

轴向超声振动辅助钻削机理与试验研究

田英健, 邹平, 陈硕, 温泉

(东北大学 机械工程及自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 针对传统钻削过程中经常出现断屑、排屑困难以及加工质量差等问题, 提出了轴向超声振动辅助钻削加工方法, 并研究了其运动特性和断屑机理. 利用自行设计的轴向超声振动辅助钻削系统对 45 号钢进行了传统钻削与轴向超声振动辅助钻削的对比试验. 从孔的粗糙度、表面微观形貌、切屑形态等方面进行研究. 结果表明, 相对于传统钻削, 轴向超声振动辅助钻削能有效降低孔表面粗糙度, 改善孔表面微观形貌. 另外, 对试验结果进行方差分析, 结果显示主轴转速和超声振幅对孔表面粗糙度有显著影响, 其中当振幅在 20 μm , 主轴转速在 450 r/min 时加工效果最好.

关 键 词: 轴向超声振动; 辅助钻削; 45 号钢材料; 运动特性; 断屑机理; 加工质量

中图分类号: TG 506.5; TH 161

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2019)05-0705-05

Cutting Mechanism Research and Experimental Study on Axial Ultrasonic Vibration Assisted Drilling

TIAN Ying-jian, ZOU Ping, CHEN Shuo, WEN Quan

(School of Mechanical Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZOU Ping, E-mail: pzou425@163.com)

Abstract: An axial ultrasonic vibration assisted drilling method was proposed for solving problems such as difficulties in chip breaking, chip removal and poor processing quality in traditional drilling process. Motion characteristics and chip breaking mechanism were studied, and the comparative tests of conventional drilling and axial ultrasonic vibration assisted drilling were performed on the 45[#] steel using an own-designed axial ultrasonic vibration assisted drilling system. Investigations were done toward the machining precision of holes, surface morphology and the shape of chips. The experimental results demonstrate that axial ultrasonic vibration assisted drilling can effectively reduce the surface roughness and improve the microscopic morphology compared with the traditional processing. In addition, variance analysis is used for data processing, indicating that the spindle speed and ultrasonic amplitude have significant influences on the surface roughness, and the processing effect is best when the amplitude is 20 μm and spindle speed is 450 r/min.

Key words: axial ultrasonic vibration; assisted drilling; 45[#] steel materials; movement characteristics; mechanism of chip broken; machining quality

在机械加工中, 孔加工是一个十分重要的工序, 也是加工量较大的加工方式, 其加工量约占所有机械加工量的 25%^[1]. 常用的孔加工方法主要包括钻削加工、电火花加工等. 然而电火花加工效率较低, 安全防护要求高, 而且只适用于加工导电材料. 相对于电火花加工, 利用麻花钻进行钻削加工不仅加工效率高、加工成本低, 而且加工范围较

为广泛, 因此成为最常见的一种孔加工方式. 但是, 传统钻削过程通常伴随着较大的切削力, 而且不易断屑, 导致加工精度低、排屑困难^[2]. 针对这一点, 一种在钻削过程中加入周期性超声振动的方法被广泛应用. 研究表明, 轴向超声振动辅助钻削可以显著降低切削过程中的摩擦力^[3], 从而使加工质量、刀具寿命等都有较大的改善和提

高^[4-5]. 目前国内对于轴向超声振动辅助钻削技术的研究还不是很成熟.

本文结合轴向超声振动辅助钻削的运动特性以及断屑机理,利用自行设计的轴向超声振动辅助钻削系统,对 45 号钢进行了传统钻削和轴向超声振动辅助钻削的对比试验. 利用 Micromasure 三维轮廓仪和超景深三维显示系统等设备对不同振幅、不同转速下所加工孔的粗糙度、表面形貌及切屑形态进行测量和分析,研究了振幅和主轴转速对孔内表面粗糙度的影响规律. 另外,为了寻求最优的工艺条件,对试验结果进行了方差分析,为轴向超声振动辅助钻削技术的发展和应提供了理论基础和试验方法.

