碳纤维复合材料钻削温度测试与分析

赵建设

(航天材料及工艺研究所 北京 100076)

文 摘 利用热像仪对碳/环氧复合材料高速钻孔时的钻削温度及温度场分布进行了系统的试验研究。实验结果显示,钻削热主要是由刀具后刀面与已加工表面之间的摩擦产生的。转速越高,钻削温度越高;进给量越大,钻削温度越低,但钻削温度一般不超过环氧树脂的玻璃化转变温度。

关键词 碳/环氧复合材料,高速钻孔,温度场,钻削温度

Measuring and Analyzing of Drilling Temperature for Carbon Fiber Reinforced Composites

Zhao Jianshe

(Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology Beijing 100076)

Abstract Drilling temperature and its temperature distributing was studied using a thermal imaging device and it is indicated that the drilling heat is mainly produced from the friction between drilling-bit backface and machind surface, and the higher the rotary rate, the higher the drilling temperature, and the higher the feedrate, the lower the drilling temperature. But the drilling temperature usually doesn't exceed glass transition temperature of carbon-epoxy composites.

Key words Carbon-epoxy composite, High speed drilling, Temperature distributing, Drilling temperature

1 引言

钻削是一种半封闭的切削形式,而 CFRP(碳纤维复合材料)耐热性较低,导热性相对较差,再加上目前 CFRP 基本都不采用冷却液钻削加工,因此,切削热问题是 CFRP 钻削加工应该关注的一个重要问题。尤其是高速钻削,会不会出现钻削温度超出 CFRP 耐热极限而造成孔壁烧焦,是将其应用于实际工程部件加工前必须解决的问题。本文首次利用热像仪对钻削过程中钻削温度的变化进行实时检测和分析。

2 试验方案

到目前为止,对钻削碳纤维复合材料时的钻削温度的研究还很不够,主要是由于没有准确可靠的方法。为了更好的研究各种切削参数尤其是转速和进给量的影响,将高速钻削技术真正引入实际生产,并给实际生产提供科学的参考,准确地对高速钻削过程中温度场的分布、温度变化、温度最高值等进行全过程测定是完全必要的。为此在测温方法上进行了深入的分析比较工作,查阅了大量文献资料。文献[1]中对常规转速下钻削温度的测量都采用人工热电偶法,但该方法存在以下缺点:(1)测得的是钻头温度;(2)埋设热电偶工艺复杂,环节多,线路长,由此带来的偶然因素影响大;(3)该方法比较适合 300 ℃~1 600 ℃的测量范围内使用,对于 200 ℃以下的温度,由于电势值相对较小,冷端补偿引起的误差相对较大,故在该范围内不适用[2];(4)该方法不能

收稿日期:2000 - 05 - 18

赵建设,1968 年出生,硕士,主要从事复合材料加工工艺的研究工作

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

观察到钻孔过程中温度场的分布和变化,也测不到温度的最高值及所处位置;(5)该方法只适用于普通转速下测量钻削温度的平均值,不适合高速钻削测温。因此本文未采用这种方法。而热像仪测温具有以下优点[3]:(1)直接测量工件温度;(2)精度高,能分辨0.1 ℃的温度;(3)响应快,可在几毫秒内测出物体的温度场;(4)可用于测量小目标物体;(5)可测量温度分布不均匀的被测对象,并记录下温度随时间的变化情况;(6)可在有限的区域内,寻找过热点和过热区域。本次试验在经过各方面分析比较后,决定采用这种方法测温,经实际使用证明,得出的结果具有较好的准确度和可信度。本文选用的热像仪是日本产的TVS 2000型,其温度分辨率为0.01 ℃,测温精度0.1 ℃,测点间距0.1 mm。

为了对钻削过程温度变化进行实时检测和记录,观察钻孔过程中温度场的变化并找到温度最高点,将温度测量分为两部分进行:第一部分是从侧面测量孔壁温度;第二部分是测量孔出口温度。由于钻孔过程是在一个封闭的空间内进行的,孔壁温度无法直接测量。为使试验具有科学性,测量孔壁温度时,在测力仪上设计了一个定位机构,能使工件在装夹时保证钻孔位置和工件侧面的距离保持固定,经反复试验,最后确定孔边距为3 mm。通过在试件侧面垂直于钻头方向上架设热像仪摄像头来间接测量孔壁温度,并把试件侧面的温度场分布记录下来。虽然这个数据并不是钻削过程中孔壁的实际温度,但CFRP层合板布层方向热导率较大,且边距仅为3 mm,因此测量值基本能反映钻孔过程中温度的变化情况,另外,在不同切削条件下钻孔时记录的数据是具有可比性的。

出口温度测定是单独进行的,测定的是孔刚刚钻透时的温度,更能反映钻孔时的真实温度,因此是本次试验的重点,侧面测温只是参考。试验时将工件直接安装在夹具上,将测力仪卸掉,在夹具后面架设热像仪摄像头,摄像头透过夹具后面的孔进行出口温度检测和记录,试验时不加冷却液。试验参数与侧面测温相同,试验条件设定考虑了转速、进给量、钻头直径、材料厚度等影响因素。

