

钢-铝板材无钉铆接接头的质量检测研究

任波¹ 刘忠侠² 张国鹏² 史运嘉² 黄海² 蔡彬² 成方泳³ 赵瑞锋¹

(1.河南工程学院机械工程学院; 2.郑州大学材料物理教育部重点实验室; 3.北京斐力泰克机电设备有限公司)

摘要 对 0.7 mm 厚度的 SAE1004 钢板和 1.0 mm 厚度的 AA6111-T4 铝板进行了无钉铆接,采用底部厚度和电阻增量检测法对其接头质量进行了检测。结果表明,接头质量的底部厚度检测法可反映材料变形程度,但对铝板预应变引起的负面影响不敏感。接头的电阻也能够反映材料的变形程度,但接头电阻增量与连接强度之间具有更明确的对应关系。当连接强度因为材料变形阻力的增加而减小时,电阻增量也会因为材料初始电阻的上升而下降。因此,接头的电阻增量法是无钉铆接接头质量检测中更适当的参考量。

关键词 钢-铝板材;无钉铆接;底部厚度;电阻增量;质量检测

中图分类号 TG441.7;TS612.1

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.03.021

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Quality Inspection of Nailless Riveted Joints of Steel-aluminum Sheets

Ren Bo¹, Liu Zhongxia², Zhang Guopeng², Shi Yunjia², Huang Hai², Cai Bin², Cheng Fangyong³, Zhao Ruifeng¹

(1.School of Mechanical Engineering, Henan Institute of Engineering; 2.Key Laboratory of Materials Physics, Ministry of Education, Zhengzhou University; 3.Beijing Feilitek Electromechanical Equipment Co., Ltd.)

Abstract: The SAE1004 steel sheet with thickness of 0.7 mm and AA6111-T4 aluminum sheet with thickness of 0.1 mm were riveted with nail-free, and the joint quality was tested by the bottom thickness and resistance increment testing methods. The results indicate that the bottom thickness detection method of joint quality can reflect the degree of material deformation, which is insensitive to the negative effects induced by the pre-strain of the aluminum plate yet. The resistance of the joint can also reflect the degree of the material deformation, however, there exists a clearer correspondence between the increment of joint resistance and the bonding strength. When the bonding strength is decreased due to the increment of deformation resistance, the increment of resistance is also decreased due to the increment of the initial resistance. Therefore, the resistance increment method of joints is an appropriate reference value in the quality inspection of nailless riveted joints.

Key Words: Steel-aluminum Sheet, Nailless Riveting, Bottom Thickness, Resistance Increment, Quality Inspection

车辆轻量化是实现能源节约、降低碳排放、减少环境污染的重要手段之一^[1~5]。现有研究表明,60%的燃料消耗于车辆自重,当车重减轻 100 kg 时,车辆的百公里油耗可降低 0.7 L,而 CO₂ 排放可降低 1.8 g 左右^[6,7]。目前,实现车辆轻量化主要有两种形式:一是大量使用包括 Al、Mg 合金等比强度高的轻质金属材料和复合材料;二是通过车身结构优化设计,使用薄壁、中空结构材料使其结构简单化、复合化。比较而言,前者更易实现,因而质轻价廉的铝合金日益成为汽车工业中的代表性轻质材料^[8,9]。但是,传统的电阻点焊技术在连接钢-铝板材时,因为铝合金的高电导率、高热传导性以及易形成氧化膜等特点,使其在焊接时耗能大、连接质量不稳定^[10,11]。此外,钢和铝异质焊接时因熔点和

热传导系数差异较大导致焊接接头质量相对较差,也会影响车辆安全性^[12]。

无钉铆接技术是利用冲压装置和模具,通过冲头的挤压和凹模的限制作用,使被连接板材产生局部的冷变形,上、下板之间形成机械互锁,从而完成连接的过程。该技术能够高效完成双层或多层的同种或异种材料之间的连接,使接头具有良好的静态拉伸和动态疲劳强度^[13]。无钉铆接在模具寿命得到保证的情况下,可降低加工成本,并且几乎没有污染^[14]。因此,该技术被广泛应用于汽车工业和其他行业中^[15,16]。目前,无钉铆接技术的研究热点在于有限元模拟优化模具参数,再通过试验对其加以验证,而对连接前材料的加工变形对无钉铆接接头质量影响的研究报道很少。本课题采用无

收稿日期:2021-12-30;修改稿收到日期:2022-01-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U2004182);河南省高等学校重点科研资助项目(22A430014)

第一作者简介:任波,男,1980 年出生,副教授,郑州(451191),E-mail:Renbo193513@163.com

引用格式:任波,刘忠侠,张国鹏,等. 钢-铝板材无钉铆接接头的质量检测研究[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(3):380-384.

