

新能源汽车电驱总成冷却系统压接技术研究

刘超, 张雷

(中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412000)

摘要: 新能源汽车电驱总成核心部件 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)功率模块的发热量极大,须通过冷却系统循环流转冷却液进行散热,冷却液若无法正常运输会使 IGBT 因散热不良而无法正常工作,甚至造成行车安全问题,故必须保证冷却液管路无泄漏。冷却系统中金属水管与电驱总成壳体的连接是否可靠成为重要关注点。压接是水管与电驱总成壳体的常用连接方式。文中对压接过盈量进行理论计算,建立水管与壳体的三维模型对不同过盈量下拉拔力、应力和应变进行仿真分析,并通过试验对不同状态下力学性能进行测试,确定最佳压接过盈量。结果表明,压接过盈量设计为 0.04~0.08 mm 时力学性能最理想。

关键词: 汽车;新能源汽车;电驱总成;冷却系统;压接技术

中图分类号:U469.7

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2024)02-0008-03

电驱总成作为新能源电动汽车的关键核心零部件,是控制车辆运行的主要执行结构,其控制特性决定电动汽车的主要性能指标^[1-2]。电动汽车电驱总成内部元件紧凑,IGBT(绝缘栅双极型晶体管)功率模块的热损耗大,散热要求高,整车上须设计冷却系统将冷却液通过冷却回路循环输送到 IGBT 模块进行降温处理。电驱总成上一般设计金属水管,其一端与电驱总成壳体相连,另一端与整车上软管相连,从而将壳体内部冷却管路与整车管路连到一起,形成闭合回路。目前金属水管与壳体的常用连接方式为压接,即通过外力将水管压入壳体,金属水管与壳体之间通过过盈配合实现连接。如果电动汽车在行驶过程中动力系统与金属水管相连接的区域发生泄漏甚至发生金属水管脱落现象,将导致冷却液无法正常输送,引起 IGBT 温度过高、电驱总成无法正常工作,进一步导致汽车无法行驶,甚至可能导致行车安全问题。因此,水管与电驱总成壳体连接是否可靠极其重要^[3-4]。

金属水管连接的可靠性与过盈量息息相关。本文对过盈量选取进行研究,对过盈量进行理论计算,对不同过盈量下拉拔力、应力和应变分布进行仿真分析,并通过试验对不同工艺状态下力学性能进行测试,确定最佳压接过盈量。

1 理论计算

金属水管与壳体的压接见图 1。压接技术原理

是过盈配合,是将外径较大的金属水管利用外力压入内径较小的壳体中(见图 2)。装配完成后,在过盈配合面上会产生一定的过盈量,使接触面形成一定的接触压力,当连接件承受轴向力或转矩时,依靠过盈接触面上的摩擦力实现额定载荷传递^[5]。



图 1 金属水管与壳体的压接方式

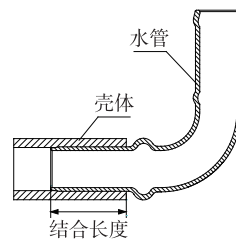


图 2 压接原理示意图

由力学知识可知,为实现载荷的传递,接触面产生的摩擦力应不小于轴向力与扭矩的矢量和,即:

$$F_f \geq \sqrt{F_x^2 + \left(\frac{2M}{d_f}\right)^2} \quad (1)$$

式中: F_f 为摩擦力; F_x 为轴向力; M 为扭矩; d_f 为结合直径。

摩擦力主要与接触压力有关,根据材料力学有关厚壁圆筒的计算理论,可得^[6]:

$$F_f = P_f \pi d_f l_f \mu \quad (2)$$

式中: P_f 为接触压力; l_f 为结合长度,根据标准选取; μ 为摩擦因数。

接触压力大小决定连接是否可靠,接触压力过小会使拉拔力和扭力不足而导致失效,接触压力过大会导致材料塑性变形而被破坏,接触压力存在极值。

由式(1)、式(2)可得连接件允许的最小接触压力为^[7]:

$$P_{fmin} = \frac{\sqrt{F_x^2 + (2M/d_f)^2}}{\pi d_f l_f \mu} \quad (3)$$

包容件与被包容件不产生塑性变形允许的最大接触压力分别为:

$$P_{f1max} = a\sigma_{s1} \quad (4)$$

$$P_{f2max} = c\sigma_{s2} \quad (5)$$

式中: $a = (1 - q_1^2) / \sqrt{3 + q_1^4}$; q_1 为包容件的直径比; σ_{s1} 为包容件的屈服极限; $c = (1 - q_2^2) / 2$; q_2 为被包容件的直径比; σ_{s2} 为被包容件的屈服极限。

