

不同冷却下运载火箭叠层厚板高速制孔试验

林涛¹, 李国和², 刘蒙², 于洋², 曹宇¹, 张慧¹

(1. 天津航天长征火箭制造有限公司, 天津 300462;

2. 天津市高速切削与精密加工重点实验室, 天津 300222)

[摘要] 运载火箭在装配过程中大量采用钻铆工艺,使得钻孔效率和质量成为影响装配工艺的重要因素。针对当前厚度大于10mm的运载火箭铝合金叠层板在高速制孔加工过程中存在的钻头折断、噪音、毛刺等问题,开展了冷却条件对运载火箭叠层厚板钻孔影响的试验研究。采用压电晶体测力仪测量切削力,采用轮廓投影仪测量孔径,采用超景深体视显微镜进行毛刺观测,从孔径、毛刺和切削力等方面分析无冷却、空气冷却和液氮冷却3种冷却条件对制孔的影响。结果表明:空气冷却条件下,钻孔数量最多,且能够满足制孔精度和毛刺方面的要求;无冷却条件下的钻削力最大,液氮冷却条件下的钻削力最小;钻头折断前并没有发生明显的刀具磨损,钻头的突然折断是由高温粘屑所引起的。

关键词: 运载火箭; 叠层厚板; 制孔; 冷却条件

Experiment Study on Influence of Cooling Conditions on Drilling of Thick Laminated Plate of Carrier Rocket

LIN Tao¹, LI Guohe², LIU Meng², YU Yang², CAO Yu¹, ZHANG Hui¹

(1. Tianjin Long March Rocket Manufacturing Co., Ltd., Tianjin 300462, China;

2. Tianjin Key Laboratory of High Speed Cutting & Precision Machining Technology, Tianjin 300222, China)

[ABSTRACT] The drilling and riveting process is widely used in the assembly of carrier rocket, which makes the efficiency and quality of drilling become the important factor affecting the assembly process. According to the problem existing in the drilling of thick laminated plate (thickness larger than 10mm) of carrier rocket, such as drill break, large noise and burr etc, experiment study of the influence of cooling conditions on the drilling were carried out. The cutting force was measured by a piezoelectric dynamometer, the aperture was measured with an outline projector and the burr was observed and measured by a digital stereo microscope. Through the measurement of contour projector and depth of field stereo microscope, the effects of three cooling conditions, including no cooling, air cooling and liquid nitrogen cooling, on the drilling were analyzed from the aspects of drilling force, diameter and burr. The results show that the largest number of hole can be obtained under the condition of air cooling. The cutting force is the largest under the condition of no cooling and that is smallest under the condition of liquid nitrogen cooling. The suddenly fracture of drill is due to the adhesions of chip under the high temperature because there is no obvious tool wear before the drill fracture.

Keywords: Carrier rocket; Thick laminated plate; Drilling; Cooling condition

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.23/24.093

叠层材料由于具有较高的强度质量比,在现代航空航天结构中被大量采用。在运载火箭的装配过程中,叠层材料零部件之间通常采用铆接方式进行连接,预制孔的加工质量是保证装配质量的基础和关键。由于预制孔的直径一般较小,通常采用具有优异制孔效果和较高加工效率的钻孔工艺^[1]。加工工艺是钻孔质量的决定性因素,不合理的加工工艺将导致制孔毛刺和孔径超差

等缺陷,进而影响后续铆接的效果和运载火箭的装配质量,因此,高质量的钻孔工艺是获得高质量铆接件和优良装配结构的前提。

国内外针对叠层板钻孔开展了一系列的研究。Choi等^[2]针对叠层板钻孔加工,建立有限元模型,研究了压紧力对层间毛刺的影响,认为采用集中压紧力可以有效避免层间毛刺。Hellstern等^[3]通过预压紧钻孔试