1 轴向超声振动辅助钻削运动特性

轴向超声振动辅助钻削是一种将传统钻削与超声振动相结合的复合加工方式,其中钻头沿其回转中心方向周期性振动,在这一过程中钻头会与工件发生周期性的分离和接触,这一分离特性改变了传统钻削加工中连续钻削的机理. 如图 1 所示,点 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 为钻头主切削刃上任意一点,则另一条主切削刃上存在与 P_1 对应的一点 $P_2(x_2, y_2, z_2)$, 其与 P_1 的位置相位差为 180° . 则传统钻削和轴向超声振动辅助钻削在加工过程中某时刻的坐标方程分别为

$$\begin{cases} x = r\cos(2\pi nt) \\ y = r\sin(2\pi nt) \\ z = -f_z nt \end{cases}, \begin{cases} x = r\cos(2\pi nt) \\ y = r\sin(2\pi nt) \\ z = -f_z nt + A\sin(2\pi ft) \end{cases}$$

其中: r 为钻头半径; f_z 为每转进给量; A 为超声波振幅; n 为主轴转速; f 为振动频率. 选择参数 $r = 3\text{ mm}$, $f_z = 0.08\text{ mm/r}$, $A = 20\text{ }\mu\text{m}$, $n = 400\text{ r/min}$, $f = 20\text{ kHz}$ 则可分别得到两种加工方式下钻头主切削刃上任一点的运动轨迹,如图 2 所示.

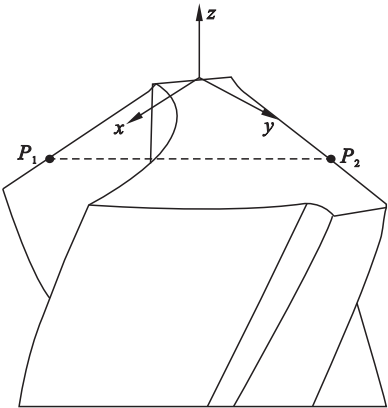


图 1 点 P_1 和 P_2 坐标位置示意图
Fig. 1 Coordinate position of points P_1 and P_2

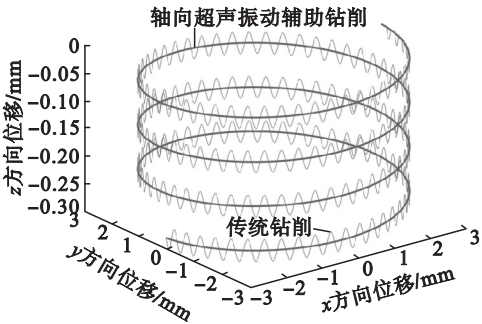


图 2 传统钻削和轴向超声振动辅助钻削刀具运动轨迹
Fig. 2 Blade trajectory of traditional drilling and axial ultrasonic vibration assisted drilling

从图 2 中可以看出,传统钻削方式的刀具运动轨迹为两条规则的螺旋线,而轴向超声振动辅助钻削方式的刀具运动轨迹和它有很大不同,它是在 z 轴方向(即钻头回转中心方向)发生周期性的振动. 当振动位于波峰时,切削刃与工件接触,而位于波谷时切削刃与工件分离. 轴向超声振动辅助钻削的这种刀具与工件“接触-分离-接触”的非连续切削方式不仅可以降低平均切削力,而且有利于切削过程中热量的排出,从而降低切削温度. 另外,与传统钻削相比,轴向超声振动辅助钻削的切削刃之间的轴向距离不再相等,刀具的瞬时切削厚度随着钻头旋转角度的变化而发生周期性的变化,这种特性彻底改变了传统钻削的切削机理,这对于钻削过程中断屑和排屑有一定的促进作用.

2 轴向超声振动辅助钻削断屑机理

分别将上述传统钻削和轴向超声振动辅助钻削相邻的两条切削刃运动轨迹沿圆周方向展开,就可以得到钻头主切削刃上任意一点随着钻头的旋转角度 θ 和轴向位移 z 变化的平面轨迹,如图 3 所示.

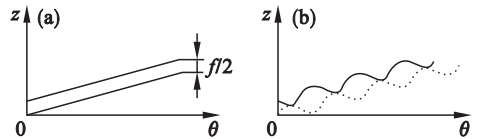


图 3 传统钻削和轴向超声振动辅助钻削主切削刃平面运动轨迹
Fig. 3 Two-dimensional path of main cutting edge in traditional drilling and axial ultrasonic vibration assisted drilling
(a)—传统钻削; (b)—轴向超声振动辅助钻削.