连接件不产生塑性变形允许的最大接触压力为:

$$P_{fmax} = [P_{f1max}, P_{f2max}]_{min} \quad (6)$$

包容件与被包容件传递负荷的直径变化量分别为:

$$e_1 = \frac{P_f d_f}{E_1} C_1 \quad (7)$$

$$e_2 = \frac{P_f d_f}{E_2} C_2 \quad (8)$$

式中: E_1 为包容件的弹性模量; $C_1 = (1 + q_1^2) / (1 - q_1^2) - \nu_1$; ν_1 为包容件的泊松比; E_2 为被包容件的弹性模量; $C_2 = (1 + q_2^2) / (1 - q_2^2) - \nu_2$; ν_2 为被包容件的泊松比。

传递负荷过盈量为^[8]:

$$\delta = e_1 + e_2 = P_f d_f \left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \right) \quad (9)$$

由于接触压力存在极值 P_{fmin} 、 P_{fmax} , 过盈量也存在极值 δ_{min} 、 δ_{max} , 过盈量应在极值范围内选取。传递负荷所需最小过盈量为:

$$\delta_{min} = e_{1min} + e_{2min} = P_{fmin} d_f \left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \right) = \frac{\sqrt{F_x^2 + (2M/d_f)^2}}{\pi d_f l_f \mu} d_f \left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \right) \quad (10)$$

传递负荷所允许最大过盈量为:

$$\delta_{max} = e_{1max} + e_{2max} = P_{fmax} d_f \left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \right) = [a\sigma_{s1}, c\sigma_{s2}]_{min} d_f \left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \right) \quad (11)$$

压装力为将零件压入孔内的力,其值须大于接触面摩擦力,故^[9]:

$$\sqrt{F_x^2 + \left(\frac{2M}{d_f} \right)^2} \leq F \leq P_{fmax} \pi d_f l_f \mu \quad (12)$$

2 有限元计算

2.1 有限元模型

建立不同过盈量下水管与壳体的三维模型,为便于计算,将壳体模型简化为圆筒(见图 3)。由于水管各个截面受力相同,网格仅通过截面进行分析(见图 4)。

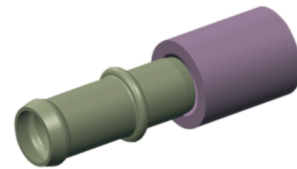


图 3 水管与壳体简化模型

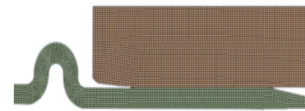


图 4 截面网格

2.2 边界条件

壳体材料为 ADC 12, 水管材料为 SUS 304 不锈钢, 材料性质见表 1。

表 1 材料属性

材料名称	屈服极限/MPa	强度极限/MPa	密度/(kg · m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比
ADC 12	165	260	2 823	70 000	0.33
SUS 304	215	505	8 000	193 000	0.29

一般成年人拉力为 500~600 N, 安全系数设为 2, 最小拉拔力应不小于 1 000 N。

对壳体与水管压接时接触的面进行接触设置, 采用 Frictional 摩擦接触, 摩擦系数为 0.18, 由于是包裹形式接触, 将水管设定为接触面, 壳体内径设定为目标面(见图 5)。

■Frictional-Geomishuiguan to Georm\KETI

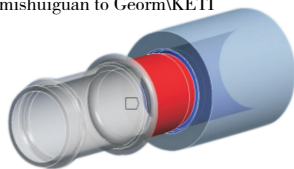


图 5 边界设置

水管压接时接触应力只会持续增大,故仅需要设置一个载荷步,时长 15 s。水管 x 方向位移为 15 mm,速度为 1 mm/s,并限制其他 5 个自由度,壳体在端部给予 6 个自由度的固定约束(见图 6)。