验证了上述观点。Melkote 等^[4]开展了叠层板钻孔试验,发现刀尖角,压紧方式以及压紧力位置都对层间毛刺的产生有重要影响。张兴华等^[5]通过试验发现采用正确的叠层顺序和较大的压紧力能够获得较好的微观毛刺形态。徐晓霞等^[6]采用不同的加工参数和压紧力,开展铝合金叠层板钻孔试验,发现相比于加工参数,轴向预压紧力可以更好地避免层间毛刺的产生。李源等^[7]开展了铝合金叠层板在单面压紧力作用下层间毛刺的研究,发现增加预压紧力可以很好地控制层间毛刺。李夏^[8]进行了钻削有限元仿真,提出了提高自动化制孔质量的压脚压紧力取值方法。卢志军^[9]通过单向预压紧钻孔试验研究了加工参数对制孔精度和层间毛刺的影响。考虑零件的变形,建立了单向预压紧下钻孔圆柱度的计算模型。考察了出口毛刺的形成机理以及预压紧力对层间毛刺的抑制作用。王豪、孙鑫等^[10]开展了叠层板自动制孔时压紧形式的研究,认为双侧压紧能够有效抑制层间间隙的产生,从而降低毛刺的高度。苏海、马兴海等^[11]开展了运载火箭铝合金叠层壁板自动化制孔工艺试验,考察刀具锋角、主轴转速、进给量和压紧力对制孔质量的影响,优选了工艺参数并进行了试验验证。

从现有的文献看出,目前还没有关于冷却条件对制孔影响方面的研究报道,而且目前的研究都是针对薄板叠层制孔的情形,对叠层厚板(总厚度大于 10mm)并没有涉及。因此,本文针对叠层厚板在高速制孔中存在的钻头折断、噪音、毛刺等问题,在高速铣削加工中心上,从冷却方式这方面开展制孔毛刺、钻削力及制孔质量的试验研究,采用铣削测力仪、投影仪和超景深体视显微镜进行数据采集和观测,为运载火箭厚板零部件钻孔工艺的制定提供依据。

1 高速制孔试验

工件材料为两块 100mm × 170mm 的 2219 铝合金矩形板料样件,厚度分别为 8mm 和 10mm。试验在汉川 XH715D 立式加工中心上进行,试验装置如图 1 所示。采用的主轴转速为 6000r/min,进给速度为 850mm/min。分别在无冷却、空气冷却和液氮冷却条件下采用直径为 $\phi 6$ 的标准含钴高速钢麻花钻进行钻孔试验。通过关闭机床的冷却液系统实现无冷却加工,通过机床空冷喷嘴实现空气冷却,液氮冷却则是将喷壶中液氮经机床喷枪雾化后直接喷淋到工件表面,图 2 为液氮喷淋示意图。试验过程中采用奇石乐 9257B 压电晶体测力仪记录切削力。对加工后的孔采用基恩士 VHX-1000C 超景深三维显微镜进行毛刺观测,采用日本三丰轮廓投影仪测量孔径。

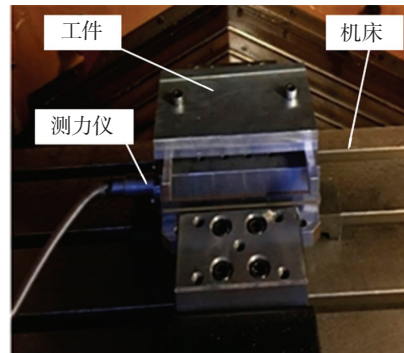


图1 试验装置

Fig.1 Experiment device

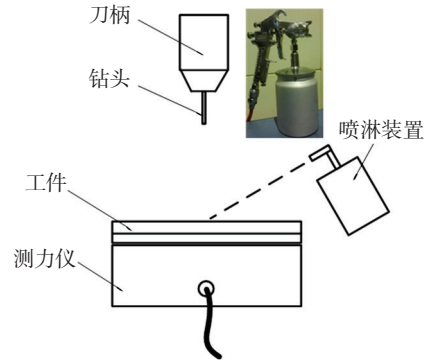


图2 液氮喷淋示意图

Fig.2 Sketch of liquid nitrogen spray

2 试验结果与讨论

2.1 制孔数量分析

在 3 种不同冷却条件下,钻头的失效形式均为突发折断。图 3 给出了不同冷却条件下钻头折断前制孔数量的对比。可以看出无冷却条件下制孔 7 个,空气冷却条件下制孔 17 个,液氮冷却条件下仅能制孔 4 个。

