1.45	0.008	0.004	0.46	0.27

实验在国产6250机床上进行M22 $\times$ 1.5 mm内螺纹的冷挤压加工,如图1所示。挤压丝锥为Q460钢专用冷挤压丝锥,结构为圆锥式棱齿结构,丝锥材料为HSS高速钢,表面进行氮化铝钛处理。内螺纹挤压成形采取一次挤压成形工艺,具体的挤压工艺参数为:机床转速25 r/min,加工螺纹长度为20 mm,采用PDMS聚二甲基硅氧烷润滑油对挤压丝锥进行润滑,试样底孔直径 $d_0$ 分别为 $\varnothing 21.15$ , $\varnothing 21.20$ , $\varnothing 21.25$ , $\varnothing 21.30$ , $\varnothing 21.35$ 与 $\varnothing 21.40$  mm。

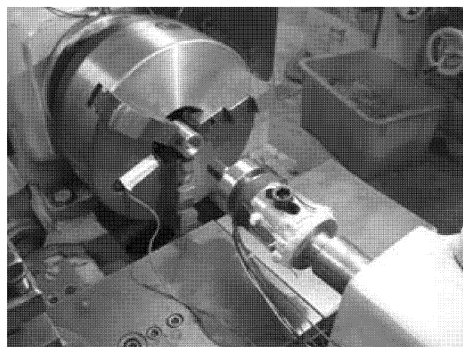


图1 内螺纹冷挤压过程图

采用MSF-3M型X射线应力分析仪对冷挤压内螺纹的牙面沿牙深方向进行残余应力的测量。为去除油污等杂质,先将冷挤压加工的内螺纹试样在丙酮中进行超声波清洗15 min,然后用酒精反复冲洗,最后吹干试样,进行残余应力的测量,测量结果采用多次测量后的平均值。X射线分析测试条件为V靶材,所用衍射晶面为 $\alpha$ -Fe(211),交相关方法定峰<sup>[6-7]</sup>。

将经过挤压成形后与车削试样沿螺纹法向线切割取一小块试样、抛光,清洗干净后,采用HXS-1000AK型数字式智能显微硬度计来进行硬度测试,由此表征冷挤压内螺纹牙顶、牙侧与牙根处表层冷挤压影响层的厚度。硬度测量条件为:载荷为200 g,保荷时间为15 s,牙顶、牙侧与牙根处硬度测试位置如图2所示<sup>[6,8-9]</sup>。