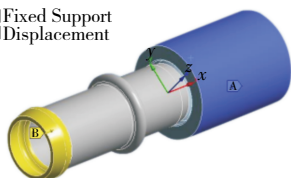
■Fixed Support
■Displacement

图 6 载荷步设置

3 求解结果与分析

3.1 应力应变和拉拔力

壳体孔径为 15.56 mm,水管外径为 15.60 mm,过盈量为 0.04 mm,水管压接时应力和塑性应变分布及拉拔力见图 7~9。

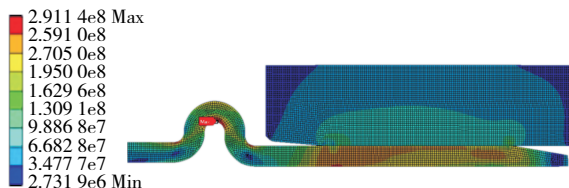


图 7 水管压接时应力分布(单位:Pa)

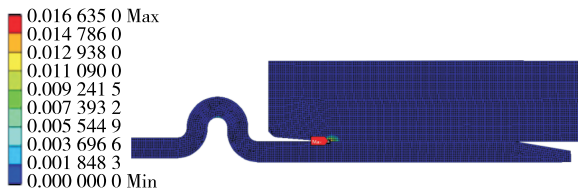


图 8 水管压接时塑性应变分布(单位:μm/m)

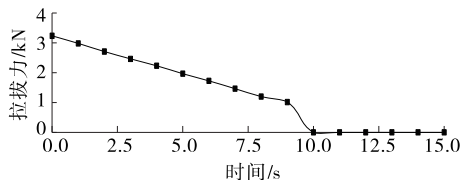


图 9 水管压接时拉拔力曲线

由图 7~9 可知:水管压接时,水管最大应力出现在弯曲处内侧和内壁表面,壳体最大应力出现在

接触表面;水管没有发生塑性变形,壳体入口处发生塑性变形;水管拉拔力为 3 235 N。

3.2 不同过盈量对比分析

不同过盈量下应力和拉拔力见图 10。

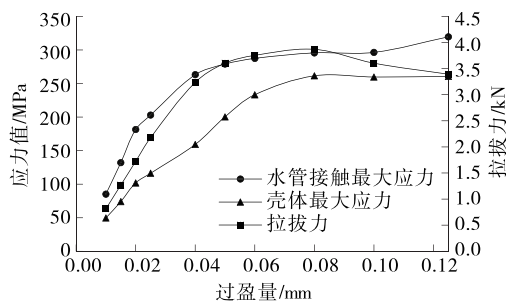


图 10 应力和拉拔力与过盈量关系曲线

由图 10 可知:过盈量为 0.01~0.04 mm 时,没有发生塑性变形,拉拔力随过盈量增大而增大,最小拉拔力为 814 N;过盈量为 0.04~0.08 mm 时,壳体产生微量塑性变形,拉拔力增长幅度下降,拉拔力达到最大值,该过盈量范围最理想;过盈量超过 0.08 mm 时,壳体与水管产生大面积塑性变形,拉拔力呈下降趋势,壳体最大应力有超过强度极限的风险。

4 试验分析

将水管和壳体通过特定工装固定在指定位置,利用压装机将水管压入壳体中,压入完毕后,将压接件放入拉伸仪器中进行拉拔力检测。拉拔力与过盈量关系试验结果及与仿真结果的对比见图 11。

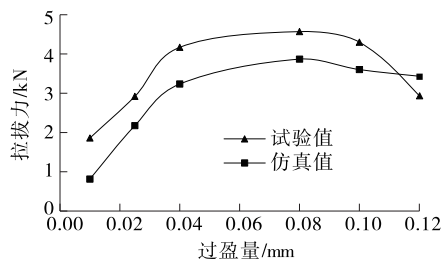


图 11 试验结果与仿真结果的对比

由图 11 可知:拉拔力试验值在过盈量为 0.01~0.04 mm 时逐渐增大,在过盈量为 0.04~0.08 mm 时达到最大,过盈量超过 0.08 mm 时呈下降趋势,变化趋势与仿真结果相符。

5 结论

(1) 过盈量为 0.01~0.04 mm 时,拉拔力随过盈量增大而增大,拉拔力在过盈量为 0.04~0.08 mm 时达到最大,过盈量超过 0.08 mm 时呈下降趋势,变化趋势与仿真结果相符。

(下转第 37 页)

距离为主。

(4) 从降雨天气下事故类型、事故原因及降雨对行车环境、道路条件、车辆稳定性和驾驶人反应时间的影响来看,对车距及车速进行有效控制是降低雨天事故发生可能性的重要措施。

参考文献:

- [1] 敖曼,翟润平.气象条件对道路交通的影响分析[J].公路与汽运,2011(2):58-62.
- [2] 马涛,汤钧尧,郑彬双,等.雨天条件下车辆轮胎与沥青路面间附着特性[J].北京工业大学学报,2022,48(6):635-643.
- [3] 季天剑,黄晓明,刘清泉,等.道路表面水膜厚度预测模型[J].交通运输工程学报,2004,4(3):1-3.
- [4] 何雅琴,刘凯慧.城市快速路速度-密度-降雨量三维模型研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2023,47(2):229-233.
- [5] 马筱桢,樊博.降雨对山区高速公路运行车速的影响研究[J].公路与汽运,2020(5):33-36.
- [6] 赵炜华,边浩毅,叶飞.降雨强度对驾驶人视认距离的影响研究[J].公路与汽运,2015(6):44-48.
- [7] 汪敏,何兆益,周文,等.雨天沥青路面能见度影响因素分析[J].西南交通大学学报,2023,58(6):1286-1293.
- [8] 盛旭高,于梦阁,霍炜.基于停车视距的强降雨环境下公路车辆制动安全可靠研究[J].公路交通科技,2023,40(1):227-235.

- [9] 阴春晔,田国红,韩忠浩,等.雨天环境下驾驶行为研究[J].汽车实用技术,2019(15):242-244.
- [10] 吴艳霞,刘剑,黄帅,等.雨天高速公路纵坡对驾驶员心率及行车速度影响[J].交通信息与安全,2021,39(4):35-42.
- [11] 朱宝林,彭艳秋,黎成超,等.云南省高速公路气象灾害风险特征分析与应对[J].公路,2021,66(3):231-236.
- [12] 白永清,何明琼,刘静,等.高速公路交通事故与气象条件的关系研究[J].气象与环境科学,2015,38(2):66-71.
- [13] ELDESSOUKI W M, IVAN J N, ANAGNOSTOU E N, et al. Using relative risk analysis to improve connecticut freeway traffic safety under adverse weather conditions[R]. The U.S. Department of Transportation, University Transportation Centers Program, 2004.
- [14] 林忠玲,王荣华,马森,等.交通灾害雨天气交通安全风险管理研究综述[J].公路,2022,67(1):272-279.
- [15] 罗京,王元庆.路面薄水膜状态对行车安全的影响[J].长安大学学报(自然科学版),2018,38(5):168-175.
- [16] 盛旭,高于梦,阁霍炜.基于停车视距的强降雨环境下公路车辆制动安全可靠研究[J].公路交通科技,2023,40(1):227-235.

收稿日期:2023-06-06

(上接第 10 页)

盈量的增大而线性增大,为弹性变形;过盈量为 0.04~0.08 mm 时,由于壳体出现微量塑性变形,局部无法产生有效接触压力,拉拔力的增长进入稳态,增长平缓;过盈量超过 0.08 mm 时,壳体出现大面积塑性变形,拉拔力逐渐下降。

(2) 对于金属水管与铝合金壳体之间的压接,过盈量设计为 0.04~0.08 mm 最理想。

(3) 拉拔力随压接过盈配合量的变化规律,仿真结果与实测结果基本一致。

参考文献:

- [1] 徐志辉.电动汽车电驱动总成 NVH 性能分析与优化[D].南昌:华东交通大学,2022.
- [2] 刘祥环,潘晓东,皮旭明,等.纯电动汽车电驱动总成 NVH 分析与优化研究[J].汽车制造业,2020(5):10-13.

- [3] 高银桥.新能源汽车驱动电机冷却技术的发展现状研究[J].内燃机与配件,2020(12):249-250.
- [4] 段武兵,翁学新,侯云江,等.不同材质冷却水管在大体积砼温度监控中的应用[J].公路与汽运,2020(6):126-130.
- [5] 刘凌.过盈连接件装配研究[J].机床与液压,2011,39(4):47-48+72.
- [6] 孙海军.过盈配合时压装力的计算[J].机械,2016,43(增刊 1):42-44.
- [7] 机械科学研究院,大同电力机车有限责任公司.极限与配合 过盈配合的计算和选用:GB/T 5371—2004[S].北京:中国标准出版社,2005.
- [8] 张敬佩,李初晔.过盈配合产生的接触压力和拔出力计算[J].机械工程与自动化,2011(1):195-197.
- [9] 薛克兴,周瑾.复合材料结构连接件设计与强度[M].北京:航空工业出版社,1988.

收稿日期:2023-08-17