

钎焊金刚石钻头制造过程热动力学仿真

柳 凯, 赵记兰, 伍亦文, 卜长根
(中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083)

摘要:本文以钎焊金刚石钻头为研究对象,对它在高温钎焊炉中的生产升温过程和降温冷却成型过程热动力学理论进行了分析总结,对整个实体模型从钎焊炉中取出后的降温冷却过程进行了数值仿真模拟。分析了钎焊金刚石钻头及石墨模具装配体降温过程的温度场,及其对钎焊钻头应力场的影响,分析了石墨心模与钎焊金刚石钻头之间的应力,并把仿真数据与解析解理论计算值进行比较,验证了钎焊金刚石钻头降温冷却过程数值仿真与理论解析值具有较好的一致性。

关键词:金刚石钻头;钎焊降温;温度场;应力场;数值仿真

中图分类号:P633.4⁺1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2016)09-0079-06

Thermal Dynamic Simulation for Manufacturing Process of Brazed Diamond Bit/LIU Kai, ZHAO Ji-lan, WU Yi-wen, BU Chang-gen (School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Taking the brazed diamond bit as research object, the paper analyzes and summarizes the thermal dynamic theory of the heating process in high temperature brazing furnace and the cooling molding process, and makes the numerical simulation for the cooling process on the whole entity model after being removed from the brazing furnace. By analyzing the temperature field of brazed diamond bit and cooling molding process as well as the effect of the temperature field on the stress field of brazed diamond bit, the stress between the inner graphite mold and the brazed diamond bit was also analyzed. The comparison was made on the simulation data with theoretical calculated values, which verified the good consistency between the numerical simulation and theoretical value of brazed diamond bit's cooling process.

Key words: diamond bit; brazing cooling; temperature field; stress field; numerical simulation

0 引言

近年来,随着我国工业发展步伐的加快,钎焊金刚石钻头以其粘结强度高、切削速度快、金刚石出刃高、使用寿命较长等优点,在地质、石油、建筑等行业发挥着越来越重要的作用。钎焊金刚石钻头的生产工艺正在逐步的完善过程中,但在生产过程中仍然会出现一些问题,由于钎焊工艺过程温度较高(970~1050℃),模具设计稍有不慎就会出现涨模或胎体裂纹。因此,找到一种行之有效的关于钎焊钻头模具和钢体尺寸的设计方法,是解决钎焊金刚石钻头问题的重点所在。

由于钎焊金刚石钻头装配体是由不同材料组成的,各材料的热物性参数差异较大,在降温冷却过程中,装配体各部分会产生不同程度的收缩,在胎体、钢体与内模接触面产生较大应力。应力过大时,可

能导致钎焊工具变形或产生较大内应力,降低其使用寿命。因此从提高金刚石钻头使用寿命,提高钻探效率,制定更加合理的加工方法这三方面来讲,对金刚石钻头钎焊降温过程的应力进行仿真研究具有重要意义。

本文在查阅总结前人对钎焊金刚石工具制造过程进行数值模拟研究的基础上,对其降温冷却过程进行仿真模拟,分析整个装配体模型在降温冷却过程中温度场和应力场的分布情况,得出自然降温冷却过程温度场以及在此过程中钎焊金刚石钻头产生应力场及其最大热应力,并与理论计算值进行对比。

降温冷却阶段就是将钎焊金刚石钻头从钎焊保温温度冷却到室温的温度变化。钢体和胎体材料的收缩程度大于石墨材料的收缩程度。刚开始冷却时,在组合的装配体中,随着温度的降低,胎体外模

收稿日期:2015-12-15;修回日期:2016-07-24

基金项目:中国地质调查局项目“长寿命钎焊金刚石钻头的研发”(编号:12120113096600)

作者简介:柳凯,男,汉族,1991年生,在读硕士研究生,机械工程专业,liukai19910830@126.com。

通讯作者:卜长根,男,汉族,1963年生,教授,探矿工程专业,工学博士,主要从事机械工程、地质工程方面的研究工作,北京市海淀区学院路29号,bucg@cugb.edu.cn。

