文章编号:1000-5773(2013)03-0337-06

Q460 高强度钢冷挤压内螺纹的表层显微组织及力学性能*

缪　宏[1],左敦稳[2],张瑞宏[1]

(1.扬州大学机械工程学院,江苏扬州　225009;
2.南京航空航天大学机电学院,江苏南京　210016)

摘要:根据冷挤压内螺纹的成型过程,对螺纹表层的微观结构、显微硬度和力学性能进行了测试,得到了牙顶、牙侧和牙底3个位置硬化程度、硬化层深度及沿层深的组织变化规律。结果表明,冷挤压加工可使内螺纹表层组织显著细化,在挤压过程中,表层纤维组织被压紧到难以分辨出晶粒的程度,形成一层流线,平稳绕过牙底并沿牙侧向牙顶方向流动。其中牙根处晶粒最细,牙顶处晶粒最粗,牙侧部分介于二者之间。同时,挤压过程中螺纹表层的显微硬度与抗拉强度显著增加,而塑性和韧性出现下降,产生了加工硬化现象,大大提高了冷挤压内螺纹的表面质量和机械强度。

关键词:内螺纹;挤压成型;显微组织;力学性能
中图分类号:TG376.2　　**文献标识码**:A

1　引　言

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。随着高强度钢在近现代飞机、高速列车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型工艺净成型是当今飞机、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。而飞机起落架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,塑性成型抗力大,传统的冷挤压技术无法适应这类材料的加工。国内对300M高强度钢的内螺纹冷挤压开展了试验研究[1-4],但对于牙面表层性能及其力学性能缺乏深入研究,制约了冷挤压内螺纹的产业化发展。

本研究以Q460高强度钢为例,采用冷挤压法加工内螺纹,研究内螺纹表层显微硬度及其力学性能,并从微观结构发生变化的角度讨论冷挤压内螺纹的组织强化机制与金属流动规律,实现高强度钢内螺纹的连续挤压成型,为进一步研究应用提供指导依据。

* **收稿日期**:2011-04-21;**修回日期**:2011-10-12
基金项目:国家863计划(SQ2008AA10XK1468859)
作者简介:缪　宏(1981—),男,博士,讲师,主要从事抗疲劳制造技术研究. E-mail:mh0514@163.com
通讯作者:左敦稳(1962—),男,博士,教授,主要从事抗疲劳制造技术与精密加工技术研究.
E-mail:mhnuaa@gmail.com

2 试验材料与方法

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 35 mm，化学成分（质量分数）见表 1。取 3 个拉伸试样按 GB/T 228－2002[5]进行室温拉伸试验，得到室温力学性能为：抗拉强度（σ_b）为 570 MPa，屈服强度（$\sigma_{0.12}$）为 410 MPa，伸长率（δ_5）为 27%，断面收缩率（ψ）为 45%。

表 1 Q460 高强度钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of Q460 high strength steel （%）

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
0.14	0.35	1.45	0.008	0.004	0.46	0.27	Bal.

实验在国产 6250 机床上进行 M22×1.5 mm 内螺纹的冷挤压加工，如图 1 所示。采用自制的 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。内螺纹挤压成型采取一次挤压成型工艺，具体的挤压工艺参数为：机床转速 25 r/min，试样底孔直径为 21.25 mm，加工螺纹长度为 20 mm，采用 PDMS 聚二甲基硅氧烷润滑液对挤压丝锥进行冷却润滑。

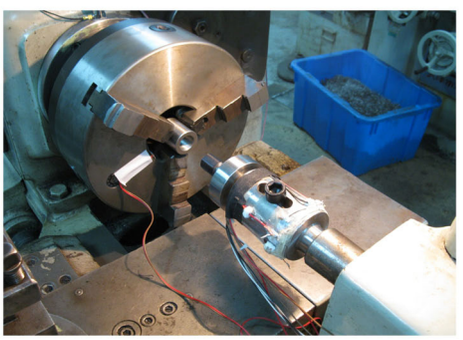


图 1 内螺纹冷挤压过程图

Fig. 1 The forming process of internal thread

将经过挤压成型后的试样完整取下，沿螺纹法向线切割取一小块试样，并进行抛光。为了去除油污等杂质，先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，经过机械抛光后，用适合于 Q460 高强度钢的侵蚀液进行腐蚀，然后在 JSM-7001F 型热场发射扫描电子显微镜（SEM）下观察螺纹表层组织结构。