REN B, LIU Z X, ZHANG G P, et al. Quality inspection of nailless riveted joints of steel-aluminum sheets[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(3):380-384.

钉铆接技术对 0.7 mm 厚度的 SAE1004 钢板和 1.0 mm 厚度的 AA6111-T4 铝板进行了无钉铆接,并采用底部厚度和电阻增量检测法对其铆接接头的质量进行检测评价,以期对钢-铝板材异质连接技术的探索与应用提供参考。

1 试验材料与方法

无钉铆接中使用的板材为 0.7 mm 厚度的 SAE1004 钢板和 1.0 mm 厚度 AA6111-T4 铝合金板,其化学成分分别见表 1 和表 2。二者的力学性能见表 3。由于两种材料强度相近,而钢板的塑性变形能力优于铝合金板,因此,SAE1004 钢板和 AA6111-T4 铝合金板分别作为无钉铆接的上板和下板。试验时,先将铝板进行 5%、10% 的预应变处理,之后采用传统的底部厚度检测法^[17,18]和自行设计的电阻增量检测法对钢-铝板材无钉铆接接头进行质量检测,并对这两种质量检测方法进行了比较。具体的试验过程参数见表 4。

表 1 SAE1004 钢板的化学成分

Tab.1 Chemical composition of SAE1004 steel sheet %				
w_B				
C	Mg	P	S	Fe
0.02~0.06	≤0.35	≤0.03	≤0.035	余量

表 2 AA6111-T4 铝合金板的化学成分

Tab.2 Chemical composition of AA6111-T4 aluminum alloy sheet %								
w_B								
Si	Mg	Cu	Mn	Fe	Zn	Ti	Cr	Al
1.15	0.72	0.70	0.27	0.26	0.16	0.15	0.11	余量

表 3 SAE1004 钢板和 AA6111-T4 铝合金板的力学性能

Tab.3 Mechanical properties of SAE1004 steel and AA6111-T4 aluminum alloy sheets			
板材	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
SAE1004	151.12	288.78	43.84
AA6111-T4	151.27	290.79	23.45

表 4 无钉铆接试验过程参数

Tab.4 Process parameters of nailless riveting test				
冲头直径/mm	模具直径/mm	模具深度/mm	预应变/%	冲压力/kN
5.6	8.0	1.2	0.5,10	8,16,24,32,40,48,56

试验中使用金属材料切割机沿无钉铆接接头的直径将其切开,经过打磨处理后对接头的机械互锁量、连接强度和底部厚度进行测量,对每种工艺参数组合,测量 3 个重复接头的截面参数,以保证试验结果的准确性。利用电阻法检测无钉铆接接头的变形程度时,采用 STR-B 型直流电阻测试机测量连接过程中接头的瞬时电阻,其 4 个电极按照四电极电阻测量方法固定在剪切拉伸试样上,以消除接触电阻和导线电阻对接头电阻带来的影响。其中,正的电压极和电流极固定在上板的一

侧,负电压极和电流极固定在下板的另一侧,接头位置位于一对电压极或电流极的对角线上,确保了电流通过连接过程中的变形区域,准确测量出电阻随材料的变形而发生的变化。为保证测量的精确度,所有的试样测量时均保证电压极位于上、下板重叠部分外侧 5 mm 处,电流极位于电压极外侧 10 mm 处,所有的电极均使用导电胶加以固定。在连接过程中,从冲头接触上板开始,电阻测试机将提供 10 A 的恒定直流电流,不同冲压阶段接头的瞬时电压将被测量,从而能够根据所测得的电压值计算出使用不同铆接力时的接头电阻。最后,对电阻试样进行剪切拉伸试验,以得到接头电阻和连接强度之间的关系。为减少因偶然因素带来的误差,对应每一铆接力的电阻试样将重复制备 3 组。