实验中作为工件材料的碳纤维复合材料为多向层合板,碳纤维牌号为T300B,基体材料为AG80环氧树脂,实验用板材厚度分别为2 mm、10 mm、15 mm。其具体情况见表1。

表1 不同厚度T300B/AG80多向层合板性能

Tab.1 Properties of various thickness T300B/AG80 composite laminates

厚度/mm	铺层形式	纤维体积分数/%	纵向压缩强度/MPa	横向压缩强度/MPa	纵向剪切强度/MPa
2	$[\pm45°/0°/90°/0°/90°/0°]_s$	62.00	700.00	556.00	-
10	$[(\pm45°/0°_2/\pm45°/0°_2/90°/0°_2/90°/0°_2)/(\pm45°/0°_2/90°/0°_2/90°/0°_2/90°/0°)/\pm45°/0°_2/90°/0°_2/90°]_s$	62.38	-	-	50.00
15	$[90°/0°_2/90°/0°_2/90°/\pm45°/90°/0°_2/90°/0°_2/90°]_{sT}$	63.60	-	-	48.40

3 试验及结果分析

图1和图2是利用热像仪测得的孔壁温度和出口温度值及温度场分布的典型图片。所用钻头为Φ5.5 mm硬质合金(牌号YG6X,以下钻头同此牌号)四平面修磨横刃钻头,所采用的转速为n=3 600 r/min,进给量为f=63 mm/min。

本文中所谈到的每个孔的钻削温度均是指图中"1"点的出口温度值。下面就几个主要因素对钻削温度的影响的实验结果简述如下。

观察钻削过程中温度变化表明,钻削过程中温度的变化同轴向力和扭矩的变化不一样,它没有一稳定阶段,而是一直持续上升。这说明CFRP的导热性差,切削热散不出去,随着钻孔深度的增加,热量聚集的越来越多,温度越来越高。

由图1和图2可以看出,钻削温度的最高点是在刚要钻透时,且是在钻头中心部位,不是在孔壁。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

这是因为尽管钻头靠近外圆处后刀面磨损最严重,摩擦最大,产生的热量也多,但该处接触面积大,热容也大,因此温度并不是最高,而钻尖处后角小,摩擦严重且面积小,热容小热量最不容易散出,因此造成该处温度最高。另外可以看出,钻削温度为梯度分布,其作用范围较小,主要集中在切削刃附近,且作用时间很短,因此钻削温度的副作用并不大。



图 1 孔壁温度场分布
(左边:入口,右边:出口)

Fig. 1 Temperature distribution along the hole wall
(left: entrance; right: exit)

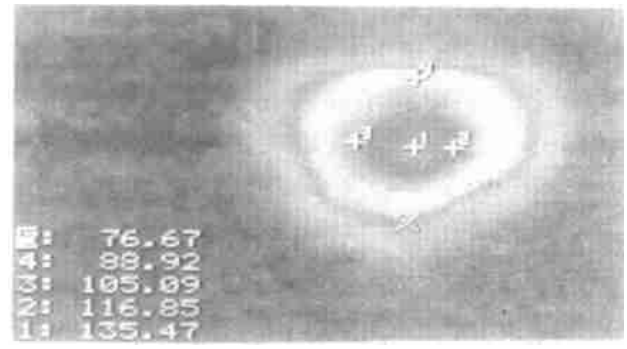


图 2 出口温度场分布

Fig. 2 Temperature distribution at exit hole

尽管在测温试验中测得的最高温度为 240 ℃,而基体(环氧树脂)的玻璃化转变温度一般为 177 ℃～220 ℃[4],但却没有发现树脂熔化现象,这充分说明钻削温度的作用区域只局限于钻头横刃及切削刃附近这一很小范围内,且作用时间很短。

3.1 进给量对钻削温度的影响

表 2 是 Φ5.5 mm 硬质合金四平面修磨横刃钻头钻削 10 mm CFRP 时,进给量对钻削温度影响试验数据。从表中可以看出:出口温度随进给量的增加而减小,进给量较小时变化较大,以后就趋于平缓,呈现非线性关系。

表 2 进给量对钻削温度影响

Tab. 2 Effects of feedrate on drilling temperatures ℃

位置	高速区进给量/mm·r⁻¹					低速区进给量/mm·r⁻¹		
	0.002	0.004	0.007	0.012	0.022	0.056	0.112	0.224
孔壁处	210.23	153.20	118.67	95.00	78.56	40.00	43.00	42.45
出口处	242.83	172.48	131.50	114.17	95.33	46.65	46.66	45.66

对高速区实验数据用线性回归法总结出以下单因素经验公式(f 为进给量):