从钻屑形状(图 4)来看,尽管铝合金材料属于较容易加工的材料,但叠层厚板钻削过程中由于散热条件差,通常会产生高温,这会使工件材料的塑性和韧性增加,形成长的带状屑而难于排屑。同时从图 5 可以看出,刀具基本无磨损,但有比较严重的粘屑。刀具前刀面的这种粘屑现象,会进一步加剧排屑的困难性,使得切屑堵塞螺旋槽而导致钻头折断。因此,在运载火箭叠层铝合金厚板钻孔时出现的钻头突然折断失效应该是在无冷却条件下,热量散失少,温升高,导致切屑粘连和刀具破损,使得制孔数量很少;液氮冷却虽然可以显著降低切削温度,但实际上液氮只能对工件上表面进行冷却,同时液氮的强冷却效果同样使得刀具变脆,降低了刀具材料的韧性,更容易在高温粘屑的情况下发生扭转断裂,使得制孔数量比无冷却条件下还要少。空气冷却能在一定程度上降低切削温度,有利于排屑和抑制积屑

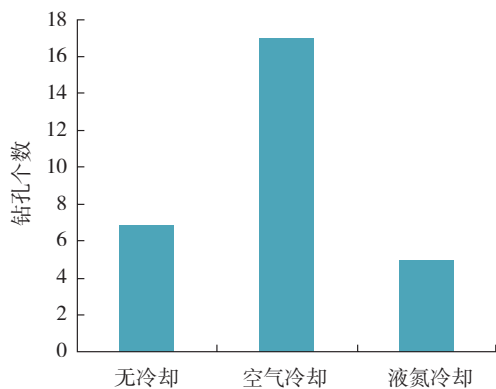


图3 不同冷却条件下制孔数量对比

Fig.3 Comparison of number of hole under different cooling conditions



图4 切屑形态

Fig.4 Chip morphology

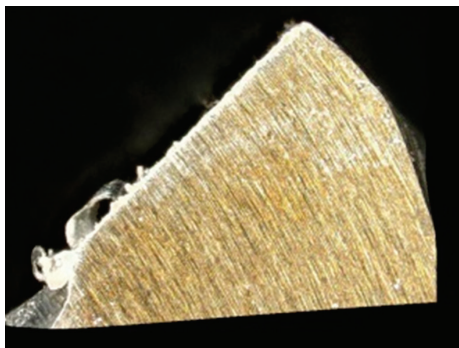
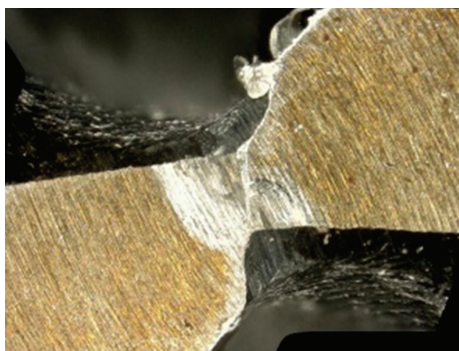


图5 刀具磨损及粘屑

Fig.5 Tool wear and crumbs

瘤,因此可以获得最多的制孔数量。

2.2 孔径尺寸分析

为对比加工后孔的精度,采用日本三丰投影仪分别对3种冷却条件下的孔径尺寸进行测量,测量结果如图6所示。可以看出无冷却条件下孔的尺寸精度较差,而空气冷却和液氮冷却条件下孔径的尺寸精度较高,满足H9的精度要求。并且空气冷却条件下的孔径尺寸精度比液氮冷却还要好,这应该是液氮冷却条件下工件温度梯度过大所引起的。