采用 HXS-1000AK 型数字式智能显微硬度计进行硬度测试，由此表征螺纹牙顶、牙侧与牙根处表层冷挤压影响层的厚度。载荷为 200 g，保荷时间为 15 s，牙顶、牙侧与牙根处显微硬度测试位置如图 2 所示。

内螺纹室温拉伸试验在液压式万能材料试验机上进行，拉伸速率为 5 mm/min，拉伸试样尺寸如图 3所示，拉伸试样中与内螺纹相配合的外螺纹采用滚压加工，外螺纹试样材料为高强度钢，并经过调质热处理，保证拉伸试验能够检测到内螺纹的力学性能。

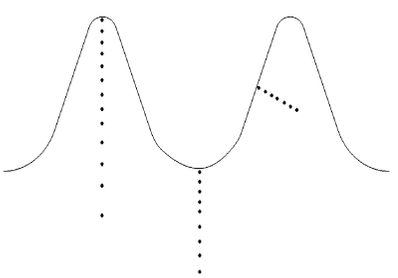


图 2 显微硬度测试位置

Fig. 2 The testing position of the microhardness

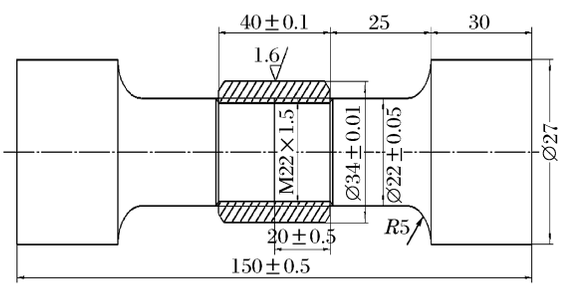


图 3 室温拉伸试样

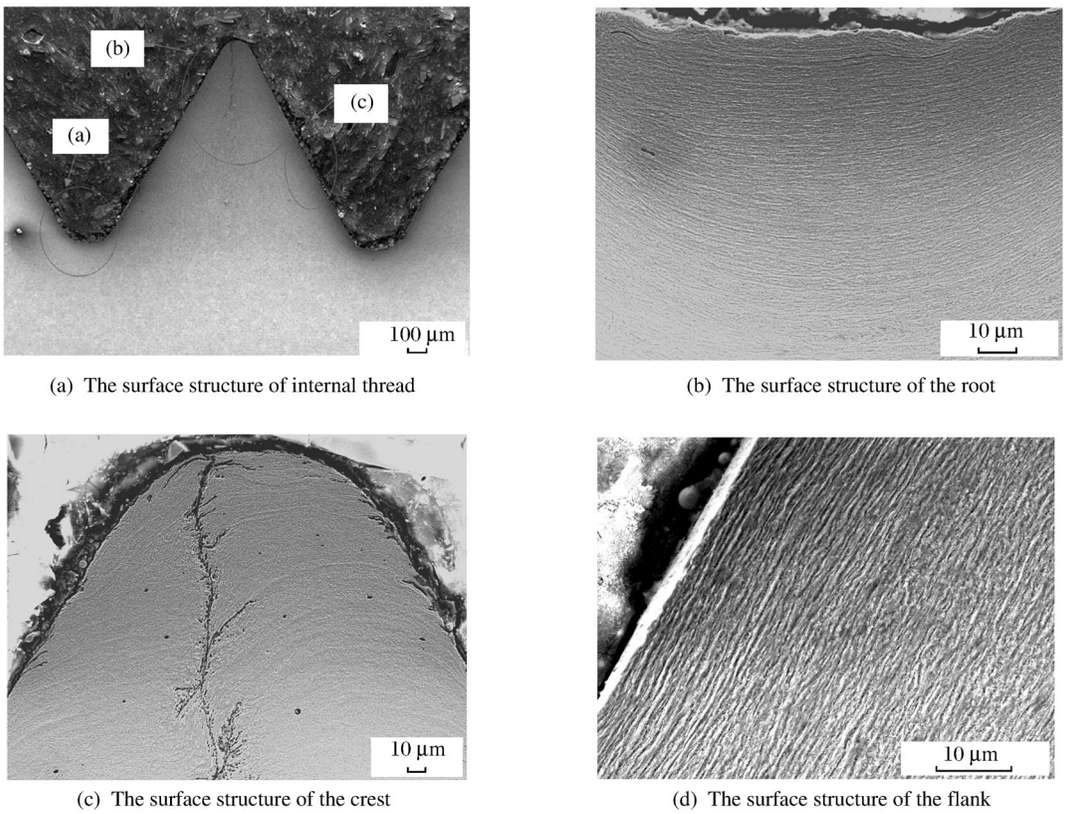
Fig. 3 The tensile test specimen at room temperature