当采用传统钻削方式加工时,主切削刃相邻的两条平面轨迹为相互平行的两条直线,它们之

间的距离不受钻头旋转角度和轴向位移的影响,始终为进给量的一半,这会使钻削过程中产生的切屑厚度始终保持不变.因此,当采用传统钻削方式加工塑性材料时易产生连续不断的长切屑.由于钻削为封闭式加工,刀具深入工件内部进行切削,此时较长的切屑很容易堵塞在钻头螺旋槽内而难以排出.尤其当钻头直径较小时,允许切屑排出的空间更加狭小,因此这种堵塞现象会更加严重.随着钻削的进行,连续不断的长条切屑会跟随钻头高速旋转,不仅会影响操作人员的安全,而且会划伤已加工好的孔内表面,从而使其表面粗糙度升高.

在轴向超声振动辅助钻削过程中,主切削刃相邻的两条运动轨迹不再保持平行,而是会随着钻削的进行而产生周期性的交叉现象.当两条轨迹发生交叉时切屑厚度为零,此时即可实现断屑,产生片状的碎屑而随钻头螺旋槽排出.

3 试验条件和试验方法

轴向超声振动辅助钻削系统如图 4 所示.由于采购、过滤及清理切削液的成本很高,而且容易造成环境污染^[6],本试验在干燥环境下进行.本文基于 CA6140 型车床建立轴向超声振动辅助钻削系统. CA6140 型车床应用广泛,生成成本较低,具有很高的通用性,便于超声振动辅助钻削技术的普及. 45 号钢因其具有较高的强度、良好的机械加工性能和广泛的材料来源而被广泛应用于工业生产中,因此选用直径为 30 mm 的 45 号钢棒料为试验材料. 为了减少试验材料的浪费,利用线切割的方式将棒料分割成长度为 15 mm 的若干个小段,并将其依次编号. 试验刀具选用直径为 6 mm 的含钴高速钢麻花钻头,钴元素可以使钻头具有更高的红硬性和耐磨性^[6]. 试验中使用美国 BRANSON 公司生产的大功率超声波发生器,它的最大输出功率为 1 100 W,输出频率为 20 kHz. 这套系统结构简单、拆装方便,可以适用于所有 CA6140 车床.

在轴向超声振动辅助钻削中,工件与刀具会产生周期性的接触与分离,而当采用过大的切削速度时,这种工件与刀具的分离现象会减弱,导致超声振动辅助钻削与传统钻削效果接近,因此本试验选用较低的主轴转速. 由于钻削进给量过大会导致钻头磨损严重,考虑到机床性能和试验成本,选用固定进给量 $f_z=0.08\text{ mm/r}$,其他各因素水平如表 1 所示. 显然,当振幅为 0 μm 时为传统

钻削加工.

表 1 因素水平表
Table 1 Levels of process parameters

因素	水平				
	1	2	3	4	5
主轴转速 $/(r\cdot\text{min}^{-1})$	200	320	450	560	710
振幅/ μm	0	10	15	20	25

4 试验结果分析

4.1 孔内表面粗糙度的对比分析及方差分析

在机械连接中,疲劳破坏是导致机体损伤的重要因素. 孔内表面粗糙度对连接孔的疲劳强度有很大影响. 粗糙的表面在外力的作用下易产生应力集中,并产生微小裂纹,从而使工件的疲劳强度降低.

为了精确获取每个加工孔表面的粗糙度,首先在每个孔的内表面随机选取 5 个点,然后利用三维轮廓仪分别对这些点的表面粗糙度值进行测量,再计算平均值作为各个加工表面的平均粗糙度值.