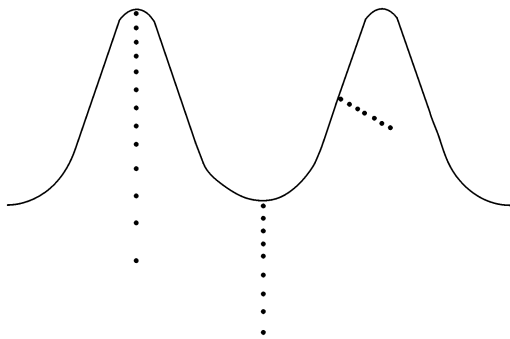


图2 硬度测试位置

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 对螺纹牙形的影响

在高强度钢内螺纹冷挤压加工中,底孔直径的大小对牙形高度有着直接的影响。图3所示为光学显微镜下工件不同底孔直径冷挤压加工后内螺纹的牙形。

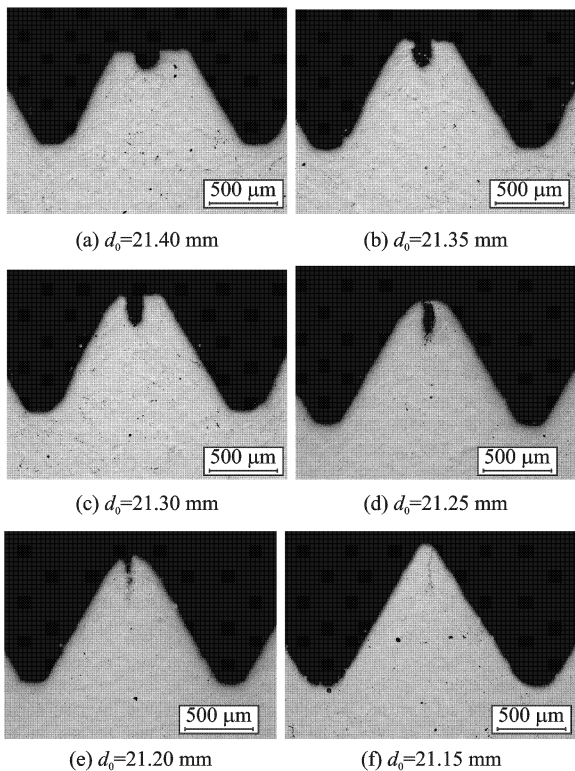


图3 冷挤压内螺纹的牙形

如图3所示,随着工件底孔直径的减小,冷挤压内螺纹牙高不断增加,而牙顶部由内螺纹挤压成形时工件金属材料未充满挤压丝锥齿沟出现的缺肉严重程度不断减小。图3为根据不同底孔直径冷挤压加工后内螺纹牙高与牙高率的测量结果,图中牙形是将挤压加工后的试样沿螺纹法向切取一小块,采用工具显微镜测量其牙高,牙高率由内螺纹牙高的测量结果根据式(2)计算得出的结果。如图

3(a)与图4所示,工件底孔直径为 $\varnothing 21.40$  mm时,冷挤压后内螺纹的牙形高度明显不足,牙高只有1.103 mm,牙高率不到67.53%,牙顶部出现的缺肉程度也最为严重,此时工件选择的底孔直径明显偏大,这样就不能保证挤压螺纹的最小高度,使工件成为无可挽救的废品,达不到螺纹强化增寿的效果。如图3(c~e)与图4所示,随着工件底孔直径的减小,冷挤压内螺纹牙高的增加趋势放缓,从而导致其牙高率的增加趋势也放缓,工件底孔直径为 $\varnothing 21.30$  mm时,冷挤压后内螺纹的牙形高度达到1.232 mm,牙高率达到82.13%,完全符合螺纹质量要求,工件底孔直径为 $\varnothing 21.20$  mm时,冷挤压后内螺纹的牙形高度增加到1.427 mm,牙高率增加到95.13%,牙高与牙高率增加幅度不是太大。如图3(f)与图4所示,工件底孔直径为 $\varnothing 21.15$  mm时,冷挤压后内螺纹的牙形高度达到极限,牙形高度为1.495 mm,牙高率为99.67%,牙顶部出现的缺肉现象基本消失,此时,工件选择的底孔直径偏小,挤压丝锥的螺纹牙形间没有空间来容纳挤压变形的多余金属。

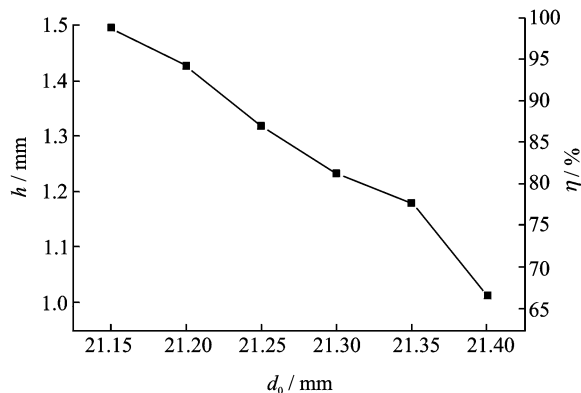


图4 工件底孔直径对冷挤压加工内螺纹牙高与牙高率的影响

#### 3.2 对螺纹表层硬度与残余应力的影响

由于内螺纹的牙面面积较小,形状又复杂,很难采用现有的检测手段来对内螺纹表面硬度与残余应力进行测试。本文采用内螺纹法向截面上距表层最近的那个测量点作为评价基准。

图5所示为三维形貌仪测量的工件不同底孔直径对冷挤压内螺纹牙顶、牙侧与牙根处表层硬度的影响。由图可知,随着工件底孔直径的增加,螺纹牙顶、牙侧与牙根处表层硬度均降低。在工件底孔直径超过 $\varnothing 21.25$  mm后,牙顶处表层硬度降低趋势有所减缓。由于工件底孔直径的增加,引起表层相同位置处变形程度的降低,由此造成各位置表层硬度的降低。