高速: $T = 19.61 f^{-0.3971}$

3.2 转速对钻削温度的影响

表 3 是用 Φ5.5 mm 硬质合金四平面修磨横刃钻头钻削 10 mm CFRP 时,转速对钻削温度影响试验数据。从中可以看出,转速对钻削温度有影响,出口温度随转速的增加而增高。

表 3 转速对钻削温度的影响

Tab. 3 Effects of rotary speed on drilling temperatures ℃

位置	高速区转速/r·min⁻¹					低速区转速/r·min⁻¹		
	3 600	5 700	9 300	15 000	24 000	200	500	1 250
孔壁处	118.80	124.63	162.56	180.82	187.52	40.00	42.00	39.00
出口处	135.47	138.08	172.09	196.00	207.55	45.69	46.60	46.65

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.3 钻头直径对钻削温度的影响

表 4 是分别用 Φ5.0 mm、Φ5.5 mm、Φ6.0 mm 硬质合金四平面修磨横刃钻头钻削 10 mm CFRP 时,钻头直径对钻削温度影响试验数据。从表中可以看出:在 Φ5 mm～Φ6 mm 范围内,钻头直径对钻削温度几乎没有什么影响。

表 4 钻头直径对钻削温度影响

Tab.4 Effects of drilling diameter on drilling temperatures

℃

位置	高速区钻头直径/mm			低速区钻头直径/mm		
	5.0	5.5	6.0	5.0	5.5	6.0
孔壁处	128.50	127.45	129.56	45.23	43.67	44.82
出口处	141.20	142.8	142.00	51.20	49.05	50.90

3.4 材料厚度对钻削温度的影响

表 5 是用 Φ5.5 mm 硬质合金四平面修磨横刃钻头分别钻 2 mm、10 mm 和 15 mm 厚 CFRP 时,材料厚度对钻削温度影响试验数据。从中可以更清楚地看出钻削温度随材料厚度增加而升高。

表 5 材料厚度对钻削温度的影响

Tab.5 Effects of plate thickness on drilling temperatures

℃

位置	高速区材料厚度/mm			低速区材料厚度/mm		
	2	10	15	2	10	15
孔壁处	54.45	137.56	146.32	24.00	40.32	43.00
出口处	65.00	147.21	158.12	28.52	46.00	50.00

3.5 切削参数的变化对切削温度影响的综合分析

从钻削温度实验结果来看,钻削温度随转速的提高而升高,随进给量的增大而降低,随材料厚度的增厚而增高,钻头直径对钻削温度的影响不大。这是因为钻削碳纤维复合材料时,切削热主要来源于后刀面与已加工表面的摩擦。摩擦力所做的功中很大一部分转化为切削热,摩擦功越大,产生的热量越多,温度就越高,因此,温升规律与钻削加工时的摩擦过程相关。

钻头实际的切削刃口并非直线,是近似于半径为 r_n 的圆柱面(硬质合金刀具刃口圆弧半径一般为 r_n = 10 μm～15 μm)[5],横刃和与后刀面比邻的切削刃的那部分一经切削就被碳纤维硬质点磨损,成为一条后角为 α = 0 的棱面,加上工件回弹的缘故,在进给速度保持不变时,转速越高,进给量越小,刀具与已加工表面之间的摩擦距离越长,产生的热量越多,因此,转速越高,切削温度越高。在转速保持不变时,进给量越大,摩擦距离越短,因此产生的热量越少,同时钻头在材料中停留时间越短,钻头越快地进入空气中,散热条件越好,从而导致进给量增加,钻削温度反而下降这一现象。这一点与金属材料一般规律不同,金属材料切削热主要来源于切削变形,因此,进给量越大,切削变形越大,温度越高[6]。在其它条件不变时,材料厚度越厚,钻削温度越高,同样也是由于材料越厚,摩擦距离越长,产生的热量越多,再加上材料越厚,热量越不容易传出去,因而温度就越高。钻头直径对钻削温度的影响不大,这是因为虽然钻头直径增大后,摩擦面积增大,热量增多,但热容也相应增大,因此钻头直径对钻削温度的影响不大。

4 结论

(1) CFRP 材料钻削时,钻削温度主要是由后刀面与已加工表面间摩擦产生的热引起的,而不是由切削变形引起的。

(2) 钻削温度随钻速的提高而升高。

(3) 钻削温度随进给量的增加而降低。

(4) 钻头直径对钻削温度的影响不大。

(5) 钻削温度随钻孔深度的增加而升高。

(6) 在低速区,钻削参数对钻削温度的影响不显著。

参考文献

1 胡凡. 复合材料钻削加工的研究. 硕士论文,北京航空学院,1985

2 陈焕生. 温度测试技术及仪表. 水利电力出版社,1987:37～70

3 王魁汉. 温度测试技术. 东北工学院出版社,1991:54

4 汪裕炳,张全纯. 复合材料的结构连接. 北京:国防工业出版社,1992:271

5 胡永生,诸兴华等. 机械加工新技术. 机械工程师进修大学出版社,1989:27

6 周泽华. 金属切削原理. 上海科学技术出版社,1987:27

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net