

大型 TC4 钛合金试样的退火处理模拟及变形机制研究

郅喜望^{1,3} 吴国清² 张琦¹ 南海³

(1.华中科技大学材料科学与工程学院; 2.北京航空航天大学材料科学与工程学院;
3.北京航空材料研究院股份有限公司)

摘要 针对铣削加工后 TC4 钛合金试样的退火变形问题,统计分析了机械加工方式对试样表层初始应力分布的影响并模型化,基于有限元模拟研究了残余应力、热处理冷却速度、结构长度等因素对试样热处理变形的影响。结果发现,对钛合金和铝合金试样,铣削加工造成的残余应力以压应力为主,应力随层深的增加呈近似“半 S 形”分布。考虑铣削加工带来的残余应力分布模型与未考虑铣削加工应力分布的理论模型计算结果相比,试样的热处理变形程度随着铣削加工精度的提高有增大的趋势。随着冷却速率增加,钛合金试样的变形程度增加,并呈近抛物线趋势。施加约束可改善大型钛合金长薄壁试样的变形程度,试样热处理变形对约束的施加位置较为敏感。

关键词 钛合金;整体结构件;热处理;数值模拟;残余应力

中图分类号 TG146.23;TG156;TP311 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.10.004 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Annealing Simulation and Deformation Mechanism of Large-scale TC4 Titanium Alloy Specimens

Qie Xiwang^{1,3}, Wu Guoqing², Zhang Qi¹, Nan Hai³

(1.School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology;
2.School of Materials Science and Engineering, Beihang University;
3.Beijing Institute of Aeronautical Materials Co., Ltd.)

Abstract: Aiming at the annealing deformation problem of typical TC4 titanium alloy specimen after milling, the effect of machining mode on the initial stress distribution of specimen surface was statistically analyzed and modeled. The influence of residual stress, cooling rate of heat treatment and structural length on heat treatment deformation were discussed based on the finite element model. The results indicate that for titanium alloy and aluminum alloy specimens, the residual stress caused by milling is dominated by compressive stress, and the stress distribution presents approximately “half S shape” with the increase of layer depth. Compared with the theoretical model that ignore the residual stress distribution caused by milling, the deformation degree of the model specimen that consider residual stress distribution has a tendency to increase with the increase of milling accuracy. With the increase of cooling rate, the deformation degree of titanium alloy specimen is increased and presents a parabolic trend. By applying constraints, the deformation degree of large-scale titanium alloy specimens with long and thin wall can be improved, and the heat treatment deformation of specimens is sensitive to the position of constraints.

Key Words: Titanium Alloy, Integral Structure, Heat Treatment, Numerical Simulation, Residual Stress

近年来,在飞机、航天器等结构设计和制造中,一些大型复杂结构零件,尤其是主承力结构件,普遍采用了整体化结构设计^[1]。整体结构件具有质量轻、结构效率高、装配工作量大、可靠性高等特点,也具有尺寸大、结构复杂、刚性弱等问题,对后续的加工和热处理提出了更高的要求。整体结构件机械加工后的热处理往往带来弯曲、扭曲或弯扭组合等变形问题,使得试样尺寸超差,精度难以达到设计要求,甚至报废^[2~4]。

收稿日期:2021-11-30;修改稿收到日期:2022-03-04
基金项目:科工局大客发动机材料专项基金资助项目(JPPT-KF2008-6-1)
第一作者简介:郅喜望,男,1982 年出生,高级工程师,北京(100095),E-mail:qiexiwang@baimtec.com.cn
通信作者:张琦,男,1997 年出生,硕士研究生,武汉(430074),E-mail:zhang_qi7@hust.edu.cn
引用格式:郅喜望,吴国清,张琦,等. 大型 TC4 钛合金试样的退火处理模拟及变形机制研究[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(10):1 210-1 215.
LUO X W, WU G Q, ZHANG Q, et al. Annealing simulation and deformation mechanism of large-scale TC4 titanium alloy specimens[J].
Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(10):1 210-1 215.