2.3 毛刺分析

对运载火箭零部件制孔来说,毛刺主要有层间毛刺和出口毛刺,由于本次试验中,试验样件的上下表面进行了加工,贴合的较好。较大的板厚和较小的尺寸也使得制孔过程中钻削力引起的变形可以忽略,没有层间毛刺,因此只对出口毛刺进行观测,结果列于表1中。可以看出,空气冷却条件下出口毛刺高度最小,全部小于1mm。前3个孔在无冷却条件和液氮冷却条件下的毛刺高度也小于1mm。但空气冷却在第5个孔,液氮冷却在第4和第5个孔的出口毛刺都很大,分别达到了2.231mm和1.872mm。对应前述的制孔数量可以看出,在这种情况下,钻头应该已经发生了粘屑,增大了对出口切削层材料的挤压,从而导致毛刺高度增大。

另外对孔的入口和出口的观测也表明,在钻孔过程中,还会出现细微毛刺和粘屑,如图7~9所示。通过对

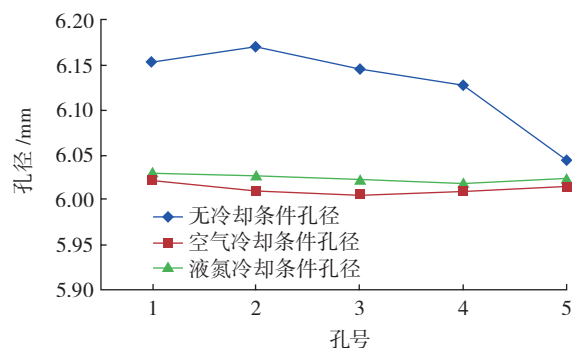
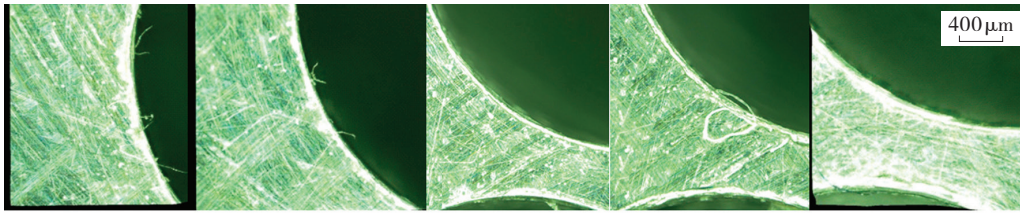


图6 不同冷却条件孔径尺寸测量结果

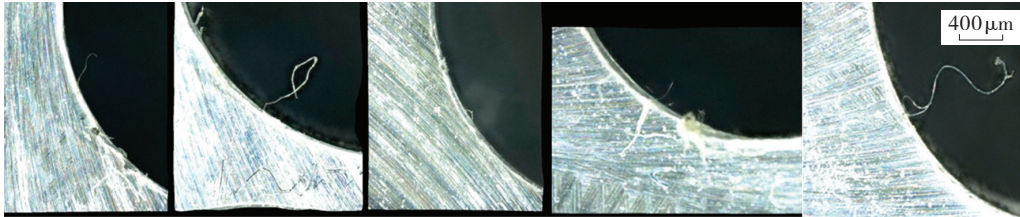
Fig.6 Measurement results of aperture under different cooling conditions