表 2 主轴转速方差分析表
Table 2 ANOVA of spindle speed

来源	$SS_{\text{误}}$	$DF_{\text{误}}$	$MS_{\text{误}}$	F 值	p 值
主轴转速	0.961	4	0.240 25	87.047 2	$2.338\ 82\times 10^{-12}$
误差	0.055 2	20	0.027 6	—	—
总和	1.016 2	24	—	—	—

表 3 振幅方差分析表
Table 3 ANOVA of amplitude

来源	$SS_{\text{误}}$	$DF_{\text{误}}$	$MS_{\text{误}}$	F 值	p 值
振幅	0.378 6	4	0.094 65	22.32 3	$3.861\ 62\times 10^{-7}$
误差	0.084 8	20	0.004 24	—	—
总和	0.463 4	24	—	—	—

为了探究主轴转速和振幅对孔表面粗糙度的影响,分别对转速和振幅进行了单因素方差分析. 对于重复 k 次、 m 水平的单因素试验,若用 \bar{y} 表示全部观测指标的平均值, \bar{y}_i 表示第 i 组观测指标的平均值,则各项计算公式为

因子效应平方和: $SS_{\text{因}} = \sum_{i=1}^m k(\bar{y}_i - \bar{y})^2$.

随机误差平方和: $SS_{\text{误}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_i)^2$.

自由度: $DF_{\text{因}} = m - 1, DF_{\text{误}} = m(k - 1)$.

均方: $MS_{\text{因}} = \frac{SS_{\text{因}}}{m-1}, MS_{\text{误}} = \frac{SS_{\text{误}}}{m(k-1)}.$

F 值 = $MS_{\text{因}}/MS_{\text{误}}.$

p 值 = $P(F_{m-1, mk-m} > c).$

F 值和 p 值分别表示 Fisher 分布的值和置信度为 α 时的概率值. 如果得出的概率值 $p < \alpha$, 则拒绝给出的假设, 认为该因素对响应有显著影响. 从表 2 和表 3 中可以看出, 主轴转速和振幅两因素的 p 值均小于 0.01 (一般置信度 α 取 0.01), 所以主轴转速和超声振幅对粗糙度值都有显著的影响. 另外, 主轴转速的 F 值大于振幅的 F 值, 则可以认为主轴转速比振幅对孔表面粗糙度的影响更加显著.

4.2 孔内表面形貌对比分析

已加工孔的内表面形貌是钻头切削刃在孔内表面留下的痕迹的微观形貌. 通过观察孔的内表面微观形貌可以更加直观地分析孔的加工效果. 图 4 为两种加工方式下所加工孔的内表面微观形貌. 在传统钻削加工方式下, 孔的内表面凹凸不平, 呈现连续的波峰波谷的形貌, 而且其分布极不规则. 而轴向超声振动辅助钻削加工的孔表面形貌为一个个单一的尖峰, 而且这些尖峰在表面上的分布十分规则, 这是因为轴向超声振动辅助钻削中刀具对工件表面产生周期性的冲击作用, 从而使得连续的波峰被刀具所截断. 另一方面, 这种刀具对工件表面的冲击会使钻头后刀面对已加工表面产生往复熨压作用, 这可以进一步提高表面加工质量^[7].

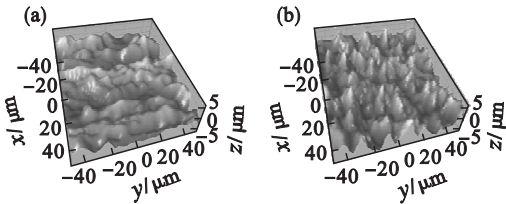


图 4 孔内表面微观形貌

Fig. 4 Surface microstructure of the holes

(a) —传统钻削; (b) —轴向超声振动辅助钻削.

4.3 切屑形态对比分析

形态不规则且较厚的长切屑对加工是非常不利的. 图 5 为两种不同加工方式下得到的切屑形态及放大 20 倍表面形态图.

传统钻削时产生卷曲状的切屑, 这种切屑很容易缠绕在钻头上^[8], 而轴向超声振动辅助钻削时产生的切屑形状比较规整而且厚度比较薄. 这种细小的片状切屑比较容易随钻头螺旋槽排出, 而且不会出现切屑飞溅现象, 既有利于操作人员

的安全防护, 又便于收集.