结构件经过机械加工后在表层一定深度范围内存在残余应力^[5~7],热处理过程因伴有温度和组织结构的变化而产生热应力和组织应力。因此,结构件的热处理变形是热应力、组织应力和机械加工残余应力在热处理过程综合作用的结果。本课题引入了不同铣削加工精度的残余应力分布模型,探讨了铣削加工精度对试样热处理变形程度的影响;运用该模型分析了冷却速率变化和试样结构长度变化对试样热处理变形的影响,初步探讨了约束对热处理变形的影响,为大型整体结构件的热处理变形控制提供参考。

1 机械加工残余应力分布模型

以钛、铝合金试样为研究对象,建立机械加工造成的试样残余应力分布模型的统计学方法,获得不同铣削加工精度下试样初始残余应力分布的统计学模型,为研究铣削加工残余应力对试样热处理变形影响提供参考。

1.1 试样应力分布与机加工方式关系的统计学研究

航空整体结构件热处理前一般都要经过铣削加工,加工带来的残余应力分布受到试样材料以及铣削加工量等因素的影响且呈现一定的规律性^[8~12]。为了能够对统计结果进行对照,对 205 组钛合金残余应力数据,以及 356 组铝合金残余应力数据进行了统计,并按试样材料、加工种类、切削参数进行分类,见图 1。可以看出,合金试样不同铣削加工方式带来的残余应力分布具有普遍的分布规律,即残余应力存在于表层较小的深度范围内,以压应力为主,且最大压应力出现在距离试样表面一定深度区域。由此,在统计分析中,需要关注的的数据为:表面残余应力值、最大残余应力值以及其出现的层深、残余应力影响深度、基体残余应力值等。

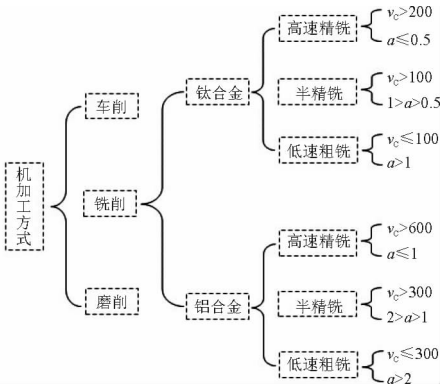


图 1 铣削加工方式的统计学划分

(v_c 为铣削速度, m/min; a 为铣削深度, mm)

Fig.1 Statistical division of milling processing methods

1.2 典型试样铣削加工整体应力分布状态的预测模型

借鉴 CARUSO S 等^[13]根据车削加工 AISI52100 钢提出的残余应力分布曲线规律以及文献^[14~16],针

对钛、铝合金铣削加工后的试样提出了铣削加工带来残余应力的“半 S 形”分布示意图,见图 2,并在此基础上定义表层残余应力(σ_{surface})、最大残余应力(σ_{max})、基体残余应力(σ_{basic})、最大应力对应的层深(h_{max})、应力影响层深度(h_{tol})5 个特征参数。

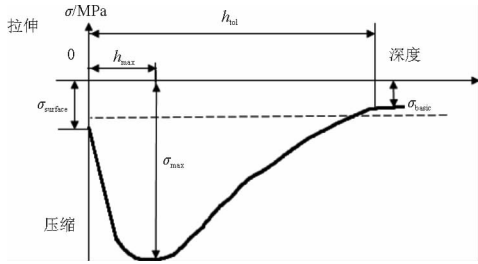


图 2 铣削加工导致的残余应力分布模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of residual stress distribution model caused by milling

“半 S 形”分布模型可用残余应力值(σ)与层深(h)的关系如下:

$$\sigma = a \cdot h^3 + b \cdot h^2 + c \cdot h + d \tag{1}$$

式中, a 、 b 、 c 、 d 为系数。对铣削加工残余应力沿层深分布的数据进行拟合,可得到钛合金、铝合金不同铣削方式带来的残余应力沿层深分布的统计模型,对应的函数曲线见图 3,数学模型系数见表 1。