表1 不同冷却条件下的出口毛刺高度 mm

孔号	无冷却	空冷	液氮冷却
1	<1	<1	<1
2	<1	<1	<1
3	<1	<1	<1
4	<1	<1	1.872
5	2.231	<1	1.393



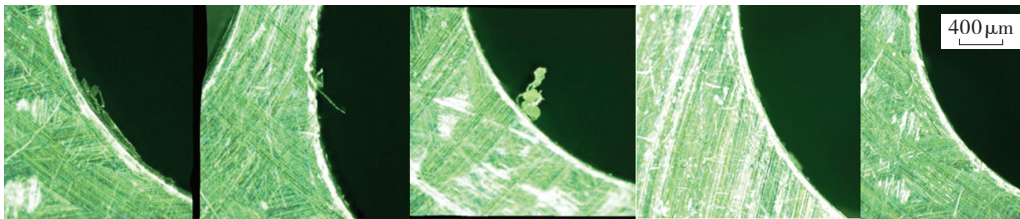
(a) 入口



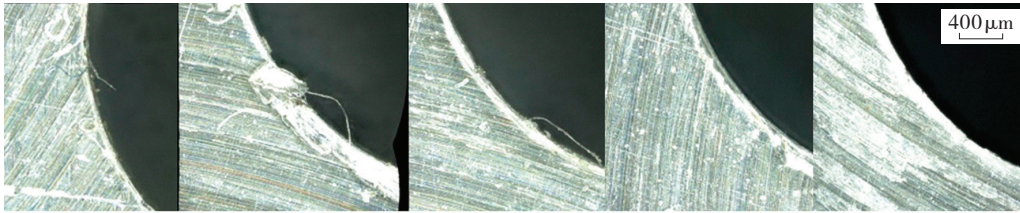
(b) 出口

图7 无冷却条件下的孔口微毛刺

Fig.7 Micro burr of orifice under no cooling conditions



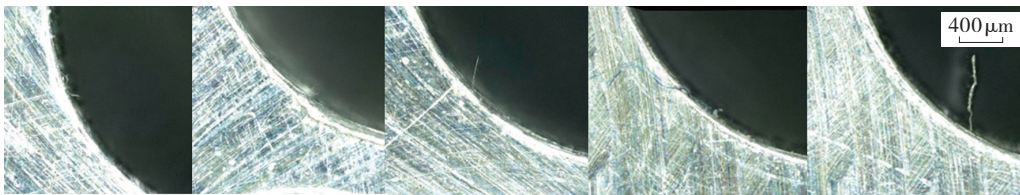
(a) 入口



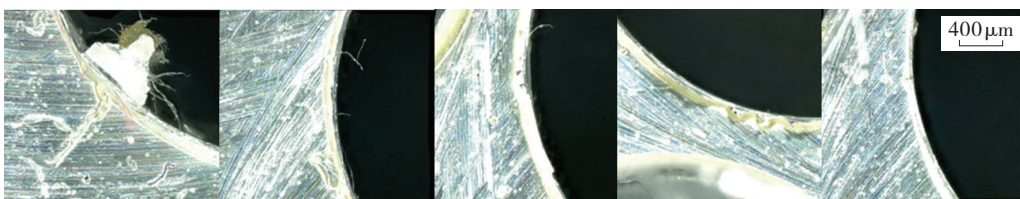
(b) 出口

图8 空气冷却条件下的孔口微毛刺

Fig.8 Micro burr of orifice under air cooling conditions



(a) 入口



(b) 出口

图9 液氮冷却条件下的孔口微毛刺

Fig.9 Micro burr of orifice under liquid nitrogen cooling conditions

比发现,在无冷却条件下,无论入口和出口都会出现微毛刺,而且毛刺长度较大。这主要是由于无冷却条件下温度较高,增大了材料的塑性和韧性,使得部分材料产生很大变形而没有被切断。空气冷却条件下,无论入口和出口处的微毛刺情况都较好。液氮冷却条件下,微毛刺情况和无冷却条件类似,进一步表明采用液氮对工件表层进行冷却并不能达到很好的抑制毛刺效果。

2.4 钻削力分析

从试验结果中选取不同冷却条件下连续钻削的5个孔为研究对象,分别对上板和下板的轴向切削力 F_z 进行分析,结果如图10和图11所示。3种冷却条件下上板切削力较为稳定,下板切削力在第4个孔时有一定波动,波动幅度在150N左右,这是由于层间间隙所引起,关于层间间隙的影响将在后续研究中深入阐述。从图10和11中可以看出,3种不同冷却方式下切削力的大小关系为:无冷却条件下切削力(F_z)>空气冷却条件下切削力(F_z)>液氮冷却条件下切削力(F_z)。空气冷却时上板的轴向切削力比无冷却时降低约60~80N,下板轴线切削力降低50N左右。液氮冷却时,上板的轴线切削力和下板的轴向切削力较无冷却时都降低了约100N。这是因为在空气冷或液氮冷却的条件下,温度下降使得工件被切金属层的塑性和韧性都有所降低,导致切削变形减小,钻削力下降。液氮冷却条件下钻削力最小则是由于其冷却效果最明显且雾化液氮能起到一定的润滑作用。较为稳定的切削力也进一步表明,钻头折