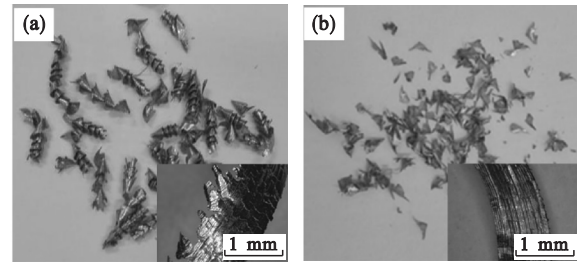


图 5 切屑形态

Fig. 5 Shape of the chips

(a) —传统钻削; (b) —轴向超声振动辅助钻削.

从切屑放大图可以看出, 传统钻削产生的切屑具有明显的锯齿形边缘, 而且切屑表面不太平整. 而轴向超声振动辅助钻削产生的切屑表面更加平整, 而且边缘无锯齿现象. 这种切屑更容易排出, 而且会减少对孔壁的划伤.

4.4 超声振动幅值对孔表面粗糙度的影响

在进给量 $f_z = 0.08 \text{ mm/r}$, 转速 $n = 320 \text{ r/min}$ 的条件下, 利用 Matlab 可以画出孔表面粗糙度随振幅变化的曲线. 如图 6 所示, 在相同主轴转速下, 轴向超声振动辅助钻削可以得到比传统钻削更低的表面粗糙度. 当振幅在 $10 \sim 20 \text{ }\mu\text{m}$ 的范围内变化时, 孔表面粗糙度随着振幅的升高有明显降低的趋势. 根据前文有关断屑机理的阐述, 由于超声振幅的升高, 钻头主切削刃相邻两条运动轨迹会更加频繁地出现互相交叉的现象, 这会使钻削过程中更加容易断屑, 从而形成细小的片状切屑, 这种切屑很容易随钻头螺旋槽排出而减少对孔内表面划伤. 但是, 过大的振幅同样对加工质量是不利的. 这是因为过大的振幅会使钻头后刀面与孔内表面之间的相对运动面积增大^[9], 从而加剧钻头磨损, 同时孔表面粗糙度也会随之升高.

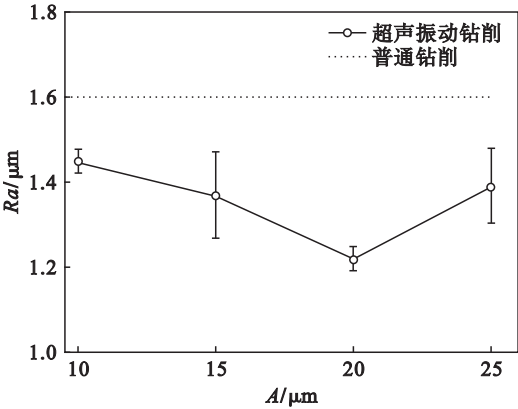


图 6 超声振幅对表面粗糙度的影响规律

Fig. 6 Influence rule of ultrasonic amplitude on the surface roughness

4.5 主轴转速对孔粗糙度的影响及其分析

图 7 为孔表面粗糙度随转速变化的曲线,进给量 $f_z=0.08\text{ mm/r}$, 振幅 $A=20\text{ }\mu\text{m}$. 从图 7 中可以看出,在相同的超声振幅和 5 种不同主轴转速下,轴向超声振动辅助钻削可以得到比传统钻削更低的表面粗糙度,其中两种加工方式所得结果对比最显著的地方发生在主轴转速为 320 r/min 时. 当主轴转速从 200 r/min 增加到 320 r/min 时,孔内表面粗糙度有明显降低的趋势. 这是因为当切削速度较低时,钻头切削刃与工件表面之间接触的时间相对增加,使得钻头与孔表面之间的摩擦水平升高,同时会加剧切屑对已加工表面的刮擦和损伤. 当主轴转速在 320 ~ 450 r/min 范围时,孔表面粗糙度值最小. 在此范围内,粗糙度值受主轴转速影响很小. 另外,并非所采用的主轴转速越大,得到的粗糙度越小. 当主轴转速超过 450 r/min 时,孔表面粗糙度值急剧升高. 这是因为过高的钻削速度加剧了刀具与工件的黏合^[10],从而极易形成积屑瘤,影响加工质量^[11].