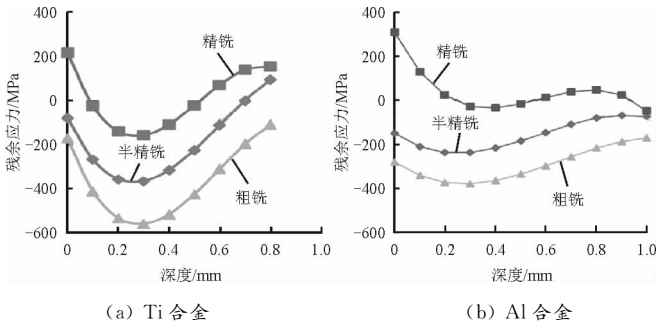


图 3 铣削加工引入试样表层的残余应力沿层深分布的统计模型

Fig.3 Statistical model of residual stress distribution along the layer depth introducing milling process

对比钛、铝合金材料铣削加工所致的残余应力分布模型可知,铣削加工对铝合金的层深影响略大于钛合金,同样铣削方式下,钛合金试样内的最大残余压应力值大于铝合金试样的。可见,材料对铣削加工所致的残余应力大小及其影响深度有一定的影响。这是在铣刀切削过程中材料内部的冷、热弹塑性变形综合作用的结果。受到材料自身屈服极限的限制,铣削加工所产生的残余应力,不可能大于试样材料塑性变形的应力极限,使试样向“强化”和“颈缩”方向发展。因此屈服极限大的材料,铣削加工的残余应力亦比较大。同时,硬度较高的材料的塑性变形层深度较浅,铣削加工后残余应力分布层深度则相应较浅^[17]。本课题统计所获得的模型符合这一规律,可以较好地反映实际情况。

表 1 不同铣削方式所致合金工件残余应力分布模型系数及特征参数表

Tab.1 Coefficients and characteristic parameters of residual stress distribution model of workpiece caused by different milling methods										
材料	类别	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	$\sigma_{\text{surface}}/\text{MPa}$	$\sigma_{\text{max}}/\text{MPa}$	$\sigma_{\text{basic}}/\text{MPa}$	h_{max}/mm	h_{tol}/mm
钛合金	粗铣	-3 942	7 065	-3 049	-173.1	-190	-570	-100	0.3	0.8
	半精铣	-3 257	5 914	-2 430	-81	-100	-380	+80	0.3	0.8
	精铣	-4 982	7 804	-3 131	214	+205	-180	+100	0.3	0.7
铝合金	粗铣	-935.1	1 843	-798.2	-278.7	-280	-390	-100	0.2	1.0
	半精铣	-1 131	1 986	-778.5	-149.9	-160	-220	-80	0.2	1.0
	精铣	-2 492	4 323	-2 187	308.5	+300	-50	+30	0.3	0.8

2 钛合金试样退火处理的有限元模拟

基于 ANSYS 有限元软件,针对钛合金试样退火处理,选取合适的有限元理论模型;针对试样热处理变形的特点,定义表示变形程度的特征几何参数,并将铣削加工初始残余应力分布模型引入到有限元模型中。

2.1 大型钛合金试样的几何模型及热物性参数

TC4 钛合金试样模型见图 4,其外形尺寸为 1 000 mm×200 mm×40 mm,筋板厚度为 10 mm,高度为 30 mm,两筋板中心的间距为 110 mm。TC4 钛合金热物性参数见表 2。

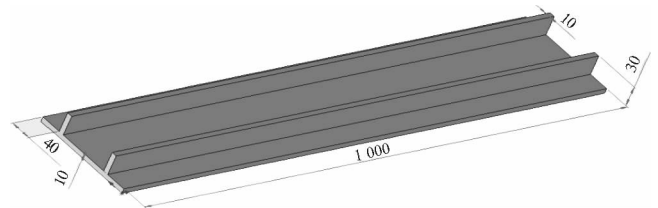


图 4 TC4 钛合金试样几何模型

Fig.4 Geometric model of TC4 titanium alloy specimen

表 2 TC4 钛合金热物性参数与力学性能

Tab.2 Thermalphysical parameters and mechanical properties of TC4 titanium alloy								
温度/ ℃	弹性模量/ GPa	剪切模量/ GPa	屈服应力/ MPa	热膨胀系数/ (10 ⁻⁶ · K ⁻¹)	热导率/ (W· m ⁻¹ ·K ⁻¹)	比热容/ (J·kg ⁻¹ · K ⁻¹)	泊松比	密度/ (g· cm ⁻³)
20	125	44	803.89	8.78	6.8	611	0.342	4.44
250	110	40	701.32	9.83	8.7	653	—	—
400	100	36	605.32	10.68	10.3	691	—	—
600	74	32	500.82	11.42	13.72	749.3	—	—
700	55	20	462.10	12.01	16.23	812.4	—	—
800	27	10	397.12	12.21	17.31	596.3	—	—
850	5	2	321.37	12.37	17.86	952.5	—	—