断前并没有发生明显的刀具磨损,钻头的突然折断是由高温粘屑所引起的。

3 结论

本文通过试验研究了不同冷却条件对运载火箭用2219铝合金叠层厚板制孔的影响,主要结论如下:

(1)切屑形态及前刀面粘屑表明,在运载火箭叠层铝合金厚板钻孔过程中,钻头的突然折断是由高温粘屑所引起的,较为稳定的切削力进一步证明了这一结论。

(2)从制孔数量上来看,空气冷却可以获得最多的制孔数量,无冷却及液氮冷却条件下得的制孔数量都较少。

(3)无冷却条件下孔的尺寸精度较差,而空气冷却和液氮冷却条件下孔径的尺寸精度较高,满足H9的精度要求。

(4)相比于无冷却及液氮冷却,空气冷却条件下出口毛刺高度最小,入口和出口处产生的微毛刺情况也最好,液氮冷却并不能达到很好的抑制毛刺效果。

(5)3种不同冷却方式下切削力的大小关系为:无冷却条件下切削力(F_z)>空气冷却条件下切削力(F_z)>液氮冷却条件下切削力(F_z)。

(6)从综合效果来看,采用空气冷却方式可以更好地满足运载火箭叠层铝合金厚板钻孔的效率、精度和质量要求。

参考文献

- [1] 卜泳,许国康,肖庆东.飞机结构件的自动化精密制孔技术[J].航空制造技术,2009,53(24):61-64.
BU Yong, XU Guokang, XIAO Qingdong. Automatic precision drilling technology of aircraft structural part[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 53(24): 61-64.
- [2] CHOI J, MIN S, DORNFELD D A, et al. Modeling of inter-layer gap formation in drilling of a multi-layered material[C]//Proceedings of 6th CIRP Workshop on Modeling of Machining. Hamilton, 2003.
- [3] HELLSTERN C. Investigation of interlayer burr formation in the drilling of stacked aluminum sheets[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2009.
- [4] MELKOTE S N, NEWTON T R, HELLSTERN C, et al. Interfacial burr formation in drilling of stacked aerospace materials[M]. Berlin: Springer, 2009.
- [5] 张兴华,郑慧慧.金属叠层材料层间毛刺形成的钻削实验研究[J].现代制造工程,2011(10):79-82.
ZHANG Xinghua, ZHENG Huihui. Experimental studies of process parameters for burrs in dry drilling of stacked metal materials[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2011(10): 79-82.
- [6] 徐晓霞,胡永祥,姚振强.层叠铝合金钻削层间毛刺试验研

(下转第102页)

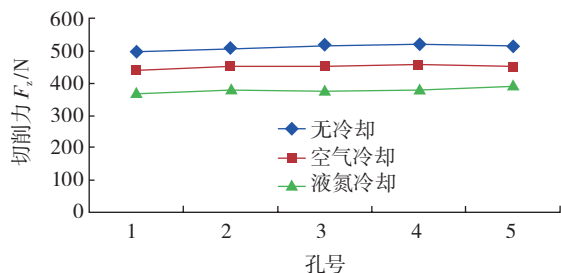


图10 不同冷却条件下上板切削力 F_z 的变化曲线

Fig.10 Change of cutting force F_z of upper plate under different cooling conditions

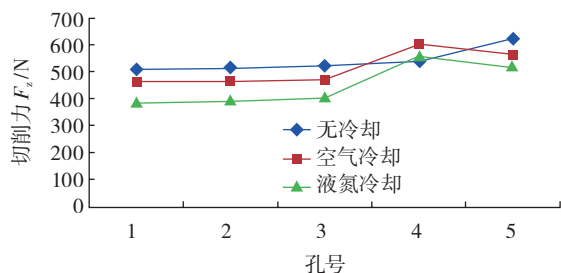


图11 不同冷却条件下下板切削力 F_z 的变化曲线

Fig.11 Change of cutting force F_z of lower plate under different cooling conditions