间开始出现间隙,同时与内模的过盈量逐渐增大,由于过盈量可能会使钎焊金刚石钻头在制造过程中引起裂纹^[2-3]。因此,降温冷却阶段是一个极其重要的阶段。

1 钎焊钻头降温过程的建模

1.1 降温过程建模

对绳索取心钎焊金刚石钻头进行建模仿真。在 ANSYS 中对其模具装配体建立有限元实体模型,为了避免由于胎体部分产生复杂的温度云场,影响运算时间,以水口无金刚石的一体钎焊烧结的平底绳索取心钻头为建模对象。模型单元采用四面体的自由网格划分,有限元模型包含 11665 个节点,49746 个单元,有限元模型如图 1 所示。

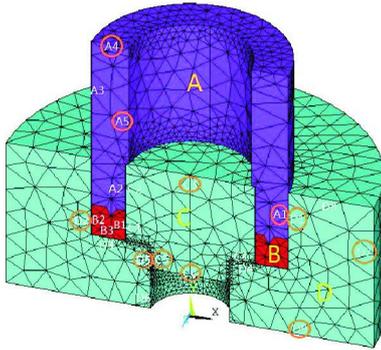


图 1 绳索取心金刚石钻头有限元模型

图 1 装配体有限元模型,紫色区域 A 为钻头钢体(45),红色区域 B 为钻头胎体(含金刚石),为 Ni-Cr 钎焊合金,蓝色区域 C、D 为装配体石墨模具,装配体物性参数^[4-7]见表 1,其中 45 钢和 Ni-Cr 合金的弹性模量、热膨胀系数、比热容、导热系数随温度变化而变化。

表 1 建模材料物性参数

材料	温度 T/ ℃	弹性模量 E/ GPa	热膨胀系数 $\alpha/(10^{-6}\text{m}\cdot\text{℃}^{-1})$	比热容 C/ [J·(kg·℃) ⁻¹]	导热系数 $\lambda/[W\cdot(\text{m}\cdot\text{℃})^{-1}]$	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	泊松比 μ
45 钢	20	200	11.6	472	47.5	7810	0.3
	100	201	11.9	480	43.5		
	200	193	12.3	498	40.4		
	300	190	13.1	524	38.1		
	400	172	13.7	560	36.0		
	500	146	14.2	615	34.2		
	600	121	14.7	700	32.0		
	700	96	15.1	854	28.7		
	800	71	12.5	806	26.5		
	900	45	13.6	637	25.9		
1000	20	14.4	602	24.0			
Ni-Cr 合金	20	186	11.5	510	12.4	8300	0.3
	100	180	11.9	536	13.6		
	200	174	12.4	569	15.1		
	300	168	13.2	617	17.1		
	400	162	13.5	634	18.4		
	500	160	13.8	668	20.1		
	600	147	14.3	705	21.9		
	700	134	14.9	752	24.0		
	800	98	15.3	811	26.5		
	900	60	15.8	889	29.6		
1000	30	16.4	1010	33.8			
石墨		11.5	3.8	710	50	1800	0.425

1.2 降温过程建模的边界条件

在金刚石钻头钎焊冷却过程中,实体模型在冷却中,各个面与外界存在着可能的热传导、热对流和热辐射。为了清楚地显示接触部位面的性质与热交换的类型,对实体模型的面进行编号设置,如图 1 所示(实体 A 的 A1 与实体 D 的 D1 间热交换面,以此类推)。在降温冷却过程中,需要对装配体接触部位进行接触设置^[9],接触面设置如表 2 所示。