3 试验结果与分析讨论

3.1 冷挤压内螺纹的表层组织结构

图 4 分别从挤压内螺纹牙形全貌、牙根和牙顶 3 个位置沿层深观察其组织变化规律。内螺纹挤压

成型实际上是一个使金属流动而形成螺纹牙形的过程。在丝锥棱齿的挤压作用下,金属发生塑性变形,将向棱齿周边区域以及轴向流动,晶体结构发生明显变化,晶粒内部出现滑移带,同时各晶粒沿金属变形的方向定向延伸和扭曲。当变形量很大时,晶界变得模糊不清,晶粒难以分辨,最终被拉成条形纤维组织,纤维组织沿齿形连续分布。随着金属变形程度的增加,定向性随之提高,晶粒被拉长、位错密度迅速提高、滑移宽度逐渐增大,同时滑移带呈现歪曲,原来的晶粒和夹杂物逐渐被压碎、细化,形成新的晶粒或亚晶。新晶界和原始晶界的差别逐渐模糊,难以区别。由于在塑性变形过程中,牙顶、牙侧和牙根 3 个位置受到的压应力各不相同,因而导致其晶粒的细化程度也不相同。从图 4 可以看出,牙根处晶粒最细,牙顶处晶粒最粗,牙侧部分介于两者之间。



(a) The surface structure of internal thread

(b) The surface structure of the root

(c) The surface structure of the crest

(d) The surface structure of the flank

图 4 冷挤压内螺纹表层组织结构

Fig. 4 The microstructure of internal thread

由于牙顶、牙侧和牙根 3 个位置受到丝锥棱齿的压力及金属的流动各不相同,导致其金属组织的变化也不完全相同。挤压过程中金属将沿着受到阻力最小的方向流动。因此丝锥棱齿与工件表层接触区的金属材料向牙顶方向流动的速度高于向牙形中心方向流动的速度,工件表层晶粒的变形最大,随着表层距离的增加,晶粒的变形程度随之变小。牙顶处金属材料受到丝锥棱齿的压力相对较小,并且金属流向牙顶两侧上方的区域时受到的阻力最小,而牙顶两侧,金属流动逐渐变得不太明显,最终导致牙顶两侧凸起,拉长的金属纤维组织也沿牙顶法向变得稀疏,如图 4(a)所示。因丝锥棱齿的两侧同时作用于工件牙侧部分,牙侧部分受到的压力比牙顶大,所以牙侧部分金属表面层拉长金属纤维的流线密集程度大于齿顶,呈近似于直线形流动,如图 4(b)所示。而牙根部分受到丝锥棱齿的压力最大,该部分金属表层的纤维组织被压紧到难以分辨出晶粒的程度,形成一层流线,平稳绕过牙根并沿牙侧方向流动,因此,牙根部分变形最大,形成的拉长纤维组织的密度也最大。在离开牙根接近牙形中心的材料流动性逐渐减弱,至中心部材料呈原始组织状态。

在内螺纹冷挤压过程中,拉长的金属纤维组织未被切断,随着塑性变形的发展,晶粒破碎和细化,位错密度增加,使得金属组织呈流线型沿牙面法向分布,如图 5 所示。随着工件材料塑性变形的进一步发