2.2 大型钛合金试样退火过程的工艺路线

大型钛合金试样实际退火工艺为:升温阶段约 40 min,退火温度为 552 ℃,保温时间为 1~2 h,冷却过程充入氩气最快可以 1 h 内冷却至 50 ℃。由于退火升温、保温、冷却阶段中,冷却过程对试样热处理变形的影响较为明显,在研究热处理工艺对变形的影响时,采用固定 30 min 加热(速率约为 17 ℃/min),在 552 ℃下保温 1 h,冷却速率则在 0.5~40 ℃/min 之间变化,包含

常用的退火冷却速率区间(2~8 ℃/min),以便后续研究冷却速率对热处理变形的影响,从而找出最优的热处理工艺。制定了几种不同的热处理工艺路线,见图 5。

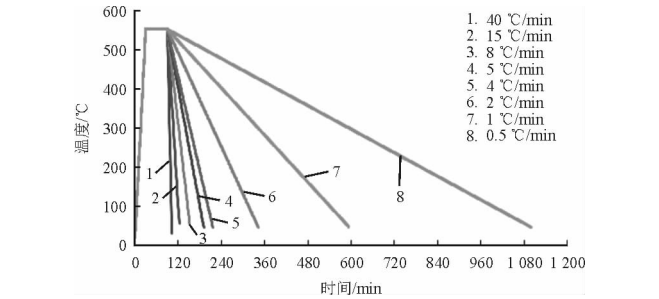


图 5 制定的退火工艺曲线

Fig.5 Formulated annealing process curves

2.3 大型钛合金试样退火变形的参数表征

由大型钛合金试样典型热处理工艺下的变形结果可知,试样退火后中间向上拱起,筋板分别向两侧偏转一定的角度。为了后续比较不同的工况下热处理变形的差别,找出工艺条件等因素对热处理变形的影响,根据试样变形的特点,定义了 4 个参数来表征试样的变形情况,即最大拱起高度 l_0 ,横向拱起角度 α ,纵向拱起角

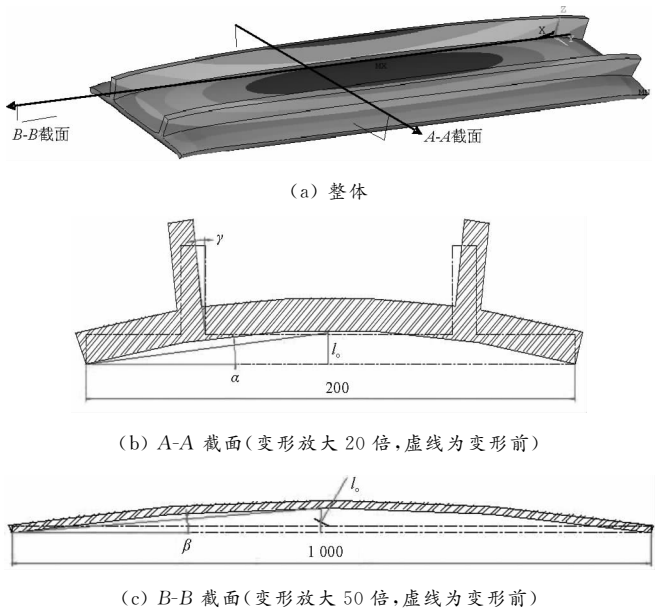


图 6 试样热处理变形典型云图及变形特征参数的表征示意图
Fig.6 Typical deformation nephogram of heat-treated deformation and schematic diagram of deformation characteristic parameters of specimens