2 试验结果与分析

2.1 接头质量的底部厚度检测

不同铝板预应变时,底部厚度对无钉铆接接头的机械互锁量和剪切强度的影响见图 1。可以看出,当底部厚度减小时,接头的机械互锁量和剪切强度均呈现出上升的趋势,这是因为随着冲头下压,接头底部的材料被不断的向外挤压,从而促进了机械互锁量的增加,而当铆接力被控制在合理的范围之内时,铆接力大小的变化不会对上板的颈部厚度产生显著影响,因此在颈部厚度不发生显著变化的情况下,接头的剪切强度就会随着机械互锁量的增加而上升。从图 1a 中还可以看出,当底部厚度从 0.54 mm 减小到 0.47 mm 时,尽管上、下板之间的机械互锁量继续保持上升,但是接头的剪切强度却出现了下降的情况,这是因为在该过程中由于铆接力过大,上板颈部被过度拉伸,导致接头在拉伸试验中出现断裂失效,从而对无钉铆接接头的剪切强度产生了不利的影响。这表明,当铆接力被控制在合理的范围之内时,无预应变和 10% 预应变的铆接接头的剪切强度均会随着底部厚度的减小而增加,因此,使用底部厚度检测法对这类材料的无钉铆接进行质量检测是合适的。

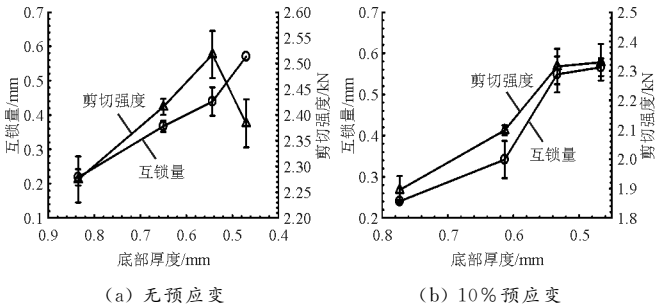


图 1 底部厚度对无钉铆接接头的机械互锁量和剪切强度的影响
Fig.1 Influence of bottom thickness on the mechanical interlock and shear tensile strength of nailless riveted joints

为进一步评估底部厚度检测法的可靠性,将图 1 中的试验数据整合后绘制在图 2 中。可以看出,当铆接力从 32 kN 增加到 48 kN 时,使用 10% 预应变铝板制备的无钉铆接接头的剪切强度要明显低于使用初始铝板所制备接头的强度,这是因为预应变引起的铝板强度的提高增加了材料在连接过程中变形的阻力,从而造成了上、下板之间机械互锁量减小,但是这种强度的变化却几乎不能通过接头的底部厚度体现出来。这说明接头质量的底部厚度检测法对被连接材料的力学性能的变化并不敏感。如果使用这种方法对连接前经过预应变的材料无钉铆接接头进行质量检测,很可能出现接头的底部厚度处于预先设定的范围内,但是接头的连接强度却明显低于预期的情况。

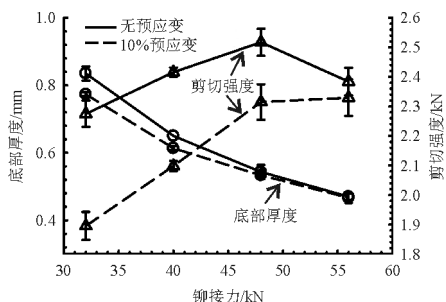


图 2 铆接力和铝板预应变对无钉铆接接头的底部厚度和剪切拉伸强度的影响

Fig.2 Influence of riveting force and pre-strain of aluminum sheet on the bottom thickness and shear tensile strength of nailless riveted joints

2.2 接头质量的电阻增量检测法

采用底部厚度检测法检测预应变对接头连接强度影响的结果并不十分可靠。由于材料在连接前和连接过程中的变形都会导致被连接材料电阻的增加,因此,通过检测接头电阻的变化有可能准确地检测出预应变对铆接接头质量的影响。图 3 为不同程度铝板预应变制备钢-铝板材无钉铆接接头的电阻随铆接力的变化曲线。可以看出,3 种接头的电阻均随铆接力的增加而上升,这表明通过测量电阻的变化能够对材料在连接过程中的变形程度进行检测。从图 3 还可看出,当铆接力相同时,无钉铆接接头的电阻随铝板预应变程度的增加而上升,这表明电阻对材料在连接前经过的加工变形是敏感的,能够通过电阻对使用不同程度预应变材料所制备的无钉铆接接头进行辨别。

图 4 为铝板预应变对接头的电阻和剪切强度的影响。可以看出,由于预应变导致铝板位错密度和变形阻力的上升,因而当铝板预应变增加时,无钉铆接接头的电阻几乎保持线性的增长趋势,而接头的剪切强度则在预应变达到 5% 时迅速下降,并在预应变继续增加至