展，其塑性变形抗力也迅速增加，硬度和强度呈显著增加，而塑性和韧性出现下降，产生加工硬化现象，大大提高了冷挤压内螺纹的表面质量和机械强度[6-9]。

3.2 冷挤压内螺纹表层的显微硬度

图 6 是冷挤压内螺纹牙顶、牙侧与牙根处显微硬度沿牙深的分布图。由于金属流动速度的不同，其各个位置的变形程度也不完全相同，越靠近牙根其纤维组织越密集，尤其是在牙根部分，金属纤维密集地沿着牙形弯曲。金属变形程度和纤维组织密度直接影响加工硬化程度，对于不同的位置，硬度值随着变形程度和变形区域而变化，变形量大和组织密集的地方硬度值比较高。牙顶变形区域和变形量都比较小，金属纤维组织分布也较为稀疏，因此其硬度强化区域和程度也比较小，硬化层厚度接近0.15 mm，随着牙深的增大显微硬度逐渐增大，在牙顶距表层 0.05 mm 处显微硬度达到最大，其最大洛氏硬度值在 37.5 左右。相对于牙顶，牙侧部分的拉长纤维组织比较密集，而且变形区域和变形程度也较大，该位置的硬化层也较厚，其硬化层厚度达到了 0.2 mm，最大洛氏硬度值超过 38.5。牙根部分变形程度和变形区域最大，拉长纤维组织非常密集，所以其硬度值较大，并且硬化层最深，其硬化层超过了 0.25 mm，最大洛氏硬度值也超过 40.5。

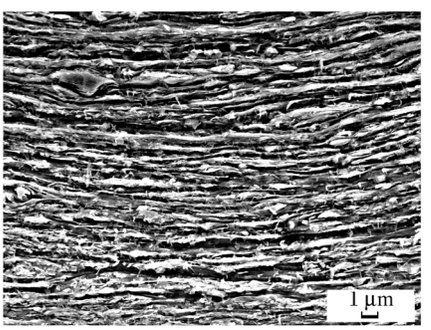


图 5 挤压内螺纹表层面的拉长纤维组织

Fig. 5 The elongate fibrous tissue on the surface layers of internal thread

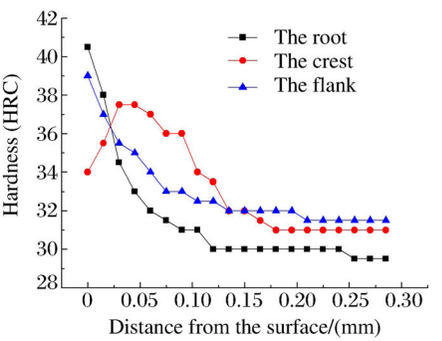


图 6 冷挤压内螺纹硬度分布及硬化层测量结果

Fig. 6 The micro-hardness distribution of internal thread

3.3 冷挤压内螺纹的力学性能

图 7 给出了冷挤压、车削内螺纹在室温状态下的力-位移曲线。从图 7 中可以看出，车削加工的内螺纹能够承受的最大拉力为 185.53 kN，而冷挤压加工的内螺纹能够承受的最大拉力为 202.68 kN，提高了 9.24%。因此，内螺纹的冷挤压加工可明显提高其抗拉强度，这是由于内螺纹的冷挤压成型能够在内螺纹表面和次表面中保存冷作硬化状态。但两者屈服阶段都极短，几乎可以忽略不计，原因是螺纹在拉伸断裂时由某一个牙的断裂而瞬间引起其它所有牙的断裂，内螺纹屈服过程只体现了先断裂的牙的屈服过程，因此，内螺纹的屈服阶段极短。上述事实说明，冷挤压加工能够提高内螺纹的抗拉强度。

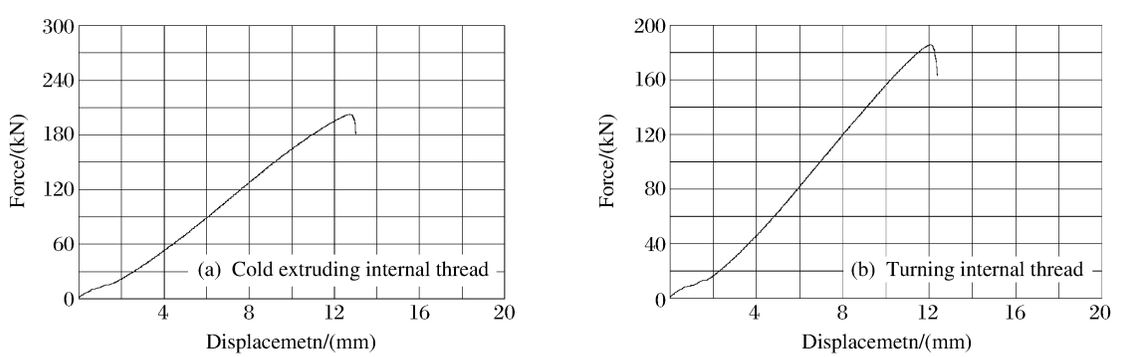


图 7 内螺纹的力-位移曲线

Fig. 7 The force-displacement curve of internal thread

4　结　论

（1）冷挤压内螺纹可细化金属表层的组织，在挤压过程中表层纤维组织被压紧到难以分辨出晶粒的程度，形成一层流线，平稳绕过牙底并沿牙侧向牙顶方向流动。其中牙根处晶粒最细，牙顶处晶粒最粗，牙侧部分介于两者之间。