表 2 各面接触设置

接触面	接触状态	原因	接触状态设置
钢体与胎体之间	接触不分离状态	金刚石钻头冷却结束后,钢体和胎体是紧紧连在一起不可分开的	将两个面粘结在一起
B1 与 C1、C5 与 D5	接触不分离状态,且接触面不发生相对移动	自由状态下,钻头胎体的收缩量大于心模的收缩量	两接触面之间有热阻,但热阻又不会太大,接触导热系数可取为 600 ^[10]
B3 与 D3、C4 与 D4	接触不分离状态,且接触面可发生滑移	材料不同会产生不同程度的收缩,会在径向产生相对滑移	接触导热系数同上,钻头胎体与石墨模具之间的摩擦系数取 0.15,石墨模具之间的摩擦系数取 0.1
A1 与 D1、B2 与 D2、A2 与 C2	出现小间隙	自由状态下,钻头钢体、胎体的收缩量大于外模的收缩量	此小间隙里没有空气的流通,忽略对流换热。随着降温的进行,A1 与 D1、B2 与 D2 之间,间隙变大,受到辐射换热;而 A2 与 C2 之间,间隙变小,忽略辐射换热

热对流和热辐射则是通过在物体表面施加对流换热系数和发射率来实现的。由于 ANSYS 模拟过程中无法同时读取施加在同一面上的对流和辐射载

荷,所以在施加辐射载荷时,需要在辐射面上覆盖一层 SHELL57 单元(图 1 中橘红色圈出的面),而后添加发射率。平面 A3、C3、C6、D6 可以看作在有限空

间里进行自然对流换热(参见图 2)。

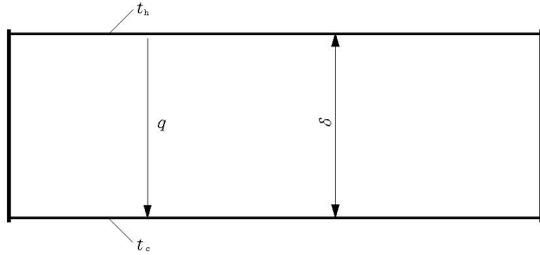


图 2 有限空间自然对流换热

其对流换热系数计算公式如下:

$$h = N_u \frac{\lambda}{\delta}$$

$$N_u = 0.197 (GrPr)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{H}{\delta}\right)^{-\frac{1}{9}}, 8.6 \times 10^3 \leq Gr \leq 2.9 \times 10^5$$

$$N_u = 0.073 (GrPr)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{H}{\delta}\right)^{-\frac{1}{9}}, 2.9 \times 10^5 \leq Gr \leq 1.6 \times 10^7$$

$$Gr = \frac{g\alpha_v(t_h - t_c)\delta^3}{v^2}$$

式中: N_u ——努塞尔数; δ ——有限空间的高度; Gr ——格拉晓夫数; Pr ——普朗特数; g ——重力加速度; α_v ——体胀系数; t_h ——高温部分的温度; t_c ——低温部分的温度; v ——运动粘度。

平面 A4、D8 为水平面向上自然对流换热(参见图 3)。

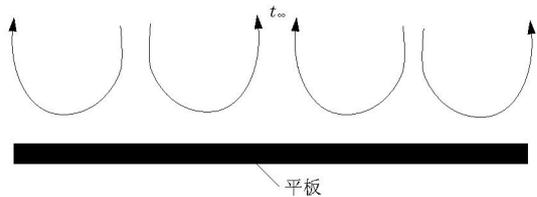


图 3 水平面向上自然对流换热示意图

其对流换热系数计算公式如下:

$$h = N_u \frac{\lambda}{l}$$

$$N_u = 0.54 (GrPr)^{\frac{1}{4}}, 10^4 \leq GrPr \leq 10^7$$

$$N_u = 0.15 (GrPr)^{\frac{1}{4}}, 10^7 \leq GrPr \leq 1.6 \times 10^{14}$$

$$Gr = \frac{g\alpha_v(t_h - t_c)l^3}{v^2}$$

式中: l ——特征长度,其表达式为 $l = A_p/P$; A_p ——换热平面的面积; P ——周界长度。

平面 D9 为水平面向下自然对流换热(参见图 4)。

其对流换热系数计算公式如下:

$$h = N_u \frac{\lambda}{l}$$

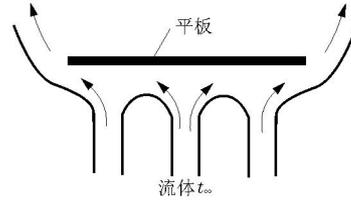


图 4 水平面自然对流换热示意图

$$N_u = 0.27 (GrPr)^{\frac{1}{4}}, 10^5 \leq GrPr \leq 10^{10}$$

$$Gr = \frac{g\alpha_v(t_h - t_c)l^3}{v^2}$$

平面 A5、D7 为竖壁面自然对流换热(参见图 5)。

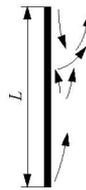


图 5 竖壁面自然对流换热示意图

其对流换热系数计算公式如下:

$$h = N_u \frac{\lambda}{L}$$

$$N_u = N_{um} = C (GrPr)^n$$

$$Gr = \frac{g\alpha_v(t_h - t_c)L^3}{v^2}$$

平面 A1、A2、B2、B3、C2、C4、C5、D2、D3、D4、D5 则没有对流换热。

各平面对流换热系数和热辐射发射率设置见表 3。

表 3 各平面对流换热系数和热辐射发射率

平面代号	对流状态	热对流系数			辐射状态	表面材料	发射率
		100 °C	500 °C	1000 °C			
C3		9.339	13.059	13.693	有	石墨	0.5
A3		9.202	12.868	13.493	无		
C6		4.022	6.437	6.971	有	石墨	0.5
D6					无		
A4	有	11.270	13.059	13.693		45 钢	0.8
D8					有	石墨	0.5
D9		4.448	6.220	6.522		石墨	0.5
A5		9.202	12.868	13.493		45 钢	0.8
D7		8.971	12.469	13.074		石墨	0.5
A1					有	45 钢	0.8
C5、D1、D2、D5						石墨	0.5
B2	无				有	镍铬合金	0.68
A2、D3、D4、C2、C4、B3					无		

2 钎焊钻头降温过程的温度场与应力场

2.1 仿真分析与讨论

2.1.1 温度场有限元分析

当实体从钎焊烧结炉中取出后,钎焊金刚石钻头及模具装配体开始自然缓慢地进行降温冷却。图6是实验过程中装配体模型外表面自然降温冷却至40、140、240、360、520、760 s时的实物图。而在ANSYS中,我们可以找到外表面降温至相同温度时的温度云图,并设置相同的温度色谱条(见图7)。从两者的对比中,可以看到,尽管ANSYS云图色差无法达到真实图温度色差变化精度,但两者温度变化非常相似,说明ANSYS仿真结果比较准确。

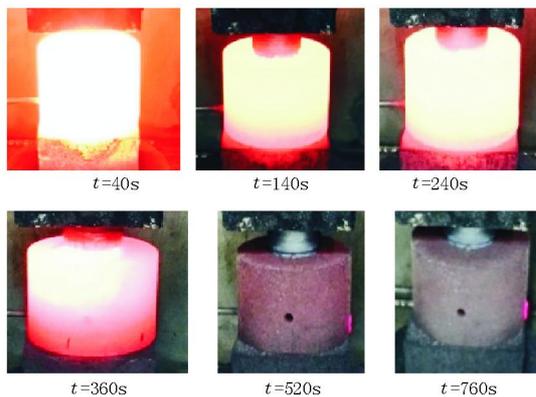


图6 钎焊烧结中降温40、140、240、360、520、760 s时图像

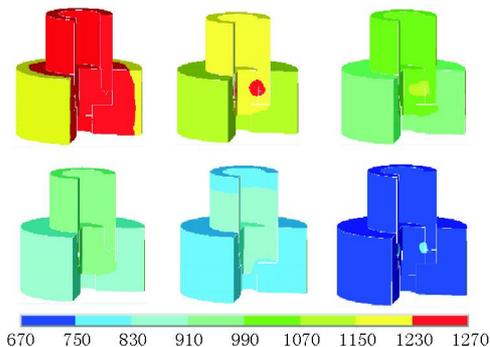


图7 降温40、140、240、360、520、760 s时的温度云图(温度单位/K)