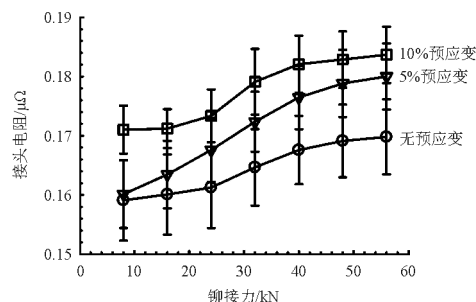


图 3 铆接力和铝板预应变对无钉铆接接头电阻的影响

Fig.3 Influence of riveting force and pre-strain aluminum sheet on the resistance of nailless riveted joints

10% 时基本保持稳定,见图 4。从图 3 和图 4 可以看出,尽管使用接头电阻能够对无钉铆接过程中材料的变形程度进行检测,并且材料在连接前经过不同程度的预应变也能够通过电阻反映出来,但是接头的电阻和剪切强度之间并没有形成十分明确的对应关系。当铝板预应变从 0 增加到 5% 时,接头电阻上升但是强度降低,而当铝板预应变从 5% 继续增加到 10% 时,电阻继续上升但是强度基本保持稳定,因此,对于应用电阻方法进行无钉铆接接头质量的检测需要进一步的研究。

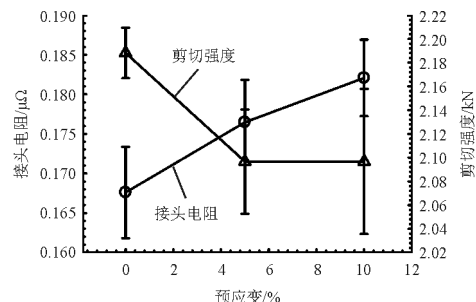


图 4 铝板预应变对无钉铆接接头的电阻和剪切拉伸强度的影响

Fig.4 Influence of pre-strain aluminum sheet on the resistance and shear tensile strength of nailless riveted joints

为了准确反映铝板预应变对无钉铆接接头的变形程度和剪切强度的影响,引入接头的电阻增量法进行研究。接头的电阻增量 ΔR 计算如下:

$$\Delta R = \frac{R - R_0}{R_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, R_0 为连接前无钉铆接接头的初始电阻; R 为在连接过程中接头的瞬时电阻。从式(1)可以看出,接头的电阻增量 ΔR 与初始电阻 R_0 成反比关系。材料的加工硬化系数 θ 、电阻增量 ΔR 和加工硬化系数 θ 之间的关系以及材料的位错密度 ρ 和变形程度 ϵ 之间的关系分别为^[19~21]:

$$\theta = \frac{d\sigma}{d\epsilon} = \frac{\alpha G}{2\lambda \sqrt{\rho}} \quad (2)$$

$$\Delta R = \left(\frac{\alpha G}{2\lambda} \right)^2 \frac{R_d}{N} \frac{1}{\theta^2} \quad (3)$$

$$\rho = \varepsilon / (\lambda b) \quad (4)$$

式中, σ 和 ε 为应力和应变; α 为常数; G 为材料的切变模量; λ 和 b 为位错的自由程和柏氏矢量; R_d 和 N 为位错的电阻和数量。由式(2)~式(4)可以得到:

$$\frac{d\Delta R}{d\varepsilon} = \frac{R_d}{N} \cdot \frac{1}{\lambda b} \quad (5)$$

从式(5)可以看出,材料的电阻增量 ΔR 与应变 ε 的变化率与材料内部位错的自由程 λ 成反比关系。当使用不同程度预应变的铝板制备钢-铝板材无钉铆接接头时,接头电阻增量随铆接力的变化见图 5。可以看出,在相同铆接力的条件下,使用预应变铝板制备的无钉铆接接头的电阻增量要明显小于使用初始铝板制备的接头。根据式(1),接头的电阻增量与初始电阻成反比关系,预应变导致材料的初始电阻急剧增加,从而造成了接头电阻增量的减小。从图 5a 中还可以看出,随着铆接力增加,3 种接头的电阻增量均呈现出上升的趋势,并在铆接力达到 40 kN 之后,这种上升的趋势变缓。根据式(5),材料的电阻增量随应变的变化率与材料内部位错的自由程成反比,在变形初期,位错密度的急剧上升导致位错自由程显著减小,造成了接头的电阻增量随应变的变化率加快。而当变形进行到一定阶段时,由于位错的塞积作用,位错自由程的变化减弱,造成了接头的电阻增量随应变的变化率趋于稳定。因此,使用电阻增量能够对无钉铆接过程中材料的变形程度进行检测,同时材料在连接前是否经过预应变也能够通过接头的电阻增量反映出来。