（2）内螺纹表层金属变形程度和纤维组织密度直接影响硬化程度与硬化层深度，牙根部分金属纤维组织最为密集，硬化层最深，达到 0.25 mm 以上，牙顶金属纤维组织最为稀疏，硬化层最浅，达到 0.15 mm，牙侧部分纤维组织密度与硬化层深度介于二者之间，达到 0.20 mm。

（3）内螺纹的冷挤压加工可明显提高螺纹表层的显微硬度与抗拉强度，这是由于内螺纹冷的挤压成型能够在内螺纹表面和次表面中保存冷作硬化状态。

References：

[1] Xu J H，Wang M. Study on internal threads in high strength steels by cold form tapping [J]. Journal of Materials Engineering，2000，4(11)：41-44. (in Chinese)
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(11)：41-44.

[2] Miao H，Zuo D W，Zhang R H，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. (in Chinese)
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.

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

[4] Miao H，Zuo D W，Wang M，et al. Simulation and experimental research on residual stresses in precipitation-hardening layer of NAK80 steel for shot peening [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering，2011，24(3)：439-445.

[5] Miao H，Zuo D W，Zhang M，et al. Research on metal flow of internal thread of high strength steel during cold extrusion for aircraft landing gear [J]. China Mechanical Engineering，2010，21(14)：1714-1718. (in Chinese)
缪　宏，左敦稳，张　敏，等. 飞机起落架高强度钢内螺纹冷挤压成型金属流动规律研究 [J]. 中国机械工程，2010，21(14)：1714-1718.

[6] Chen J J，Shih Y S. A study of the helical effect on the thread connection by three dimensional finite element analysis [J]. Nucl Eng Des，1999，191(2)：109-116.

[7] Zhu D C，Sun Y，Song M Z，et al. Effect of alloy elements on the microstructure and properties of Cu-Te-Cr alloys during aging process [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)，2007，5(39)：97-100. (in Chinese)
朱达川，孙　燕，宋明昭，等. 合金元素对 Cu-Te-Cr 合金时效组织与性能的影响 [J]. 四川大学学报(工程版)，2007，5(39)：97-100.

[8] Li Y，Cai J，Zou Y，et al. The microstructures in 0.20%C carbon steel induced by high-current pulsed electron beam [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics，2011，25(3)：268-274. (in Chinese)
李　燕，蔡　杰，邹　阳，等. 强流脉冲电子束作用下 20 钢的微观结构状态 [J]. 高压物理学报，2011，25(3)：268-274.

[9] Chen Y N，Wei J F，Zhao Y Q，et al. Microstructure and mechanical properties of Ti14 alloy after semi-solid deformation [J]. Rare Metal Materials and Engineering，2009，38(10)：1822-1825. (in Chinese)
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.

Microstructure and Mechanical Properties of Internal Thread during Cold Extrusion for Q460 High Strength Steel

MIAO Hong[1], ZUO Dun-Wen[2], ZHANG Rui-Hong[1]

(1. *College of Mechanical Engineering, yangzhou University, yangzhou* 225000, *China*;
2. *Mechanical Engineering Institute, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing* 210016, *China*)

Abstract: According to the forming process of internal thread, the microstructure, microhardness and mechanical properties of internal thread surface layer were investigated. The microstructure change and deformation mechanism, harden ability and depth of hardening layers on the crest, the flank and the root of the thread along the layer depth direction were obtained. The results showed that the grains on the surface layers of the thread were refined after the cold extrusion. Fibrous structure of the metal surfaces on the root of thread was pressed to distinguish the grains difficultly, and formed a layer of flown line and smoothly rounded the root to flow from the flank to the crest. The grains on the root were the smallest, followed by the flank and the crest. In the extrusion processes, the microhardness and the tensile strength of the material were increased significantly, and the plasticity and the toughness were decreased. The work-hardening phenomenon greatly increased the surface texture and the mechanical strength of internal thread with cold extrusion.

Key words: internal thread; extrusion process; microstructure; mechanical properties