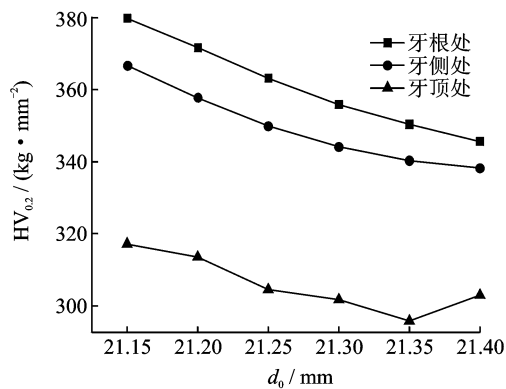


图5 工件底孔直径对螺纹表层硬度的影响

图6所示为工件不同底孔直径对冷挤压内螺纹牙顶、牙侧与牙根处表层残余应力的影响。由图可知:在不同底孔直径下得到的内螺纹牙根、牙侧与牙顶处表面残余应力均为压应力,并且它们的绝对值随着工件底孔直径的增加均减小。图中曲线也反映了表层残余应力与距牙根的距离相关,与牙根处距离越近,表层残余压应力就越大。

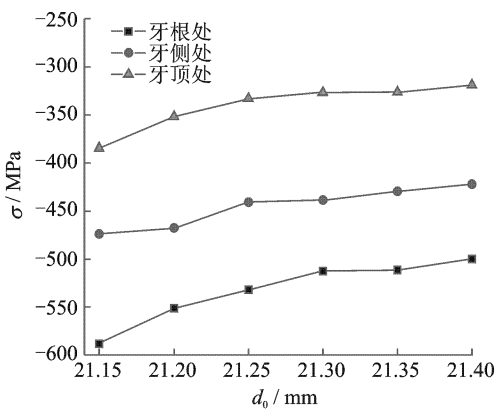


图6 工件底孔直径对螺纹表层残余应力影响

### 3.3 对冷挤压内螺纹端面的影响

在冷挤压加工高强度钢内螺纹时,由于轴向挤压力的作用使工件上螺纹的进出端靠近内孔的一侧形成突出的堆积体,其堆积程度与工件的底孔直径有关。图7所示为3种不同底孔直径冷挤压加工后内螺纹端面的表面形貌。

由图7所示,冷挤压加工后内螺纹端面堆积体呈两边高、中间低的凹陷形,随着工件底孔直径的减小,端面堆积的高度不断增加,堆积程度也就变得愈加严重。

### 3.4 对挤压丝锥的影响

工件选择的底孔直径偏小,由于挤压丝锥的螺纹牙形间没有空间来容纳挤压变形的多余金属,会使挤压过程中的扭矩急剧上升,容易导致丝锥的咬合、破损甚至折断,从而缩短丝锥的使用寿命。图8为工件

底孔直径低于 $\varnothing 21.15 \text{ mm}$ 后出现丝锥断裂,图9为由 此断裂丝锥的断口形貌的SEM照片,图中显示断口垂直于轴线方向,心部高,周围低,断口呈顶锥状。

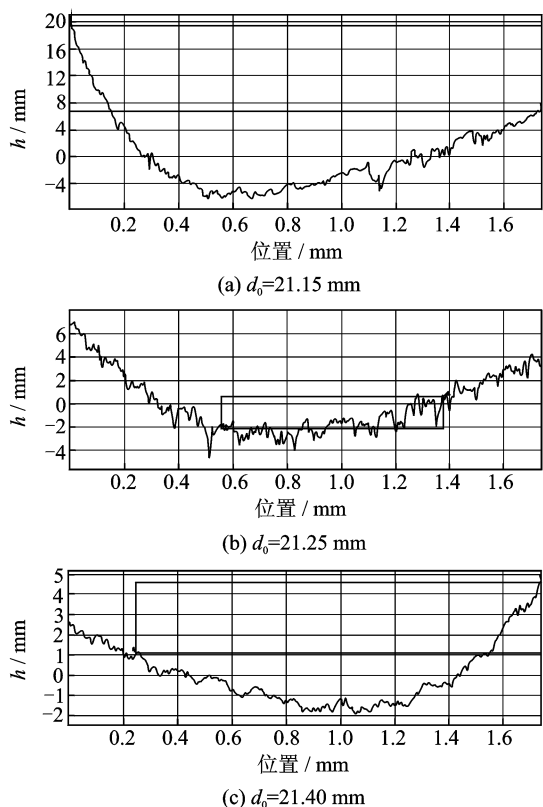


图7 工件不同底孔直径下冷挤压内螺纹端面的表面形貌(1.74 mm×1.29 mm)