观察装配体降温云图时,可以看到石墨模具降温速度快,其中外模外侧降温速度最快。钢体顶部与石墨模具芯模底部降温速度较快。金刚石钻头被石墨模具包裹的部位与芯模降温速度较慢,如图8所示。

基于仿真结果,提取钎焊金刚石钻头及模具装配体整个实体模型在降温冷却过程中最高温度和最低温度的差值如图9所示。从图中可以看出,时间 $t=0$ s时刻,模型各点温差为 0°C 。在降温初期,由于模具降温最快,而模型中心几乎无温降,导致温差迅速上升。之后随着自然降温冷却的进行,模型中

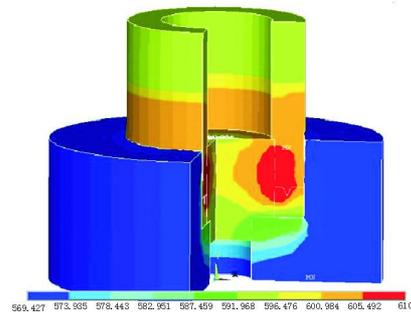


图8 模型温度云场图(温度单位/K)

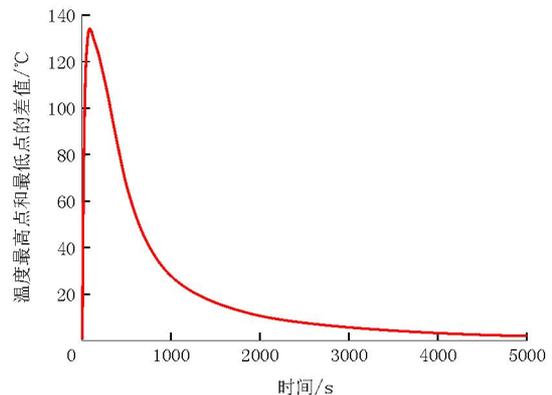


图9 温度最高点与温度最低点的温差图

各点的温差在逐渐地减小。

2.1.2 应力场有限元分析

取钎焊金刚石钻头1/4降温冷却后的应力云图(见图10)。从图10可以直观地看出,钎焊金刚石钻头的胎体部分产生了较大的热应力,为了更清楚地显示钻头上的应力值,分别提取3个特殊节点1、2、3的应力。在ANSYS中查看这3个节点的等效应力随时间的变化情况如图11所示。

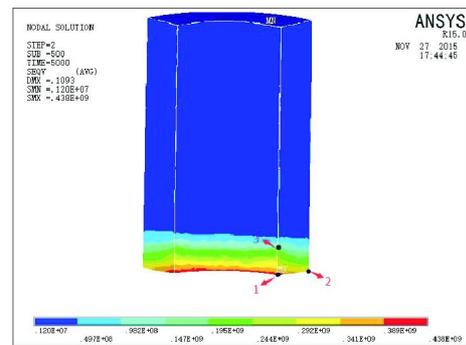


图10 钎焊金刚石钻头应力云图

从图11可以看出,钎焊金刚石钻头的胎体部分产生了较大的热应力,随着降温冷却的进行,在1000 s之内,各节点的等效应力值逐步增大明显,然后趋于不变,最大等效应力出现在钻头胎体内侧底