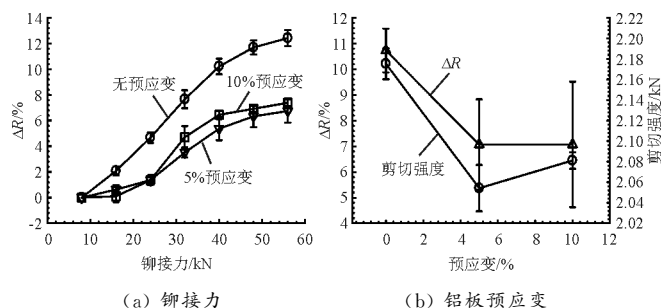


图 5 铆接力和铝板预应变对无钉铆接接头电阻增量和剪切强度的影响

Fig.5 Influence of riveting force and pre-strain of aluminum sheet on the resistance increment of nailless riveted joints

图 5b 为铝板预应变对接头的电阻增量和剪切强度的影响。可以看出,当铝板预应变从 0 增加到 5% 时,接头的电阻增量和连接强度均出现明显下降,而当铝板预应变从 5% 继续增加到 10% 时,接头的电阻增量和剪切强度均不再出现明显变化,二者之间保持了非常好的同步关系。对比图 4 和图 5b 可以看出,无论是接头的电阻还是电阻增量,均能够反映出材料预应变对连接的影响并对连接过程中材料的变形程度进行检测,但是只

有接头的电阻增量能够和连接强度之间形成十分明确的对应关系,因此在利用电阻法对无钉铆接接头进行质量检测时,接头的电阻增量是更适当的参考量。

3 结 论

(1)接头的底部厚度能够反映出无钉铆接过程中材料的变形程度,进而对接头的质量进行检测,但其对铝板的预应变对接头连接强度所造成的不利影响不敏感。

(2)材料在连接前和连接过程中经历的变形程度均能够通过接头的电阻和电阻增量反映出来,并且接头的电阻增量能够和连接强度之间形成明确的对应关系;当连接强度因为材料变形阻力的增加而减小时,电阻增量也会因为材料初始电阻的上升而下降。

参 考 文 献

- [1] PICKIN C G, YOUNG K, TUERSLEY I. Joining of lightweight sandwich sheets to aluminum using self-pierce riveting[J]. Materials and Design, 2007, 28: 2 361-2 365.
- [2] 敖炳秋. 轻量化汽车材料技术的最新动态[J]. 汽车工艺与材料, 2002(8-9): 1-21.
- [3] CARLE D, BLOUNT G. The suitability of aluminum as an alternative material for car bodies[J]. Materials and Design, 1999, 20: 267-272.
- [4] 赵立信. 汽车业与特种铸造及有色合金[J]. 特种铸造及有色合金, 2000(6): 4-14.
- [5] MILLER W S, ZHUANG L, BOTTEMA J, et al. Recent development in aluminum alloys for the automotive industry[J]. Materials Science and Engineering, 2000, A280: 37-49.
- [6] 鲁春艳. 汽车轻量化技术的发展现状及其实施途径[J]. 上海汽车, 2007(6): 28-31.
- [7] 彭晓东, 李玉兰, 刘江. 轻合金在汽车上的应用[J]. 机械工程材料, 1999, 23(2): 1-4.
- [8] 朱文峰, 张岚. 车身结构联接新工艺及其应用[J]. 上海汽车, 2004(1): 33-35.
- [9] ABE Y, MORI K, KATO T. Joining of high strength steel and aluminum alloy sheets by mechanical clinching with dies for control of metal flow[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212: 884-889.
- [10] 吴卫枫, 鲁厚国. 铝合金电阻点焊技术研究[J]. 汽车制造业, 2021(3): 46-48.
- [11] 钟丽慧, 韩立军, 郭院波. 车身铝板电阻点焊技术发展趋势与分析[J]. 电焊机, 2020, 50(6): 1-9.
- [12] 张伟华, 孙大千, 李志东, 等. 电极板辅助点焊钢/铝异质接头的组织与性能[J]. 焊接学报, 2011, 32(9): 85-88.
- [13] 胡亚民, 李红, 李文艳. 一种先进的板料冲压连接技术-TOX 连接技术[J]. 锻压机械, 2000(5): 15-17.
- [14] 张金海. 板料冲压连接技术在汽车工业中的应用[J]. 模具技术, 2004(1): 57-60.
- [15] 王劲青, 魏兵, 王为, 等. 薄板冲压无铆钉连接技术[J]. 湖北工学院学报, 2003, 18(5): 1-2.
- [16] 宋宝玉. 气液增压缸在圆形板件连接中的应用[J]. 机床与液压, 2001(4): 62-63.