图8 底孔直径过小引起丝锥断裂照片

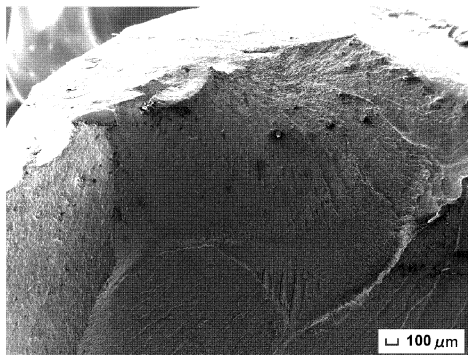


图9 断裂丝锥的断口形貌的SEM图

## 4 结 论

(1) Q460 高强度钢冷挤压内螺纹的工件底孔直径超过 21.20 mm 后,牙高率超过 80%。

(2) Q460 高强度钢冷挤压加工后内螺纹端面堆积体呈两边高、中间低的凹陷形,随着工件底孔直径的减小,端面堆积的高度不断增加,堆积程度也就变得愈加严重,螺纹牙顶、牙侧与牙根处表层硬度与表面残余压应力均升高。

(3) 工件底孔直径为  $\varnothing 21.15$  mm 时, Q460 高强度钢冷挤压后内螺纹的牙形高度达到极限,牙形高度为 1.495 mm,牙高率为 99.67%,牙顶部出现的缺肉现象基本消失,工件选择的底孔直径超过  $\varnothing 21.15$  mm 后,会使挤压过程中的扭矩急剧上升,容易导致丝锥的咬合、破损甚至折断,从而缩短丝锥的使用寿命。

(4) 工件底孔直径的选择,在正确保证螺纹质量和丝锥寿命的前提下应尽可能取最大值。一般情况下没有必要过分求最高的牙高与牙高率,即选择太小的底孔直径,否则将给高强度钢内螺纹成形带来许多困难。Q460 高强度钢冷挤压内螺纹工件底孔直径最佳取值范围为  $\varnothing 21.20 \sim \varnothing 21.30$  mm。

### 参考文献:

- [1] 王珉. 抗疲劳制造原理与技术[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1998.  
Wang Min. Principle and technology of anti-fatigue manufacture [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing House, 1998.
- [2] 徐九华,王珉. 高强度钢内螺纹冷挤压强化研究[J]. 材料工程,2000,11(4):41-44.  
Xu Jiuhua, Wang Min. Study on internal threads in high strength steels by cold form tapping[J]. Journal of Materials Engineering, 2000, 11(4): 41-44.
- [3] 许晓静,张雪峰,刘桂玲,等. 等通道转角挤压下变形体长度对应力的影响及开裂判据分析[J]. 机械工程学报,2008,44(1):223-226.

Xu Xiaojing, Zhang Xuefeng, Liu Guiling, et al. Work-piece length of the effect on stress and analysis of cracking-criterion under equal channel angular pressing [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(1): 223-226.

- [4] 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]. 冲击与振动,2010,29(2):208-212.  
Miao Hong, Zuo Dunwen, Wang Hongfeng, et al. Effect on the thread connection of aircraft landing gear by the impact load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(2): 208-212.
- [5] 蒋联民,胡湘红. Q460 高性能钢表面裂纹的分析[J]. 宽厚板,2007,13(1):19-23.  
Jiang Lianmin, Hu Xianghong. Analysis on the surface cracks of high performance Q460/Z35 plate[J]. Wide and Heavy Plate, 2007, 13(1): 19-23.
- [6] Miao Hong, Zuo Dunwen, Wang Hongjun, et al. Surface characteristics of 10Ni3MnCuAl steel by shot peening[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 26(3): 178-183.
- [7] Jien Jongchen, Yan Shinshih. A study of the helical effect on the thread connection by three dimensional finite element analysis[J]. Nuclear Engineering and Design, 1999, 191: 109-116.
- [8] 陈永楠,魏建锋,赵永庆,等. Ti14 合金半固态变形组织及力学性能[J]. 稀有金属材料与工程,2009,38(10):1822-1825.  
Chen Yongnan, Wei Jianfeng, Zhao Yongqing, et al. Microstructure and mechanical properties of Ti14 alloy after semi-solid deformation [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(10): 1822-1825.
- [9] 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.  
Miao Hong, Zuo Dunwen, Zhang Ruihong, et al. Experimental research on cold extruding of internal thread in Q460 high-strength-steel [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(13): 160-166.