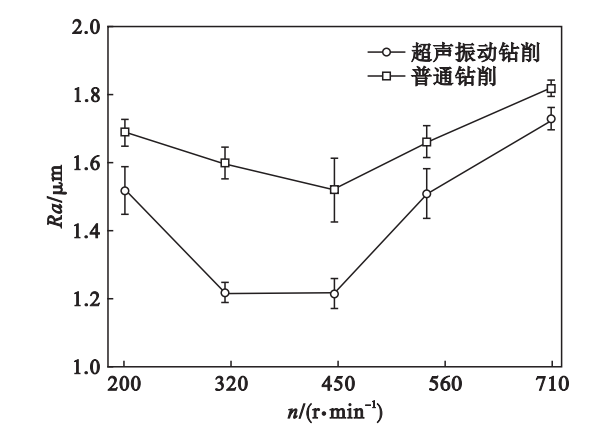


图 7 主轴转速对表面粗糙度的影响规律
Fig. 7 Influence rule of spindle speed on the surface roughness

5 结 论

1) 相对于传统钻削加工,轴向超声振动辅助钻削可明显提高孔加工质量. 在本试验中,进给量 $f_z=0.08\text{ mm/r}$, 转速 $n=320\text{ r/min}$ 的条件下,孔表面平均粗糙度可由传统钻削的 $1.60\text{ }\mu\text{m}$ 降低到 $1.22\text{ }\mu\text{m}$,加工质量有了明显的提高.

2) 相对于传统钻削,轴向超声振动辅助钻削可以明显改善孔表面微观形貌. 由于超声振动的作用,刀具可以将孔表面连续的波峰和波谷截断,从而使孔表面更加平整.

3) 相对于传统钻削,轴向超声振动辅助钻削可以有效实现断屑,并且产生表面规整、不易缠刀的细小片状切屑,使切屑更容易排出.

4) 通过对试验参数的分析,轴向超声振动辅助钻削振幅在 $20\text{ }\mu\text{m}$ 、转速在 320 ~ 450 r/min 范围时加工效果最好.

参考文献:

[1] Degarmo E P, Black J T, Kohser R A. Materials and processes in manufacturing [M]. New York: Macmillan, 1990.

[2] Brehl D E, Dow T A. Review of vibration-assisted machining [J]. Precision Engineering, 2008, 32 (3): 153 - 172.

[3] 高本河,熊镇芹,王世清,等. 低频振动钻削钛合金深小孔的试验研究 [J]. 西安石油大学学报 (自然科学版), 2000, 15 (4): 76 - 79.

(Gao Ben-he, Xiong Zhen-qin, Wang Shi-qing, et al. Experimental study on drilling deep-small hole by using axial low-frequency vibration drilling technique [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science), 2000, 15 (4): 76 - 79.)

[4] Barani A, Amini S, Paktinat H, et al. Built-up edge investigation in vibration drilling of Al2024-T6 [J]. Ultrasonics, 2014, 54 (5): 1300 - 1310.

[5] Adachi K, Yoshikawa A, Sakurai K. A study on burr low frequency vibratory drilling [J]. Procedia CIRP, 2016, 46: 563 - 566.

[6] Cheng K. Machining dynamics: fundamentals, applications and practices [M]. London: Springer, 2008.

[7] Sanda A, Arriola I, Navas V G, et al. Ultrasonically assisted drilling of carbon fibre reinforced plastics and Ti6Al4V [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 22: 169 - 176.

[8] Lotfi M, Amini S. Experimental and numerical study of ultrasonically-assisted drilling [J]. Ultrasonics, 2016, 75: 185 - 193.

[9] 马利杰. 轴向振动钻削机理及其工艺效果实验研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2007.

(Ma Li-jie. Study on mechanism and process effect of axial vibration drilling [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2007.)

[10] Najiah D A, Ascroft H, Barnes S. The effect of varying cutting speeds on tool wear during conventional and ultrasonic assisted drilling (UAD) of carbon fibre composite (CFC) and titanium alloy stacks [J]. Procedia CIRP, 2016, 46: 420 - 423.

[11] Dahnel A, Gloger M, Ascroft H, et al. Analysis of tool wear and hole quality during ultrasonic assisted drilling (UAD) of carbon fibre composite (CFC) / titanium alloy (Ti6Al4V) stacks [C] // ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Houston, 2015: 1 - 9.