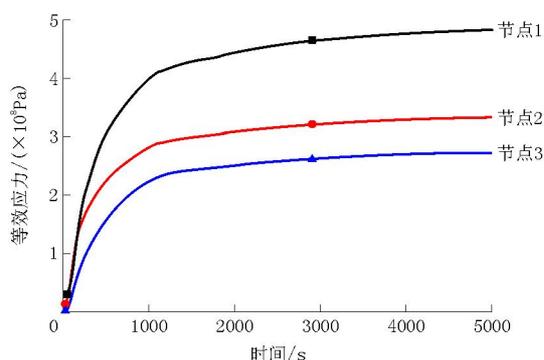


图 11 等效应力随时间的变化曲线图

部,最大等效应力值达到 438 MPa。另外,钻头胎体

$$\begin{cases} \sigma_r = -\frac{\Delta T(\alpha_g - \alpha_m)}{\frac{R_{bi}(1 + \alpha_g \Delta T)}{E_m(R_{bo}^2 - R_{bi}^2)} \left[\frac{R_{bo}^2(1 + \mu_m)}{R_{bi}} + (1 - \mu_m)R_{bi} \right] + \frac{1 - \mu_g}{E_g}(1 + \alpha_m \Delta T)} \\ \sigma_\theta = -\frac{(R_{bo}^2 + R_{bi}^2)\Delta T(\alpha_g - \alpha_m)}{\frac{R_{bi}(1 + \alpha_g \Delta T)}{E_m} \left[\frac{R_{bo}^2(1 + \mu_m)}{R_{bi}} + (1 - \mu_m)R_{bi} \right] + \frac{1 - \mu_g}{E_g}(1 + \alpha_m \Delta T)(R_{bo}^2 - R_{bi}^2)} \end{cases}$$

式中降温过程的温度差 $\Delta T = 940\text{ }^\circ\text{C}$, 钻头胎体内径 $2R_{bi} = 49.4\text{ mm}$, 钻头胎体外径 $2R_{bo} = 75\text{ mm}$; 石墨热膨胀系数 α_g 、弹性模量 E_g 、泊松比和 Ni - Cr 合金泊松比 μ_m 不随温度变化(见表 1), 而 Ni - Cr 合金的热膨胀系数 α_m 、弹性模量 E_m 是随温度变化的, 近似取平均值 $\alpha_m = 13.9 \times 10^{-6}\text{ m}/^\circ\text{C}$ 和 $E_m = 131.1\text{ GPa}$ 。将参数值代入公式中, 得到钻头胎体与石墨模具芯模之间的径向应力 σ_r 和切向应力 σ_θ 为 130.8 MPa 和 331.86 MPa。

由于在降温冷却过程中整个实体模型处于收缩状态, 钻头胎体与石墨模具芯模之间受到了相互作用力的影响, 从而在两者的接触表面产生了径向应力 σ_r 和切向应力 σ_θ 。选取钻头胎体上的点 A, 此点所受到的 $\sigma_r = \sigma_x, \sigma_\theta = \sigma_y$, 如图 12 所示。

将节点 A 的径向应力和切向应力随时间的变化关系转换成随温度的变化关系, 得到径向应力 σ_r 和切向应力 σ_θ 随温度的变化曲线(见图 13)。

钎焊金刚石钻头及模具装配体实体模型在降温冷却过程中, 随着温度的降低, 节点 A 的径向应力 σ_r 和切向应力 σ_θ 增大。由理论计算与仿真实验的比较, 从图 13 可以看出, 径向应力 σ_r 、切向应力 σ_θ 仿真值与理论值接近; 当温差 $\Delta T = 940\text{ }^\circ\text{C}$, 钻头胎体与石墨模具芯模之间的径向应力 σ_r 和切向应力 σ_θ 为 115.2 MPa 和 312.3 MPa。

外侧底部的应力值达到 321 MPa(由于水口材质原因, 实际应力偏小)。

2.2 钎焊热应力解析与仿真数据对比分析

从理论上讲, 由钎焊金刚石钻头的结构可以知道, 刚体的内径要略大于钎焊胎体部分的内径(在设计内模时为了便于脱模, 会留有一定的余量), 因此应力主要集中在 Ni - Cr 合金和石墨模具芯模之间。钎焊烧结金刚石钻头降温冷却时胎体与芯模之间的径向应力和切向应力公式^[1]如下:

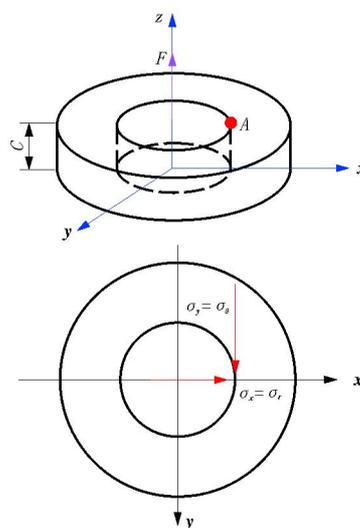


图 12 选取节点 A 受力示意图

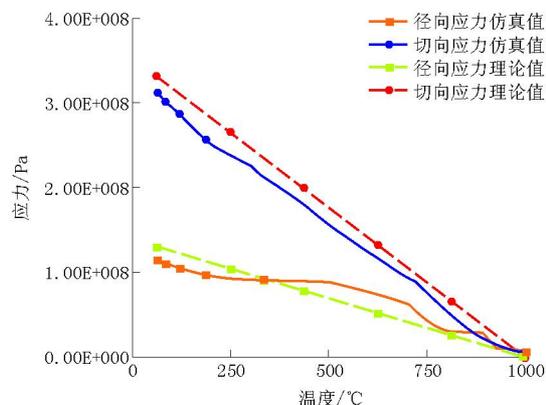


图 13 径向应力和切向应力仿真与理论值随温度的变化曲线

由于钻头胎体的弹性模量随温度呈非线性变化,仿真分析的胎体弹性模量与解析解的数值存在区别,会引入应力仿真值与理论计算值差异,总体看径向应力 σ_r 和切向应力 σ_θ 仿真值与解析值相差不大,仿真结果与理论解析值具有较好的一致性。

3 结论

依托钎焊金刚石钻头制造成型过程,采用软件ANSYS研究了钎焊金刚石钻头及模具装配体钎焊降温过程温度场的应力变化,主要结论如下。

(1)在整个降温过程中,石墨模具底模外侧的降温速度最快,石墨模具芯模、钻头钢体和胎体部分降温速度较慢。

(2)钎焊金刚石钻头胎体内侧与石墨芯模则紧紧箍在一起,导致两者之间产生了切向与径向应力,仿真结果与理论解析值具有较好的一致性。

参考文献:

- [1] W. Y. Song, F. B. Liu, C. G. Bu, et al. Analysis on the Thermal Stress of Brazed Diamond Bit during Cooling Process[J], *Procedia Engineering*, 2014, 73: 48-54.
- [2] 赵记兰. 钎焊金刚石钻头降温冷却过程热动力学仿真[D]. 北

- 京:中国地质大学(北京),2014.
- [3] 伍亦文. 金刚石钻头钎焊过程热动力学仿真[D]. 北京:中国地质大学(北京),2012.
- [4] 何源. 单层钎焊金刚石工具的残余应力分析[D]. 江苏南京:南京航空航天大学,2005.
- [5] 陈燕. 高温钎焊金刚石磨料热损伤分析及其控制对策的基础研究[D]. 江苏南京:南京航空航天大学,2008.
- [6] 缪树良. 石墨模具对金刚石锯片刀头质量的影响[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2008, (1): 54-56.
- [7] 余庆玲. 高温钎焊金刚石结合机理研究与热应力建模仿真[D]. 北京:中国地质大学(北京),2010.
- [8] 苗恩铭, 费业泰. 两种膨胀系数热变形计算误差分析[J]. *工具技术*, 2003, 37(9): 43-45.
- [9] 张洪才, 何波. 有限元分析——从入门到实战[M]. 北京:机械工业出版社, 2011.
- [10] 杨华威, 袁广江, 肖刘. ANSYS接触单元在接触热阻仿真中的应用[J]. *微波学报*, 2012, (S2): 241-244.
- [11] 杨世铭, 陶文铨. 传热学(第四版)[M]. 北京:高等教育出版社, 2006: 41-45.
- [12] 葛绍岩, 那鸿悦. 热辐射性质及其测量[M]. 北京:科学出版社, 1989.
- [13] 林瑞泰. 热传导理论与方法[M]. 天津:天津大学出版社, 1992.
- [14] 张芳. 高温钎焊金刚石残余应力的基础研究[D]. 江苏南京:南京航空航天大学, 2008.
- [15] 周思柱, 杨世奇. 金刚石钻头有限元应力分析[J]. *石油天然气学报*, 1997, 19(4): 67-69.