度 β ,筋板的偏转角度 γ 。

3 钛合金热处理变形影响因素及控制

通过计算模拟试样在不同铣削加工精度、不同冷却速度、不同结构长度下的热处理过程,重点探讨机械加工带来的残余应力分布、热处理过程的冷却速率、试样结构长度等因素对试样热处理变形的影响,初步探索约束对试样热处理变形的影响。

3.1 初始应力场

图 7 为不同铣削加工精度与最大拱起高度 l_0 、横/纵向拱起、筋板偏转角度的柱状关系图。分析可知,随着铣削加工精度的降低,试样的热处理变形有增大的趋势,粗铣造成的试样热处理变形比精铣高出一倍以上。

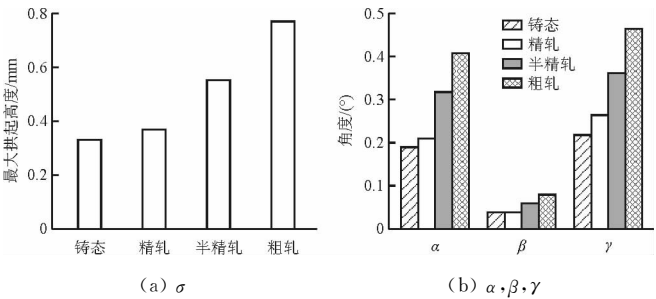


图 7 不同铣削加工精度与变形参数关系图
Fig.7 Relationship histogram of different milling precision and deformation parameters

3.2 冷却速率

图 8 为试样拱起高度 l_0 随冷却速率的变化情况。可以看出,随着冷却速率增加,试样的变形程度增加,并呈近抛物线趋势。在冷却速率低于 $15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时,试样热处理变形程度对冷却速率较为敏感,超过该冷却速率,试样热处理变形程度的增大趋势变缓。

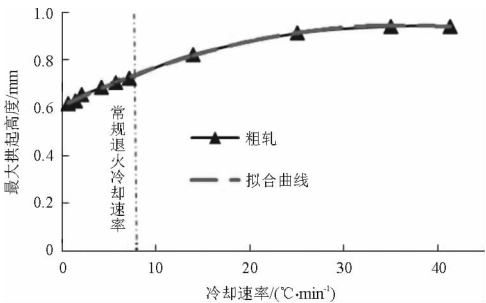


图 8 试样拱起高度 l_0 随冷却速率的变化
Fig.8 Variation of arch height l_0 of specimen with cooling rate

3.3 结构特征

定义从图 6c 中 B-B 截面上平板下表面从中心到边缘(表征工件的纵向变形)的距离为节点路径 b ,定义从路径 b 边缘算起变形量达到总变形量 90% 的区域为

主变形区。图 9 为最大拱起高度 l_0 和主变形区长度随试样结构长度的变化曲线。可以看出,对于大型钛合金长薄壁试样,随着试样结构长度在一定范围内增加,试样的退火变形程度如最大拱起高度 l_0 、主变形区长度明显增加,当试样结构长度达到一定值(长宽比大于 10)时对试样热处理变形的增大趋势变缓。

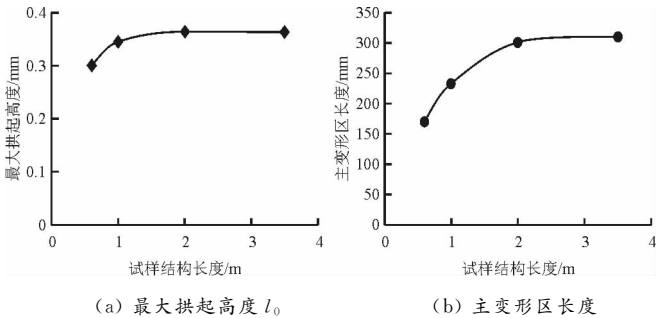


图 9 最大拱起高度 l_0 和主变形区长度随试样结构长度的变化曲线

Fig.9 Variation of maximum arch height l_0 and length of main deformation zone with the length of specimen structure

3.4 约束条件

钛合金试样无约束条件下热处理变形表现为中心区域向上拱起,而变形梯度较大的区域(主变形区)集中在试样的两端部位,结合试样的变形特点设计了几种典型的刚性约束条件,初步探索了约束位置对试样退火处理变形的影响。