基于相似理论和模型试验的 K418B 大型薄壁件的成形及品质

丁 雪¹ 吴东辉^{1,2}

[1.航天海鹰(哈尔滨)钛业有限公司; 2.哈尔滨工业大学金属精密热加工国家级重点实验室]

摘 要 为实现利用比例模型来预测高温合金大型薄壁件的成形过程及内部品质的目的,采用物理相似的方法设计了比例模型并验证了其有效性。采用数值模拟和熔模铸造试验研究了高温合金大型薄壁件的流动性、凝固过程和内部品质。结果表明,比例模型可以充分反映原高温合金大型薄壁件的成形过程及内部品质,高温合金大型薄壁构件中筋条和无缝隙浇道连接的光滑薄壁处的充填凝固特性相同,且充填凝固速度均大于凸台的充填凝固速度,但充填凝固趋势相同。这表明相似理论与数值模拟及实际试验相结合可有效指导高温合金大型薄壁铸件的熔模铸造生产,有效降低其研制成本、提高成品率。

关键词 镍基高温合金;熔模铸造;物理相似;数值模拟;大型薄壁件

中图分类号 TG249.5;O303

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.03.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Forming and Quality of K418B Large Thin-walled Parts Based on Similarity Theory and Model Test

Ding Xue¹, Wu Donghui^{1,2}

[1.Aerospace HIWING(Harbin) Titanium Industry Co., Ltd.;

2.National Key Laboratory for Precision Hot Processing of Metals, Harbin Institute of Technology]

Abstract: In order to utilize the scale model to predict the forming process and internal quality of large thin-walled parts, a scale model was designed based on similarity theory and the effectiveness was verified. Numerical simulation and investment casting experiments were conducted to investigate the filling, solidification, hot tendency and internal quality of large thin-walled superalloy parts. The results indicate that the scale model can fully reflect the forming process and internal quality of the original large thin-walled superalloy parts, where the filling and solidification properties of the smooth thin wall connected by steel bar and seamless gate are identical. Moreover, the filling and solidification velocity is higher than that of the convex, while the trend is common. Therefore, it is proved that the combination of similarity theory, numerical simulation and actual experiment can effectively guide the production of large thin-walled superalloy parts, effectively reducing the development costs and improving yield rate.

Key Words: Nickel-based Superalloy, Investment Casting, Physical Similarity, Numerical Simulation, Large Thin-walled Parts

收稿日期:2021-08-23;修改稿收到日期:2021-11-23

基金项目:装备预研重点实验室基金资助项目(6142909200105)

第一作者简介:丁雪,女,1997 年出生,助理工程师,哈尔滨(150029),E-mail:19s109246@stu.hit.edu.cn

通信作者:吴东辉,男,1988 年出生,高级工程师,哈尔滨(150029),E-mail:wudonghui56@163.com

引用格式:丁雪,吴东辉. 基于相似理论和模型试验的 K418B 大型薄壁件的成形及品质[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(3):384-390.

DING X, WU D H. Forming and quality of K418B large thin-walled parts based on similarity theory and model test[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(3):384-390.

[17] 石柏军,何灿荣,何涛. 基于机械变形的钣金件连接过程实时监控方法的研究和应用[J]. 机床与液压,2009,37(5):34-37.

[18] TAN Y M, HAHN Q, DU F N. Process monitoring method with window technique for clinch joining[J]. ISIJ International, 2005, 45: 723-729.

[19] BROWN R A. Electrical resistivity of dislocations in metals[J]. Journal of Physics: Metal Physics, 1977(7): 1 283-1 295.

[20] KAROLIK A S, LUHVICH A A. Calculation of electrical resis-

tivity produced by dislocations and grain boundaries in metals[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 1994(6): 873-886.

[21] DOMINGUEZ D, SEVOSTIANOV I. Cross-property connection between work-hardening coefficient and electrical resistivity of stainless steel during plastic deformation[J]. International Journal of Fracture, 2011, 167: 281-287.

(编辑:栗万仲)