(上接第78页)

表7 锚索抗拔承载力检测结果汇总

锚索位置	受检锚索编号	锚索长/m	自由段长/m	轴向拉力标准值/kN	最大加荷值/kN	最大位移量/mm	自由段理论弹性伸长度80%/mm
常规锚索第一道	ZY1-1	30	10	360	504	36.64	34.29
	ZY1-2	30	10	360	504	35.19	34.29
	ZY1-3	30	10	360	504	38.30	34.29
	ZY1-4	30	10	360	504	38.07	34.29
	ZY1-5	30	10	360	504	36.77	34.29
常规锚索第二道	ZY2-1	29	7	430	602	31.52	28.66
	ZY2-2	29	7	430	602	31.93	28.66
	ZY2-3	29	7	430	602	34.27	28.66
扩大头锚索第二道	QYK2-1	20	10	410	574	42.22	39.05
	QYK2-2	20	10	410	574	44.77	39.05
	QYK2-3	20	10	410	574	43.69	39.05
	ZYK2-1	20	10	410	574	45.42	39.05
	ZYK2-2	20	10	410	574	43.15	39.05
	ZYK2-3	20	10	410	574	41.83	39.05

扩大头锚索比普通锚索的锚固段长度可以减少,因此锚索总工程量可以减少,工程量和总造价可以减少30%,节约造价,因此,在深基坑支护工程中有很

好的推广应用前景,对复杂地层下的深基坑工程锚索支护施工具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 张小平, 牛道纯, 张元平. 扩大头锚索技术在基坑支护工程中的应用[J]. *西部探矿工程*, 2008, (12): 27-28.
- [2] 李云峰, 彭小林. 扩大头锚索在地铁深基坑施工中的应用[J]. *建筑监督检测与造价*, 2008, 10(1): 25-28.
- [3] 黄小平, 平扬, 张梁. 扩大头锚索在某复杂环境下深基坑支护工程中的应用[J]. *中国农村水利水电*, 2013, (6): 139-140.
- [4] 邹思源. 扩大头锚索在深基坑支护工程中的应用[J]. *建筑施工*, 2010, 11(32): 1116-1118.
- [5] 黄爱兵. 扩大头预应力锚索在深基坑中的应用[J]. *建设施工*, 2015, (2): 154-156.
- [6] 戴巍巍. 深基坑支护工程施工旋喷锚索与常规锚索技术比较[J]. *建筑科学*, 2015, (13): 153.
- [7] 朱振华, 张俊利, 杨春发. 预应力扩大头锚索在深基坑支护工程中的应用[J]. *湖南城市学院学报*, 2011, 4(20): 17-19.
- [8] JGJ 120—2012, 建筑基坑支护技术规程[S].
- [9] 高谦, 罗旭, 等. 现代岩土施工技术[M]. 北京:中国建材工业出版社, 2006: 122.
- [10] 陈礼仪, 胥建华. 岩土工程施工技术[M]. 四川成都:四川大学出版社, 2008: 137.
- [11] 付青山, 孔繁全. 岩土施工项目管理[J]. *山西建筑*. 2009, (22).