使用的约束块尺寸为 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$,约束块与试样之间的间隙为 0.2 mm ,采用刚性接触方式。所设计的约束情况见图 10,其中约束方式①:约束位置为试

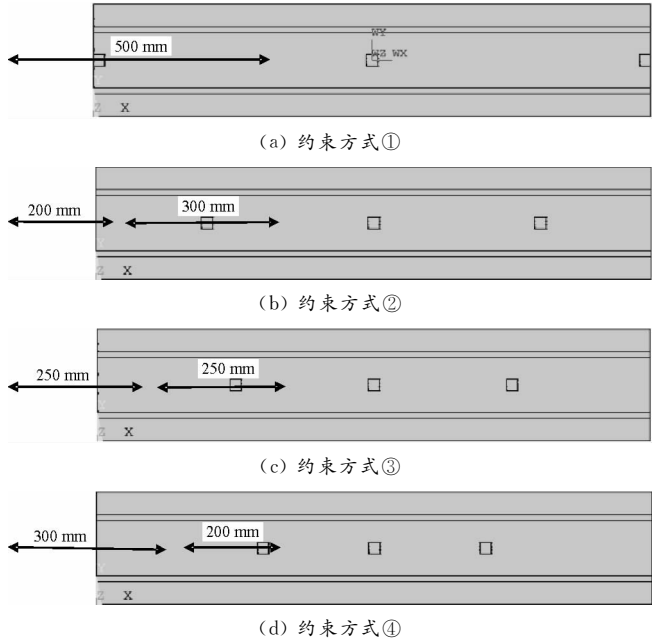


图 10 试样热处理变形控制的 4 种约束条件
Fig.10 Four constraint conditions for deformation control of specimens during heat treatment

样长度方向的中心点和两端(距离中心点 500 mm);约束方式②:约束位置为试样结构长度方向的中心点和距离中心点 300 mm 处;约束方式③:约束位置为试样长度方向的中心点和距离中心点 250 mm 处;约束方式④:约束位置为试样长度方向的中心点和距离中心点 200 mm 处。除了使用主板下表面路径 b 外,还定义了主板上表面路径 b' (从中心到边缘,和路径 b 平行,见图11),同时采用试样主板上表面两条路径上的节点

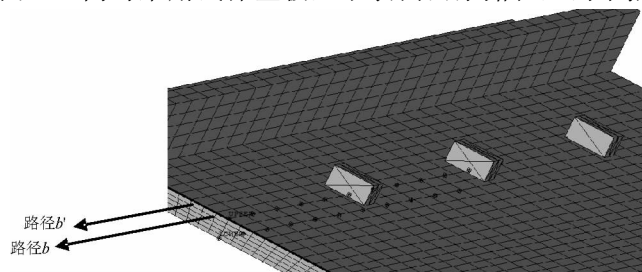
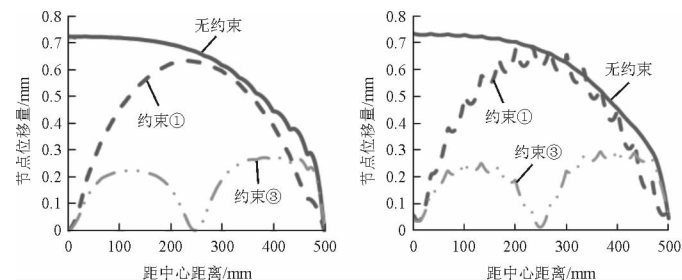


图 11 b 、 b' 路径示意图

Fig.11 Schematic diagram of b 、 b' paths



(a) 路径 b , 约束方式①和约束方式③ (b) 路径 b' , 约束方式①和约束方式③ (c) 路径 b , 约束方式②和约束方式④ (d) 路径 b' , 约束方式②和约束方式④

位移数据来表征试样的变形情况。

图 12 为试样在有无约束条件下的热处理变形情况。可以看出,通过施加约束,可以在一定程度上改善试样的变形程度,试样热处理变形对约束的施加位置较为敏感。相比较而言,采用约束方式③即将约束位置定为试样长度方向的中心点和距离中心点 250 mm 处,可获得较好的变形控制效果;而采用约束方式①即将约束位置定为试样长度方向的中心点和两端时,对试样变形控制并不理想。当采用约束方式②和④时,试样下表面变形(路径 b)过渡平稳,而上表面变形(路径 b')存在较大幅度的波动,说明计算结果的收敛性不好,这可能与施加的约束为刚性约束有关。结果表明,对试样施加刚性约束的热处理变形控制模拟会影响计算结果收敛性,在未来研究中,可考虑借鉴铣削加工变形模拟中所采用的弹簧弹性约束方式来模拟约束条件。

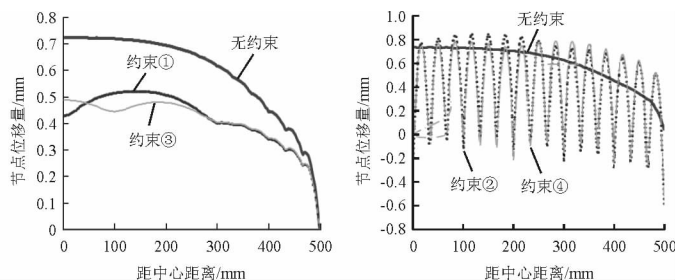


图 12 试样在有无约束条件下的热处理变形情况

Fig.12 Heat treatment deformation of specimens with or without constraints

4 结 论

(1)对钛合金和铝合金试样而言,铣削加工造成的残余应力以压应力为主,应力随层深的增加呈近似“半 S 形”分布。

(2)考虑铣削加工带来的残余应力分布模型与未考虑铣削加工应力分布的理论模型计算结果相比,试样的热处理变形程度随着铣削加工精度的提高有增大的趋势。钛合金试样退火处理模拟表明,随着冷却速率增加,试样的变形程度增加,并呈近抛物线趋势。

(3)通过施加约束,可改善大型钛合金长薄壁试样的变形程度,试样热处理变形对约束的施加位置较为敏感。

参 考 文 献

- [1] 吴红兵,柯映林,刘刚,等. 航空框类整体结构件铣削加工变形研究[J].浙江大学学报(工学版), 2009(3): 546-550.
- [2] 龙国荣,欧阳承,马军. L15 飞机整体结构件制造变形分析与控制[J].教练机, 2010(4): 82-86.
- [3] 王广生,张善庆.航空热处理特点和发展[J]. 航空材料学报, 2003

(S1): 250-255.

- [4] 王广生.航空热处理技术改造[J]. 热处理技术与装备, 2007(2): 1-10.
- [5] 陈磊,吴运新,胡永会,等. 交变载荷对铝合金板表面残余应力的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(2): 8-10.
- [6] 孙雅洲,刘海涛,卢泽生. 基于热力耦合模型的切削加工残余应力的模拟及试验研究[J]. 机械工程学报, 2011(1): 187-193.
- [7] 张亦良,黄惠茹,李想. 车削加工残余应力分布规律的实验研究[J]. 北京工业大学学报, 2006(7): 582-586.
- [8] 董兆伟,张以都,刘胜永. 铣削过程中残余应力仿真分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2005(7): 762-765.
- [9] 贾春燕. 机加工中残余应力的产生和处理[J]. 机械, 2010(S1): 79-81.
- [10] 王立涛,柯映林,黄志刚,等. 铝合金材料数控加工残余应力的分析[J]. 机械工程学报, 2004(4): 123-126.
- [11] LEE C, CHANG K. Finite element simulation of the residual stresses in high strength carbon steel butt weld incorporating solid-state phase transformation[J]. Computational Materials Science, 2009, 46(4): 1 014-1 022.
- [12] DUTTA M, BRUNO G, EDWARDS L, et al. Neutron diffraction measurement of the internal stresses following heat treatment of a plastically deformed Al/SiC particulate metal-matrix composite[J]. Acta Materialia, 2004, 52(13): 3 881-3 888.

中大型钢锭电渣冶金制备技术研究进展

赵黎廷 陈 瑞 高云保 韩 智 李瑞新 李景明 温秋林
(沈阳铸造研究所有限公司)

摘 要 由于电渣重熔法具有金属纯净、组织致密、铸锭表面光洁等特点,针对条件要求苛刻的中大型钢锭已广泛采用电渣重熔及其衍生技术进行生产。对电渣重熔技术、液态电渣技术、双回路电渣重熔技术、电渣熔焊技术 4 项中大型钢锭生产技术的原理及研究进展进行介绍和评价。随着电渣复合概念的普及,提出采用电渣铸焊技术生产中大型钢锭,并对其技术优势进行阐述。

关键词 电渣重熔;液态电渣;双回路电渣重熔;电渣熔焊;电渣铸焊

中图分类号 TF14;TG261 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.10.005 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Research Progress in Electroslag Metallurgical Preparation Technology
for Middle and Large Steel Ingots

Zhao Liting, Chen Rui, Gao Yunbao, Han Zhi, Li Ruixin, Li Jingming, Wen Qiulin
(Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd.)

Abstract: Electroslag remelting method has the characteristics of pure metal, dense structure, and smooth surface, which is widely used to produce large steel ingots with demanding conditions combined with its derivative technologies. The principles and research progress of four kinds of large-scale steel ingot production technologies were reviewed, including electroslag remelting technology, liquid-metal electroslag technology, double-circuit electroslag remelting, and electroslag remelting-welding technology. With the popularization of the electroslag composite concept, the electroslag welding technology was proposed to produce large-scale steel ingots, and technical advantages were expounded.

Key Words: Electroslag Remelting, Liquid-metal Electroslag, Double-circuit Electroslag Remelting, Electroslag Remelting-welding, Electroslag Casting-welding

随着现代工业技术的飞速发展,电力、石化、船舶、铁路、矿山、军工等领域的核心装备部件逐渐大型化,对优质大型铸锻件存在重大需求^[1]。根据“十四五规划和 2035 年远景目标”要求,将在雅鲁藏布江下游进行多级水电站开发,急需 500 t 级高品质环形构件^[2~4]。目前,中型钢锭直径一般在 1 m 以下,质量小于 10 t,大型钢锭直径一般在 1 m 以上,质量大于 10 t。要想获得品质好、强度高、尺寸大的优质铸锻件就需要优质中大型钢锭,因此钢锭的发展也面临着大型化趋势,并且对品质

要求越来越高^[5,6]。传统的模铸钢锭生产方法存在凝固缓慢、钢水氧化、炉衬侵蚀等缺点。随着钢锭尺寸增加,模铸钢锭在凝固过程中产生的非金属夹杂、缩松、缩孔、成分偏析等缺陷也逐渐凸显出来,很难通过后续加工过程消除或者改善,成为制约装备制造业进一步发展的瓶颈^[7]。

电渣冶金技术起源于 20 世纪 30 年代, HOPKINS R K 等^[8]进行多次熔渣电极熔化试验,并于 1940 年获得“凯洛铸锭”专利技术。电渣冶金过程的技

收稿日期:2022-02-17;修改稿收到日期:2022-03-20
第一作者简介:赵黎廷,男,1992 年出生,硕士研究生,沈阳(110022),E-mail: zlt9224@qq.com
引用格式:赵黎廷,陈瑞,高云保,等. 中大型钢锭电渣冶金制备技术研究进展[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(10):1 215-1 219.
ZHAO L T, CHEN R, GAO Y B, et al. Research progress on electroslag metallurgical preparation technology for middle and large steel ingots[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(10):1 215-1 219.

[13] CARUSO S, UMBRELLO D, OUTEIRO J C, et al. An experimental investigation of residual stresses in hard machining of AISI 52100 steel[J]. Procedia Engineering, 2011, 19: 67-72.

[14] 吴红兵,刘刚,柯映林,等. 钛合金的已加工表面残余应力的数值模拟[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007(8): 1 389-1 393.

[15] 胡创国. 薄壁件精密切削变形控制与误差补偿技术研究[D]. 西安:西北工业大学, 2007.

[16] 王艳颖,黄志刚. 基于正交切削模型的铣削加工残余应力预测方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2004(9): 7-9.

[17] 孔庆华,于云鹤. 车削加工残余应力的实验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1999(5): 549-552.

(编辑:刘晨辉)